



This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

- + *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
- + *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
- + *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
- + *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at <http://books.google.com/>



A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

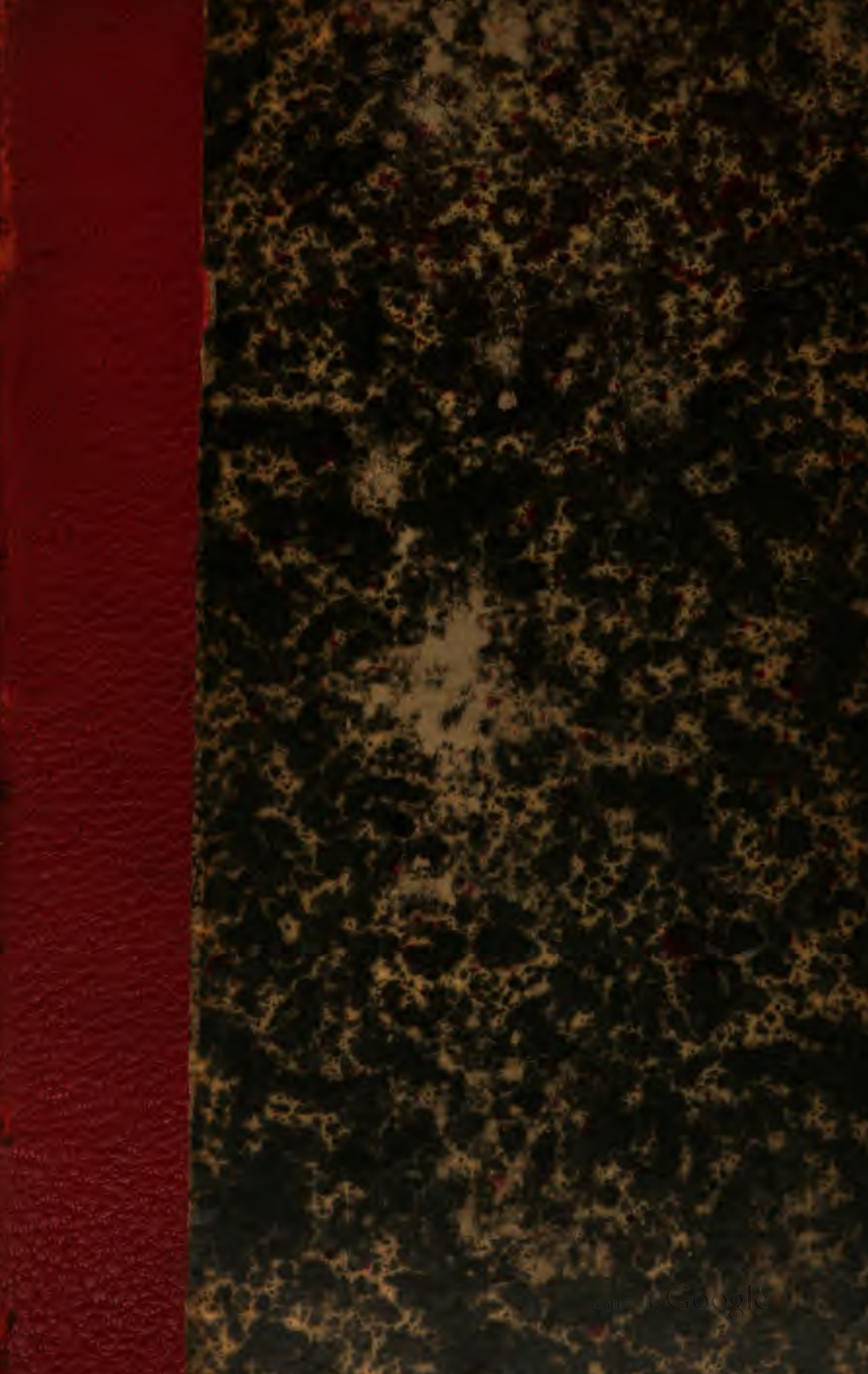
Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

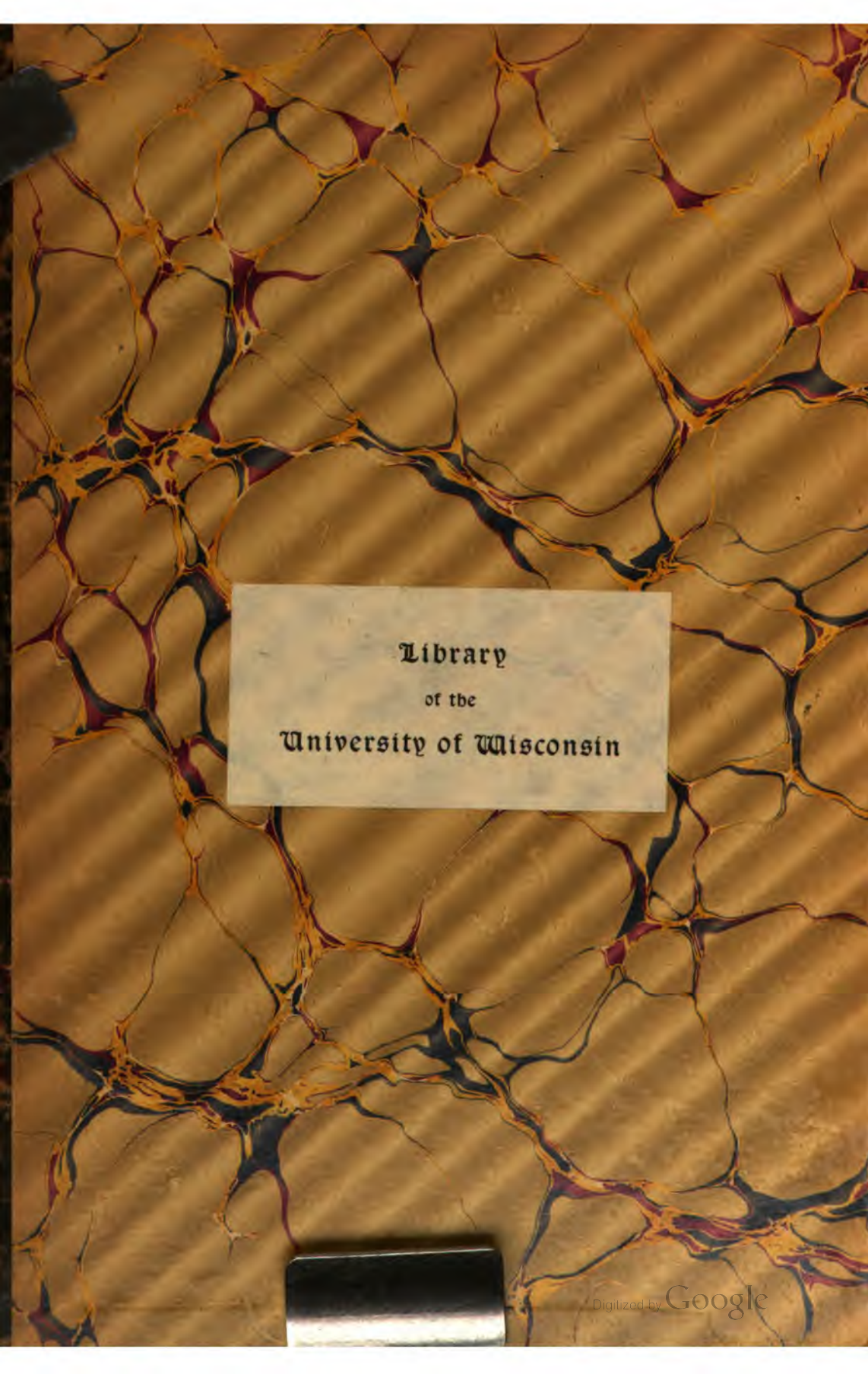
Nous vous demandons également de:

- + *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.
- + *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.
- + *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.
- + *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

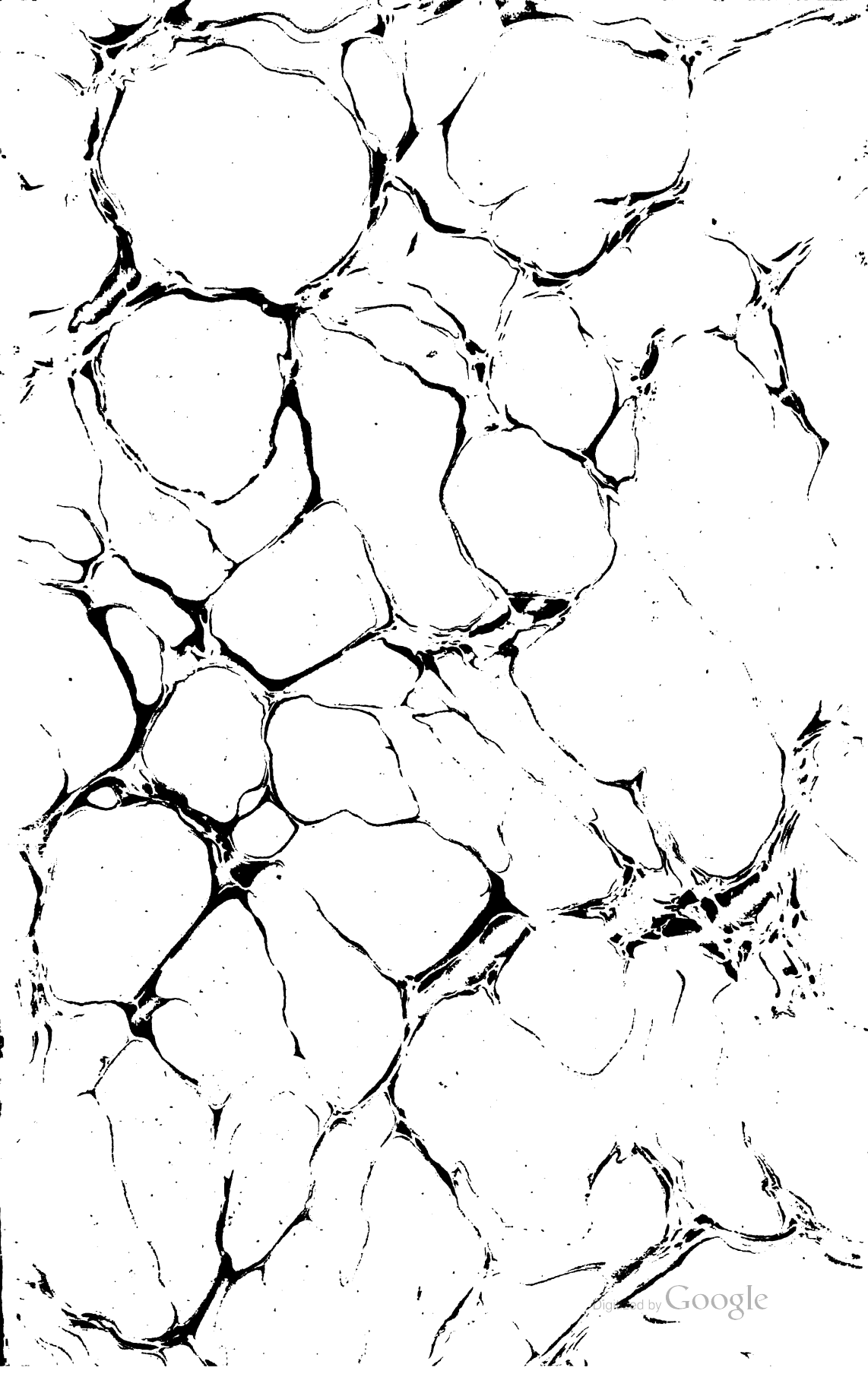
À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse <http://books.google.com>



The image shows the front cover of a book. The cover is decorated with a traditional marbled paper pattern, featuring a complex, organic design of veins in shades of brown, tan, and dark blue. A central, rectangular white paper label is pasted onto the cover. The label contains the text 'Library of the University of Wisconsin' in a black, serif font. The text is arranged in three lines: 'Library' on the top line, 'of the' on the middle line, and 'University of Wisconsin' on the bottom line. The font is a classic, slightly formal typeface. The overall appearance is that of an antique or historical library book.

Library
of the
University of Wisconsin



LA TECHNIQUE
DES
COURANTS ALTERNATIFS

TOME PREMIER
EXPOSÉ ÉLÉMENTAIRE ET PRATIQUE
DES PHÉNOMÈNES DU COURANT ALTERNATIF

ANNOUNCEMENT

THE UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS

CHICAGO

1950

LA TECHNIQUE
DES
COURANTS ALTERNATIFS

A L'USAGE DES ÉLECTRICIENS, CONTRE MAITRES, MONTEURS, Etc.

PAR

Giuseppe SARTORI

INGÉNIEUR

PROFESSEUR D'ÉLECTROTECHNIQUE A L'INSTITUT ROYAL TECHNIQUE SUPÉRIEUR DE MILAN
PROFESSEUR SPÉCIAL D'ÉLECTROTECHNIQUE A L'ÉCOLE I. R. INDUSTRIELLE DE L'ÉTAT
ET A L'ÉCOLE I. R. SUPÉRIEURE DE CONSTRUCTIONS NAVALES A TRIESTE

Traduit de l'italien

PAR

J.-A. MONTPELLIER

RÉDACTEUR EN CHEF DE L'« ÉLECTRICIEN »

TOME PREMIER

**EXPOSÉ ÉLÉMENTAIRE ET PRATIQUE
DES PHÉNOMÈNES DU COURANT ALTERNATIF**

PARIS (VI^e)

V^o CH. DUNOD, ÉDITEUR

49, QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS, 49

—
1904

Tous droits réservés.

84925

APR 1 1969

69.79691

TOD
SA7
T

AVIS DU TRADUCTEUR

Jusqu'à présent l'étude des courants alternatifs avait été une des parties de l'Electrotechnique que l'on considérait comme ne pouvant être exposée d'une manière élémentaire. L'ouvrage dont nous présentons aujourd'hui aux électriciens une traduction française a le mérite incontestable de montrer que le problème n'était pas insoluble, car M. Sartori l'a résolu d'une manière complète.

Bien que l'auteur, dans sa préface, se défende d'avoir écrit un livre de science, nous ne partageons pas entièrement sa manière de voir ; la tâche entreprise était, en effet, particulièrement difficile et il fallait beaucoup de science jointe à une longue pratique de l'enseignement pour mettre à la portée de toutes les intelligences l'explication de phénomènes aussi complexes que ceux que présentent les courants alternatifs.

Aussi, lorsque l'édition originale de l'ouvrage de M. Sartori nous parvint, nous fûmes frappé par l'excellence de sa méthode d'enseignement et par la clarté avec laquelle il exposait un sujet si difficile. Sans rien sacrifier de la rigueur scientifique qu'il convient toujours d'observer, il a trouvé le moyen de se mettre à la portée de ceux qui n'ont pas la pratique des calculs mathématiques.

Ce premier volume sera particulièrement utile aux électriciens qui y trouveront l'explication de tous les phénomènes relatifs aux courants alternatifs, présentés au point de vue purement physique et, par conséquent, faciles à comprendre. Il sera également lu avec intérêt par les nombreux ingénieurs qui, ne s'étant pas spécialisés dans les applications électrotechniques, désirent néanmoins et avec juste raison acquérir connaissance assez complète de l'électricité industrielle.

L'étude attentive de ce premier volume constitue une préparation très suffisante permettant d'aborder avec fruit celle des développements et des calculs qui font l'objet du tome II, complément indispensable du tome I.

Nous espérons que cet ouvrage sera accueilli en France avec la même faveur qu'en Italie ; il ne peut que contribuer au développement de l'industrie électrique en vulgarisant des connaissances qui ne doivent être ignorées par aucun de ceux qui de près ou de loin touchent à cette industrie.

J.-A. MONTPELLIER.

Paris, janvier 1904.

PRÉFACE DE L'AUTEUR

En présentant au public, réunies en volume, les leçons sur les courants alternatifs que nous avons professées aux cours du soir de l'Ecole industrielle I. et R. de l'Etat, à Trieste, nous avons cru devoir exposer les motifs qui nous ont engagé à les publier.

L'Ecole où ces leçons ont été professées est fréquentée par des contremaitres, des techniciens, des mécaniciens et des ouvriers attachés aux divers établissements et usines de la ville de Trieste. Ce sont, en général, des jeunes gens n'ayant qu'une instruction primaire, mais qui sont remplis de bonne volonté et peuvent suivre avec fruit l'enseignement d'une matière qui, comme l'Electrotechnique, demande beaucoup de réflexion et habitue l'esprit à penser.

Dès le début de notre enseignement, il y a quelques années, nous avons considéré les phénomènes du courant alternatif à un point de vue purement physique et nous les exposons d'une manière aussi élémentaire que possible, en évitant même l'emploi de l'algèbre, mais en ne négligeant pas néanmoins le côté scientifique de la question. Nous avons, dans ces conditions, cherché à être bref, clair, prudent dans le choix des exemples et à présenter cet enseignement d'une manière synthétique ; pour que nos auditeurs

puissent suivre facilement tous les développements sans perdre la suite des idées, nous nous sommes vu obligé à de nombreuses redites. Malgré nos efforts, les résultats ne furent pas ceux que nous espérions et nous avons constaté que, pour la majeure partie de nos élèves, les idées restaient encore indécises et confuses.

Nous avons alors modifié graduellement notre méthode d'enseignement et nous n'avons pas tardé à reconnaître qu'une analyse plus étendue des phénomènes, le rappel constant des principes énoncés précédemment et une certaine prolixité, pour ainsi dire, dans l'exposé des phénomènes, prolixité qui ne nous empêchait point de synthétiser à chaque instant les raisonnements présentés, étaient d'un grand secours pour nos élèves et, au lieu de nuire à l'intelligence de notre enseignement, leur permettaient d'en mieux saisir toutes les parties.

Cette méthode nous a donné surtout d'excellents résultats dans l'étude des courants alternatifs.

Dans nos relations journalières avec les ouvriers, les électriciens, les monteurs, etc., nous avons toujours constaté invariablement une ignorance presque complète des principes fondamentaux qui régissent les phénomènes des courants alternatifs. C'est le motif qui nous a engagé à publier la partie de nos leçons se rapportant à cette branche importante de l'Électrotechnique, pensant que nous pourrions ainsi faciliter, dans une certaine mesure, l'instruction de tous ceux qui s'occupent de ces questions; nous nous sommes efforcé de présenter les explications nécessaires en suivant fidèlement la méthode suivie dans notre enseignement oral.

Les installations à courant alternatif sont aujourd'hui si répandues que les personnes attachées à ces installations et à leur exploitation sont légion. Ce personnel a une très

grande habileté en ce qui concerne le montage, la conduite et l'entretien de toutes les machines et des nombreux appareils constituant ces installations ; mais la plupart ignorent probablement pourquoi un transformateur est autorégulateur, pourquoi la vitesse angulaire est constante dans un moteur synchrone et variable dans un moteur asynchrone, etc. D'autre part, il croit pouvoir régler les charges d'alternateurs couplés en quantités, comme s'il s'agissait de dynamos à courant continu, etc. En admettant que ce nombreux personnel des usines électrotechniques soit familiarisé avec les principes fondamentaux de l'électrotechnique et qu'il connaisse bien le fonctionnement de la dynamo à courant continu, nous espérons que le présent ouvrage pourra lui être de quelque utilité, à la condition toutefois qu'il ne l'ouvre pas seulement à la page qui peut l'intéresser, mais qu'il le lise en entier avec méthode et en lui accordant la plus grande attention.

Nous avons tenu essentiellement à donner les explications qui précèdent pour bien faire ressortir que ce livre n'est pas une œuvre scientifique, mais bien une œuvre de vulgarisation. Il s'adresse à toutes les personnes qui, n'ayant qu'une instruction primaire, n'ont pas à chaque instant la facilité de consulter quelqu'un pouvant les guider dans leur étude et leur expliquant, avec la clarté suffisante, des points qui sont sans nul doute présentés dans les livres scientifiques avec une rigoureuse exactitude, mais qui peuvent paraître obscurs pour la catégorie de lecteurs à qui ce livre s'adresse.

Ces considérations doivent justifier la physionomie particulière du présent ouvrage, son caractère spécial, une certaine exubérance de forme et, dans une certaine mesure, la familiarité des expressions, qui ne saurait certainement être admise dans une œuvre purement scientifique.

Dans le second volume, qui comporte exactement les mêmes chapitres, les phénomènes, exposés uniquement au point de vue physique dans le premier, sont développés d'une manière plus complète avec l'aide du calcul, simplifié autant que possible. En ce qui concerne les alternateurs, les transformateurs, les moteurs, etc., leur fonctionnement est analysé, d'après des méthodes appropriées, au seul point de vue de leurs applications industrielles.

G. SARTORI.

Trieste, 1903.

LA TECHNIQUE
DES
COURANTS ALTERNATIFS

INTRODUCTION

1. Fonction d'un générateur d'énergie électrique. — Parmi les nombreuses personnes qui s'occupent d'électrotechnique, il n'est pas rare d'en trouver qui croient qu'un générateur électrique a *simplement* pour fonction de produire de l'électricité. C'est là une grave erreur qu'il convient de signaler dès à présent et il importe de préciser plus exactement le rôle d'une dynamo dans ses diverses applications scientifiques et industrielles, afin de donner du générateur d'énergie électrique une définition claire et exacte.

D'une manière générale, une machine quelconque est un appareil susceptible de produire une transformation de l'énergie, cette expression de transformation devant être prise dans son acception la plus large. Une quantité déterminée d'énergie reste toujours invariable; mais elle peut être fournie dans des conditions très diverses et une machine n'a d'autre fonction à remplir que de modifier, suivant nos besoins, les conditions dans lesquelles cette énergie est mise à notre disposition. Ainsi, par exemple, le levier est la machine la plus simple que l'on connaisse; on lui fournit de l'énergie mécanique pour obtenir également de l'énergie mécanique; mais on sait que, pour actionner un levier, il suffit d'une faible force appliquée sur une grande longueur et que l'effet utile produit est le résultat d'une force beaucoup plus grande appliquée sur une faible longueur; mais le travail dépensé d'un côté du

levier reste égal au travail recueilli de l'autre côté. Dans ce cas, la nature de l'énergie mise en jeu reste la même et les conditions dans lesquelles elle est utilisée sont les seules qui varient.

La dynamo, étant une machine, rentre, par conséquent, dans la loi commune à toutes les autres et sa fonction consiste à transformer de l'énergie mécanique en énergie électrique ; on doit donc définir, d'une manière générale, le rôle de tout générateur d'énergie électrique comme il suit :

La fonction d'un générateur d'énergie électrique est de mettre à notre disposition de l'énergie électrique par transformation d'une autre forme de l'énergie.

Pour pouvoir utiliser l'énergie électrique, il ne suffit pas de se trouver en présence d'une quantité quelconque d'électricité. Une masse matérielle, une quantité d'eau ne peuvent mettre à notre disposition de l'énergie mécanique ou de l'énergie hydraulique, c'est-à-dire effectuer un travail, qu'à la condition expresse d'être mises en mouvement ; c'est ainsi que l'eau, pour fournir de l'énergie hydraulique, doit tomber d'une certaine hauteur ou, tout au moins, être animée d'un certain mouvement dû à une différence de niveau. En ce qui concerne l'énergie thermique, la chaleur peut en mettre à notre disposition, mais encore, s'il s'agit d'une quantité de chaleur constante, faut-il qu'il existe une différence de température entre la source de chaleur et le milieu environnant pour que cette source de chaleur produise de l'énergie thermique.

Dans la nature, où tous les phénomènes obéissent à des lois très simples, l'énergie ne se manifeste pas d'une manière différente, quelle que soit la forme sous laquelle elle se présente, mécanique ou électrique.

Puisque toujours les phénomènes naturels sont dus à une *cause* qui, pendant le temps qu'elle agit, change de *position* ou de *condition*, on doit s'attendre à ce que les manifestations de l'énergie électrique soient la conséquence de ce fait que, dans un temps donné, cette énergie électrique passe d'une certaine condition à une autre. C'est justement ce que con-

firme l'expérience. En effet, si l'on se place dans des conditions telles qu'une certaine quantité d'électricité passe nécessairement d'une condition à une autre, le phénomène se manifeste à nos sens avec un caractère de continuité et l'on se trouve alors en présence d'un *courant électrique*.

2. Courant électrique. — Qu'est-ce que l'électricité? Comment s'accomplissent les phénomènes que l'on désigne sous le nom de courant électrique?

A la première question, il ne faut pas songer à répondre; d'ailleurs on n'a à étudier que les effets de l'énergie électrique et les moyens de la produire et l'on peut se livrer à cette étude sans qu'il soit nécessaire d'avoir recours à une hypothèse quelconque sur la nature de l'électricité. Mais, d'autre part, on ne peut laisser de côté l'étude du phénomène de l'établissement d'un courant électrique, car c'est généralement sous cette forme que l'énergie électrique se manifeste. Ce phénomène est d'une nature telle que, pour la plupart des personnes, il paraît quelque peu abstrait et que vouloir en donner une explication entraînerait à exposer des théories que ne comporte pas le caractère pratique de cet ouvrage. Dans ces conditions, on ne peut que laisser de côté la précision scientifique et on se contente d'une explication empruntée à une comparaison. En réalité, cette manière d'expliquer le phénomène du courant électrique conduit à des conclusions identiques à celles que l'on obtient par une étude plus savante, mais beaucoup moins simple; si ce résultat ne justifie pas la méthode employée, elle a du moins le mérite de la simplicité.

Cette explication était nécessaire, car celui qui veut apprendre doit toujours avoir présent à l'esprit que, en comparant les phénomènes du courant électrique à la circulation de l'eau en mouvement dans un tube, on a un exemple qui est loin de la réalité, mais qui présente l'avantage de faciliter l'étude du phénomène, car le résultat est identique à celui que l'on obtiendrait par des méthodes absolument scien-

tifiques. Comme l'a dit le professeur Ferraris ¹ : « Nous nous écartons de la réalité parce que, dans le cas du courant hydraulique, l'énergie se trouve dans la masse même du liquide en mouvement à l'intérieur du tube et que cette énergie est absolument sans action sur les corps qui environnent le tube. Dans le cas du courant électrique, au contraire, l'énergie ne se manifeste pas seulement dans le conducteur où circule le courant, elle agit également dans l'espace environnant, c'est-à-dire dans le champ magnétique créé autour du conducteur. La valeur de cette énergie est d'autant plus élevée que la perméabilité du milieu environnant est plus grande. Un courant électrique diffère donc absolument, quant à sa nature, du courant d'eau, puisque l'énergie électrique se manifeste non seulement dans le conducteur, mais aussi dans l'espace environnant ; on peut même dire que l'action produite par le courant s'exerce, pour la plus grande partie, dans le champ magnétique créé, car c'est dans ce champ que se manifeste l'énergie électrique, alors que le conducteur absorbe, au contraire, une partie de cette énergie.

« Toutefois, le conducteur remplit une fonction importante en donnant une direction au phénomène, car c'est de sa forme que dépend la distribution des lignes de force dans le champ magnétique. Ce serait une erreur de croire que le courant soit un phénomène qui existe seulement dans le conducteur, car le caractère essentiel de ce courant est la création du champ magnétique qu'il produit et dont toutes les lignes de force se trouvent fermées autour du conducteur. »

3. Établissement d'une transmission d'énergie. — Il convient d'examiner brièvement quelques-uns des cas qui se présentent journellement dans la pratique. Soient A (*fig. 1*) la poulie d'un moteur et B la poulie d'un arbre de transmission ; en reliant ces deux poulies à l'aide d'une courroie T, la force

¹. *Lezioni di Elettrotecnica*, p. 288.

motrice de la poulie A peut être transmise à la poulie B dans des conditions identiques de vitesse angulaire si les deux poulies ont le même diamètre, ou bien dans des conditions différentes de vitesse angulaire si les deux poulies n'ont pas le même diamètre. La courroie qui les relie sert d'agent de transmission et il est inté-

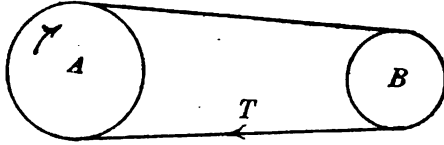


FIG. 1.

ressant de constater que, seul, le brin inférieur de cette courroie est fortement tendu, fait visible à l'œil, montrant bien que ce brin joue le principal rôle dans le mécanisme de la transmission. Le brin supérieur de la courroie n'est que peu ou pas tendu, ce qu'il est facile de constater en remarquant qu'il cède partiellement à l'action de la pesanteur, puisque son poids l'oblige à s'infléchir.

La poulie motrice A produit la tension sur le brin conducteur T de la courroie et cette tension sert à vaincre la résistance tangentielle de la poulie B. La courroie est donc un organe qui transmet réellement l'énergie mécanique et c'est par son intermédiaire que s'effectue la transmission. C'est une force qui actionne la courroie et le travail effectué a

pour valeur le produit de cette force par l'espace parcouru pendant l'unité de temps (vitesse de la courroie).

Un fluide, l'eau par exemple, peut également être utilisé pour transmettre de l'énergie mécanique. Soit une pompe P (fig. 2) pouvant envoyer une certaine quantité d'eau, sous une pression

déterminée, dans un tube *a*, cette eau étant puisée dans une conduite *b*. Cette eau sous pression peut effectuer un certain travail en agissant sur un appareil récepteur R (grue,

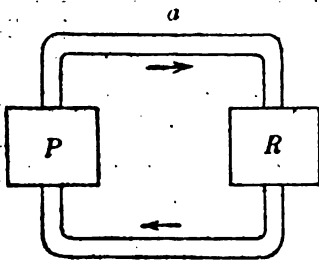


FIG. 2.

turbine, moteur hydraulique, etc.) et, une fois ce travail accompli, la pompe P peut de nouveau reprendre cette eau. Dans ce cas, l'agent de transmission de l'énergie est l'eau et il est facile de comprendre que, pour un tube de capacité donnée, le travail effectué aura une valeur d'autant plus grande que la pression de l'eau sera plus considérable. L'eau qui circule dans le tube a possède une certaine quantité d'énergie et peut effectuer un certain travail; en traversant le récepteur R, elle cède toute son énergie, moins toutefois celle qui a été dépensée pour vaincre la résistance due aux frottements sur les parois du tube a , et elle retourne à la pompe ne possédant plus aucune énergie. Mais la pompe, continuellement actionnée par le moteur qui la commande, reprend cette eau, lui fournit une nouvelle quantité d'énergie, la refoule dans le tube a et les mêmes phénomènes se reproduisent d'une manière continue. On peut en déduire le rôle qui incombe à la pompe et définir la fonction de cette dernière, rôle qui consiste à fournir à une masse d'eau inerte une certaine quantité d'énergie, afin qu'elle puisse effectuer un travail donné; en d'autres termes, dans le cas considéré, la pompe transmet de l'énergie mécanique qui lui est fournie par un moteur approprié.

Dans le cas d'une transmission d'énergie électrique, il se produit des phénomènes *analogues*. La dynamo a pour rôle de mettre l'électricité en mouvement dans un circuit alimentant des récepteurs et dans lesquels se produisent des phénomènes mécaniques, thermiques, chimiques, etc., c'est-à-dire des récepteurs transformant l'énergie électrique qu'ils reçoivent en énergie mécanique, thermique ou chimique, etc., suivant le cas. L'énergie électrique est fournie continuellement au circuit par le fonctionnement de la dynamo actionnée par un moteur mécanique.

On donne le nom de *potentiel électrique* au travail total qu'une quantité déterminée d'électricité (l'unité) est susceptible de produire sous l'action des forces qui la mettent en mouvement. Par suite, la *différence de potentiel* fournit la

mesure de la valeur du travail effectué par cette quantité d'électricité lorsqu'elle est en mouvement. La différence de potentiel aux bornes d'un générateur d'énergie électrique permet de mesurer le travail que l'unité de quantité d'électricité accomplit dans son trajet du pôle positif au pôle négatif.

Il y a lieu de remarquer que, dans l'exemple cité de transmission d'énergie par l'eau, l'énergie fournie à l'eau par le jeu des pistons de la pompe n'arrive pas intégralement jusqu'au récepteur R ; en effet, il existe une différence de pression entre l'origine de la conduite et son extrémité opposée, due à ce qu'une partie de l'énergie est absorbée pour vaincre les résistances de frottement de l'eau dans la pompe. De même, dans une dynamo, la différence de potentiel qui existe entre ses bornes est inférieure à la *force électromotrice* (cause qui produit le mouvement de l'électricité) de la quantité nécessaire pour vaincre la résistance électrique intérieure du générateur, quantité qui représente la *chute intérieure de potentiel*.

Il faut savoir en outre que, dans le cas du courant continu, la chute de tension se répartit en proportion des *résistances du circuit* et que de la différence de potentiel entre deux points donnés de ce circuit (ne contenant pas de générateur ou d'autre force électromotrice) et de l'intensité du courant dépend le travail que l'énergie électrique peut produire.

4. Mouvement alternatif. — La transmission d'énergie mécanique par l'intermédiaire de l'eau mise en mouvement toujours dans la même direction est le cas le plus simple et celui qui se rencontre le plus fréquemment ; mais cette transmission peut s'effectuer de diverses manières. On peut, par exemple, à l'aide d'un piston A mobile dans un cylindre (*fig. 3*), mettre en mouvement un piston identique B, également mobile dans un cylindre, à la condition que ces deux cylindres soient reliés entre eux, par leur partie supérieure et par leur partie inférieure, à l'aide de tuyaux remplis d'eau. Une cer-

taine quantité de l'énergie de l'eau ne peut, dans ce cas, être transmise que par le mouvement alternatif du piston A, mouvement qui est reproduit par le piston B à cause de l'in-

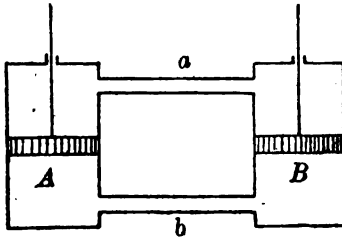


FIG. 3.

compressibilité de l'eau. Tout autre serait le phénomène si le fluide employé était compressible, un gaz par exemple. Sans entrer dans d'autres considérations, on comprend facilement que l'eau à laquelle on imprime un mouvement alternatif dans les cylindres

et dans les tubes *a* et *b* passe, pendant toute la durée de la course du piston A, par les différentes vitesses comprises entre le repos et la vitesse maximum ; par suite de l'inertie de l'eau, l'étude du phénomène devient plus difficile. L'inertie de la masse d'eau donne lieu, en effet, à des réactions dont la valeur augmente en même temps que croît la vitesse de marche des pistons, c'est-à-dire avec le nombre d'inversions du sens de marche de l'eau dans les tubes *a* et *b*.

On sait également que l'on peut obtenir une transmission électrique d'énergie à l'aide d'un courant électrique appelé *courant alternatif*. Mais, pour les mêmes raisons qui viennent d'être données pour le cas de la transmission hydraulique alternative, l'étude du phénomène que présente le courant alternatif est plus complexe que lorsqu'il s'agit du courant continu.

En mécanique, l'étude d'un mouvement uniforme est très simple et facile à saisir, même pour ceux qui n'ont pas une instruction très développée ; il n'en est plus de même pour l'étude d'un mouvement variable ; en effet, cette étude est plus difficile à cause de la force d'inertie qui intervient, force qui tend à maintenir le corps considéré dans l'état de repos ou de mouvement qu'il possède au moment où intervient la cause perturbatrice. Une force analogue agit sur les conducteurs parcourus par un courant alternatif, force

qui tend à empêcher les variations du courant et c'est précisément ce phénomène qui rend plus difficile l'étude du courant alternatif. En mécanique, on conçoit facilement ce qu'est l'inertie et il est possible de se rendre compte de la nature de la force d'inertie et de ses effets en arrêtant un corps en mouvement ou en mettant en mouvement un corps à l'état de repos. Malheureusement, en ce qui concerne le courant électrique alternatif, il n'est pas toujours possible de voir les effets produits par la force analogue qui exerce son action; on peut, toutefois, toujours s'en rendre compte en observant les indications fournies par des instruments appropriés.

Il convient donc, à ce propos, de donner ici une conception très claire de cette nature de phénomènes en s'appuyant sur le raisonnement et sur l'expérience. La plupart des expériences nécessaires peuvent être facilement réalisées par tous ceux qui ont à leur disposition du courant alternatif ou, à défaut, une dynamo à courant continu qu'il est facile de modifier pour obtenir du courant alternatif dans un but expérimental. Il y a lieu de recommander vivement à tous ceux qui abordent l'étude du courant alternatif de répéter, dans la mesure du possible, certaines expériences fondamentales, parce que celui qui constate par lui-même les effets produits en tire un meilleur profit pour son instruction que celui qui se borne à regarder les expériences faites dans un cours. Il est en effet reconnu que, si l'on oublie facilement les diverses particularités d'une expérience faite par un professeur au cours d'une leçon, il n'en est plus de même quand on fait soi-même cette expérience.

5. Transformation d'énergie mécanique en énergie électrique. — Pour compléter le raisonnement qui précède, il est utile de déterminer les fonctions des divers organes qui sont employés pour effectuer toute transformation d'énergie mécanique en énergie électrique.

Une force électromotrice alternative est produite dans un conducteur par la seule action des variations de flux; on l'obtient

à l'aide d'une dynamo où des conducteurs sont mis en mouvement dans un champ magnétique ou *vice versa*. En dehors de l'énergie absorbée par les frottements mécaniques, il ne faut développer aucun travail pour maintenir cette force électromotrice dans une dynamo fonctionnant à vide. Mais, si on vient à fermer le circuit, la force électromotrice donne lieu à la production d'un courant dont l'intensité a une valeur qui satisfait à la loi d'Ohm ; aussitôt que ce courant s'établit, la transformation d'énergie mécanique en énergie électrique commence à se produire. Ce n'est qu'à ce moment que le moteur actionnant la dynamo produit un travail utile et il ne l'effectue qu'en surmontant la réaction entre l'inducteur et l'induit, réaction qui tend constamment à imprimer à l'organe mobile de la dynamo un mouvement de sens contraire à celui de sa marche, ce qu'indique la loi de Lenz.

Il s'ensuit que la dépense d'énergie est automatiquement rendue proportionnelle à l'énergie utilisée, bien entendu en ne tenant pas compte des pertes. Dans ces conditions, on s'explique pourquoi, quand l'intensité du courant augmente par suite, par exemple, d'une diminution de résistance du circuit extérieur, la réaction qui se produit entre l'inducteur et l'induit augmente dans les mêmes proportions et le moteur mécanique doit alors fournir une plus grande quantité d'énergie.

Il est donc essentiel de séparer nettement les deux périodes du phénomène dont il vient d'être question :

1° Production d'une force électromotrice due à la variation du flux dans l'induit ;

2° Établissement d'un courant qui nécessite une dépense d'énergie mécanique proportionnelle à l'énergie électrique utilisée et qui constitue le travail utile de la dynamo.

6. Courant alternatif. — Pour acquérir les premières notions relatives au courant alternatif et aux effets qu'il produit, quelques expériences peuvent contribuer à faciliter cette étude.

On prend une dynamo bipolaire à courant continu (*fig. 4*), sur le collecteur de laquelle sont chassés à force trois anneaux en bois dur, bien tournés et portant sur leur circonférence extérieure un anneau de cuivre. Ces trois anneaux doivent être placés à la distance d'un demi-centimètre l'un de l'autre, en ayant le soin de laisser, du côté de l'induit, une partie du collecteur libre, partie sur laquelle appuient deux balais destinés à recueillir le courant continu nécessaire à l'excitation de l'inducteur de la dynamo. On divise ensuite le collecteur en trois parties égales et, après avoir marqué trois lames équidistantes, on relie respectivement chacune de ces lames à un des anneaux de cuivre fixés sur les anneaux en bois¹.

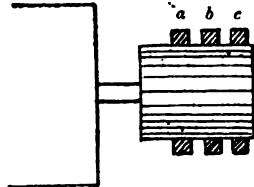


FIG. 4.

En plaçant un balai sur chacun des anneaux *a*, *b* et *c*, on a réalisé une dynamo à courants alternatifs qui peut alors être utilisée pour effectuer un grand nombre d'expériences.

En mettant en marche cette dynamo, l'inducteur est excité par le courant continu, recueilli par les balais qui appuient directement sur le collecteur et, d'après ce que l'on apprend par l'étude de la dynamo à courant continu, on sait qu'en établissant un circuit entre deux quelconques des balais appuyant sur les anneaux *a*, *b* et *c*, une force électromotrice alternative se produit dans ce circuit.

7. Effets chimiques produits par le courant alternatif.

— En intercalant un voltamètre dans un circuit, on sait que, si le courant qui le traverse est continu, il y a décomposition

1. Il peut arriver que le nombre des lames du collecteur ne soit pas divisible par 3; dans ce cas, on divise ce collecteur en trois parties approximativement égales: si, par exemple, il comporte 20 lames, on en prend 7, 7 et 6; pour 40, on compte 13, 13 et 14. Les communications entre les lames et les anneaux de cuivre peuvent être établies avec du fil de cuivre nu fixé, d'une part, sur la partie antérieure de la lame du collecteur à l'aide d'une petite vis et, d'autre part, sur le côté de l'anneau de cuivre à l'aide d'une goutte de soudure, le fil étant passé dans un trou fait avec une vrille dans le bois du disque.

de l'eau et l'on recueille de l'oxygène au pôle positif et de l'hydrogène au pôle négatif, le volume de ce dernier étant le double de celui de l'oxygène. Au contraire, avec un courant alternatif (dont on règle l'intensité avec un rhéostat), la quantité de gaz qui se dégage dans les deux éprouvettes est la même, parce que le sens du courant dans le circuit subit des inversions rapides¹. Si la vitesse angulaire de la dynamo est de 15 tours par seconde, en une seconde le courant circule alternativement 15 fois dans un sens et 15 fois en sens contraire et son intensité passe par une valeur nulle à chaque inversion. Il est facile de comprendre que, dans ce cas, chaque éprouvette du voltamètre doit contenir des volumes égaux d'un mélange d'hydrogène et d'oxygène, le volume d'hydrogène étant dans chacune d'elles, considérée séparément, le double de celui de l'oxygène, ce qui constitue un mélange détonant. Il est du reste facile de le constater en prenant une des éprouvettes et en l'approchant d'une flamme; il se produit aussitôt une petite explosion.

Il est encore une autre expérience qui montre la polarité alternativement positive et négative du circuit établi entre deux quelconques des trois balais supplémentaires appuyant en *a*, *b* et *c*. On prend une bande de papier à dessin et on la trempe dans une dissolution composée de 10 centimètres cubes de solution concentrée de ferrocyanure de potassium, 10 centimètres cubes de solution concentrée d'azotate d'ammoniaque et 60 centimètres cubes d'eau distillée. Lorsque cette bande est bien imprégnée de liquide, on la retire de la solution, on la laisse égoutter et on la place sur une lame de cuivre. Les deux extrémités du circuit sur lequel on veut opérer se terminent chacune par une petite tige de fer, un clou par exemple. Les deux tiges sont fixées dans un petit morceau de bois et disposées de manière que l'une de leurs extrémités, convenablement émoussée, dépasse le bois, tandis que chacune des extrémités opposées soit respectivement reliée aux deux

1. En réalité, les gaz produits se recombinent en partie spontanément, parce qu'ils se trouvent à l'état naissant.

balais de la dynamo. Tout étant ainsi disposé, on fait appuyer les tiges sur la bande de papier en les faisant glisser rapidement sur sa surface et l'on observe alors un fait intéressant. Si les fils attachés aux deux tiges de fer sont reliés respectivement aux deux balais qui appuient sur le collecteur de la dynamo, la pointe reliée au pôle positif laisse sur le papier une ligne bleue et l'autre ne produit aucun effet. En inversant le courant dans ce circuit à l'aide d'un commutateur, ou simplement en intervertissant les points d'attache des deux conducteurs, c'est la seconde pointe qui trace une ligne bleue. Si, ensuite, on relie les pointes à deux quelconques des trois balais supplémentaires et que l'on fasse de nouveau glisser l'ensemble rapidement sur la bande de papier, chacune des pointes trace des séries de traits bleus séparés par des intervalles, le trait bleu tracé par une des pointes correspondant à l'espace blanc laissé par l'autre (*fig. 5*). On doit conclure de cette expérience que chaque pointe est alternativement positive et négative et que la force électromotrice du courant est elle-même alternative.



Fig. 5.

8. Effets thermiques produits par le courant alternatif.

— Tout conducteur parcouru par un courant s'échauffe et ce phénomène est indépendant du sens de ce courant. En faisant passer le courant alternatif dont on dispose dans un fil de fer fin, on constate que ce fil s'échauffe, quoique le courant soit fréquemment inversé; on peut aussi porter à l'incandescence et même fondre ce fil de fer, si l'on augmente l'intensité efficace du courant; c'est du reste ce que prouve l'expérience.

L'emploi du courant alternatif pour l'éclairage à incandescence est fondé sur le phénomène d'échauffement que produit le passage du courant dans un conducteur et il se prête aussi bien que le courant continu à cette application. Si les inversions du courant alternatif sont très rapides, l'œil ne perçoit aucune différence entre la lumière produite avec du

courant continu et celle produite par du courant alternatif. En approchant de la lampe un aimant assez puissant, il est possible toutefois de distinguer si c'est du courant continu ou du courant alternatif qui l'alimente. Si le courant est continu, le filament est légèrement attiré, puis reste immobile; si, au contraire, il est alternatif, le filament se met à osciller rapidement en produisant l'effet d'une sorte de ruban lumineux pour peu qu'il soit assez long et élastique (une lampe de 10 bougies à 60 volts suffit pour cette expérience, mais il est préférable d'utiliser une lampe à tension plus élevée). Le phénomène qui vient d'être décrit prouve qu'un courant placé dans un champ magnétique tend à se placer dans une position déterminée sous l'action d'une force électromagnétique et que, lorsque ce courant est alternatif, cette action électromagnétique s'exerce alternativement dans un sens et dans l'autre et, par suite, le conducteur (qui dans le cas considéré est le filament de la lampe) se met à vibrer.

9. Effets lumineux produits par le courant alternatif.

— Si la dynamo dont on dispose a une puissance suffisante, il est possible d'obtenir un arc voltaïque entre les pointes de deux crayons de charbon que l'on peut rapprocher à la main lorsqu'on n'a pas un régulateur approprié. Un instant après l'extinction de l'arc, on constate que les extrémités des deux crayons de charbon ont un aspect identique, tandis qu'avec le courant continu, l'une d'elles, la positive, se creuse en forme de cratère, l'autre se terminant par un champignon. Mais, en réalité, l'arc à courant alternatif, lorsque la fréquence du courant est suffisamment grande (au minimum 60 à 70 inversions par seconde), ne présente, au point de vue de l'éclairement, aucune différence sensible avec l'arc alimenté par du courant continu, ce qui permet d'en faire une très grande application pour l'éclairage électrique. Il est pourtant possible de faire une expérience qui montre que l'arc à courant alternatif subit des variations de puissance lumineuse correspondant aux variations du sens du courant. A cet effet,

sur l'arbre de la dynamo on monte un disque de carton d'un diamètre suffisant pour que, par un trou de 1 centimètre de diamètre pratiqué près de la périphérie, on puisse apercevoir l'arc lumineux qui doit être placé dans l'axe de la dynamo, à environ 1 mètre de distance (fig. 6). On met en marche la dynamo en lui imprimant une vitesse angulaire de 30 tours par seconde et on alimente l'arc avec du courant alternatif. En mettant l'œil derrière le disque et en face du trou, on voit cet arc dans une

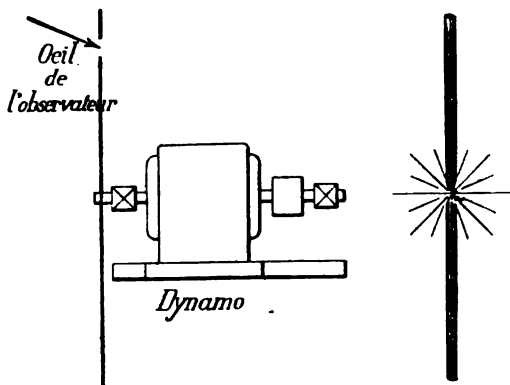


FIG. 6.

certainne condition d'éclat lumineux, par suite de la persistance des impressions lumineuses sur la rétine; déplaçant ensuite lentement l'œil autour de la circonférence du disque, on observe que l'arc subit des variations d'intensité lumineuse; la plus faible intensité lumineuse correspond à la valeur nulle du courant (à ce moment l'arc s'éteint, mais les extrémités des crayons de charbon restent incandescentes) et la plus grande intensité lumineuse est obtenue au moment où l'intensité du courant devient maximum pour diminuer ensuite de nouveau en repassant par zéro et ainsi de suite. Il suffit de parcourir avec l'œil la moitié de la circonférence pour se rendre compte de ce phénomène; sur l'autre moitié de la circonférence le phénomène se reproduit dans les mêmes conditions. Il y a lieu de remarquer que l'arc se reforme spontanément, sans qu'il soit nécessaire de rapprocher les charbons, et cela, par suite de la haute température et de la bonne conductance du milieu qui sépare les extrémités des deux charbons pendant le très court intervalle de temps qui s'écoule entre deux inversions du courant.

Par suite des mêmes effets, une raie noire, tracée suivant un diamètre sur la face intérieure du disque et éclairée par l'arc, paraît fixe dans l'espace.

On aura encore à recourir, dans d'autres cas, à des expériences *stroboscopiques* analogues (voir § 12).

10. Effets électromagnétiques produits par le courant alternatif. — Voici encore une expérience qui démontre l'alternance du courant. Si on prend un fil parcouru par un courant alternatif et qu'on l'approche d'une aiguille aimantée librement suspendue, l'aiguille reste immobile ou oscille légèrement au lieu de se déplacer comme elle le ferait avec le courant continu en satisfaisant à la règle énoncée par Ampère. Si ensuite on agit brusquement sur l'aiguille pour lui imprimer un mouvement de rotation, il est possible de maintenir ce mouvement en faisant agir sur l'aiguille le fil parcouru par le courant alternatif, pourvu que l'aiguille effectue un tour pendant le temps que le courant met à reprendre une valeur identique. Dans ce cas, la force électromagnétique est entièrement utilisée. Cette expérience ne réussit pas du premier coup; elle exige que l'aiguille possède une certaine inertie qu'il est du reste facile de lui donner en fixant en son centre un tout petit disque de plomb.

C'est pour cela que, si l'on fait agir un courant alternatif sur un ampèremètre du type Weston ou de tout autre type analogue ne fonctionnant qu'avec le courant continu, on n'obtient aucune indication, l'aiguille indicatrice oscillant simplement dans les environs du zéro. Il est pourtant indispensable d'avoir à sa disposition des instruments appropriés pour la mesure des courants alternatifs; ces instruments existent et ils seront décrits ultérieurement.

11. Applications du courant alternatif. — Les diverses expériences qui viennent d'être décrites donnent une idée nette de la nature du courant alternatif et montrent qu'un vaste champ d'applications industrielles lui est ouvert, aussi

vaste que celui des applications du courant continu. On comprend facilement que, dans beaucoup de cas, on donne aujourd'hui la préférence au courant alternatif, parce qu'un alternateur n'ayant pas de collecteur, puisque le courant est utilisé tel qu'il est produit dans le circuit de l'induit sans qu'il soit nécessaire de le redresser, permet d'obtenir des tensions très élevées qui se prêtent économiquement au transport électrique de l'énergie avec des conducteurs de faible section. Cette propriété est d'autant plus précieuse que, grâce aux transformateurs qui ont un rendement élevé, on peut faire varier à volonté les facteurs de l'énergie, c'est-à-dire transmettre l'énergie électrique sur la canalisation principale à haute tension et à faible intensité et obtenir, d'autre part, dans le réseau d'utilisation, des courants intenses à basse tension.

C'est ainsi que le levier, dans les applications mécaniques, sert à faire varier les facteurs du travail et les nombreuses applications de cette machine rudimentaire, sous ses mille aspects différents, montrent l'importance des résultats qu'elle permet d'obtenir. De même, le transformateur électrique, constitué simplement par un noyau de fer sur lequel sont enroulés deux circuits distincts, est certainement l'appareil électrique le plus simple et pourtant les applications que, grâce à lui, on a pu réaliser, sont des plus importantes.

Les applications du courant continu à l'éclairage, à la traction, à la transmission d'énergie mécanique, à l'électrochimie et à l'électrothermie ont causé une véritable révolution économique se complétant maintenant par l'utilisation du courant alternatif qui donne la possibilité de transporter économiquement, dans les meilleures conditions de rendement, les quantités immenses d'énergie que nous offrent d'une manière continue les fleuves aux cours rapides et les chutes d'eau alimentées constamment par les glaciers, sources d'énergie qui sont aussi précieuses que le charbon qu'il faut arracher du sein de la terre.

12. Phénomènes stroboscopiques. — Pour les lecteurs qui ne sont pas familiarisés avec les phénomènes stroboscopiques, il est utile de donner ici quelques explications élémentaires.

Notre œil possède la merveilleuse propriété de percevoir un objet lumineux, alors même que la durée de l'éclairement est extrêmement courte, un millionième de seconde, par exemple, comme c'est le cas pour l'étincelle électrique. Lorsque l'effet lumineux cesse, l'œil conserve encore pendant un certain temps l'impression reçue ; la persistance de l'impression lumineuse sur notre rétine, une fois la cause disparue, est évaluée à $1/40$ de seconde.

Pour se rendre compte de ces effets, il suffit d'imprimer à un disque un mouvement très rapide (avec un petit moteur électrique par exemple) et, par un trou pratiqué sur les bords de la circonférence, de regarder un objet placé au delà. Si le disque tourne lentement, l'objet apparaît et disparaît ; si, au contraire, le mouvement est rapide, on aperçoit l'objet d'une façon continue quoiqu'un peu flou.

En prenant un disque qui tourne dans un plan perpendiculaire à un faisceau lumineux disposé pour que, par un trou pratiqué dans ce disque, un rayon lumineux puisse passer lorsque ce dernier se trouve dans son axe, on peut, avec ce cône de lumière, éclairer un objet en mouvement, par exemple un volant de machine avec ses bras ; le local dans lequel on se trouve doit être naturellement plongé dans l'obscurité.

Pendant les courts instants où la lumière passe à travers le trou, le volant paraît immobile ; mais, dans l'intervalle de temps séparant deux éclairagements successifs, on voit, grâce au déplacement des bras, que le volant a changé de position. Il n'est pas, du reste, difficile de disposer l'expérience pour que le volant paraisse immobile ; il suffit de l'éclairer chaque fois que l'un des bras passe par une position déterminée, par exemple la verticale. Il ne faut pas en conclure que le volant et le disque tournent à la même vitesse angulaire, car dans l'intervalle de deux éclairagements successifs, deux bras peuvent

être passés aussi bien qu'un seul ; si le volant a six bras, il apparaît immobile aux différentes vitesses angulaires correspondant à la vitesse 1, $1/2$, $1/3$, $1/6$ de celle du disque.

Si la vitesse angulaire du volant n'est pas exactement dans les rapports indiqués, par exemple si le rapport est de $1/6$, c'est-à-dire que le disque fasse 6 tours pendant que le volant n'en fait qu'un, on constate, lorsque la vitesse du volant augmente pendant les intervalles d'éclairement qui doivent rester invariables, que l'un de ses bras a parcouru un peu plus de $1/6$ de tour et on le voit un peu en avant de la position verticale. Le phénomène se reproduit à chaque émission de lumière et il n'est pas difficile de se rendre compte que, par suite de la persistance des impressions lumineuses sur la rétine, pour peu que le mouvement soit rapide, on puisse apercevoir le volant non plus immobile, mais tournant lentement. D'autre part, si la vitesse du volant diminue, il semble que son mouvement de rotation s'effectue en sens inverse. De la vitesse apparente en avant ou en arrière, que l'on peut facilement apprécier parce qu'elle est lente, il est facile de déduire, au moyen d'un calcul très simple, la différence de vitesse entre le disque et le volant.

Cette méthode d'observation, dite *stroboscopique* et que l'on peut appliquer de plusieurs manières différentes, est très précieuse pour l'étude des phénomènes périodiques, c'est-à-dire des phénomènes qui se représentent dans les mêmes conditions à des intervalles de temps réguliers. C'est pourquoi cette méthode se prête parfaitement à l'étude des variations d'intensité lumineuse d'une lampe à arc (Voir l'expérience § 9). En effet, l'intensité lumineuse d'un arc électrique est toujours fonction de celle du courant ; en approchant l'œil d'un certain point de la circonférence du disque, le trou permet à l'arc d'impressionner notre œil et l'impression lumineuse produite est toujours en rapport avec l'intensité du courant dans le circuit au moment où le trou passe devant l'œil. Si, au lieu de regarder toujours le même point, on porte le regard le long de la circonférence, par exemple à $1/8$ de la circonférence plus en avant, l'image n'est plus la même ; en effet, après $1/8$ de tour

de l'induit de l'alternateur, l'intensité du courant a sensiblement varié; mais, par suite de la persistance des impressions sur la rétine, l'arc paraît avoir une intensité lumineuse différente et bien déterminée.

C'est pourquoi les variations du courant alternatif qui sont très rapides peuvent être observées dans leurs différentes phases avec la plus grande facilité.

Les variations d'intensité lumineuse d'une lampe à arc peuvent être observées par d'autres procédés, par exemple au moyen d'un disque, muni de trous, que l'on fait tourner à la main; il suffit de regarder la lampe au travers des trous en tenant le regard fixé toujours sur le même point.

Une méthode plus simple encore consiste à mettre un objet rapidement en mouvement, par exemple un bâton (de couleur blanche de préférence), que l'on éclaire à l'aide de la lampe. L'image du mouvement ne sera plus continue et les solutions de continuité montrent que le bâton n'est éclairé avec une intensité maximum qu'à des intervalles de temps réguliers. C'est là un procédé permettant de reconnaître si une lampe à arc est alimentée par du courant continu ou par du courant alternatif.

CHAPITRE PREMIER

PHÉNOMÈNES PÉRIODIQUES ET MANIÈRE DE LES REPRÉSENTER

13. Phénomènes périodiques et mouvement harmonique. — Un phénomène est dit *périodique* lorsque, à des intervalles de temps déterminés, il se reproduit dans des conditions identiques. Si les intervalles de temps sont égaux, chacun de ces intervalles porte le nom de *période* du phénomène.

Le mouvement d'un pendule est un phénomène périodique ; celui d'un balancier également. Le mouvement uniforme d'une roue est aussi un phénomène périodique, parce qu'un point quelconque de cette roue, mais toujours le même, se trouve toujours dans une position identique à des intervalles de temps égaux correspondant à un tour complet. Si un pendule effectue une oscillation complète (c'est-à-dire deux oscillations simples) en une seconde, on dit que la période du phénomène est de 1 seconde. Si la roue considérée a une vitesse angulaire de 10 tours par seconde, la période du phénomène est de $1/10^{\circ}$ de seconde et le nombre 10 qui exprime combien de fois il se produit de périodes dans l'unité de temps (la seconde) est appelé *fréquence* du phénomène périodique. Pour le pendule, la fréquence est 1 et pour la roue la fréquence est 10.

Soient deux phénomènes périodiques de même période, mais se produisant l'un suivant une circonférence et l'autre suivant une ligne droite que l'on admet être un des diamètres de la

circconférence. Soient, par exemple, deux points P et P_1 (*fig. 7*), le premier animé d'un mouvement un iforme et l'autre se déplaçant le long du diamètre, à la condition de se trouver constamment sur la perpendiculaire abaissée du point P sur le diamètre. Un simple examen montre que ce double phénomène

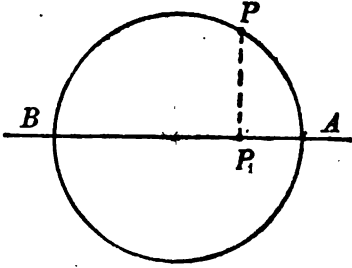


FIG. 7.

se produit à peu près exactement dans la plupart des moteurs à vapeur, en admettant que la course du piston s'effectue théoriquement suivant le diamètre de la circonférence décrite par le bouton de la manivelle ; du reste, le mouvement de P_1 est celui dont nous semblerait animé le point P

si on le regardait en plaçant l'œil dans le plan du mouvement.

La nature du mouvement de P_1 (tête de la tige du piston) est facile à comprendre : ce point se déplace suivant le diamètre AB tantôt en avant, tantôt en arrière, mais avec une vitesse qui varie constamment. Cette vitesse est nulle lorsque le point P_1 arrive en A ainsi que lorsqu'il arrive en B ; elle est maximum au moment où ce point P_1 arrive au centre de la circonférence. Ce mode de mouvement, particulièrement intéressant en ce qui concerne cette étude, est appelé *mouvement harmonique* et une démonstration des plus simples (à laquelle du reste le simple bon sens peut suppléer) montre que la vitesse de P_1 varie à chaque instant d'après la distance verticale qui sépare P de P_1 ; autrement dit la vitesse est proportionnelle au segment vertical PP_1 .

Un simple tracé graphique permet de représenter les variations, à chaque instant, de la vitesse du point P_1 .

On divise le premier quart de la circonférence (*fig. 8*) en quatre parties égales : Aa , ab , bc , cd . Comme on le sait, ces quatre arcs sont parcourus par le point P en des temps égaux ; quant au point P_1 , dans les mêmes temps, il se déplace de A en a' , de a' en b' , ..., etc., avec une vitesse toujours croissante.

Sur une ligne droite, appelée axe des abscisses, on représente les intervalles de temps par des points équidistants, la distance comprise entre le premier et le deuxième correspondant au temps que met le point P_1 pour parcourir l'espace Aa' ; celui compris entre le deuxième et le troisième, le temps que met le point P_1 pour parcourir l'espace $a'b'$ et ainsi de suite.

A l'origine, en A, la vitesse est nulle; après un temps 1, la vitesse correspond à aa' , segment que l'on reporte sur la verticale élevée par 1; après un temps 2, la vitesse correspond à bb' , segment que l'on reporte sur la verticale élevée par 2, et l'on

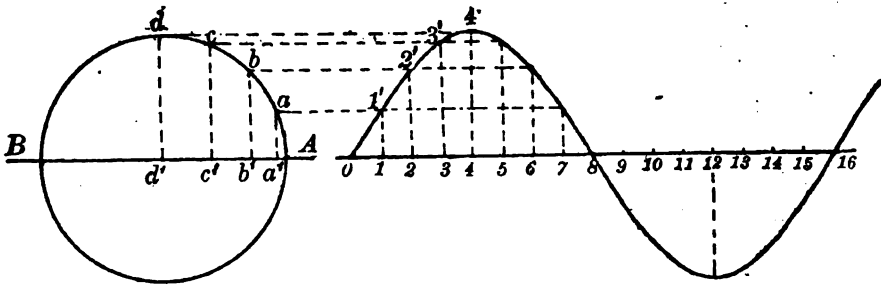


FIG. 8.

continue à opérer ainsi pour tous les autres points. La vitesse ne s'accroît pas brusquement, mais elle augmente graduellement : donc, en reliant les points 0, 1', 2', 3', 4' par une ligne continue, on obtient une représentation très nette des variations de vitesse du point P_1 dans son trajet de A vers le centre de la circonférence. A partir du centre et jusqu'en B, cette vitesse va en diminuant et, en opérant graphiquement de la même manière que précédemment, on obtient la courbe 4', 5', 6', 7', 8', symétrique à la précédente et représentant les variations de vitesse du point P_1 dans son trajet depuis le centre jusqu'en B. Arrivé en B, le point P_1 prend une direction inverse avec des variations de vitesse allant graduellement en augmentant, variations qui sont représentées par une courbe identique; c'est pourquoi, le sens du mouvement étant inversé, cette courbe est tracée, à partir du temps 8, en dessous de l'axe des temps, indiquant ainsi que les vitesses vont en augmentant et que la

direction du mouvement est de sens inverse. Le diagramme (fig. 8) montre également qu'après le temps 16 le point P_1 se trouve dans des conditions identiques à celles dans lesquelles il se trouvait au départ, ce qui doit être, parce que le point P , au bout du temps 16, a effectué un tour complet et revient en A.

Au départ de A, le phénomène se reproduit ensuite toujours de la même manière et la courbe indique la vitesse du point P_1 à chaque instant, si on la continue indéfiniment le long de l'axe des temps. Cette courbe porte le nom de *sinusoïde* et c'est cette courbe, construite comme il a été indiqué, qui représente un mouvement harmonique.

Le temps 16 est la période du phénomène et la fréquence dans ce cas est de $1/16$.

Le mouvement d'un pendule, les vibrations d'un diapason, d'une corde tendue et de tout corps qui, par suite de son élasticité, entre en oscillation, sont autant d'exemples de mouvements harmoniques.

14. Variation instantanée de la vitesse d'un mobile animé d'un mouvement harmonique. — Il est très utile de connaître les diverses valeurs que prend successivement la vitesse d'un mobile animé d'un mouvement harmonique, c'est-à-dire d'étudier comment cette vitesse varie à chaque instant; autrement dit, il est nécessaire de connaître les valeurs que prend l'accélération de ce mobile.

Si on considère la vitesse du point P_1 au moment où il passe par le centre de la circonférence, on voit qu'à ce moment elle est maximum. Cette vitesse est positive ou négative suivant que le point P_1 se déplace en avant dans la direction AB ou qu'il se déplace en sens inverse dans la direction BA.

Il y a lieu de remarquer qu'au moment où la vitesse est maximum, cette vitesse reste constante pendant un temps très court τ , temps pendant lequel l'augmentation ou la diminution de vitesse, c'est-à-dire l'accélération, est nulle. Donc, comme le montre la figure 9, l'accélération est nulle aux temps 4 et 12.

Par contre, aux temps 8, 16, 24, etc., pendant un temps très court τ , la vitesse subit la variation maximum et c'est pourquoi l'accélération atteint alors sa plus grande valeur. Pour les valeurs intermédiaires de la vitesse, l'accélération prend également des valeurs intermédiaires et l'on démontre que la courbe représentative de l'accélération est une courbe ayant la même allure que celle qui représente les variations de vitesse, c'est-à-dire une sinusoïde. Cette courbe est tracée en pointillé sur la figure 9. Les parties positives de cette nouvelle courbe correspondent aux points de la courbe des variations de la vitesse qui indiquent que cette vitesse augmente et les parties

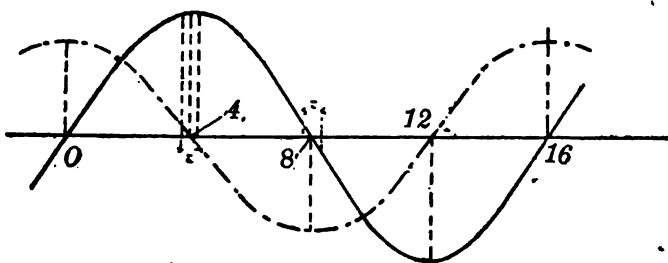


FIG. 9.

négatives, à ceux qui indiquent que la vitesse diminue. En réalité, à partir du temps 8, la vitesse va en augmentant, mais dans le sens négatif; par suite, l'accélération doit être négative. Enfin, après le temps 12, la vitesse diminue toujours dans le sens négatif, tandis que l'accélération est positive. On peut aussi démontrer que les ordonnées de la courbe de l'accélération sont proportionnelles aux infléchissements de la courbe des variations de vitesse aux points considérés, cet infléchissement étant déterminé par les tangentes trigonométriques des angles que les tangentes géométriques à la courbe forment avec l'axe des temps.

Ces considérations présentent une grande importance et s'appliquent d'une manière générale.

Par suite, l'on peut dire que, *chaque fois qu'un phénomène se produit suivant la loi harmonique, les variations instantanées*

de ce phénomène suivent également une loi harmonique dont les points maxima correspondent aux points nuls du phénomène lui-même.

Les deux phénomènes ont même période; mais le phénomène des variations instantanées précède ou suit l'autre avec une différence de phase de $1/4$ de période suivant les différents cas. S'il s'agit d'une vitesse obéissant à la loi harmonique, l'accélération précède le phénomène de $1/4$ de période.

15. Phase d'un phénomène périodique. — Lorsqu'on se trouve en présence de deux phénomènes périodiques de même nature et ayant même forme et même période, on donne le nom de *différence de phase*, de l'un par rapport à l'autre, à l'intervalle de temps qui sépare le moment où le premier partant de la valeur nulle commence à prendre une valeur positive du

moment où le second, partant également d'une valeur nulle, commence aussi à prendre une valeur positive.

Soient deux points P et Q (fig. 10) mobiles sur une circonférence, animés tous deux d'un mouvement uniforme et mettant un temps T pour effectuer un tour; la différence de phase d'un des mobiles par rapport à l'autre a pour valeur

le temps nécessaire à l'un des mobiles pour parcourir l'arc correspondant à l'angle φ . Cet angle peut également être pris comme valeur de la différence de phase. Si le mouvement se produit de droite à gauche, le mobile Q est en *retard de phase* sur le mobile P, tandis que ce dernier est en *avance de phase* sur le mobile Q. On donne plus simplement le nom de *phase* à l'arc décrit par le mobile en partant du point correspondant à l'origine des temps.

Dans le cas du mouvement harmonique et en ce qui concerne les valeurs de l'accélération, il n'est pas difficile de

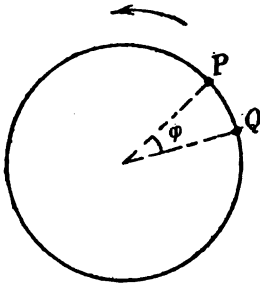


FIG. 10.

comprendre que ces valeurs sont celles de la vitesse d'un mobile Q' (*fig. 11*) animé d'un mouvement harmonique et dont le point correspondant Q (sur la circonférence de rayon OQ) se déplace d'un mouvement uniforme, mais précède toujours le point P de 90° . C'est pourquoi, lorsqu'on dit que deux phénomènes périodiques sont *décalés de 90°* par rapport au temps, cela signifie que les deux phénomènes sont bien de même nature, mais qu'ils ne passent pas par une valeur nulle au même moment. Dans l'exemple qui vient d'être cité, le retard de P sur Q ou, ce qui revient au même, l'avance de Q sur P , est de 90° , c'est-à-dire d'un quart de période.

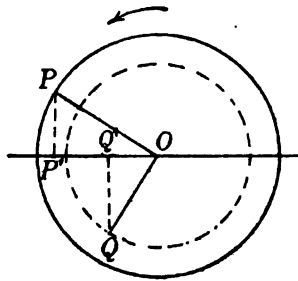


FIG. 11.

Les diagrammes ci-dessous (*fig. 12*) sont des exemples de retard de phase.

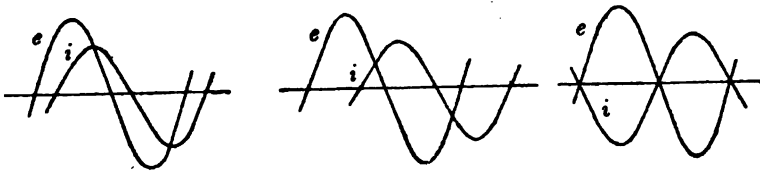


FIG. 12.

i est en retard sur e
de $1/8$ de période

$$\text{phase} = \frac{360^\circ}{8} = 45^\circ$$

i est en retard sur e
de $1/3$ de période

$$\text{phase} = \frac{360^\circ}{3} = 120^\circ$$

i est en retard sur e
de $1/2$ de période

$$\text{phase} = \frac{360^\circ}{2} = 180^\circ$$

16. Autre manière de représenter un phénomène périodique. — On voit qu'en correspondance avec le temps ou, pour employer une expression plus correcte, *en fonction* du temps, les valeurs ou les grandeurs d'un phénomène périodique sont représentées graphiquement par des lignes verticales (*ordonnées*) comprises entre les points correspondants au

temps considéré et une courbe appelée sinusoïde (fig. 13). La plus longue de ces lignes, c'est-à-dire l'ordonnée maximum, est dénommée *amplitude* du mouvement harmonique et correspond

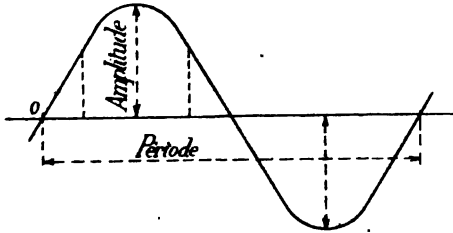


FIG. 13.

au rayon de la circonférence sur laquelle se déplace le mobile P (fig. 7).

On trace deux circonférences (fig. 14) ayant un diamètre égal à l'amplitude du mouvement harmonique et dont les centres respectifs sont placés sur une ligne verticale venant rencontrer en *o* une ligne horizontale et, à l'aide d'une épingle, on fixe en *o* un fil tendu avec la main que l'on fait tourner lentement, d'un mouvement uniforme, de droite à gauche. On remarque alors qu'en partant de la ligne horizontale à droite, les longueurs *o a* augmentent graduellement de longueur jusqu'à un maximum, puis vont en diminuant jusqu'à zéro pendant le deuxième quart de tour; pendant le parcours des troisième et quatrième quarts de tour, les mêmes variations de longueur se reproduisent; mais on les considère comme négatives parce qu'elles se trouvent au-dessous de l'horizontale.

Fixant ensuite sur ce fil tendu, à une distance de *o* égale à l'amplitude, une pointe P, si l'on compare le tracé obtenu en faisant tourner lentement et d'un mouvement uniforme le fil de droite à gauche autour du centre *o* avec le tracé donné par

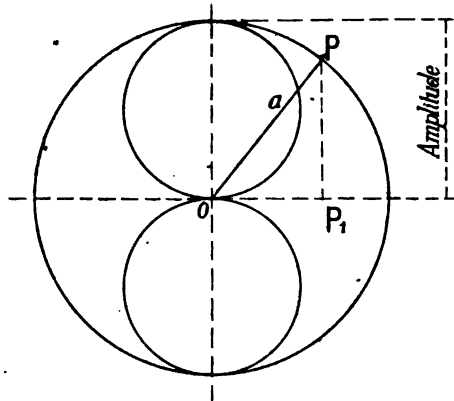


FIG. 14.

le parcours des troisième et quatrième quarts de tour, les mêmes variations de longueur se reproduisent; mais on les considère comme négatives parce qu'elles se trouvent au-dessous de l'horizontale.

Fixant ensuite sur ce fil tendu, à une distance de *o* égale à l'amplitude, une pointe P, si l'on compare le tracé obtenu en faisant tourner lentement et d'un mouvement uniforme le fil de droite à gauche autour du centre *o* avec le tracé donné par

la figure 8, on constate que les longueurs successives de la ligne oa représentent la vitesse du point P_1 correspondant à ces diverses positions.

Enfin, au centre o on fixe deux fils au lieu d'un (ce que l'on réalise en prenant un fil de longueur double dont les deux extrémités sont libres, le milieu étant à cheval sur l'épingle), et on les maintient écartés l'un de l'autre de manière à ce qu'ils forment entre eux un angle constant dont la valeur est φ (fig. 15) ; en faisant tourner les deux fils lentement et d'un mouvement uniforme de droite à gauche, ils indiquent les valeurs successives de la vitesse de deux points animés d'un mouvement harmonique identique, mais décalés l'un par rapport à l'autre du temps correspondant à l'angle φ .

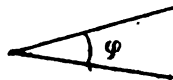


FIG. 15.

CHAPITRE II

PHÉNOMÈNES D'INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

17. Phénomènes d'induction électromagnétique et principe des alternateurs. — Les phénomènes d'induction électromagnétique sont la base de l'étude qui fait l'objet de cet ouvrage et, quoique ces phénomènes fassent plutôt partie de l'étude générale de l'électrotechnique, il est utile de les rappeler ici brièvement afin de les exposer sous une forme en rapport avec le caractère essentiellement pratique du présent travail.

Dans l'étude générale des phénomènes électriques et magnétiques, on a appris que la cause qui les produit est le flux magnétique et que les propriétés de ce dernier restent toujours identiques, que ce flux soit produit par un aimant, par un électro-aimant ou par un courant électrique. Il y a une certaine analogie entre le flux magnétique et le courant électrique, puisque le flux magnétique s'établit, comme le courant électrique, dans un circuit déterminé, circuit qui, à l'extérieur d'un aimant, part du pôle Nord pour revenir au pôle Sud; mais il faut se garder de pousser plus loin cette analogie, parce que le courant électrique qui passe dans un circuit nécessite une certaine dépense d'énergie qui est fonction de la résistance du conducteur et de l'intensité de ce courant, tandis que, dans un circuit magnétique, le flux se produit sous l'action d'une force, mais sans aucune dépense d'énergie, comme lorsqu'on maintient tendu ou comprimé un ressort sous l'action d'un

poids. Il ne serait pas possible sans cela de concevoir comment un aimant peut produire un champ magnétique constant sans absorber de l'énergie. Ce fait semble ne pas se vérifier lorsqu'il s'agit d'un électro-aimant puisque, pour produire un champ magnétique, il est nécessaire de faire passer un courant dans l'enroulement, c'est-à-dire de dépenser de l'énergie électrique dans cet enroulement; cette contradiction n'est qu'apparente, parce que l'énergie dépensée pour produire le courant magnétisant pourrait être rendue aussi faible qu'on le désirerait si l'on pouvait diminuer de plus en plus la résistivité du métal employé pour l'enroulement. Pour le flux, il n'y a pas dépense d'énergie et la preuve en est donnée par ce fait que l'intensité du courant dans la bobine de l'électro-aimant reste constante, que cette bobine soit pourvue ou non d'un noyau de fer. On sait que la présence d'un noyau de fer a pour effet d'augmenter le flux de force magnétique, dont la valeur est alors égale à sa valeur primitive, lorsque la bobine n'a pas de noyau, multipliée par le *coefficient de perméabilité du fer*, pourvu toutefois qu'il s'agisse d'un circuit magnétique fermé et homogène.

L'analogie entre le flux magnétique et le courant est encore limitée par ce fait que la résistance électrique est entièrement indépendante de l'intensité du courant, tandis que la *réductance* (résistance magnétique) d'un circuit magnétique dépend essentiellement de la valeur du flux.

Soit un flux magnétique produit d'une manière quelconque (*fig. 16*) et représenté par une série de lignes de

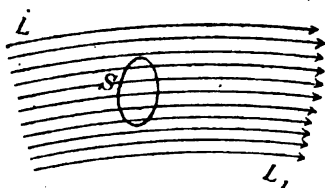


FIG. 16.

force L , L_1 ; dans ce champ magnétique on place un conducteur S fermé sur lui-même. On sait qu'un certain *flux de force magnétique* traverse cette spire S , de gauche à droite par exemple.

Il est évident que la valeur du flux qui traverse cette spire dépend de la position qu'elle occupe dans le champ. En suppo-

sant que, pour une cause quelconque, ce flux vienne à varier, soit en augmentant, soit en diminuant, l'expérience prouve que, comme conséquence de cette variation, un courant électrique prend naissance dans la spire. Ce courant est appelé *courant induit*; l'on donne le nom d'*induit* au circuit dans lequel se développe ce courant et le nom d'*inducteur* au système qui produit le champ magnétique.

Pour exprimer le phénomène d'une manière précise, on peut dire que *la variation du flux traversant une spire donne naissance à une force électromotrice induite* et, si le circuit dans lequel se produit cette force électromotrice est fermé, il s'établit un courant électrique soumis aux règles de la loi d'Ohm. Il ne faut pas oublier que la force électromotrice induite dans la spire S est développée dans le conducteur toutes les fois qu'il se produit une variation du flux qui l'entoure, même dans le cas où cette spire se trouve déjà parcourue par un courant électrique.

Les variations de flux s'obtiennent, soit en déplaçant le circuit induit dans le champ inducteur, soit en rendant le champ inducteur mobile et le circuit induit fixe, soit encore en faisant varier les valeurs de l'intensité du courant qui donne naissance au champ inducteur.

Dans les dynamos et dans les moteurs électriques, la force électromotrice est due au déplacement, l'un par rapport à l'autre, de l'inducteur et de l'induit; dans les transformateurs, on applique le procédé qui consiste à produire une force électromotrice à l'aide de variations de flux obtenues par des variations d'intensité du courant excitant l'inducteur.

Les forces électromotrices induites sont la conséquence des variations de flux et doivent, par suite, avoir des durées égales à celles des variations qui les produisent; c'est ce que l'expérience confirme. Si le flux ne varie pas, aucune force électromotrice ne peut se produire dans le circuit, même lorsqu'il est mis en mouvement.

Il y a lieu maintenant de considérer les valeurs de la force électromotrice ainsi produite par induction. Il est assez logique

d'admettre que si, dans une première expérience, on fait varier le flux traversant la spire de 5000 unités en 1 centième de seconde, tandis que, dans une seconde expérience, ce flux varie, dans le même laps de temps, de 10000 unités, la force électromotrice induite, dans le second cas, doit avoir une valeur double. D'autre part, si dans la seconde expérience la variation de flux s'effectue dans un temps deux fois plus considérable, soit 2 centièmes de seconde, on comprend que la force électromotrice induite ait la même valeur que dans la première expérience.

On peut en conclure que *la valeur d'une force électromotrice induite est directement proportionnelle à la valeur des variations de flux et inversement proportionnelle au temps que ces variations de flux mettent pour se produire.*

De plus, si à côté de la spire S on en place une deuxième, cette deuxième spire devient le siège des mêmes phénomènes et la force électromotrice induite dans cette spire est de même sens que celle qui est induite dans la première. En reliant les deux spires en tension, il se développe, dans le circuit ainsi constitué, pendant le temps d'une variation de flux, une force électromotrice dont la valeur est deux fois plus grande ; avec trois spires cette valeur sera trois fois plus grande et ainsi de suite.

On dispose donc de trois procédés pour obtenir des forces électromotrices de valeurs de plus en plus élevées :

1° L'utilisation d'un champ magnétique plus intense afin d'obtenir de plus grandes variations de flux ;

2° La production de variations de flux en un temps plus court, autrement dit augmentation du nombre de ces variations par unité de temps, en imprimant, par exemple, une plus grande vitesse de déplacement à l'organe mobile de la dynamo ;

3° Augmentation du nombre de spires induites reliées en tension.

Il y a lieu toutefois de remarquer que, dans la pratique, ces divers procédés sont limités. C'est ainsi que, pour un poids donné de métal magnétique (fer, fonte ou acier coulé), on ne peut dépasser une certaine valeur de flux, car cette valeur a

pour limite la saturation magnétique du métal. En ce qui concerne la vitesse angulaire, les effets de la force centrifuge imposent également une limite et c'est pourquoi, dans les dynamos, il n'est pas possible de dépasser une vitesse tangentielle de 40 à 50 mètres par seconde. Enfin, il semble qu'il est possible d'augmenter, autant qu'on le veut, le nombre de spires de l'induit, puisque, avec un poids donné de cuivre, on peut, en diminuant la section du fil, obtenir le nombre de spires que l'on désire; mais il ne faut pas perdre de vue qu'en augmentant ainsi la valeur de la force électromotrice totale, on augmente également la résistance du circuit et que, par suite, on diminue l'intensité du courant; par conséquent, l'augmentation du nombre de spires au delà d'une certaine limite peut quelquefois réduire la quantité d'énergie électrique utilisable fournie par la dynamo.

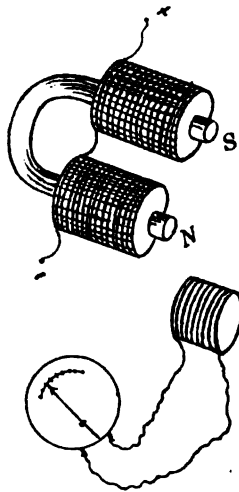


FIG. 17.

C'est aux constructeurs qu'il appartient de calculer les proportions à donner aux divers organes pour réaliser un type de dynamo déterminé et il suffit ici de donner simplement les renseignements qui précèdent.

Les phénomènes qui viennent d'être exposés peuvent être facilement contrôlés par l'expérience, si l'on a à sa disposition un galvanomètre suffisamment sensible, une bobine de fil bien isolé et un aimant ou mieux un électro-aimant.

En reliant la bobine au galvanomètre, à l'aide de deux conducteurs souples, si l'on vient à approcher rapidement cette bobine tout près du pôle Nord de l'électro-aimant parcouru par un courant (*fig. 17*), il se produit une augmentation de flux dans cette bobine et l'on observe une déviation de l'aiguille du galvanomètre, par exemple vers la droite. Dès que la bobine cesse d'être en mouvement, l'aiguille revient au zéro. En éloignant ensuite

la bobine du pôle Nord de l'électro-aimant pour la ramener dans sa position primitive, il se produit une diminution de flux dans la bobine et l'aiguille du galvanomètre dévie de nouveau, mais en sens inverse, par conséquent vers la gauche. En répétant cette expérience avec le pôle Sud de l'électro-aimant, au lieu du pôle Nord, on obtient des résultats identiques, mais le sens des déviations successives de l'aiguille du galvanomètre est inversé, c'est-à-dire que, lors de l'augmentation du flux, on obtient une déviation vers la gauche et, pendant la diminution du flux, une déviation vers la droite. Ces résultats sont donc les suivants :

Augmentation du flux positif...	déviation à droite.
Diminution du flux positif.....	— à gauche.
Augmentation du flux négatif..	— à gauche.
Diminution du flux négatif.....	— à droite.

Si, maintenant, la bobine étant rapprochée du pôle Nord de l'électro-aimant, on l'amène rapidement en présence du pôle Sud, on obtient toujours une déviation dans un sens (à gauche), parce que, dans la première moitié du mouvement imprimé à la bobine, on a produit une diminution du flux positif (entrant dans la bobine) et que,

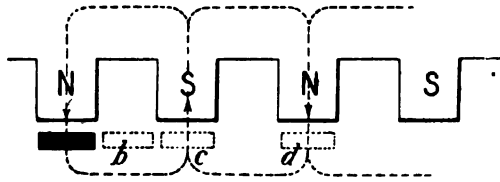


FIG. 18.

dans la seconde moitié de ce mouvement, il y a augmentation du flux négatif (sortant de la bobine). Par contre, on obtient une déviation toujours de sens inverse, c'est-à-dire vers la droite, en amenant rapidement la bobine du pôle Sud vers le pôle Nord. C'est pour cela que, si l'on vient à déplacer une bobine devant une série de pôles alternativement Nord et Sud (*fig. 18*), on donne naissance, en allant de N vers S, à une force électromotrice induite d'un certain sens et, en allant de S vers N, à une force

électromotrice induite de sens contraire. Cette force électromotrice passe par une valeur nulle toutes les fois que la bobine se trouve exactement en présence de l'un des pôles, c'est-à-dire au moment où le flux auquel elle est soumise atteint sa valeur maximum. Dans son mouvement de a vers b , il y a diminution du flux positif dans la bobine et, de b vers c , augmentation du flux négatif. Ce phénomène est dû aux variations simultanées de la valeur et du sens de ce flux, mais toutefois sans changer la direction du mouvement. La bobine, dans son trajet de c vers d , est le siège d'un phénomène inverse. A partir du point d , les phénomènes qui se manifestent dans la bobine, c'est-à-dire production d'une force électromotrice tantôt dans un sens, tantôt de sens inverse, se reproduisent tant que le mouvement continue. Si les divers pôles Nord et Sud sont disposés alternativement sur le pourtour d'une circonférence et que la bobine mobile soit animée d'un mouvement de rotation la faisant passer successivement devant chacun des pôles, il y a production d'une force électromotrice induite dans cette bobine, tantôt dans un sens, tantôt en sens inverse, et le phénomène se reproduit à chaque intervalle de temps correspondant au passage de la bobine de a en d , distance qui sépare deux pôles de même nom. D'après ce qui a été dit précédemment, on appelle *période du phénomène* le temps que met la bobine pour effectuer son trajet de a en d . La force électromotrice développée dans la bobine varie, par conséquent, périodiquement de sens et est dite *force électromotrice alternative*.

Il convient de remarquer qu'il n'est pas nécessaire que les pôles soient alternativement de noms contraires. Si tous ont la même polarité (*fig. 19*), il y a seulement diminution et augmentation du flux toujours dans une direction déterminée; mais cela suffit pour donner naissance à une force électromotrice alternative. De a en b , cette force électromotrice a un sens donné et, de b en c , elle est de sens contraire. La période est la durée du mouvement de la bobine pour passer de a en c . Dans le cas où la dynamo est identique comme construc-

tion à celle où les pôles sont alternativement Nord et Sud, la période est réduite de moitié, si la vitesse angulaire de l'induit reste la même, ou, en d'autres termes, la *fréquence* est deux fois plus grande. Si l'on veut obtenir la même fréquence dans les deux cas, il suffit, avec la dynamo à pôles de même nom, de réduire de moitié la vitesse angulaire de l'organe mobile. Ce dispositif a été souvent utilisé par les constructeurs et l'est encore quelquefois dans certains cas, par exemple lorsqu'on veut, avec une dynamo ayant une faible vitesse angulaire, réa-

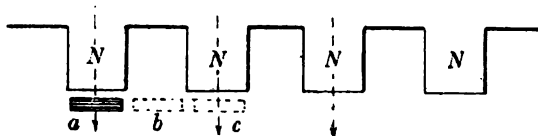


FIG. 19.

liser une fréquence déterminée et cela sans exagérer la vitesse tangentielle de l'organe mobile, tout en donnant à l'intervalle qui sépare deux pôles consécutifs des dimensions telles qu'il soit possible de les développer convenablement.

18. La loi de Lenz et son interprétation. — Si on cherche à déterminer expérimentalement le sens de la déviation de l'aiguille d'un galvanomètre sous l'action d'un courant de sens donné induit dans une bobine, on constate facilement que le sens de ce courant induit est toujours tel qu'il s'oppose à la variation du flux qui lui a donné naissance. En d'autres termes, s'il est dû à une augmentation du flux, le courant induit produit un flux de sens inverse à celui qui agit sur la bobine et s'oppose à l'augmentation du flux dans l'inducteur ; si, au contraire, le courant induit est la conséquence d'une diminution du flux, le flux dû à ce courant est de même sens et, dans ce cas, il s'oppose à la diminution du flux inducteur ; s'il était de sens inverse, il aurait pour effet de faire diminuer le flux inducteur encore plus rapidement. Tous ces faits sont résumés dans la loi de Lenz, qui est ainsi énoncée :

Lorsqu'un circuit se déplace dans un champ magnétique de manière que le flux auquel il est soumis varie constamment, le sens du courant induit est tel que les forces électromagnétiques exercées par le champ sur le circuit tendent à s'opposer au mouvement de ce dernier.

Ainsi formulée, cette loi peut paraître difficile à comprendre pour ceux qui ne sont pas familiarisés avec les études électrotechniques ; mais il suffit de donner ici quelques explications assez simples pour montrer que cette loi présente une grande analogie avec celle qui établit que tout système tend toujours à s'opposer aux déformations que l'on veut lui faire subir.

L'étude des phénomènes qui se produisent lorsqu'on approche ou qu'on éloigne une bobine du pôle d'un électro-aimant, du pôle Nord par exemple, permet d'expliquer clairement la loi de Lenz. Ce pôle est produit par un courant continu qui circule dans les spires en sens inverse du mouvement des aiguilles d'une montre.

On a déjà constaté que, pendant tout le temps que la bobine est en mouvement pour se rapprocher de ce pôle, elle est le siège d'un courant induit, courant qui est la manifestation d'une production d'énergie électrique ; il est évident que cette énergie est due à une dépense d'énergie mécanique correspondante, conséquence du principe de la conservation de l'énergie. Si l'on dépense de l'énergie mécanique pour approcher la bobine du pôle de l'électro-aimant afin d'obtenir la production d'un courant induit, il faut nécessairement vaincre une force résistante, sans cela il ne pourrait y avoir dépense d'énergie mécanique. Or l'expérience prouve que cette force résistante est la répulsion qui s'exerce entre le pôle Nord inducteur et entre le pôle Nord que le courant induit développe sur la face de la bobine qui se trouve en présence de l'inducteur. C'est pour cela qu'il est dit que *le courant induit a un sens tel que les forces électromagnétiques qui s'exercent entre le champ et le circuit s'opposent au mouvement* ; le phénomène inverse ne saurait se produire, parce qu'il serait en opposition absolue avec la loi de la conservation de l'énergie.

Des phénomènes analogues se produisent également lorsqu'on éloigne la bobine du pôle de l'électro-aimant. On sait que le courant induit qui est développé dans la bobine induite est de sens inverse à celui qui se produit dans le cas où l'on approche la bobine ; donc il se développe un pôle Sud sur la face de la bobine qui se trouve en regard du pôle Nord de l'inducteur et, par conséquent, il y a attraction ; c'est justement cette attraction qui constitue la force résistante qu'il faut vaincre et l'énergie mécanique dépensée est équivalente à l'énergie électrique obtenue.

Il y a encore une autre expérience qui ne laisse plus aucun doute sur le sens des courants induits dans ces conditions.

On monte une petite bobine à l'extrémité inférieure d'une tige de bois, dont l'extrémité supérieure est fixée de manière à pouvoir osciller librement, comme un pendule, dans un plan correspondant à celui des spires. Cela fait, on place un électro-aimant dans une position verticale telle que la bobine, dans son mouvement d'oscillation, passe entre les deux pôles de cet électro-aimant.

On laisse le circuit de la petite bobine ouvert et on la met en mouvement ; par suite de ce mouvement, il se développe une force électromotrice induite, mais il n'y a pas production d'un courant, le circuit étant ouvert ; par conséquent, il ne peut y avoir production d'énergie électrique et, dans ces conditions, la dépense de travail mécanique est nulle. La petite bobine continue à osciller comme si l'électro-aimant ne se trouvait pas sur son passage et elle s'arrête au bout d'un certain temps par la seule action de la résistance de l'air et du frottement au point de suspension.

Si, au contraire, on ferme le circuit de la petite bobine sur lui-même, pour que, sous l'action de la force électromotrice induite, un courant puisse se développer, donnant lieu ainsi à une production d'énergie électrique, le phénomène change complètement d'aspect. En donnant une assez forte impulsion à la bobine mobile, on constate que son mouvement se ralentit presque brusquement, comme cela se produirait si on la faisait

osciller dans un milieu visqueux, et il ne se produit plus ensuite la moindre oscillation. C'est là la meilleure preuve que le courant induit a pour effet de s'opposer à la cause qui lui donne naissance.

Il est intéressant de rechercher maintenant comment se transforme l'énergie électrique due au travail mécanique absorbé. Dans les expériences précédentes, cette énergie électrique était partiellement employée, d'une part, à vaincre l'inertie de l'aiguille du galvanomètre pour la faire dévier et, d'autre part, à produire un échauffement, c'est-à-dire qu'elle était en partie transformée en énergie thermique. Dans l'expérience actuelle, où il n'y a pas de galvanomètre dans le circuit, cette énergie électrique est totalement transformée en énergie thermique. Du reste, la simple réflexion, sans avoir recours à l'expérience, conduit à la même conclusion, si l'on tient compte de la loi de la conservation de l'énergie.

La loi de Lenz n'est qu'un cas particulier d'une loi générale qui établit que tout phénomène tend à s'opposer à la cause qui le produit. Le frottement, cette force bien connue, a un effet tel qu'il s'oppose toujours au mouvement qui le produit. Les mécaniciens savent bien, par expérience, qu'il est indispensable de réduire les frottements au minimum en graissant abondamment les surfaces frottantes et ils savent aussi qu'en négligeant cette précaution, il peut se produire de graves accidents, le travail de frottement pouvant alors atteindre une valeur telle qu'un moteur en marche peut être arrêté. Le fonctionnement d'un frein est fondé sur ce fait que le frottement, dû au fonctionnement d'un moteur, est une force agissant en sens inverse du mouvement et pouvant agir d'une façon plus ou moins énergique.

Quand on tire sur un ressort en boudin pour l'allonger, on développe une force élastique qui primitivement n'existait pas; cette force résiste à l'allongement et c'est pourquoi il faut dépenser de l'énergie mécanique pour produire cet allongement. On peut en dire autant dans le cas de la compression.

Si l'on vient à comprimer brusquement de l'air, cet air

s'échauffe et, par suite, tend à augmenter de volume, ce qui montre qu'il s'oppose à la compression que l'on veut exercer sur lui ; de même, si on détend brusquement de l'air comprimé, cet air se refroidit pour les mêmes raisons.

Les exemples pourraient être multipliés à l'infini, mais ceux qui ont été cités suffisent amplement. L'énergie ne peut se manifester suivant des lois différentes, qu'il s'agisse d'énergie mécanique ou d'énergie électrique, parce que tout est parfaitement harmonisé dans la nature et que tous les phénomènes qui se manifestent à nos sens sont soumis à des lois universelles, très simples et rationnelles.

19. Sens des courants induits. — Dans la pratique, pour reconnaître rapidement *le sens d'un courant induit*, il suffit de se rappeler que *son sens est tel dans la spire la plus rapprochée du pôle inducteur qu'il s'y développe un pôle de même nom lorsqu'on approche la bobine et un pôle de nom contraire lorsqu'on l'éloigne.*

Dans l'étude du courant alternatif, cette règle est suffisante ; mais, dans l'étude des dynamos à courant continu, il en existe une autre qui, dans certains cas, convient mieux.

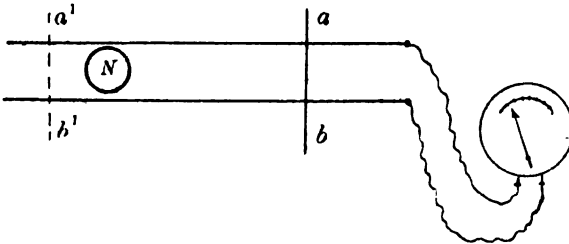


FIG. 20.

Les variations du flux dans un circuit (*fig. 20*) peuvent être obtenues en déplaçant le conducteur *ab* dans la direction *a'b'* et transversalement par rapport à deux fils métalliques parallèles, le flux provenant d'un pôle Nord placé en dessous. Fleming a donné la règle suivante : *en ouvrant les trois premiers*

doigts de la main droite (fig. 21) placés perpendiculairement l'un par rapport à l'autre, le pouce indique la direction du

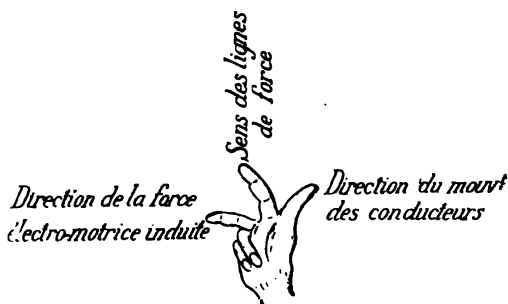


FIG. 21.

mouvement du conducteur ab , l'index la direction des lignes de force et le médium le sens du courant induit. Comme moyen mnémotechnique pour retrouver l'ordre dans lequel les trois gran-

deurs doivent être indiquées, il suffit de se rappeler que l'on peut les représenter par la lettre m (mouvement), l (lignes de force) et f (force électromotrice) et que l'ordre dans lequel se présentent ces lettres est l'inverse de celui dans lequel elles se présentent dans le mot *Fleming*.

20. Courants de Foucault. — On n'a jusqu'ici examiné que les phénomènes d'induction qui se produisent dans un conducteur rectiligne ou dans les spires d'une bobine. On conçoit facilement que les phénomènes d'induction puissent se produire dans une masse conductrice de forme quelconque, mais il est alors plus difficile et moins simple de se rendre compte de la marche des courants, parce qu'ils se développent dans la masse même en produisant de l'énergie thermique et, par conséquent, un échauffement. Dans tous les cas, ces courants doivent satisfaire à la loi de Lenz, ainsi que le prouvent les expériences suivantes :

La tige de bois, munie d'une petite bobine à son extrémité et suspendue comme un pendule (§ 18), peut être utilisée de nouveau pour effectuer une expérience démonstrative ; il suffit de remplacer la bobine par un secteur massif de cuivre ou d'aluminium découpé dans une planche du métal. En faisant osciller ce secteur entre les pôles d'un puissant électro-aimant, on constate que, dès que l'électro-aimant est excité, il influe for-

tement sur le mouvement du pendule et que les oscillations cessent immédiatement. Ce sont les courants induits dans la masse de métal qui arrêtent le mouvement. C'est aussi pour la même cause qu'il est impossible, avec un marteau de cuivre, de frapper un fort coup sur le pôle d'un gros électro-aimant excité par un courant; de même on ne peut frapper un coup sec sur le même pôle avec une lame de cuivre.

En recouvrant le secteur de cuivre du pendule d'une couche de cire et en le faisant mouvoir à la main entre les deux pôles de l'électro-aimant, on constate que la cire entre peu à peu en fusion par suite du développement de chaleur dû à la transformation de l'énergie électrique mise en jeu par les courants induits.

Les actions électromagnétiques produisent donc comme une sorte de frottement qui s'oppose au mouvement du conducteur mobile et cet effet est d'autant plus accentué que la vitesse est plus considérable.

On sait qu'un corps en mouvement est susceptible d'entraîner par frottement un autre corps en le déplaçant dans la même direction, mais avec une vitesse moindre (à moins que le frottement ne devienne tellement considérable qu'il produise une sorte d'accouplement à friction et, dans ce cas, la vitesse du corps entraîné est égale à celle du corps qui l'entraîne); de même un aimant placé horizontalement et animé d'un mouvement de rotation peut faire tourner un disque de cuivre monté sur pivot et librement suspendu au-dessus de lui. Les courants induits, tendant à s'opposer au mouvement de rotation de l'aimant, exercent leur action sur le disque qu'ils font tourner; c'est sur ce principe qu'est fondée la construction de certains types, très employés, de moteurs à courant alternatif. On remarque aussi que le disque de cuivre ne peut jamais atteindre la même vitesse que celle que l'on imprime à l'aimant et que, dans le cas actuel, il n'est pas possible que le disque de cuivre prenne une vitesse égale à celle de l'aimant, car ces deux organes ne seraient plus alors animés d'un mouvement relatif l'un par rapport à l'autre; si ces

deux organes se déplaçaient simultanément, il ne se produirait pas de variations de flux et, par suite, pas de courants induits. Le mouvement de rotation du disque doit donc être plus lent que celui de l'aimant.

21. Phénomènes d'induction dans les conducteurs protégés par une masse de fer et courants de Foucault qui s'y produisent. — En effectuant l'expérience disposée comme le montre la figure 20, mais en protégeant le conducteur *ab* des actions magnétiques à l'aide d'un tube de fer, on constate que le galvanomètre dévie de la même manière, ce qui prouve que, malgré l'écran magnétique, le conducteur est toujours le siège d'une force électromotrice induite. En déplaçant le système, le flux développé par le tube de fer se meut avec lui et avec le conducteur; il n'y a donc pas de mouvement relatif entre eux; il en est autrement du conducteur qui, bien qu'entouré par le tube, se déplace par rapport au champ inducteur immobile, d'où production d'une force électromotrice. Il est évident que si l'on déplaçait le conducteur à l'intérieur du tube de fer, sans faire mouvoir l'ensemble par rapport au champ inducteur, il ne se développerait aucune force électromotrice.

Le procédé employé par presque tous les constructeurs et qui consiste à placer les conducteurs induits dans des trous pratiqués autour de la périphérie d'un noyau de fer est une excellente disposition, parce que, tout en n'empêchant pas les phénomènes d'induction électromagnétique de se produire, on donne aux induits ainsi établis la rigidité mécanique nécessaire.

L'emploi du fer est justifié par la nécessité d'établir un circuit magnétique d'aussi faible réluctance que possible, afin d'obtenir un flux d'induction maximum avec un nombre minimum d'ampères-tours sur l'inducteur. Pourtant cette masse de fer n'est pas complètement exempte de phénomènes d'induction électromagnétique lorsqu'elle coupe les lignes de force du champ magnétique; il se produit alors des courants de

Foucault très énergiques, mais on prend la précaution de les réduire à leur valeur minimum en constituant les noyaux d'induit, non avec une masse de fer, mais bien avec des paquets de tôles très minces, isolées les unes des autres, comme on le fait, du reste, pour les dynamos à courant continu.

CHAPITRE III

PHÉNOMÈNES D'INDUCTION MUTUELLE ET DE SELF-INDUCTION

22. Induction mutuelle et self-induction. — Dans le chapitre précédent, en parlant des phénomènes d'induction, on les a attribués à une cause unique, les variations du flux. Ce mode d'explication doit être conservé, car il est le plus rationnel et le plus simple.

Il est utile maintenant de passer à d'autres considérations. On prend un noyau de fer, feuilleté ou non, ayant la forme

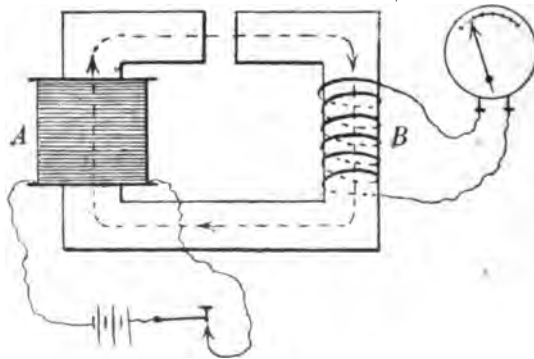


FIG. 22.

indiquée sur la figure 22 et muni sur un de ses côtés verticaux d'une bobine ayant un grand nombre de spires et dont l'enroulement est relié à quelques éléments d'accumulateurs, un

interrupteur permettant d'envoyer ou d'interrompre le courant dans cette bobine. Lorsqu'on fait passer le courant, un flux magnétique traverse le noyau, flux ayant une direction qui dépend du sens du courant dans la bobine. On place d'abord une seule spire de fil sur l'autre branche du noyau et on la relie à un galvanomètre. En manœuvrant l'interrupteur, on développe ou on supprime le flux dans le noyau et, à chaque manœuvre, il se produit un courant induit dans la spire, dans un sens lorsqu'on ferme le circuit de la bobine, en sens inverse lorsqu'on l'ouvre. Si on enroule deux fois le fil autour du noyau de manière à avoir deux spires, on constate que le galvanomètre dévie plus fortement et, si ce dernier est suffisamment sensible, on peut facilement reconnaître qu'avec deux spires la déviation de l'aiguille est deux fois plus grande qu'avec une seule, qu'avec trois elle est triple et ainsi de suite. Cela est dû à ce fait que les forces électromotrices, induites dans chacune des spires à l'ouverture et à la fermeture du circuit, s'ajoutent.

Ce phénomène d'induction, dû en réalité à l'action d'une bobine parcourue par un courant sur une autre bobine, est appelé *induction mutuelle*. La valeur de la force électromotrice induite par la première bobine dans la seconde dépend de la valeur du flux qu'elle développe et du nombre de tours de la seconde.

Mais ici se pose une question importante : puisque le flux, en s'établissant, produit une certaine force électromotrice dans chaque spire de la bobine B, il s'agit de savoir si le phénomène ne se produit pas également dans la bobine A. Or le flux auquel est soumise la bobine B agit d'une manière identique et dans le même laps de temps sur la bobine A ; en raisonnant sans idée préconçue et en se fondant sur les seules notions déjà acquises, on comprend qu'il doive en être ainsi. Le fait qu'un courant, fourni par les accumulateurs, circule dans la bobine A, ne peut en aucune manière empêcher que la force électromotrice due au flux ne produise également son action dans la bobine B. D'après la loi d'Ohm, puisqu'il s'agit d'un circuit fermé, cette

action s'exerce jusqu'au moment où le flux prend une valeur constante. On verra dans ce qui suit que cet effet influe d'une manière appréciable sur le temps que mettent le courant et le flux pour passer d'une valeur nulle à une valeur constante.

On sait que n'importe quel phénomène naturel met toujours un certain temps pour se produire; ce temps est plus ou moins court, mais il n'existe pas dans la nature de phénomène se produisant instantanément. On sait qu'on ne peut mettre un corps instantanément en mouvement et qu'avant qu'il atteigne la vitesse voulue il est indispensable que ce corps passe par toutes les valeurs comprises entre le repos et la vitesse de régime; pour arriver à ce résultat, il s'écoule un certain laps de temps. C'est pour ce motif que, si l'on vient à ouvrir brusquement le robinet d'une conduite d'eau sous pression, on constate qu'il faut un temps appréciable pour que le jet atteigne son maximum d'intensité.

Tous ces phénomènes sont dus à l'inertie des corps, propriété dont il faut tenir compte à cause des effets qui en dérivent. C'est pourquoi, lorsque l'on veut modifier l'état de repos ou de mouvement d'un corps, la force d'inertie agit toujours pour s'opposer à la modification que l'on veut apporter à l'état de repos ou de mouvement de ce corps. Ainsi considérée, la loi de l'inertie n'est qu'un cas particulier de la loi générale énoncée précédemment à propos de la loi de Lenz, loi en vertu de laquelle tout phénomène naturel tend à s'opposer à la cause qui le produit.

Le courant électrique, étant un phénomène naturel, doit évidemment satisfaire à cette loi et l'expérience le prouve. Pour que le courant s'établisse dans un conducteur, il faut un certain temps pendant lequel le courant doit vaincre la force qui s'oppose à son établissement, force qui dépend de la nature du circuit. Cela s'accorde parfaitement avec tous les autres phénomènes naturels analogues. Ces forces résistantes, qui s'opposent à l'établissement du courant, ne sont autre chose que les forces électromotrices d'induction qui se développent à la fois dans la bobine A et dans la bobine B. Pendant la pé-

riode de temps où le courant augmente d'intensité (augmentation du flux), ces forces électromotrices sont de sens opposé à celles qui leur donnent naissance et s'opposent à l'établissement du flux ; mais, à mesure que l'intensité du courant et la valeur du flux augmentent, les variations de ce dernier vont en diminuant de plus en plus, jusqu'au moment où elles deviennent nulles, et alors, toute réaction cessant, le courant atteint son intensité normale donnée par la relation :

$$I = \frac{E}{R},$$

dans laquelle E représente la force électromotrice agissante et R la résistance ohmique du circuit comprenant la bobine A et les accumulateurs.

En supposant que la réaction due au flux produit par le courant sur le courant lui-même demande $1/500^{\circ}$ de seconde pour que le courant atteigne son intensité normale, temps pendant lequel l'intensité passe d'une valeur nulle (moment de la fermeture du circuit) à sa valeur normale (flux constant), on pourrait croire que, pendant cette période, la loi d'Ohm ne se vérifie pas, puisque l'intensité du courant a toujours une valeur inférieure à

$$I = \frac{E}{R}.$$

Cela ne serait pas exact, car une loi, comme la loi d'Ohm, doit toujours se vérifier et il convient de rappeler ici que cette loi d'Ohm précise que : *L'intensité du courant dans un circuit est égale à la somme des forces électromotrices agissantes divisée par la résistance de ce circuit.* Donc, si l'intensité du courant varie, la loi d'Ohm est toujours applicable à chaque instant de la variation.

Dans l'exemple cité, le courant ne prend son régime normal qu'après $1/500^{\circ}$ de seconde et la valeur de son intensité est donnée par la relation :

$$\frac{E - e}{R},$$

dans laquelle e représente la valeur de la force électromotrice produite dans la bobine A par la variation du flux; au début, cette force électromotrice a sa plus grande valeur et va graduellement en décroissant pour devenir nulle au moment (après $1/500^e$ de seconde) où l'intensité du courant atteint sa valeur normale.

L'existence dans un circuit d'une force contre-électromotrice au moment de sa fermeture, c'est-à-dire au moment où le courant tend à s'établir, peut être expliquée de plusieurs manières, explications que l'on aura l'occasion d'employer fréquemment. Puisque cette force contre-électromotrice s'oppose à l'établissement du courant principal, on peut dire que tout se passe comme si, dans la période de temps que met le courant pour atteindre son intensité normale, la bobine ou, plus exactement, le circuit présentait une *résistance apparente* supérieure à la résistance ohmique réelle. On peut dire aussi que *le flux produit par le courant présente une sorte d'inertie*, ce qui fait qu'il faut un certain temps au courant pour atteindre son intensité normale. Il est pourtant préférable d'expliquer le phénomène par l'hypothèse de la résistance apparente, qui donne une idée plus claire de la manière dont il se produit.

Le phénomène de la production d'une force électromotrice d'induction dans un circuit fermé parcouru par un courant, chaque fois que l'intensité de ce courant subit des variations, est appelé *self-induction* (induction d'un circuit par lui-même), afin de distinguer cette sorte d'induction de l'induction mutuelle.

On comprend facilement que cette force électromotrice, due à la self-induction, ait une valeur d'autant plus élevée que le flux produit par un courant d'intensité donnée a une valeur plus grande, car ce flux, comme on le sait, augmente avec le nombre de spires de la bobine et varie suivant la nature et les dimensions du circuit magnétique. Cette force électromotrice produite par la self-induction a une valeur minimum dans un conducteur rectiligne tendu dans l'air, car, dans ce cas, le champ magnétique produit par le courant est très faible.

Tout ce qui précède s'applique au cas où la bobine B a son circuit ouvert ou bien n'existe pas. Mais, si cette bobine est fermée sur une résistance, elle est parcourue par un courant pendant tout le temps que l'intensité du courant, dans la bobine A, met pour atteindre sa valeur normale. Dans ces conditions, le courant de la bobine B donne aussi naissance à un flux qui agit dans le même temps que celui produit par le courant circulant dans la bobine A. Il convient maintenant de rechercher si le flux produit en B renforce ou affaiblit celui qui est produit en A. Suivant en cela la loi naturelle, le flux de B tend à affaiblir le flux de A qui lui donne naissance, lorsque ce dernier se trouve dans la période d'accroissement; dans ces conditions, le flux total résultant a une valeur minimum, les effets de la self-induction sont moins sensibles et il s'ensuit que le courant, dans la bobine A, atteint alors plus rapidement son intensité normale.

Si l'on examine maintenant les phénomènes qui se produisent lorsqu'on vient à ouvrir le circuit, on constate que le flux disparaît et il se produit alors dans toutes les spires de la bobine B, une nouvelle force électromotrice, mais de sens inverse à celle qui s'était développée précédemment. On sait aussi maintenant qu'une force électromotrice prend également naissance dans la bobine A et que cette force électromotrice est de même sens que la force électromotrice principale E , comme l'indique la loi de Lenz. Au point d'ouverture du circuit et à l'instant où il est interrompu, le courant tend à continuer et à passer à travers l'air, d'où production d'une étincelle; si le circuit présente une grande self-induction, le courant induit produit par la cessation du flux s'ajoute à celui qui circule dans la bobine et, dans ce cas, il y a production d'une étincelle très forte qui prouve que la self-induction est considérable. Ce phénomène est dû à ce que la variation de flux étant la même que précédemment, le temps pendant lequel se produit cette variation est beaucoup plus petit, ce qui a pour effet de donner à la force électromotrice une valeur moyenne beaucoup plus considérable. C'est ce que l'on peut

prouver à l'aide du galvanomètre relié à la bobine B, car on constate qu'il se produit une plus forte déviation dans le second cas (rupture du circuit) que dans le premier (fermeture du circuit).

Lorsque la bobine B comporte un grand nombre de spires, si l'on touche avec la main les extrémités des conducteurs, préalablement séparés du galvanomètre, on peut facilement constater la différence qui existe entre la valeur de la force électromotrice induite au moment de la fermeture du circuit et celle qui se produit au moment de la rupture de ce même circuit : à la fermeture on ne perçoit rien, tandis qu'à l'ouverture on reçoit dans les doigts une petite secousse.

Il faut remarquer que, par des considérations identiques à celles qui ont été déjà développées, on peut admettre que la présence dans le circuit d'une seconde bobine fermée sur une résistance et placée sur le parcours du flux a pour effet de retarder la cessation du courant au moment où l'on interrompt le premier circuit; la seconde bobine exerce maintenant une action contraire de celle qui avait lieu lors de la fermeture du circuit, puisque le phénomène se produit en sens inverse, et la force électromotrice induite alors dans la bobine A a, par suite, une faible valeur.

En résumé, la présence dans le circuit d'une seconde bobine soumise à l'induction mutuelle a pour effet d'affaiblir la self-induction de la première; cette action est d'autant plus sensible que la résistance de la seconde bobine, pour un nombre donné de spires, est plus faible, parce qu'alors l'intensité du courant qui la parcourt est d'autant plus grande ainsi que le flux de sens opposé auquel ce courant donne naissance.

Il suffit donc de retenir ce fait important que l'action d'une induction mutuelle a pour effet d'affaiblir la self-induction apparente d'une bobine. On empêche ainsi les effets nuisibles de la self-induction, mais toutefois avec une dépense plus grande d'énergie. Dans le cas du courant alternatif, par exemple, si l'on veut simplement atténuer les effets de la self-induction dans un circuit, il suffit d'installer à ses extrémités un con-

densateur de capacité appropriée, ainsi qu'on le verra dans le chapitre VII. En ce qui concerne le temps que met le courant pour atteindre son intensité normale dans un circuit, alors qu'il se trouve un autre circuit en présence, il faut être très prudent pour évaluer cette durée et il est utile, à ce sujet, de consulter les explications données dans le paragraphe 23.

L'existence de la force électromotrice de self-induction peut être mise en évidence par des expériences autres que celles qui ont été décrites plus haut et encore plus probantes, par exemple la suivante :

Soient A et B (*fig. 23*) les bornes d'une dynamo à courant continu (l'excitatrice d'un alternateur, par exemple). On constitue un circuit comprenant un interrupteur, une lampe et une résistance ohmique R (un rhéostat d'excitation, par exemple); aux bornes de la lampe on met en dérivation un électro-aimant dont l'enroulement a une résistance suffisante pour limiter convenablement la valeur de l'intensité du courant qui y passe par rapport à la tension normale aux bornes de la lampe (on peut utiliser à cet effet le circuit primaire d'un petit transformateur, dont le circuit secondaire reste ouvert). Cela fait, on règle la résistance R pour que la lampe soit à peine rouge en régime constant. On observe alors qu'au moment de la fermeture du circuit, aussi bien qu'à son ouverture, la lampe est portée à l'incandescence pendant un instant très court. Ce phénomène doit nécessairement se produire, parce qu'au moment où le circuit est fermé, le courant trouve un grand obstacle pour passer dans l'électro-aimant à cause de la force contre-électromotrice qui s'y développe et il passe alors de préférence dans la lampe. Au moment de l'ouverture du circuit, au contraire, la force électromotrice induite donne alors naissance à un courant de décharge

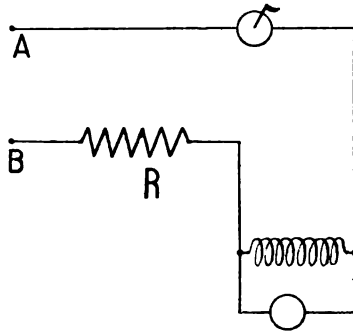


Fig. 23.

s'établissant entre la bobine et la lampe, qui est alors portée à l'incandescence. En supprimant la résistance R , l'intensité lumineuse de la lampe diminue au moment de la fermeture du circuit, parce que la lampe se trouve en dérivation entre deux points où la tension est la même. Avec la résistance, la tension utile aux bornes de la lampe est d'autant plus grande que la chute de potentiel due à la résistance est plus faible; cette chute de potentiel est très faible au début, parce que, à cause de la self-induction, il ne passe d'abord qu'un courant d'intensité suffisante pour alimenter la lampe, puis le courant passe dans la bobine et alors, la chute de potentiel devenant plus grande, l'intensité lumineuse de la lampe diminue. On peut facilement réaliser cette expérience avec une petite lampe de 20 à 25 volts.

Si la self-induction est due au circuit primaire d'un transformateur, on peut facilement constater que cette self-induction est considérablement affaiblie par les effets de l'induction mutuelle lorsqu'on vient à mettre l'enroulement secondaire en court-circuit.

23. Énergie dépensée et récupérée par les phénomènes d'induction. — Si, par suite de la cessation du flux dans un circuit, il y a une certaine quantité d'énergie mise en mouvement (incandescence de la lampe), il est utile de savoir d'où elle provient. Cette énergie se trouve à l'état latent dans le champ magnétique; quoiqu'un champ magnétique puisse être maintenu sans dépense d'énergie (§ 17), il ne faut pas perdre de vue que, pour donner naissance à ce champ magnétique, il a fallu dépenser une certaine quantité d'énergie; c'est cette énergie qui est restituée, sous forme de courant induit, au moment de la cessation du flux, c'est-à-dire lorsque le champ magnétique disparaît.

Ce phénomène est en parfaite harmonie avec tant d'autres qui se passent sous nos yeux journallement. On sait, par exemple, qu'un lourd volant bien centré sur son axe (en faisant abstraction de l'énergie absorbée par les frottements aux points

de suspension et aussi par la résistance de l'air) n'exige aucune dépense d'énergie pour se maintenir en mouvement; mais la quantité d'énergie qu'il peut produire lors de l'arrêt (équivalente à sa force vive) est la même que celle qu'il a fallu dépenser pour le mettre en mouvement et lui imprimer une certaine vitesse. Cette dépense d'énergie, correspondant au travail effectué pour vaincre la force d'inertie, reste à l'état latent dans le volant; c'est justement sur ce phénomène qu'est fondé l'emploi du volant comme organe de régulation de la vitesse dans une machine.

Un exemple encore plus frappant est celui d'un ressort. Pour le maintenir allongé ou comprimé, il suffit d'un simple effort, mais, pour cela, il faut dépenser une certaine quantité d'énergie. Il s'établit une sorte d'équilibre quand la force élastique développée compense exactement la force appliquée. En abandonnant ensuite brusquement ce ressort à lui-même, l'énergie emmagasinée se dépense en vibrations et donne lieu à un développement de chaleur.

Un champ magnétique emmagasine une quantité d'énergie d'autant plus grande qu'il est plus intense et cette énergie n'est autre chose que le travail effectué par le courant pendant la période variable pour surmonter la force contre-électromotrice due à la self-induction. Cette quantité d'énergie emmagasinée reste constante tant que le courant ne subit pas de variations d'intensité. Lorsque le courant cesse, le champ magnétique disparaît en restituant, sous forme de courant induit, l'énergie qu'il avait absorbée.

Il est un fait important sur lequel il convient d'insister, c'est que l'établissement du courant exige un travail (correspondant à l'énergie accumulée dans le champ produit); or, on ne peut concevoir un travail qu'à la condition qu'il existe une force réagissante qu'il doit surmonter et, dans le cas actuel, c'est la force contre-électromotrice de self-induction, puisqu'elle est de sens opposé à la force électromotrice principale qui exerce son action tant que l'intensité du champ magnétique augmente. Par contre, lorsque l'intensité du champ magnétique diminue,

la force électromotrice développée par la self-induction est de même sens que la force électromotrice principale et elle produit un travail positif par suite de la restitution de l'énergie accumulée.

Grâce aux connaissances déjà acquises, on peut maintenant interpréter d'une autre manière les phénomènes d'induction mutuelle et de self-induction.

On prend une bobine munie de deux enroulements dont l'un est relié à une source de courant, tandis que l'autre a son circuit ouvert. Si l'on vient à interrompre le courant dans le premier circuit, le flux cesse et l'énergie accumulée dans le champ magnétique formé par ce flux est restituée dans le circuit sous forme de courant de self-induction. Mais, si on ferme le circuit du second enroulement au moment où l'on interrompt le courant dans le premier, l'énergie emmagasinée dans le champ se retrouve en partie sous forme de courant induit dans le second enroulement et, pour l'autre partie, sous forme de courant de self-induction dans le premier enroulement. On peut donc conclure de cette seconde expérience que l'action de la self-induction dans le premier enroulement est, dans ce cas, beaucoup plus faible, puisque la quantité d'énergie qui lui donne naissance est moindre que dans le cas de la première expérience.

Un phénomène analogue se produit lorsqu'on fait passer le courant dans le premier enroulement, le second ayant son circuit fermé. La source de courant est seule à fournir l'énergie et elle doit alors non seulement fournir l'énergie nécessaire à la création du champ, mais encore celle qui, par l'effet du flux même, agit sur le second enroulement, dépense d'énergie qui cesse dès que l'intensité du courant a atteint sa valeur normale.

La courbe de l'intensité (*fig. 24*) doit alors s'élever plus rapidement. En réalité, le flux de réaction qui s'oppose à l'établissement du flux principal provient en partie du courant d'induction mutuelle; par suite, l'effet de la self-induction, tendant à produire un flux contraire, est diminué. L'établissement du

courant étant ainsi favorisé, son intensité augmente plus rapidement. Il ne faut pas en conclure que la durée de la période variable du courant soit plus courte que dans le cas où les phénomènes d'induction mutuelle n'existent pas. En effet, le courant qui se développe dans la bobine B, courant de sens contraire au courant principal, augmente d'intensité pendant un certain

temps, puis diminue; pendant le temps où son intensité croît, le courant, par réaction, induit dans la bobine A une force électromotrice qui s'ajoute à la force électromotrice principale, puisqu'elle est de même sens, et

c'est pourquoi l'intensité du courant qui passe dans la bobine A augmente rapidement. Mais, lorsque l'intensité du courant induit dans la bobine B vient à diminuer, la force électromotrice induite dans la bobine A est de sens inverse à la force électromotrice du courant principal et, par conséquent, retarde l'augmentation d'intensité de ce courant qui, pour atteindre sa valeur normale, met un temps beaucoup plus long.

Toutefois, comme la première partie du phénomène a une action prédominante, on peut en conclure que l'action des phénomènes d'induction mutuelle a pour effet d'affaiblir les phénomènes de self-induction dans le circuit inducteur.

La connaissance des phénomènes d'induction, comme on le verra plus loin, est d'une très grande importance dans l'étude du courant alternatif.

24. Hystérésis. — La récupération d'énergie dont il vient d'être question ne se produit pas intégralement dans le circuit électrique lorsque le circuit magnétique comporte du fer. On sait, en effet, qu'en interrompant le courant qui produit le flux

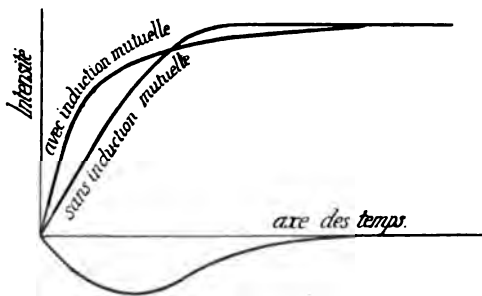


FIG. 24.

agissant sur un morceau de fer, ce dernier ne revient pas immédiatement à son état primitif et conserve une certaine aimantation que l'on appelle *magnétisme rémanent ou résiduel*. Dans ces conditions, si, pour produire le champ magnétique qui agit sur le fer, il faut une certaine dépense d'énergie et si une certaine aimantation subsiste dans le fer après que le flux qui l'a produite a disparu, il est évident que la totalité de l'énergie dépensée au début n'est pas restituée en entier au circuit électrique; une certaine quantité d'énergie s'est en effet dissipée et se retrouve sous forme thermique dans le noyau de fer. Ce phénomène est connu sous le nom d'*hystérésis*, qui veut dire retard, parce que, en soumettant un morceau de fer à des forces magnétisantes, alternativement de sens contraire, en utilisant par exemple un courant alternatif, l'aimantation ou plutôt l'induction magnétique du fer ne suit qu'avec un certain retard les variations de la force magnétisante qui dépend de l'intensité du courant.

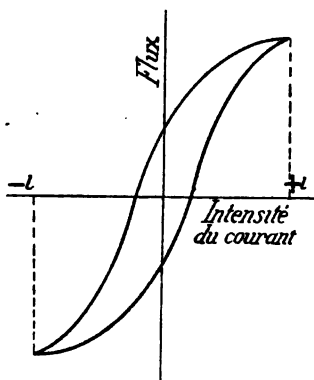


FIG. 25.

Pour tout cycle complet, la quantité d'énergie transformée en chaleur dans le fer est proportionnelle à la surface comprise entre les deux courbes.

CHAPITRE IV

COURANT ALTERNATIF ET IMPÉDANCE D'UN CIRCUIT

25. Valeur de la force électromotrice nécessaire pour qu'un courant se produise dans un circuit. — On peut maintenant aborder l'étude des phénomènes que présente le courant alternatif et il convient d'abord de déterminer la valeur de la force électromotrice nécessaire pour qu'un courant s'établisse dans un circuit, circuit qui présente, comme on le sait, une certaine self-induction.

On a déjà fait connaître l'effet produit par la self-induction d'un circuit sur un courant dont l'intensité augmente graduellement et qui, après l'interruption du circuit, décroît ensuite jusqu'à zéro. Le courant alternatif présente périodiquement des variations analogues et, en s'appuyant sur les notions déjà exposées précédemment, il n'est pas difficile de déterminer la valeur de la force électromotrice nécessaire pour qu'un courant se produise dans un circuit.

Pour simplifier la question, on peut supposer que les variations du courant alternatif suivent une loi harmonique par rapport au temps et, dans ce cas, on sait que l'on peut représenter graphiquement ce courant alternatif par une courbe qui est une sinusoïde (*fig. 26*).

Si le circuit ne présente pas self-induction, la force électromotrice nécessaire pour qu'un courant s'établisse est repré-

sentée par une courbe semblable, ayant même période et même phase (c'est-à-dire atteignant les valeurs nulles et maxima au même moment que celles de l'intensité du courant). Si la résistance du circuit est égale à 1 ohm, la même courbe

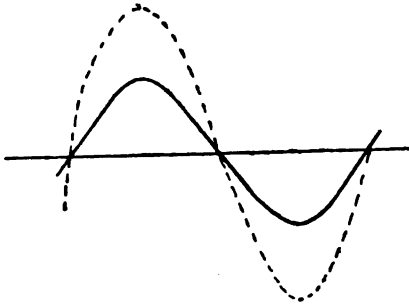


FIG. 26.

représente encore dans le même temps les valeurs successives de l'intensité et de la force électromotrice, toujours, bien entendu, à la condition que le circuit n'ait pas de self-induction.

Mais les phénomènes qui se produisent ne sont plus les mêmes lorsque

le courant passant dans le circuit produit un flux; ce flux réagit sur le courant qui lui a donné naissance en développant une force électromotrice de self-induction, dont la valeur, à chaque instant, est proportionnelle aux variations du flux. Lorsque la variation atteint son maximum, la force électromotrice due à la self-induction atteint sa plus grande valeur et elle devient nulle lorsque le flux ne varie pas.

On a déjà, précédemment, étudié un cas identique à propos des valeurs que prend l'accélération d'un mobile animé d'un mouvement harmonique (§ 14) et il est inutile de répéter ici ce qui a été déjà exposé complètement.

On peut dire, pourtant, que le flux produit par un courant étant en phase avec lui, ses variations, d'où dépendent les valeurs de la force électromotrice de self-induction, sont représentées par une courbe harmonique dont les valeurs nulles correspondent aux valeurs maxima; elles sont décalées en phase de 90° ($1/4$ de période). Pour représenter le flux, on peut se servir de la courbe d'intensité du courant, puisque le flux varie proportionnellement à l'intensité; lorsque l'intensité est nulle, le flux est égal à zéro et le flux maximum correspond à la valeur maximum de l'intensité.

La courbe des valeurs de la force électromotrice de self-induction doit donc avoir la même allure que celle qui représente les variations de flux, avec cette différence toutefois que, d'après la loi de Lenz, qui indique que la force électromotrice induite est toujours de sens opposé à celui des variations qui lui ont donné naissance, cette courbe doit être tracée dans une direction opposée à celle de l'intensité, lorsque cette dernière croît, et dans la même direction, lorsque l'intensité décroît.

La courbe $df'g$ (fig. 27) représente les valeurs successives de la force électromotrice de self-induction ; cette courbe est en retard de $1/4$ de période sur la courbe de l'intensité.

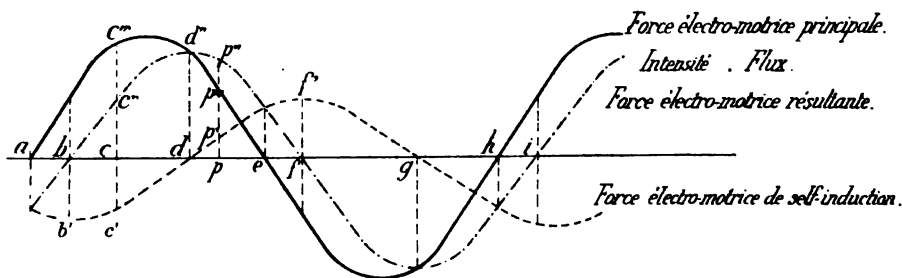


FIG. 27.

Il est maintenant facile de résoudre le problème.

Si la résistance du circuit est égale à 1 ohm (on lui donne cette valeur pour simplifier le calcul), la courbe de l'intensité représente également la courbe de la force électromotrice strictement nécessaire pour qu'un courant passe dans le circuit.

Considérons, par exemple, l'instant c . La force électromotrice nécessaire pour produire le courant est cc'' ; mais, au même instant, la force contre-électromotrice de self-induction cc' agit sur le circuit.

A ce moment la force électromotrice principale est :

$$cc'' = cc' + c'c''.$$

d'où

$$c'c'' = cc',$$

Alors une partie de la force électromotrice $c''c'''$ équilibre la force contre-électromotrice de self-induction et c'est la partie restante cc'' de force électromotrice qui fait passer le courant dans le circuit.

A l'instant d , il suffit que la force électromotrice du générateur (force électromotrice principale) soit égale à dd'' , parce que la force contre-électromotrice de self-induction est nulle à ce moment. A l'instant p , la force électromotrice principale doit avoir pour valeur

$$pp'' = pp' - pp'$$

parce que, à ce moment, la force électromotrice de self-induction tend à renforcer l'intensité du courant pendant qu'elle décroît et qu'il suffit alors d'une force électromotrice principale moindre pour obtenir une force électromotrice effective égale à pp'' .

En procédant ainsi, point par point, sur l'axe des temps, on remarque que là où la courbe de la force électromotrice de self-induction croise celle de la force électromotrice résultante, la force électromotrice principale passe, à ce moment, par la valeur zéro; l'on trouve, en réunissant par une courbe les points ainsi obtenus, que la force électromotrice nécessaire pour obtenir un courant $bc''p''f...$ dans un circuit ayant 1 ohm de résistance est donnée par la courbe $ac'''p'''e...$

Si le circuit a une résistance autre que l'unité, il faut alors, à la place de la courbe de l'intensité, en tracer une autre dont les ordonnées soient celles de l'intensité multipliées par la résistance R du circuit complexe.

On voit que cette courbe, dont les ordonnées sont à chaque instant en concordance avec les effets combinés de la force électromotrice principale et de la force électromotrice de self-induction, peut être désignée à juste raison sous le nom de courbe de la *force électromotrice résultante* dans le circuit. La loi d'Ohm est applicable sans aucune restriction à cette force électromotrice parce que ses valeurs sont, à chaque instant, la somme algébrique de toutes les forces électromotrices agis-

sant dans le circuit considéré. La loi d'Ohm n'est plus applicable à la force électromotrice principale, à moins de tenir compte de la présence de la force électromotrice de self-induction, dont les valeurs varient à chaque instant.

26. Influence de la self-induction sur un circuit parcouru par un courant alternatif. — Il convient d'examiner maintenant les résultats obtenus. En opérant comme on l'a fait pour la construction de la courbe, on voit immédiatement que la courbe de la force électromotrice principale a même période que les deux autres. Réciproquement, pour une force électromotrice due à un générateur d'énergie électrique et ayant une période donnée, la force électromotrice de self-induction et la force électromotrice résultante ont également même période. La self-induction produit deux actions bien distinctes :

1° Elle retarde la phase de la force électromotrice résultante (et, par suite, celle de l'intensité qui est en phase avec elle) par rapport à celle de la force électromotrice principale ;

2° Elle réduit la valeur de la force électromotrice principale, c'est-à-dire que la valeur maximum de la force électromotrice résultante est plus faible que celle de la force électromotrice principale.

Le décalage de phase produit par la self-induction est quantitativement mesuré par le segment *ab* (*fig. 27*) exprimé en fractions de période. Ce décalage augmente proportionnellement à la self-induction et on peut le vérifier graphiquement en traçant une courbe de la force électromotrice de self-induction à plus grande échelle. L'augmentation de la self-induction entraîne la diminution de la force électromotrice principale et la force électromotrice résultante a toujours alors une amplitude de plus en plus petite. A mesure que la valeur de la force électromotrice de self-induction augmente, la valeur de la force électromotrice résultante diminue et peut arriver à une valeur très faible, mais pourtant jamais nulle, réduisant également les valeurs de l'intensité. En même temps le décalage de phase augmente et

peut même avoir une valeur de près de 90° ($1/4$ de période), mais sans jamais atteindre 90° .

27. Résistance apparente ou impédance. — Si la self-induction a pour effet de réduire l'intensité du courant qui s'établit sous l'action d'une force électromotrice alternative, on peut dire que le circuit présente une *résistance apparente* ou *impédance* plus grande que n'est la résistance ohmique réelle. Plus augmente la self-induction et plus croît la résistance apparente et, par suite, l'intensité diminue; les effets contraires se produisent lorsque, au contraire, la self-induction diminue. Pour diminuer l'effet de la self-induction, afin d'obtenir le régime normal d'intensité de courant dans le circuit, il est nécessaire d'augmenter la résistance ohmique de ce circuit et également la valeur de la force électromotrice principale. Dans ce cas, le décalage de phase entre l'intensité et la force électromotrice principale est réduit à une valeur plus petite. Si, au contraire, on veut augmenter l'action de la self-induction pour obtenir des résultats déterminés, il faut augmenter la valeur du flux dû au courant, soit en diminuant la réluctance du circuit magnétique parcouru par le flux, soit en augmentant le nombre de spires. Il faut également tenir compte de ce fait qu'en augmentant la fréquence on augmente aussi les effets de la self-induction, parce que les variations de flux sont alors plus rapides. Réciproquement, une diminution de fréquence produit l'effet contraire, c'est-à-dire diminue les effets de la self-induction.

28. Analogie mécanique. — D'après ce qui a été déjà dit des propriétés générales de l'énergie, il est naturel de supposer, au moins en ce qui concerne les effets produits par la self-induction, que des phénomènes analogues doivent se produire dans d'autres domaines de la physique et c'est une supposition exacte.

On prend, par exemple, un ressort en boudin assez long que l'on tend en suspendant un poids à son extrémité inférieure et

dont on tient l'extrémité supérieure dans la main. En faisant mouvoir lentement la main de haut en bas, on constate que le poids reproduit exactement les mouvements de la main; il y a donc coïncidence de phase entre la cause (mouvement de la main) et l'effet (mouvement du poids). En accélérant graduellement le mouvement de la main, on constate que le poids, tout en continuant son mouvement alternatif, n'est plus en concordance de phase avec le mouvement de la main; ce décalage de phase, pour un ressort donné, est d'autant plus grand que la fréquence du mouvement est elle-même plus élevée. Il est même facile d'atteindre le moment où la cause et l'effet sont en *opposition complète de phase*; à ce moment, on voit le poids s'abaisser quand la main s'élève et, lorsque cette dernière s'abaisse, le poids remonter.

Cette expérience très simple présente ici un intérêt tout particulier, car elle montre que toutes les fois qu'une action alternative, due à une cause également alternative, se produit par l'intermédiaire d'un dispositif dont les déformations produisent une force, cette dernière a pour effet de décaler la phase du premier phénomène par rapport au second. Dans l'expérience qui vient d'être décrite, cette force est évidemment la force élastique.

On prend un tube fermé sur lui-même (*fig. 28*), rempli d'un liquide visqueux et incompressible, à l'intérieur duquel est disposé un piston *s* mobile sans frottement. Si, sous l'action d'une force motrice, le piston se déplace, vers la gauche par exemple, le liquide se met en mouvement par suite de la différence de pression existant entre les deux faces du piston; mais, par suite de la force d'inertie, le liquide prend graduellement une certaine vitesse. Tant que le liquide n'a pas atteint sa vitesse normale, il est nécessaire d'employer de la force motrice pour effectuer deux travaux qui sont :

1° Vaincre la résistance au mouvement qu'opposent les

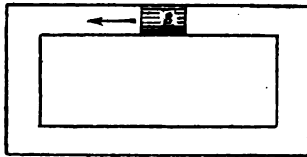


FIG. 28.

parois du tube, résistance d'autant plus grande que la viscosité du liquide est plus considérable ;

2° Fournir l'énergie cinétique à la masse du liquide en surmontant la force d'inertie.

Dans le premier de ces deux cas, l'énergie se transforme totalement en chaleur ; dans le second, elle s'accumule à l'état potentiel dans le liquide.

Lorsque la force motrice cesse d'agir, c'est-à-dire devient nulle, le mouvement se continue encore pendant un certain temps, parce que l'énergie potentielle passe à l'état cinétique en se transformant en mouvement de la masse et en se dissipant ensuite complètement sous forme de chaleur. Dans ce cas, l'effet est en retard sur la cause qui le produit, comme cela se passe dans le cas électrique considéré (§ 26).

Il convient maintenant de constater (parce que cette constatation servira dans un autre cas) que, pendant la période variable, la quantité de liquide qui passe par une section donnée dépend à la fois de sa masse et de sa viscosité. Plus sa viscosité et sa densité sont faibles et plus rapidement le liquide atteint sa vitesse normale.

L'analogie est donc complète : la quantité de liquide qui passe par une section donnée dans l'unité de temps est analogue à l'intensité du courant et la viscosité de ce liquide correspond à la résistance du circuit électrique. L'énergie accumulée dans le liquide en mouvement correspond également à l'énergie électromagnétique accumulée sous forme de champ magnétique. Enfin, dans les deux cas, dès que la cause cesse, il y a transformation d'énergie en chaleur.

Il est essentiel de ne pas pousser trop loin cette analogie, parce que, si les effets produits sont analogues, la nature des deux sortes de phénomènes est essentiellement différente. Ainsi, tandis que dans l'exemple emprunté à l'hydraulique l'énergie est accumulée dans la masse du liquide, dans l'exemple pris en électricité cette énergie se trouve dans le champ magnétique.

29. Autre mode de représentation graphique. — Pour suivre les variations des trois grandeurs : force électromotrice principale, force électromotrice de self-induction et force électromotrice résultante, correspondant à l'intensité du courant dans le circuit, comme elles se présentent en réalité dans une dynamo en fonctionnement, on peut employer la méthode suivante :

Soit AA' (*fig. 29*) le plan d'une spire animée d'un mouvement uniforme dans le champ magnétique bipolaire NS . Par suite des variations du flux qui traverse cette spire, cette dernière est le siège d'une force électromotrice induite de forme sinusoïdale, ainsi que l'apprend l'étude des dynamos à courant

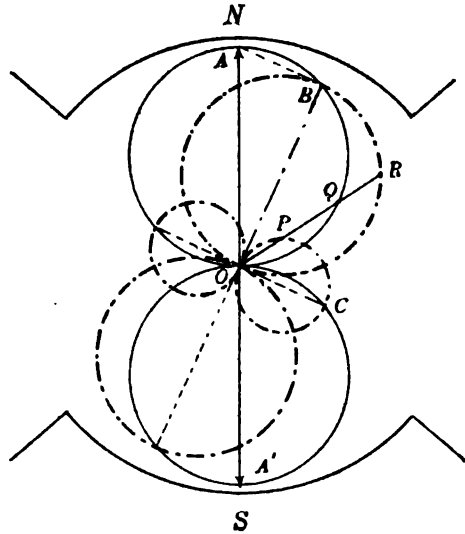


FIG. 29.

continu. La force électromotrice a une valeur maximum lorsque la spire se trouve dans le plan des lignes de force et une valeur nulle quand le flux qui la traverse est maximum (spire perpendiculaire aux lignes de force du champ). On peut alors établir la construction graphique suivante en représentant par AO l'amplitude de la force électromotrice principale.

Du centre O et avec un rayon OB égal à l'amplitude de la force électromotrice due à la self-induction, on décrit un arc de cercle ; puis du centre A et avec un rayon égal à l'amplitude de la force électromotrice résultante, on trace un autre arc de cercle qui coupe le premier en un point B ; on trace ensuite la ligne OC égale et parallèle à AB et enfin les six circonférences que l'on voit sur la figure et ayant respectivement pour diamètres

OA, OB, OC. Il est utile de tracer les trois séries de circonférences avec des couleurs différentes.

On découpe ensuite dans une feuille de carton un disque dont le diamètre est légèrement supérieur à AA' et l'on trace sur ce disque un diamètre DD' représentant le plan de la

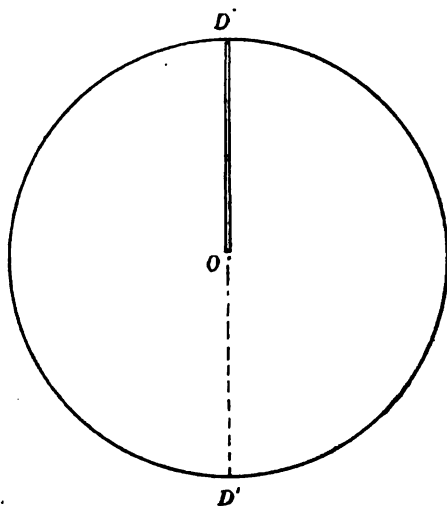


FIG. 30.

spire (fig. 30); à l'aide d'un canif, on découpe une fente OD de 1 millimètre environ de largeur. En plaçant ce disque sur la figure 29, si on le fait tourner autour du point O comme centre, en le fixant en ce point avec une épingle, on aperçoit à travers la fente trois points, par exemple P, Q, R, de couleurs différentes, et les longueurs OR, OP, OQ

donnent les valeurs des trois grandeurs alternatives considérées au moment du passage en ce point de la spire représentée par le diamètre DD', et cela par une propriété géométrique qui sera exposée dans le tome II, chapitre VI. En faisant tourner le disque de carton, on trouve successivement toutes les valeurs des trois grandeurs considérées et l'on peut constater, avec un double décimètre, qu'à tout instant on a :

$$OR = OQ + (\pm QR),$$

QR étant à tout instant égal à OP, mais positif si Q est au delà de R et négatif s'il est au delà. En réalité, dans le cas considéré, QR va de R vers O en sens inverse.

Il est superflu de faire remarquer que le tracé graphique n'a de valeur que pour un seul cas déterminé. Si la self-induction ou bien si la résistance du circuit varie, la force

électromotrice principale ne change pas, mais le segment OB n'est pas le même et $OC = AB$. Enfin le triangle OBA, dit *triangle de la force électromotrice*, est toujours rectangle en B. Le lieu du point B est par suite (par une propriété géométrique bien connue) la demi-circonférence ABO.

30. Résumé. — Résumant ce qui vient d'être expliqué, on peut dire que, si une force électromotrice alternative agit sur un circuit, le courant est également alternatif, mais ce courant s'établit comme s'il y avait une *résistance apparente*, c'est-à-dire une *impédance* supérieure à la résistance ohmique réelle. Ce phénomène est dû à la présence d'une force électromotrice de self-induction qui tend toujours à s'opposer aux variations de l'intensité du courant ou plus exactement aux variations du flux produit par le courant. La loi d'Ohm se vérifie toujours, à tout instant, soit que l'on considère les deux forces électromotrices en présence (principale et de self-induction), soit que l'on considère leur résultante.

Les effets produits par la self-induction sont de deux sortes :

- 1° *Elle réduit la valeur de l'intensité du courant que devrait produire la force électromotrice principale ;*
- 2° *Elle retarde la phase de l'intensité du courant par rapport à celle de la force électromotrice principale.*

Il est évident que *l'intensité du courant est toujours en concordance de phase avec la force électromotrice résultante.*

CHAPITRE V

VALEURS PARTICULIÈRES DES QUANTITÉS ÉLECTRIQUES PÉRIODIQUES INSTRUMENTS DE MESURE

31. Valeurs efficaces des quantités électriques alternatives. — Avant de continuer cette étude et d'examiner les autres cas particuliers qui se produisent dans les circuits parcourus par un courant alternatif, il est indispensable de savoir comment on peut mesurer les quantités électriques alternatives et aussi de connaître les instruments qui conviennent pour effectuer ces mesures. Les quantités électriques alternatives que l'on doit mesurer sont au nombre de trois :

- 1° La force électromotrice agissant sur un circuit ou la tension aux bornes de ce circuit;
- 2° L'intensité du courant ;
- 3° La puissance.

En ce qui concerne l'intensité, si les variations sont parfaitement harmoniques, sa valeur peut être représentée, comme à l'ordinaire, par une sinusoïde et on peut alors penser qu'il suffit de mesurer sa valeur maximum qui se reproduit à chaque période, puisque, à ce moment, elle est parfaitement déterminée. La période de ce courant étant connue (elle dépend du type de machine et de la vitesse angulaire de cette dernière, comme on l'a vu au paragraphe 17), on pourrait construire la courbe de l'intensité et toutes ses valeurs succes-

sives seraient ainsi déterminées. Mais, en dehors des difficultés pratiques qu'il y a pour réaliser un instrument pouvant indiquer la valeur maximum de l'intensité, il y a en réalité ce fait que l'allure harmonique de l'intensité est une conception théorique. Dans la pratique, on a toujours cherché à obtenir des forces électromotrices sinusoïdales dans le circuit et on n'a pu jusqu'ici atteindre complètement ce but. Si certains types d'**alternateurs** permettent d'obtenir une allure presque sinusoïdale pour la courbe de force électromotrice, en général on n'obtient qu'une sinusoïde plus ou moins déformée. Il en résulte que la courbe de l'intensité est également déformée, mais ses déformations sont moins accentuées par suite de l'action de la self-induction, qui tend toujours à s'opposer aux variations d'intensité ; par contre, le fer du noyau influe beaucoup sur ces effets de déformation qui sont encore plus considérables si l'on intercale un condensateur dans le circuit. Ces cas particuliers seront examinés dans le tome II, chapitres VII et VIII.

Comme la courbe de la force électromotrice et celle de l'intensité peuvent avoir une forme différant de la sinusoïde, cela indique qu'il n'y a qu'un seul procédé permettant de déterminer la valeur de ces grandeurs, procédé qui consiste à avoir recours à un des effets produits par elles, comme on le

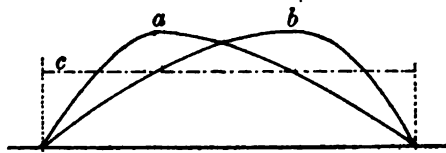


FIG. 31.

fait pour le courant continu, en choisissant judicieusement l'effet produit et l'instrument convenable pour le mesurer. En réalité, il y a toujours intérêt à connaître les valeurs successives de deux intensités de courant, la courbe de l'une ayant l'allure que montre la figure 31 en *a* et celle de l'autre ayant l'allure *b*; mais, si ces deux courants produisent un même effet, par exemple s'ils échauffent également un conducteur, on peut en déduire que leur *efficacité* est identique et c'est là un point important. Il faut remarquer également qu'un

courant continu c peut aussi produire le même échauffement du conducteur considéré dans le même laps de temps. Si on suppose que l'intensité du courant continu pouvant, dans la même période de temps, produire le même phénomène thermique ait une intensité de 10 ampères, on peut en conclure que l'intensité efficace des deux courants a et b est aussi de 10 ampères.

A première vue, on pourrait supposer que cette valeur 10 correspond à la valeur moyenne des diverses valeurs successives de l'intensité pendant une demi-période; ce serait une erreur qu'un raisonnement très simple fait comprendre.

32. Effets thermiques d'un courant alternatif. — Les effets thermiques d'un courant sont proportionnels au carré de

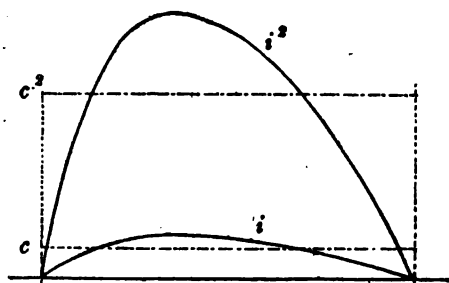


FIG. 32.

son intensité (l'énergie thermique développée $= Ri^2$). L'effet résultant produit est la somme de chacune des valeurs successives, dont la valeur moyenne a une signification physique bien définie. Soit c^2 (fig. 32) l'ordonnée

moyenne du diagramme obtenu en élevant au carré chacune des valeurs successives de i . Cette valeur moyenne est le carré de l'intensité du courant continu c qui, au point de vue thermique, produit le même effet que le courant i . On peut donc dire que le courant variable i a une valeur efficace égale à c , c'est-à-dire que c représente l'intensité efficace du courant alternatif.

Pendant la seconde demi-période, le courant change de sens, mais le phénomène thermique se produit également; les ordonnées de $i^2 = (-i)(-i)$ sont toujours positives (fig. 33) et leur valeur moyenne ne change ni de grandeur, ni de signe.

Le moyen de définir la valeur de l'intensité d'un courant

alternatif fondé sur la conception de son efficacité est donc parfaitement justifié.

Donc, en utilisant un phénomène thermique comme principe d'un instrument destiné à mesurer l'intensité d'un courant alternatif, l'inertie d'une pièce mobile ne permettant pas à l'aiguille indicatrice d'indiquer les valeurs successives de l'intensité de la courbe i^2 , la position d'équilibre du système mobile est déterminée par la valeur moyenne des carrés des valeurs instantanées de l'intensité.

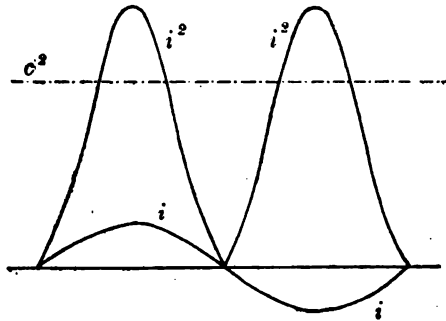


FIG. 33.

En graduant l'instrument avec un courant continu, si on l'utilise pour mesurer un courant alternatif, il indique les *valeurs efficaces* de l'intensité de ce dernier.

En résumé, *l'intensité efficace d'un courant alternatif est égale à la valeur que doit avoir un courant continu pour produire, dans le même laps de temps et dans le même circuit, la même quantité d'énergie thermique.*

33. Effets électrodynamiques d'un courant alternatif. —

Si un courant alternatif donné a une intensité efficace, au point de vue des effets thermiques, identique à celle d'un courant continu, les effets électrodynamiques de ces deux courants sont également les mêmes, car, s'il en était autrement, le phénomène ne satisferait point à la loi de la conservation de l'énergie.

On prend, par exemple, deux bobines plates, d'égal diamètre, placées l'une sur l'autre et parcourues par le même courant (fig. 34). Une d'elles est fixée à l'extrémité d'un fléau de balance et est exactement équilibrée par un poids P (balance de

lord Kelvin). En envoyant dans le circuit un courant continu, l'effet de répulsion électrodynamique qui se produit entre les deux bobines est égal pour les deux et on peut l'équilibrer

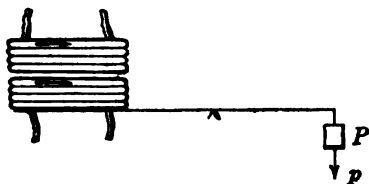


FIG. 34.

exactement avec un poids p ; cet effet de répulsion est proportionnel au carré de l'intensité du courant. Si, au lieu d'un courant continu, on fait passer dans les bobines un courant alternatif, l'effet électrodynamique

produit est toujours de même sens, c'est-à-dire qu'il y a répulsion, parce que les inversions du courant se produisent simultanément dans les deux bobines. Si l'effet de répulsion est exactement équilibré par le même poids p , comme avec le courant continu, l'intensité efficace du courant alternatif est la même, au point de vue des effets électrodynamiques, que celle du courant continu. Dans ce cas encore, l'intensité du courant continu donne la valeur efficace de l'intensité du courant alternatif.

Des effets analogues sont obtenus avec un électrodynamomètre constitué par une spire fixe et par une spire mobile placée dans un plan à 90° de celui de la spire fixe (fig. 35). Le même courant passant successivement dans les deux spires, celle qui est mobile tourne et tend à se placer dans le même plan que la spire fixe; à un certain moment elle atteint sa position d'équilibre lorsque le couple de torsion d'un ressort en spirale, auquel est fixée cette spire mobile et qui constitue une force antagoniste, devient égal au couple électrodynamique développé.

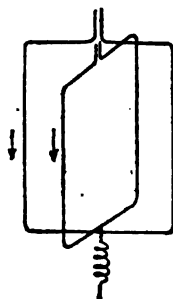


FIG. 35.

34. Valeur efficace d'une force électromotrice alternative. — Les considérations qui viennent d'être développées en

ce qui concerne l'intensité d'un courant alternatif s'appliquent également à une force électromotrice alternative ; par conséquent, on peut dire que *la valeur efficace d'une force électromotrice alternative* est la même que celle d'une force électromotrice constante qui, appliquée à un circuit ayant une *résistance simplement ohmique*, produit dans le même laps de temps les mêmes effets thermiques, électrodynamiques, etc.

Lorsque le circuit présente des phénomènes d'induction, la valeur efficace de la force électromotrice alternative s'obtient en multipliant par la *résistance* apparente du circuit (§ 22) la valeur efficace de l'intensité du courant.

35. Valeurs moyennes des quantités électriques alternatives. — Dans le cas particulier où les quantités alternatives considérées varient suivant une loi harmonique, c'est-à-dire lorsque la courbe de ces valeurs est une sinusoïde, leurs valeurs efficaces sont égales à 70,7 0/0 des valeurs maxima correspondantes ou plus exactement à ces valeurs maxima divisées par $\sqrt{2} = 1,414$.

Quant aux valeurs moyennes, elles sont données par la relation :

$$\frac{2}{\pi} = 0,637$$

des valeurs maxima et, comme on le voit, elles diffèrent notablement des valeurs efficaces.

36. Ampèremètres et voltmètres pour courant alternatif. — Les instruments destinés à mesurer les quantités électriques alternatives sont une application des phénomènes thermiques et électrodynamiques dont il a été déjà question. En outre, pour les voltmètres, il se construit des instruments utilisant les phénomènes électrostatiques.

Dans la plupart des installations industrielles, les ampèremètres pour courant alternatif sont généralement fondés sur la dilatation d'un fil. Ils sont constitués par un fil fin en alliage

de platine-argent, tendu entre deux points fixes a et b (fig. 36). Au point c est fixé l'extrémité d'un fil vertical qui, après s'être enroulé sur une petite poulie portant une aiguille indicatrice se déplaçant devant un cadran gradué, se termine, à l'extrémité opposée, par un ressort en boudin d qui maintient constamment ce fil tendu. Par suite de la grande résistance électrique que présente le fil ab , il s'échauffe et s'allonge lorsqu'il est parcouru par un courant ; il s'ensuit que le point c s'abaisse et la poulie, en tournant, amène l'index devant une division de la graduation.

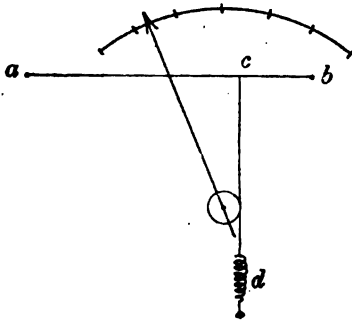


FIG. 36.

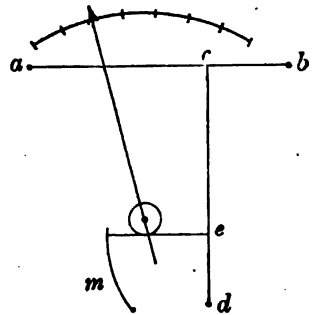


FIG. 37.

Dans les ampèremètres thermiques Hartmann et Braun, un fil de laiton cd (fig. 37) est tendu entre deux points fixes ; le fil qui s'enroule sur la poulie est fixé en e et il est toujours maintenu tendu par un ressort m . La poulie porte un disque très léger en aluminium qui se déplace entre les pôles d'un petit aimant. Cette disposition a pour but de rendre l'instrument apériodique, parce que les courants induits dans ce disque empêchent l'ensemble d'osciller autour de la position d'équilibre que l'index doit prendre sous l'action du courant passant dans le fil thermique. Enfin, le fil ab est monté sur une platine compensée au point de vue de la dilatation (analogue à celle des pendules), afin d'éliminer toute chance d'erreur due aux variations de la température ambiante.

Cet instrument permet, ainsi qu'on l'a déjà dit, de mesurer

l'intensité efficace d'un courant alternatif. Il ne présente pas de phénomènes de self-induction et donne des indications qui sont indépendantes de la fréquence et de la forme du courant ; en outre, l'instrument n'est pas influencé par la présence de champs magnétiques voisins. La précision de ses indications est très suffisante, à la condition de procéder à des étalonnages fréquents, surtout lorsque, à la suite d'un court-circuit, l'index vient buter brusquement contre l'arrêt disposé à l'extrémité de la graduation. L'étalonnage s'effectue très simplement avec un courant continu fourni, autant que possible, par une batterie d'accumulateurs.

Lorsque l'instrument doit être utilisé pour mesurer des courants de grande intensité (et c'est un cas qui se présente fréquemment), on ne fait passer qu'une fraction du courant dans le fil thermique, la majeure partie étant dérivée à travers une résistance (shunt) appropriée n'ayant pas de self-induction.

Pourvu que la bobine n'ait qu'un petit nombre de spires et que son noyau de fer soit réduit à un simple fil ou à une petite lame, on peut utiliser un ampèremètre électromagnétique pour mesurer l'intensité efficace d'un courant alternatif ; toutefois, il est indispensable que l'instrument soit étalonné directement avec un courant alternatif ayant la même fréquence que celui que l'instrument aura à mesurer, afin qu'il indique les valeurs efficaces ¹.

Pour effectuer des mesures de précision dans un laboratoire, on utilise ordinairement la balance de lord Kelvin, dont le principe a été déjà donné (§ 33).

Dans les stations centrales, on utilise également toute une

1. Au sujet des instruments électromagnétiques, il convient d'ajouter que, si l'instrument comporte des pièces de fer d'assez grandes dimensions, l'aimantation est faible et croît proportionnellement à l'intensité du courant. Dans ces conditions, la force d'attraction est le produit de ces deux grandeurs et le déplacement de l'organe mobile de l'instrument est proportionnel au carré de l'intensité du courant. L'instrument indique alors la valeur efficace de l'intensité du courant s'il est alternatif.

D'un autre côté, afin d'éviter les effets de l'hystérésis, dus à des variations d'intensité d'aimantation produites par un même courant, mais changeant de

catégorie d'instruments de mesure fondés sur les phénomènes d'induction ; il en sera parlé plus loin dans le chapitre x.

Pour la mesure des courants très intenses, on tend à généraliser l'emploi d'un petit transformateur spécial (chap. xii) qui permet de séparer complètement l'instrument du circuit principal (avantage très appréciable dans le cas de courants à haute tension) et de ne faire passer dans l'ampèremètre qu'une fraction de courant en rapport constant avec celle qui passe dans la canalisation.

Les types de voltmètres pour courant alternatif sont plus nombreux, mais c'est encore les instruments thermiques qui sont le plus souvent utilisés dans les installations industrielles. Naturellement, les voltmètres sont montés en dérivation sur les deux points entre lesquels existe la différence de potentiel à mesurer ; ils comportent une grande résistance non inductive intercalée, afin que le courant de faible intensité qui passe dans l'instrument soit exactement proportionnel à la tension du circuit sur lequel le voltmètre est placé.

Il se construit aussi des voltmètres électromagnétiques, mais qui exigent surtout d'être étalonnés avec un courant de fréquence parfaitement définie. En outre, il est indispensable qu'ils aient une très grande résistance sans induction, afin de rendre négligeable la self-induction de la bobine du voltmètre ; dans ces conditions, l'intensité du courant qui passe dans la bobine est très réduite et l'instrument manque de sensibilité.

Les voltmètres les plus précis pour la mesure des tensions alternatives sont ceux qui sont fondés sur le principe de l'électrodynamomètre (Weston, Siemens). Les bobines fixe et mobile de l'instrument comportent un même nombre de spires et

sens, il convient d'employer une pièce de fer aussi réduite que possible. Alors, quoique le champ magnétique soit faible, le fer est toujours saturé et le déplacement de l'organe mobile de l'instrument est à peu près proportionnel à la valeur de l'intensité du courant. Dans ce cas l'instrument, utilisé avec un courant alternatif, donne la valeur moyenne de l'intensité.

En réalité, les instruments électromagnétiques industriels utilisés pour la mesure des courants alternatifs ne donnent jamais exactement aucune de ces valeurs ; c'est pourquoi il est indispensable de les étalonner empiriquement pour la fréquence des courants qu'ils doivent servir à mesurer.

l'intensité du courant qui les parcourt est pratiquement en concordance de phase avec la tension à cause de la résistance additionnelle sans self-induction que comporte l'instrument et qui représente la presque totalité de la résistance du circuit dérivé. Ces instruments ne peuvent toutefois pas être utilisés dans le voisinage de champs magnétiques intenses (tels que les inducteurs de dynamos), car ils donneraient alors des indications absolument fausses.

Pour les hautes tensions, il est d'usage courant dans la pratique de réduire la tension à l'aide d'un petit transformateur. Connaissant le rapport de transformation de ce dernier, on peut déduire des indications du voltmètre placé en dérivation sur le circuit secondaire la valeur de la différence de potentiel existant aux bornes du circuit primaire.

On peut construire d'excellents voltmètres pour courant alternatif sur le principe de l'électromètre. Deux quadrants, l'un mobile et l'autre fixe (*fig. 38*), sont mis respectivement en communication avec les points entre lesquels on veut mesurer la différence de potentiel.

Par suite du couple électrostatique développé, couple proportionnel au carré de la différence de potentiel, le quadrant mobile se déplace par rapport au quadrant fixe et prend une position d'équilibre déterminée par un couple antagoniste obtenu par divers procédés qui diffèrent suivant les constructeurs.

Le couple électrostatique, étant proportionnel au carré de la différence de potentiel, est toujours dans la même direction et l'instrument donne, par conséquent, la valeur efficace de la tension alternative, pourvu qu'il soit préalablement étalonné avec une différence de potentiel constante, celle, par exemple, que l'on peut obtenir avec une batterie d'accumulateurs constituée par un très grand nombre d'éléments.

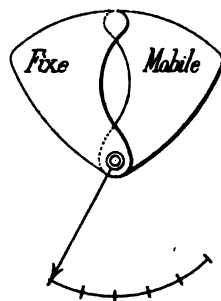


FIG. 38.

37. Puissance d'un courant alternatif. — On sait, pour le courant continu, que la puissance de ce courant, c'est-à-dire le travail électrique qu'il peut effectuer dans l'unité de temps est donné par la relation :

$$E \times I = P,$$

dans laquelle E est exprimé en volts, I en ampères et P en watts.

Si la force électromotrice et conséquemment l'intensité du courant varient avec le temps, il faut déterminer le travail effectué pour chacun des intervalles de temps successifs et en faire la somme ; en divisant cette somme par la durée totale, on obtient le *travail moyen* effectué.

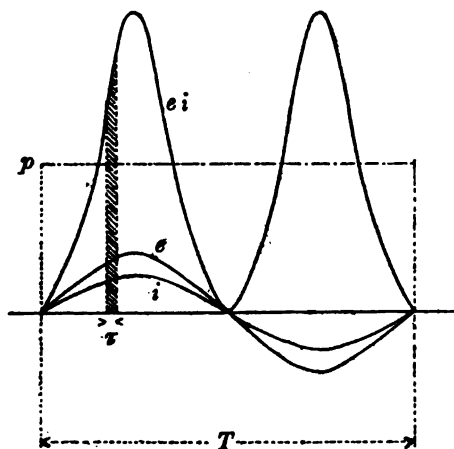


FIG. 39.

Dans le cas d'un courant alternatif, on ne peut que mesurer la valeur moyenne du travail pour une période et, en multipliant cette valeur par la fréquence, on trouve la valeur moyenne par seconde, c'est-à-dire la *puissance*. C'est pourquoi,

si la force électromotrice alternative et l'intensité dans le circuit sont représentées respectivement par la courbe de leurs valeurs instantanées, en faisant les produits des valeurs successives de ces deux grandeurs, on obtient une nouvelle courbe ei (fig. 39) dont les ordonnées représentent les valeurs successives de la puissance de ce courant alternatif. Le travail effectué par un courant alternatif pendant un temps très court τ est proportionnel à l'aire du trapèze représenté par la partie hachurée sur la figure 39 et, pendant la durée d'une période, le

travail est proportionnel, par conséquent, à l'aire de la surface comprise entre la courbe *ei* et l'axe des temps. On détermine alors l'ordonnée moyenne *p* de la courbe *ei* et, en multipliant cette valeur par le temps correspondant à une période, on a la valeur moyenne du travail effectué par le courant pendant une période.

Si on suppose maintenant que l'intensité du courant soit en concordance de phase avec la force électromotrice, dans ce cas, le produit *ei* est toujours positif, comme le montre la figure 39. L'aire de la surface comprise entre la courbe *ei* et l'horizontale représente le *travail total* *W* effectué par le courant pendant une période de temps *T*. Si *p* est une ordonnée telle que l'aire du rectangle $p \cdot T = W$, le travail effectué par le courant par seconde se calcule facilement en multipliant par la fréquence *f*, c'est-à-dire par le nombre de périodes par seconde, et l'on a :

$$W \cdot f = p \cdot T \cdot f,$$

mais, puisque $f = \frac{1}{T}$, on a

$$W \cdot f = p,$$

c'est-à-dire que *p* représente la puissance moyenne du courant.

Les considérations qui précèdent sont absolument indépendantes de la forme de la courbe, qui peut être non seulement harmonique, mais encore plus ou moins déformée.

Cette puissance moyenne du courant alternatif est encore égale à celle que peut produire un courant continu pouvant effectuer le même travail dans le même laps de temps *T*. Si l'intensité de ce courant continu est égale à l'intensité efficace du courant alternatif, il faut aussi que sa force électromotrice soit égale à la valeur efficace de la force électromotrice alternative, pour le cas admis de l'égalité de phase, puisque les deux courants, continu et alternatif, doivent être équivalents en ce qui concerne le travail effectué pendant le même temps *T*. En représentant par *E_e* et par *I_e* les valeurs efficaces des deux grandeurs alternatives, on a

$$p = E_e I_e$$

représentant la *puissance moyenne du courant alternatif*, c'est-à-dire la valeur du travail qu'il peut effectuer pendant l'unité de temps.

Si les deux valeurs e et i sont en concordance de phase, le produit obtenu en multipliant les indications du voltmètre par celles de l'ampèremètre donne la puissance du courant exprimée en watts.

Ainsi, par exemple, avec la lampe à incandescence, qui n'a guère de self-induction et avec laquelle l'intensité du courant peut rester en concordance de phase avec la tension, le produit obtenu en multipliant l'une par l'autre les indications données par le voltmètre, d'une part, et par l'ampèremètre, d'autre part, donne, exprimée en watts, la puissance requise pour alimenter cette lampe.

Mais la chose n'est plus aussi simple lorsque l'intensité du courant n'est plus en concordance de phase avec la force élec-

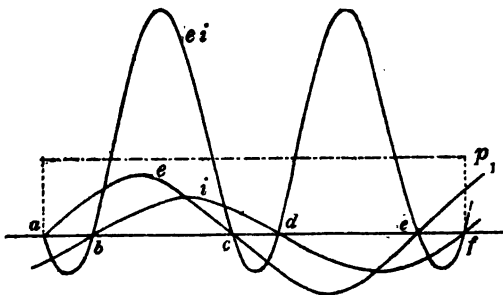


FIG. 40.

tromotrice agissant sur le circuit ou avec la tension aux extrémités du circuit considéré. La puissance instantanée s'obtient toujours en multipliant les valeurs successives de e par les valeurs correspondantes de i ; mais, lorsque l'intensité est en retard de phase sur la force électromotrice (*fig. 40*), dans les fractions de période ab , cd , ef , etc., l'intensité du courant est encore négative, tandis que la force électromotrice est déjà positive. Cela veut dire que la force électromotrice de self-induction augmente par rapport à la force électromotrice principale, tendant ainsi à produire un courant de sens inverse. Étant donné que le produit de ces deux quantités représente la puissance, celle-ci est négative et il en est de même du travail.

tromotrice agissant sur le circuit ou avec la tension aux extrémités du circuit considéré. La puissance instantanée s'obtient toujours en multipliant les valeurs successives de e par les valeurs correspondantes de i ; mais,

Dans les fractions de période bc , de , les deux quantités étant toutes deux d'abord positives, puis négatives, le travail effectué pendant ce temps est toujours positif.

Il est évident que pendant une période le travail est partiellement négatif et partiellement positif; par suite, la valeur totale du travail effectué est donnée par la différence entre l'aire positive et l'aire négative dans la période. Si l'on trouve l'ordonnée moyenne p égale au travail utile W_1 réellement effectué, on a comme précédemment

$$p_1 T = W_1;$$

mais alors on ne peut plus avoir $p_1 = E_e I_e$. En réalité, si les valeurs efficaces des quantités alternatives sont restées telles qu'au début, on a, à cause du décalage de l'intensité, $W_1 < W$ et aussi $p_1 < p$. On a donc :

$$p_1 = k E_e I_e,$$

k étant un coefficient numérique plus petit que l'unité que l'on appelle *facteur de puissance* du circuit.

Il faut également interpréter physiquement les résultats obtenus et ne pas oublier que le retard de l'intensité est dû à la présence d'une force électromotrice de self-induction due aux variations de flux et que ce flux a exigé, pour se produire, une dépense d'énergie qui est restituée intégralement lorsqu'il cesse (en ne tenant pas compte naturellement des effets de l'hystérésis). Dans ces conditions, à chaque demi-période, le champ magnétique absorbe, puis restitue de l'énergie. Lorsque la valeur instantanée de la puissance restituée par le champ magnétique dépasse celle qui, au même moment, est produite par la force électromotrice agissant sur le circuit, on obtient un travail négatif, c'est-à-dire que le générateur absorbe la différence de travail et se comporte, par suite, comme un moteur. Ainsi, dans le cas présenté par la figure 40, dans les fractions de période ab' et cd , le générateur reçoit de l'énergie et fonctionne comme un *moteur*, tandis que, dans

les fractions de période *bc* et *de*, il fonctionne, au contraire comme *générateur* en fournissant de l'énergie.

Ce phénomène n'est nullement paradoxal et se produit aussi dans un moteur à vapeur dont le volant absorbe de l'énergie lorsque la puissance motrice a une valeur supérieure à la puissance résistante et ne la restitue que lorsque cette dernière a une valeur supérieure à la première. A chaque tour, donc, le moteur à vapeur fonctionne pendant un certain temps comme générateur d'énergie mécanique, et pendant le reste du temps, comme moteur recevant de l'énergie de l'extérieur, c'est-à-dire du volant. Il est évident que le travail positif a une valeur supérieure à celle du travail négatif et cet excédent est utilisé pour vaincre le travail résistant.

En dehors des frottements des paliers et de la résistance de l'air, le volant ne consomme pas d'énergie; de même, la self-induction, qui est la cause du retard de phase de l'intensité par rapport à la force électromotrice et qui est due aux variations d'intensité du champ, ne consomme pas d'énergie, abstraction faite des pertes par hystérésis dans le fer et des pertes dues aux courants de Foucault; elle a pour effet de réduire la valeur efficace de la force électromotrice alternative.

Un exemple fera mieux comprendre l'importance des considérations qui précèdent.

Soit un groupe de lampes à incandescence alimentées par du courant alternatif; le voltmètre indique une tension efficace de 100 volts et l'ampèremètre une intensité efficace de 10 ampères. La puissance est alors

$$100 \cdot 10 = 1\,000 \text{ watts,}$$

parce que l'intensité du courant est en concordance de phase avec la tension.

Mais si, au lieu de considérer un circuit de lampes à incandescence, on a un autre circuit dans lequel se trouvent des lampes à arc pour lesquelles, à cause de la bobine qu'elles comportent, le facteur de puissance du circuit est égal à 0,9, si les instruments de mesure indiquent toujours 100 volts

et 10 ampères, l'énergie consommée dans ce cas est

$$0,9 \cdot 100 \cdot 10 = 900 \text{ watts}$$

au lieu de 1000. En réalité, le générateur d'énergie électrique fournit 900 watts et la force motrice qu'il absorbe pour son fonctionnement est proportionnelle, mais l'efficacité de la tension alternative, qui est toujours de 100 volts, se trouve diminuée du fait de la self-induction.

38. Composantes du courant. — Le phénomène peut être envisagé d'une autre manière et c'est là un point particulièrement intéressant.

On peut supposer que le courant qui passe dans un circuit est, à chaque instant, la somme d'un *courant utile* ou *actif* I_a que l'on désigne aussi sous le nom de *courant énergétique* ou de *courant watté*, en concordance de phase avec la tension (fig. 41), à qui est dû le travail électrique extérieur, et d'un autre courant I_μ ap-

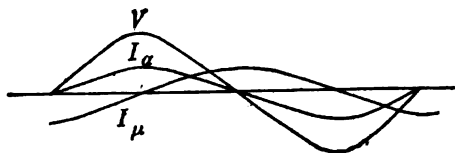


FIG. 41.

pelé *courant magnétisant* et aussi *inergétique* ou *déwatté*, produit par les phénomènes d'induction et qui produit le travail de formation du champ magnétique. Le travail de ces deux composantes du courant, pendant une période, se réduit à celui qu'effectue seulement le premier, parce que le travail du second, pendant ce temps, est nul, toute l'énergie qu'il a fournie pour créer le champ étant restituée intégralement. D'après la définition donnée, si le premier de ces courants, c'est-à-dire le courant actif, en reprenant l'exemple donné, a effectué un travail de 900 watts, la valeur efficace de son intensité est $0,9 \times 10 = 9$ ampères. En général, on a la valeur de l'intensité du courant actif en multipliant par le facteur de puissance la valeur de l'intensité lue sur l'ampère-mètre.

En traçant alors sur le diagramme une courbe d'intensité en phase avec celle de la tension, avec la valeur efficace 9, la valeur maximum est alors

$$\frac{9}{0,707} = 12,8$$

et l'on peut obtenir immédiatement, avec quelques points, la courbe du second courant, en tenant compte de ce fait que les valeurs de l'intensité I (non portées sur la figure 41) doivent à chaque instant rester égales à la somme des valeurs des deux composantes. La seconde composante, c'est-à-dire le *courant magnétisant*, s'appelle aussi *courant de réaction*, étant dû à la réaction du champ magnétique.

On peut maintenant établir le diagramme de la puissance en multipliant les valeurs de la tension d'abord par les valeurs

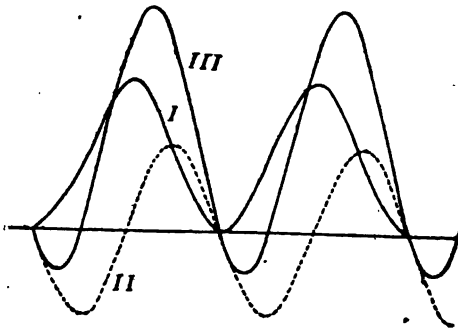


FIG. 42.

de l'intensité du courant actif, puis par les valeurs de l'intensité du courant magnétisant, enfin par celles du courant résultant dans le circuit et l'on obtient les trois courbes I, II et III (fig. 42).

Pendant une période ou une demi-période, les valeurs de la première sont toujours positives (travail extérieur du courant dans les appareils d'utilisation : lampes, moteurs, etc.); les valeurs de la deuxième sont négatives pendant $1/4$ de période (travail absorbé pour la production du champ magnétique dans tout le circuit : ligne et appareils d'utilisation)¹, c'est-à-dire pendant le temps que la valeur du courant actif croît, et posi-

1. Si l'on eût considéré la force électromotrice plutôt que la tension, il aurait également fallu comprendre le travail de magnétisation dans le générateur pour la production de son champ.

tives pendant $1/4$ de période (travail restitué par le champ magnétique) pendant le temps que la valeur du courant actif décroît. A la fin de la demi-période, le travail total du second courant est nul.

Les ordonnées de la troisième courbe sont la somme algébrique de celles des deux autres, à chaque instant; elles sont négatives pendant deux parties de la période et positives pendant les autres. Lorsque le générateur, ainsi qu'on l'a déjà dit, reçoit de l'énergie du circuit, il se comporte comme un moteur. Le champ magnétique produit dans un circuit complexe par le courant magnétisant remplit le même rôle que le volant dans un moteur à vapeur.

Le travail final de ce courant est nul; en tenant compte de l'hystérésis (§ 24) qui fait que la somme d'énergie restituée par le champ magnétique est inférieure à celle qu'il a fallu lui fournir pour le créer, on comprend que le générateur doive parfaire la différence en fournissant, à chaque période, une certaine quantité d'énergie (en tenant compte de l'hystérésis, le courant actif doit être plus grand).

Les pertes d'énergie par effet Joule (effets thermiques) sont dues au courant résultant dans le circuit et, *à cet égard seulement, le phénomène de self-induction entraîne une dépense supplémentaire d'énergie*. C'est pourquoi, en reprenant l'exemple précédent, si on veut obtenir une puissance de 1000 watts, avec un facteur de puissance égal à 0,9, il faut élever la tension efficace à 112 volts; on a, en effet :

$$0,9 \cdot 112 \cdot 10 = 1000 \text{ watts,}$$

ou encore porter l'intensité à 11,2 ampères,

$$0,9 \cdot 100 \cdot 11,2 = 1000 \text{ watts.}$$

Dans le premier cas, l'énergie absorbée par suite de l'effet Joule est :

$$R \cdot 10^2 = 100 R \text{ watts,}$$

exactement comme cela se vérifie dans le cas des lampes à incandescence, mais la tension a dû être augmentée de 12 0/0; dans le second cas, la tension reste la même, mais l'intensité a dû être augmentée de 12 0/0 et produit, par suite, une perte plus considérable par effet Joule dans le circuit.

En résumé, on peut dire que la self-induction a pour effet de diminuer la tension utile, c'est-à-dire de réduire le travail que peut effectuer le courant, mais, dans tous les cas, la *self-induction n'absorbe pas d'énergie*. La majeure partie du travail absorbée est celle qu'entraînent les pertes par effet Joule lorsque, pour obtenir un résultat déterminé, on augmente l'intensité du courant dans le circuit.

39. Mesure de la puissance d'un courant alternatif. —

Wattmètre. — Il résulte de ce qui précède que les indications fournies par les deux instruments usuels (voltmètre et ampèremètre) ne sont pas suffisantes pour permettre de déterminer la *puissance moyenne* d'un courant alternatif, à moins que le facteur de puissance k du circuit soit connu, facteur qui permet de calculer cette puissance moyenne en multipliant le produit des deux lectures faites sur l'ampèremètre et sur le voltmètre par ce facteur k . Le produit des deux lectures seules ne donne que la *puissance apparente*.

Dans le cas où les valeurs de l'intensité et de la tension sont représentées par des courbes de même allure parfaitement harmoniques, le facteur de puissance, qui, dans ce cas, est lié au décalage de phase par une relation très simple, peut être fourni par un instrument spécial appelé *phasemètre*. La disposition de cet instrument est la suivante : un disque métallique est soumis simultanément à l'action de deux bobines convenablement placées et parcourues respectivement par les courants dont on veut mesurer la différence de phase (*fig. 43*). L'index de l'instrument reste au zéro quand les deux courants sont en concordance de phase, mais dévie soit à droite, soit à gauche, lorsque les courants décalés constituent un champ magnétique tournant (Voir chap. x).

Dans la pratique, il est préférable d'avoir recours au wattmètre pour déterminer plus facilement et plus simplement la valeur de la puissance moyenne, d'autant plus que les indications qu'il donne sont indépendantes de la forme des courbes de la tension et de l'intensité.

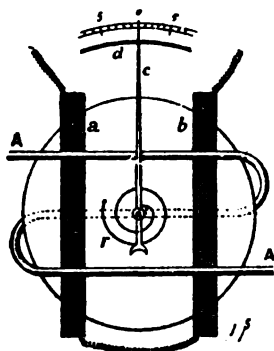


Fig. 43.

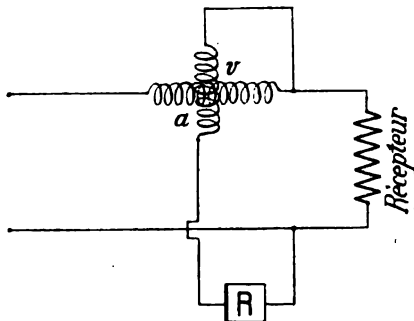


Fig. 44.

Le wattmètre est une modification de l'électrodynamomètre. La bobine fixe *a* (fig. 44), dite *bobine d'ampèremètre*, est parcourue par le courant, tandis que la bobine mobile *v*, comportant un très grand nombre de spires de fil fin, est parcourue par un courant directement proportionnel à la tension et en concordance de phase avec elle; c'est la *bobine de volt-mètre*. Le courant dans la bobine de voltmètre peut être mis en concordance de phase avec la tension lorsque, en supprimant le fer de l'instrument, cette bobine est mise en série avec une très grande résistance *R* dépourvue de self-induction.

Le couple produisant la déviation est, à tout instant, proportionnel au produit

$$i \cdot \frac{v}{R}$$

des courants qui passent dans les deux bobines et, par suite, proportionnel aux ordonnées de la courbe III (fig. 42). Par suite de l'inertie de l'organe mobile de l'instrument et pour

peu que la fréquence soit élevée (il suffit que cette fréquence soit égale à 15), l'instrument prend une déviation permanente qui est proportionnelle à la valeur moyenne de la puissance pendant la période, c'est-à-dire proportionnelle aux ordonnées moyennes de la courbe III (fig. 42) caractérisant le travail du courant alternatif pendant une période.

Si δ est la déviation de l'instrument, la puissance en watts est donnée par la relation

$$P = C\delta,$$

dans laquelle C est une constante, dépendant de l'instrument et de la résistance R intercalée, qui est déterminée par le constructeur. Il s'ensuit que les wattmètres industriels ont une graduation permettant de lire directement la puissance exprimée en watts.

Les wattmètres sont fondés sur le principe de l'électrodynamomètre, dont ils ne diffèrent que par des détails de construction. Les modèles Weston et Siemens sont de très bons instruments.

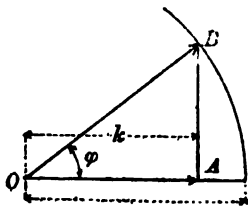


FIG. 45.

A l'aide de trois instruments : voltmètre, ampèremètre et wattmètre, on peut déterminer tous les éléments d'un courant alternatif, c'est-à-dire la différence de potentiel ou la tension et l'intensité du courant, par leurs valeurs efficaces, ainsi que la puissance moyenne exprimée en watts. Le produit de la valeur efficace de la tension par celle de l'intensité donne la puissance apparente. Enfin, le rapport

$$\frac{P}{E_e I_e} = k$$

donne le facteur de puissance du circuit. Ce facteur permet, dans le cas de grandeurs sinusoïdales, de déterminer le déca-

lage de phase φ entre l'intensité et la tension. A cet effet, on trace une circonférence de rayon 1 (*fig. 45*), on porte en OA la valeur de k et on mène la perpendiculaire AB sur le rayon ; le rayon OB fait alors avec OA un angle φ qui mesure en degrés (Voir § 15) le décalage de phase correspondant au facteur de puissance k .

CHAPITRE VI

FORME DES COURBES REPRÉSENTATIVES DES QUANTITÉS ALTERNATIVES

40. Forme des courbes représentatives des quantités alternatives. — On a eu plusieurs fois l'occasion de faire remarquer que les quantités alternatives ont, en général, une allure qui diffère plus ou moins de la courbe représentant un phénomène harmonique simple, courbe qui est une sinusoïde. En réalité, les courbes de courant alternatif sont des sinusoïdes plus ou moins déformées. Même lorsque la courbe de la force électromotrice a une allure parfaitement sinusoïdale, la courbe de l'intensité est influencée par la présence du fer et se trouve déformée par suite de l'action de l'hystérésis ; s'il n'y a pas de fer, la courbe de l'intensité reste sinusoïdale, parce que ni la self-induction, ni l'induction mutuelle, ni la capacité du circuit ne causent de déformation.

Dans le cas où la courbe représentative de la force électromotrice n'est pas une sinusoïde, celle de l'intensité se trouve déformée pour plusieurs raisons : d'abord, par suite de la présence du fer, qui produit un décalage en retard de la courbe de l'intensité par rapport à celle du flux ; puis, par les phénomènes de self-induction, qui aplatissent l'onde du courant ; enfin, par la capacité, qui produit une véritable distorsion de la courbe de l'intensité (t. II, chap. VII et VIII).

Les constructeurs ont pourtant le soin de chercher à rendre

presque sinusoidale la courbe de la force électromotrice développée dans les alternateurs et ils obtiennent ce résultat par divers procédés : soit en donnant aux sections de l'induit une largeur proportionnée à celle des pièces polaires ; soit, de préférence, en augmentant l'épaisseur de l'entrefer aux extrémités des pièces polaires, par exemple en abattant les angles supérieurs

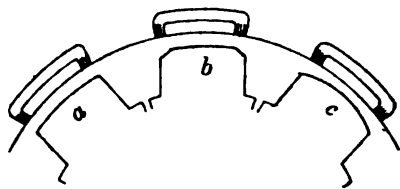


FIG. 46.

(*b*, *fig.* 46) ou bien en donnant aux extrémités des pièces polaires une courbure plus grande que celle qui correspond au rayon de l'inducteur (*fig.* 46, *c*) ; soit, enfin, en rendant le champ symétrique. C'est pourquoi, dans un alternateur à pôles alternés, le champ magnétique a deux axes symétriques pour chaque

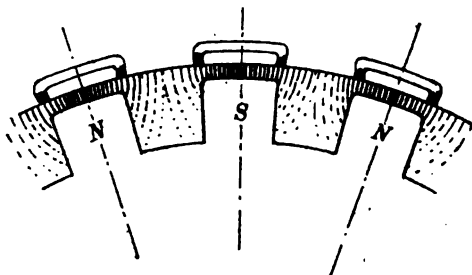


FIG. 47.

pôle (*fig.* 47), l'un passant par le milieu de la pièce polaire, l'autre par le milieu de l'espace interpolaire. Par suite, la courbe de la force électromotrice doit être symétrique par rapport à ces deux axes, dont un passe par le point de l'ordonnée maximum et l'autre par le point de l'ordonnée zéro.

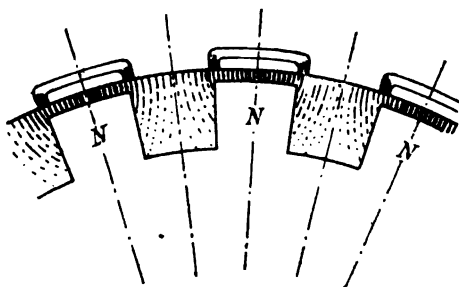


FIG. 48.

Au contraire, dans un alternateur à pôles semblables ou *homopolaire* (*fig.* 48), le champ ne possède qu'un seul axe de symétrie par pôle et la courbe n'est pas en général

symétrique, mais a plutôt la forme que montre la figure 49. On peut obtenir une courbe de force électromotrice presque rigou-

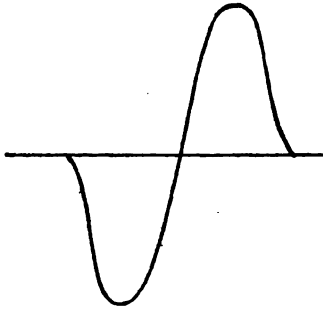


FIG. 49.

reusement sinusoïdale en disposant sur les pièces polaires des circuits amortisseurs (Hutin et Leblanc) qui, en outre, empêchent, comme on le verra, les oscillations de l'organe mobile et rectifient, en quelque sorte, la force électromotrice produite (t. II, chap. XI).

La connaissance de la véritable allure des courbes de tension et d'intensité, au point de vue pratique, présente une réelle importance et peut être d'un grand secours dans beaucoup de cas. C'est pourquoi il est utile de décrire les méthodes et les instruments employés pour déterminer les allures de ces courbes, étude qui sera donnée dans le tome II de cet ouvrage.

41. Courbes des phénomènes harmoniques simples.

— D'une manière générale, un phénomène périodique complexe peut être décomposé en plusieurs phénomènes harmoniques simples se superposant les uns aux autres; en choisissant judicieusement le nombre de ces phénomènes harmoniques, leur amplitude, leur période, leur phase, on peut arriver à représenter un phénomène périodique quelconque.

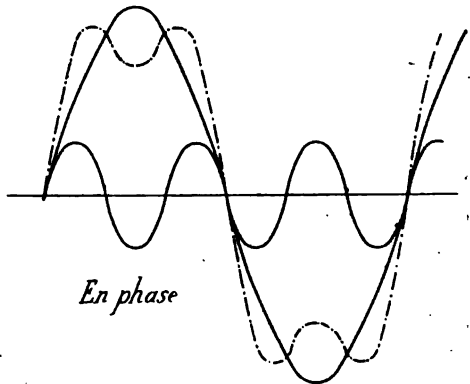


FIG. 50.

Ainsi, par exemple, si dans un circuit agissent simultanément deux forces électromotrices de même phase, mais dont

l'une a une fréquence trois fois plus grande que l'autre, la force électromotrice résultante est représentée par une courbe dont l'allure est montrée sur la figure 50.

Si la force électromotrice dont la fréquence est triple est en avance de $\frac{1}{6}$ de période, l'allure que présente alors la courbe de la force électromotrice résultante (fig. 51) est différente. Pour d'autres décalages, les allures des courbes ne sont plus les mêmes et, dans ce cas, ne sont plus symétriques (fig. 52). Réciproquement, étant donnée

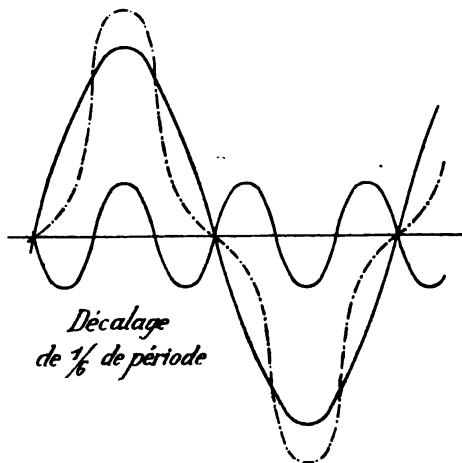


FIG. 51.

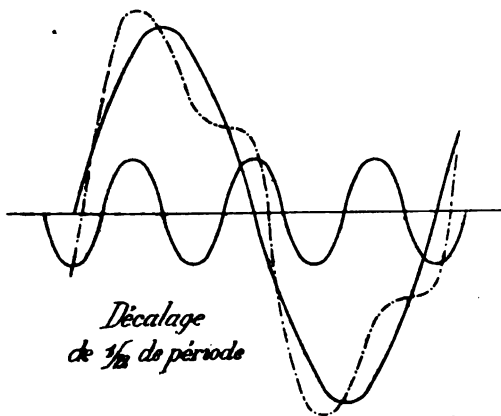


FIG. 52.

une courbe de force électromotrice produite par un alternateur ou tout autre appareil, il est possible, à l'aide de procédés convenables, de la décomposer en deux ou plusieurs courbes harmoniques.

Généralement, une sinusoïde fondamentale de fréquence égale à celle de l'alternateur et deux autres courbes sinusoïdales (harmoniques), une de fréquence trois fois plus grande et l'autre de fréquence cinq fois plus grande disposées convenablement en phase et en amplitude, sont plus

que suffisantes pour représenter la véritable allure du phénomène.

Les courbes ayant une fréquence de même ordre s'annulent, parce que, pour les grandeurs électriques, l'axe des temps est toujours un axe de symétrie et alors les harmoniques de même ordre s'annulent; c'est ce qui sera démontré dans le chapitre vi du tome II.

CHAPITRE VII

EFFETS PRODUITS PAR UN CONDENSATEUR INTERCALÉ DANS UN CIRCUIT PARCOURU PAR UN COURANT ALTERNATIF

42. Action d'un condensateur intercalé dans un circuit parcouru par un courant alternatif. — On sait que tout corps conducteur est susceptible de contenir une certaine quantité d'électricité et l'on sait également que ce phénomène est influencé par les corps qui avoisinent ce conducteur. Si les corps voisins sont métalliques, ils reçoivent par induction une charge électrique de signe contraire et alors, par suite de l'action réciproque qui se produit entre les charges, il est possible d'augmenter la quantité d'électricité que le conducteur pouvait posséder. Si, par exemple, on met en présence et à très faible distance l'une de l'autre deux grandes surfaces parallèles, planes ou cylindriques (*fig. 53*), la charge électrique de ces deux conducteurs peut devenir considérable. Un dispositif de ce genre constitue un *condensateur* dont les deux surfaces conductrices mises en présence constituent les *armatures* et l'isolant interposé, le *diélectrique*.

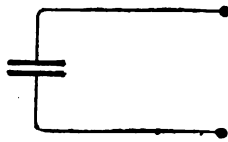


FIG. 53.

Si, dans un circuit présentant une solution de continuité ou coupure, on fait agir une force électromotrice constante, le

courant ne s'établit pas ; mais, si la coupure est due à un condensateur, alors une certaine quantité d'électricité passe dans le circuit pour charger le condensateur et, pendant un temps très court, un courant s'établit dans ce circuit. Le courant cesse lorsque, entre les deux armatures du condensateur, s'établit une différence de potentiel exactement de même valeur que la force électromotrice constante agissant sur le circuit. Le condensateur est alors chargé.

Si, à ce moment, on cesse de faire agir la force électromotrice constante et que l'on réunisse les deux armatures du condensateur par un circuit comprenant un galvanomètre, on constate qu'il se produit un courant très court, de sens opposé au courant de charge ; ce phénomène constitue la *décharge* du condensateur qui restitue l'énergie électrique qu'il avait accumulée. Maxwell a donné à ces courants momentanés de charge et de décharge des condensateurs le nom de courants *de déplacement*, parce que ce savant a considéré le phénomène de la charge comme étant dû au déplacement relatif des charges électriques positive et négative dans le diélectrique, déplacement produisant un *champ électrostatique*. Selon l'idée de Maxwell, le diélectrique subit une déformation comparable à celle qu'éprouve un corps élastique comprimé ou étiré et l'énergie électrique s'accumule dans le diélectrique et non dans les armatures. Dans ces conditions, lors de la décharge, la déformation du diélectrique disparaît et il restitue l'énergie qui s'était dépensée pour le déformer.

En représentant par q la quantité d'électricité, exprimée en coulombs (unité de quantité d'électricité), et par U la différence de potentiel, exprimée en volts, on a

$$q = CU,$$

C étant la capacité, exprimée en farads (unité de capacité). Comme C est généralement exprimé en microfarads, q représente des microcoulombs.

Lorsque la force électromotrice, au lieu d'être constante, est variable, il se produit alors un échange continu d'énergie

entre le générateur d'énergie électrique et le condensateur. Tant que la force électromotrice conserve une valeur supérieure à celle de la différence de potentiel existant entre les armatures du condensateur, le générateur fournit de l'énergie au condensateur; quand, au contraire, cette différence de potentiel atteint une valeur supérieure à celle de la force électromotrice, le phénomène inverse se produit et le condensateur se décharge dans le générateur. Le phénomène qui vient d'être décrit est parfaitement analogue à celui qui se produit lorsqu'une force électromotrice alternative, agissant sur un circuit, détermine la production d'un champ magnétique variable, parce que dans ce cas aussi (§ 37) il y a échange continu d'énergie; mais, comme on le verra, les effets sont opposés.

Si la force électromotrice alternative qui agit sur le circuit est sinusoïdale, on comprend facilement que la courbe de l'intensité du courant dû à cette force électromotrice soit également sinusoïdale.

43. Analogie avec les phénomènes hydrauliques et mécaniques. — La production d'un courant électrique, momen-

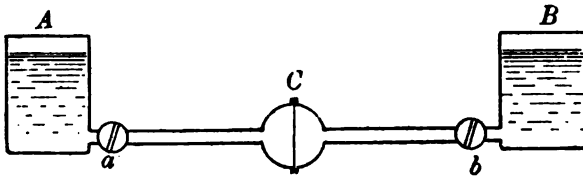


FIG. 54.

tané ou permanent suivant le cas (dans ce dernier cas toujours variable), dans un circuit discontinu peut être comparée à ce qui se passe dans une conduite hydraulique interrompue par un diaphragme élastique et imperméable.

Soient, par exemple, deux réservoirs A et B (*fig. 54*) reliés respectivement par des tubes flexibles aux deux parois opposées d'une chambre C au milieu de laquelle est disposée une membrane élastique. Les tubes étant maintenus dans une position horizontale, l'on remplit le système de liquide de manière que

ce dernier soit au même niveau dans les deux réservoirs et on ferme les robinets *a* et *b*. Le diaphragme, soumis à des pressions égales sur chacune de ses faces, ne subit alors aucune déformation.

Si on place le réservoir A à une certaine hauteur (*fig. 55*) et que l'on abaisse le réservoir B d'une quantité égale, en ouvrant

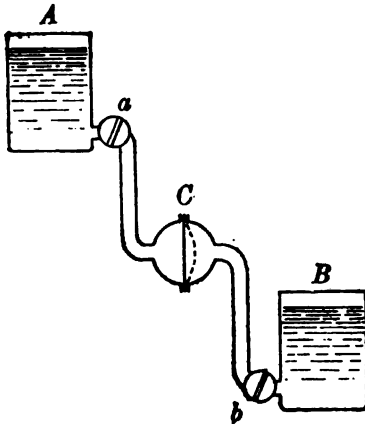


FIG. 55.

les robinets *a* et *b*, les pressions exercées par le liquide sur chacune des faces du diaphragme sont différentes par suite de la différence de niveau qui existe entre les surfaces libres du liquide dans chacun des réservoirs. Sous l'action de cette différence de pression, le diaphragme se courbe du côté du réservoir B; il se produit alors dans le système un mouvement de

l'eau, mouvement dont la vitesse diminue à mesure que se développe la réaction élastique provoquée par l'extension de la membrane. Lorsque cette réaction fait équilibre à la différence de pression, le mouvement de l'eau cesse.

On laisse ensuite les robinets ouverts et on imprime aux deux réservoirs deux mouvements alternatifs opposés, de haut en bas et de bas en haut, dans la direction de la verticale, de manière à soumettre la membrane à des différences de pression variant périodiquement de grandeur et de sens. On peut ainsi maintenir dans le système un mouvement alternatif du liquide, grâce à la déformation élastique continue subie par la membrane qui s'infléchit alternativement dans les deux sens.

Faisant abstraction pour le moment de l'inertie du liquide, on constate qu'à mesure que la différence des pressions exercées sur les deux faces de la membrane augmente, la déformation du diaphragme s'accroît et le liquide se déplace dans une

certaine direction; ce mouvement du liquide cesse à l'instant où la différence des pressions atteint sa valeur maximum (extrémité de la course pour chacun des deux réservoirs), puis cette différence des pressions commence à décroître et, lorsque sa valeur devient nulle (le liquide étant au même niveau dans les deux réservoirs), la membrane redevient plane pendant un instant et à ce moment la vitesse du mouvement imprimé au liquide est maximum.

44. Représentation graphique du phénomène. — Le phénomène qui vient d'être décrit peut être représenté graphiquement à l'aide de deux courbes (*fig. 56*), les ordonnées de l'une d'elles u représentent les valeurs successives de la différence des pressions; les ordonnées de la seconde c indiquent les variations de vitesse du courant liquide. Ces deux courbes sont décalées de $1/4$ de période l'une par rapport à l'autre et la courbe c est décalée en avance.

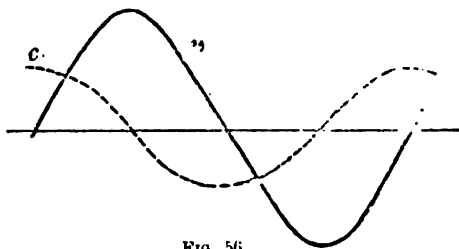


FIG. 56.

Il ne peut en être autrement, parce que le courant liquide change de sens au moment où la différence des pressions u commence à décroître. De plus, en considérant le mouvement d'un seul réservoir, par exemple A, on constate que, lorsqu'il s'élève (et alors u augmente), le liquide se dirige de A vers B (c est alors positif); réciproquement, quand ce réservoir descend (et alors u diminue), le liquide remonte vers A (c est alors négatif).

Par analogie, on peut dire que le courant électrique qui s'établit dans un condensateur, sous l'action d'une différence de potentiel alternative, est aussi alternatif; il fournit périodiquement au condensateur une certaine quantité d'électricité qui, périodiquement aussi, est restituée au circuit par le condensa-

teur, phénomène analogue à celui qui se produit dans l'exemple emprunté à l'hydraulique où une certaine quantité de liquide se loge dans la cavité de la membrane pour ensuite revenir dans le réservoir.

L'intensité et la différence de potentiel entre les armatures d'un condensateur sont de même signe ou de signe opposé suivant que la différence de potentiel augmente ou diminue; l'intensité du courant est réduite à zéro lorsque la différence de potentiel atteint sa valeur maximum. Il en résulte que l'intensité du courant dans un circuit comprenant un condensateur est décalée en avance de $1/4$ de période sur la différence de potentiel existant entre les deux armatures; autrement dit, la courbe de la différence de potentiel entre les deux armatures d'un condensateur est en retard de $1/4$ de période sur celle de l'intensité.

Tout ce qui vient d'être dit se rapporte à un condensateur considéré seul. Mais, lorsque ce condensateur est intercalé dans un circuit soumis à l'action d'une force électromotrice alternative, il est nécessaire, pour déterminer la *force électromotrice résultante*, de faire la somme des forces électromotrices composantes. La différence de potentiel aux bornes du condensateur est, à tout moment, comparable à celle d'une force électromotrice de sens opposé à la force électromotrice agissant sur le circuit et ayant même valeur que cette dernière, parce que le diélectrique interposé entre les armatures du condensateur se comporte, pour ainsi dire, comme un ressort qui, soumis à l'action d'une force périodique, tend toujours, en vertu de son élasticité, à réagir en sens inverse pour reprendre sa condition initiale. On peut donc dire que *la différence de potentiel entre les armatures d'un condensateur dans un circuit, sur lequel agit une force électromotrice alternative, se comporte comme une force électromotrice également alternative agissant dans le circuit et dont la phase est décalée en avance de $1/4$ de période sur la phase de l'intensité du courant*; c'est pourquoi cette nouvelle force électromotrice est en opposition de phase avec la différence de potentiel existant entre les deux armatures.

En reprenant l'analogie avec les phénomènes hydrauliques, on peut remarquer que, si la différence des pressions exercées par le liquide sur les deux faces de la membrane élastique devient trop grande, celle-ci vient à se rompre. De même, si les armatures d'un condensateur sont soumises à une différence de potentiel exagérée, le condensateur est mis hors de service par suite d'une étincelle de décharge qui perfore le diélectrique. Donc, l'épaisseur de la matière isolante qui sépare les deux armatures doit être proportionnée à la différence de potentiel maximum que le condensateur est susceptible de supporter.

Une analogie mécanique avec un circuit comprenant un condensateur se rencontre dans un volant que l'on suppose monté sur pointes et pourvu d'un ressort en spirale (balancier d'une montre); ce balancier tend à reprendre sa position initiale dès qu'on l'a déplacé de sa position d'équilibre et, dans le mouvement alternatif (pendulaire) qui en résulte, on a successivement transformation de force vive en énergie de déformation élastique et réciproquement. Le couple de réaction élastique, proportionnel à l'angle de déplacement, devient maximum quand la vitesse du système est réduite à zéro.

En réalité, comme un volant n'est pas dépourvu d'inertie, le liquide, dans l'exemple hydraulique cité, en possède également. De même, dans le cas électrique, le flux produit par le courant présente une certaine inertie. On doit donc considérer le cas général qui suit après avoir d'abord observé que, dans un circuit ordinaire ayant une résistance ohmique et comprenant un condensateur (en supposant ce circuit dénué de self-induction), la phase de l'intensité reste toujours en avance par rapport à celle de la force électromotrice principale agissant sur ce circuit. C'est pourquoi le courant s'établit en vertu d'une force électromotrice résultante (*fig. 57*) en concordance de phase avec l'intensité et dont la courbe — abstraction faite de l'échelle — peut être représentée par la même sinusoïde. Les ordonnées de cette courbe sont, à chaque instant, la somme algébrique des sinusoïdes composantes (force électromotrice correspondante à la différence de potentiel aux bornes du condensateur et force

électromotrice principale du générateur d'énergie électrique); c'est pour cela que le condensateur, en diminuant la force électromotrice résultante comme le fait la self-induction, pro-

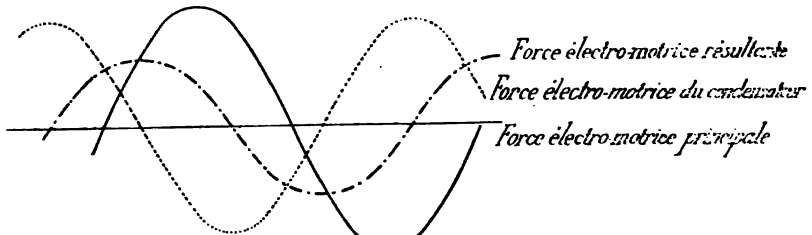


FIG. 57.

duit un effet opposé en ce qui concerne le décalage. Donc, *une capacité intercalée dans un circuit produit une avance de phase de l'intensité par rapport à celle de la force électromotrice, mais cette capacité a aussi pour effet d'augmenter la résistance apparente ou impédance du circuit.*

En résumé, l'effet produit par une capacité est le même que celui d'une self-induction négative; le courant magnétisant aussi bien que celui de charge réduisent l'efficacité de la force électromotrice agissant sur le circuit par rapport à l'intensité du courant produit; mais, tandis que le courant magnétisant a pour effet de décaler en retard la phase de l'intensité, le courant de charge la décale en avance.

45. Circuit comprenant une capacité et ayant de la self-induction (fig. 58). —

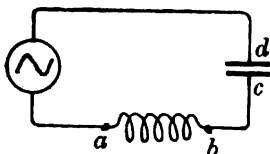


FIG. 58.

Le courant alternatif produit un champ magnétique et ce dernier réagit en donnant naissance à une force électromotrice de self-induction qui est absolument indépendante de la présence d'un condensateur et dont les valeurs dépendent seulement des variations du flux. On sait que cette force électromotrice est alternative et décalée en retard de $1/4$ de période par rapport à la phase de l'intensité, c'est-à-dire

par rapport à la force électromotrice résultante dans le circuit, et aussi que cette force électromotrice est toujours de sens opposé à celle que produit le condensateur, c'est pourquoi les deux effets peuvent se compenser. Lorsque les amplitudes des deux phénomènes sont égales, la compensation est complète et l'impédance du circuit se réduit à la seule résistance ohmique. Dans ce cas, on dit qu'il y a de la *résonance* dans le circuit. Si l'action de la self-induction prédomine, la phase de l'intensité est en retard sur celle de la force électromotrice agissante ; si, au contraire, l'action de la capacité est supérieure, la phase de l'intensité est en avance sur la force électromotrice.

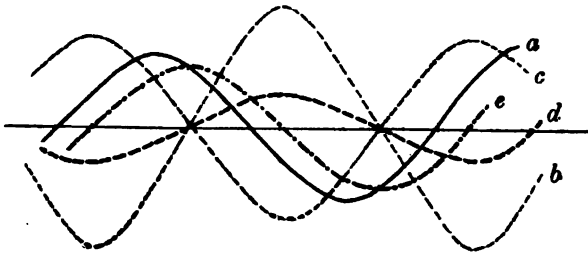


FIG. 59.

Dans le graphique figure 59 :

a est la courbe de la force électromotrice principale ;

b est la courbe de la force électromotrice de self-induction ;

c est la courbe de la force électromotrice due au condensateur ;

d est la courbe résultante de *b* et de *c* ;

e est la courbe résultante de *d* et de *a*, c'est-à-dire la force électromotrice résultante totale.

Le phénomène qui vient d'être décrit présente une certaine analogie avec celui qui se produit dans le cas de l'exemple hydraulique et mécanique à cause de l'inertie des masses en mouvement.

Ainsi, dans le cas de l'exemple emprunté à l'hydraulique, si le liquide présente une grande inertie (du mercure par exemple), lorsque la différence des pressions devient maximum pour

commencer ensuite à diminuer, la vitesse du liquide ne devient pas nulle au moment où elle va changer de direction, ainsi qu'on l'avait admis précédemment; mais, par suite de la force vive acquise par le liquide, celui-ci continue son mouvement encore pendant un certain temps, de sorte que le moment où sa vitesse passe par une valeur nulle est retardé et se produit seulement quand la différence des niveaux dans les réservoirs est déjà un peu inférieure au maximum. Il n'est pas difficile de comprendre pourquoi, pour une différence de niveau maximum donnée que l'on peut obtenir en imprimant un mouvement alternatif aux deux réservoirs, suivant le degré d'inertie du liquide et toujours avec la même fréquence, la valeur de la pression à laquelle la membrane élastique est soumise peut être de beaucoup supérieure à celle qui correspond à la seule différence des niveaux. En d'autres termes, si l'on utilise le même dispositif avec de l'alcool, de l'éther ou tout autre liquide de faible densité, la membrane résiste bien mieux à la pression produite par la différence des niveaux obtenue par le mouvement alternatif des deux réservoirs; en se servant de mercure, pour la même différence des niveaux et pour la même fréquence, la membrane ne résiste pas. Dans le cas où elle résisterait, il est probable qu'il suffirait d'augmenter la fréquence du mouvement alternatif des réservoirs pour arriver à la rupture.

Ces faits, qui se comprennent facilement, peuvent parfaitement être comparés à ce qui se passe en électricité quand une force électromotrice alternative donnée agit dans un circuit ayant de la self-induction et une capacité en série.

Aussi bien aux bornes de la bobine d'induction qu'à celles du condensateur, il peut se produire des tensions bien supérieures à celles qui agissent dans le circuit, tensions d'autant plus élevées que la fréquence est plus grande. Ce fait, au premier abord, peut paraître paradoxal, mais on se rend compte immédiatement de sa possibilité si l'on réfléchit que ces tensions sont de signe contraire et que la tension résultante (nécessaire pour vaincre la résistance du circuit) peut être très faible par rapport aux tensions composantes. On comprend

aussi immédiatement que les phénomènes de résonance sont des plus dangereux et ces phénomènes, que l'on cherche quelquefois à utiliser pour combattre les effets nuisibles de la self-induction, présentent un danger non seulement pour les machines et appareils, mais aussi pour les personnes.

Il est arrivé, par exemple, par suite d'effets de résonance, que des câbles souterrains concentriques ont été complètement mis hors de service, parce que leur capacité s'est trouvée compensée par la self-induction des transformateurs insérés dans le circuit et il s'est produit alors une différence de potentiel tellement considérable entre le conducteur extérieur du câble et l'armature (constituant les armatures d'un véritable condensateur) que le diélectrique interposé n'a pu résister.

46. Capacité et self-induction en dérivation sur le circuit. — Un cas particulièrement intéressant au point de

vue de la pratique est celui dans lequel un condensateur est mis en dérivation sur un appareil ayant de la self-induction. Soit, par exemple, une longue ligne de transmission alimentant un moteur à courant alternatif *M* (*fig. 60*).

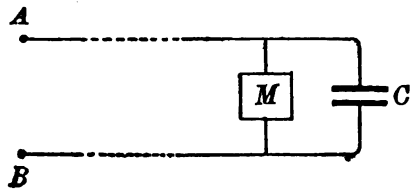


FIG. 60.

Par suite de la présence de ce moteur dans le circuit, l'intensité du courant est décalée en retard par rapport à la tension agissant aux extrémités A et B du circuit, ce qui a pour conséquence de diminuer l'efficacité de l'alternateur alimentant le circuit. Cet inconvénient peut être évité en plaçant un condensateur en dérivation sur le circuit.

En effet (Voir § 38, *fig. 41*), le courant magnétisant du moteur (appareil d'induction) est de $1/4$ de période en retard sur la force électromotrice agissante, tandis que le courant dans le condensateur agit comme un courant de self-induction de sens opposé et de $1/4$ de période en avance. En réglant convenablement la capacité du condensateur, on peut équilibrer ces

deux courants et donner naissance dans le circuit du moteur et du condensateur à un courant alternatif local (courant magnétisant = courant de charge), tandis que la ligne est parcourue seulement par le courant normal actif. Le condensateur, dans ce cas particulier, sert de réservoir d'énergie électrique dans lequel se décharge l'énergie accumulée sous forme de champ magnétique dans le moteur; le condensateur restitue ensuite au moteur, sous forme de courant (courant de décharge), l'énergie qu'il avait emmagasinée pour produire de nouveau un champ magnétique dans le $1/4$ de période qui suit. Il y a donc échange continu d'énergie entre le champ magnétique du moteur et le condensateur et cela à chaque $1/4$ de période. Dans ces conditions, l'énergie nécessaire à l'établissement du champ magnétique n'est plus empruntée au générateur, qui fournit alors seulement le courant actif.

Ainsi qu'on l'a vu dans le paragraphe 45, il peut se produire aux bornes d'une bobine d'induction ou d'un condensateur une différence de potentiel de valeur bien supérieure à celle de la force électromotrice efficace du circuit; dans le cas qui vient d'être examiné (condensateur en dérivation), le courant dans le moteur (appareil d'induction) et dans le condensateur peut atteindre une valeur bien supérieure à celle qui existe normalement sur la ligne.

Pour mieux faire comprendre ce phénomène, on peut encore avoir recours à un exemple emprunté à l'hydraulique. On veut imprimer à un lourd piston s un mouvement alternatif à l'intérieur d'un cylindre (*fig. 61*), en utilisant le mouvement alternatif de deux réservoirs remplis de liquide. Par suite de l'inertie de la masse du piston, le mouvement du liquide dans les tubes t, t' est en retard par rapport au mouvement des réservoirs. Mais si, en ouvrant les robinets r, r' , on fait intervenir l'action de la membrane élastique, alors le mouvement du piston s n'est pas modifié, tandis que celui du liquide dans les tubes t, t' peut être amené en concordance de phase avec le mouvement des réservoirs. Aux fins de course, la membrane

élastique atteint sa tension maximum et, au moment où change le sens du mouvement, le piston ne s'est pas encore arrêté, mais le mouvement du liquide dans les tubes t et t' n'en est pas modifié, parce que l'excédent de liquide déplacé par le piston passe dans la cavité que présente la membrane élastique au moment où elle commence à se retirer.

La chambre à air des pompes à mouvement alternatif remplit une fonction parfaitement analogue à celui de la membrane élastique dans le système qui vient d'être décrit.

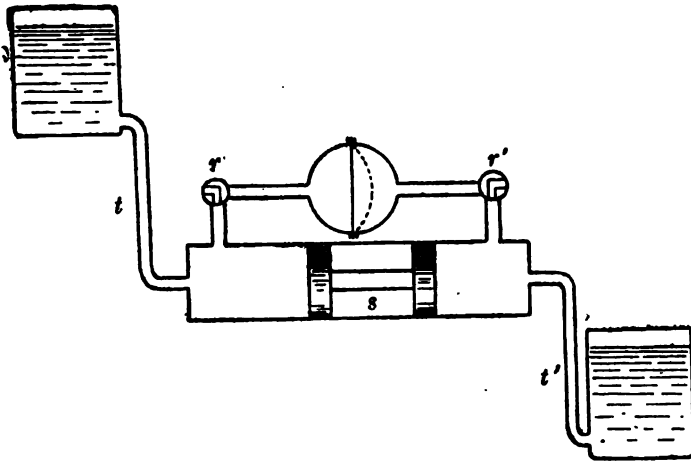


FIG. 61.

L'insertion, dans un circuit parcouru par un courant alternatif, d'un condensateur, monté en série aussi bien qu'en dérivation, peut avoir pour effet de diminuer la résistance apparente de ce circuit, ce qui peut paraître un paradoxe si l'on considère que la capacité comme la self-induction, agissant séparément, tendent au contraire à augmenter cette résistance apparente. Il convient de ne pas oublier que *la conception de la résistance apparente est une véritable fiction*; en réalité, la seule résistance du circuit est la résistance ohmique des conducteurs et l'insertion dans ce circuit d'un appareil qui, sans modifier cette résistance ohmique, donne naissance à un courant magnétisant, ou bien l'insertion d'un condensateur qui produit un courant de

décharge, introduit **tout simplement** dans ce circuit une force électromotrice dont l'effet, suivant le cas, s'ajoute à celui des autres forces électromotrices agissant sur le circuit ou bien s'en retranche, en modifiant dans un sens ou dans l'autre la valeur de l'action antagoniste résultante qui tend à réduire la valeur de l'intensité du courant.

C'est pourquoi, comme cela a été démontré, puisque ces forces électromotrices (de self-induction et du condensateur) tendent à se compenser, il est logique d'admettre que, si on fait agir l'une ou l'autre dans un circuit où l'une d'elles seulement existait préalablement en opposition à la force électromotrice principale, il se produit alors une augmentation de la valeur de l'intensité primitive, ce que l'on exprime en disant que la résistance apparente du circuit a diminué.

47. Condensateurs industriels. — Les condensateurs industriels sont presque toujours constitués par une série de feuilles d'étain séparées les unes des autres par des feuilles de matière isolante (papier, mica, paraffine, cérésine, etc.). On empile ces feuilles régulièrement et on relie à un même conducteur toutes les feuilles d'étain de rang pair et à un second conducteur toutes les feuilles d'étain de rang impair, de manière à former les deux armatures du condensateur. Ce dispositif consiste donc à relier en quantité un grand nombre de petits condensateurs, de manière à obtenir une capacité assez grande.

La pile des feuilles alternativement conductrices et isolantes doit être soumise à une pression assez énergique, afin d'éviter que les variations de température ou d'autres causes ne fassent subir des déformations à l'ensemble, déformations qui amèneraient une modification de la capacité du condensateur, par suite des variations d'épaisseur entre les diverses feuilles.

Il est évident qu'entre deux feuilles d'étain successives existe la même différence de potentiel qu'entre les armatures du condensateur et comme, dans les condensateurs industriels, cette différence de potentiel peut atteindre quelques milliers de volts.

il s'ensuit que les feuilles de matière isolante doivent avoir une certaine épaisseur afin de pouvoir supporter, sans risque de perforation, des tensions aussi élevées.

D'autre part, la capacité du condensateur est en raison inverse de l'épaisseur du diélectrique ; c'est pourquoi il est difficile pratiquement de construire un condensateur industriel de grande capacité pour de hautes tensions, à moins de lui donner des dimensions considérables qui, naturellement, entraînent une dépense assez forte.

Il y a quelques années, l'emploi des condensateurs dans les applications industrielles était nul ou à peu près, parce que le papier paraffiné employé généralement pour leur construction ne répondait pas aux exigences voulues ; il ne présentait pas, sous une faible épaisseur, l'uniformité et la densité nécessaires et alors le moindre petit trou existant dans ce diélectrique rendait le condensateur inutilisable. Le professeur Lombardi, qui depuis longtemps cherchait la solution de ce problème, a réussi dernièrement à fabriquer, par un procédé spécial, des feuilles de cérésine qui présentent un grand pouvoir isolant sous une faible épaisseur. On peut donc espérer que, à bref délai, le condensateur deviendra un véritable appareil industriel dont on pourra se servir en toute sécurité.

Dans les emplois industriels des condensateurs, il y a deux points à considérer. D'abord, lorsqu'on les monte en série dans un circuit ayant de la self-induction dont on veut éliminer les effets, ils donnent lieu à une surélévation de tension (§ 45) qui peut les mettre hors de service, alors qu'au moment des essais en laboratoire, sous la tension normale de l'installation, ils ont parfaitement résisté. Puis, les diélectriques de mauvaise qualité (comme généralement sont ceux qui sont employés industriellement) soumis à des électrisations rapides et alternatives s'échauffent et, si l'on ne prend pas des précautions particulières, cet échauffement peut avoir des conséquences dangereuses. En réalité, la résistivité des isolants diminue à mesure que la température augmente et, alors, au courant de charge peut s'ajouter un courant de conduction

qui se dissipe en chaleur suivant la loi de Joule. Plus la température s'élève et plus diminue la résistivité et, si le phénomène s'accroît, il produit la détérioration du condensateur; c'est là encore une des principales difficultés à vaincre pour constituer un véritable condensateur industriel.

On utilise parfois avec les courants alternatifs de grande intensité des condensateurs à liquide constitués par de minces lames de fer isolées et plongées dans une solution conductrice. Lorsqu'un liquide bon conducteur est parcouru par un courant alternatif de haute fréquence, le phénomène de la polarisation ne se produit que faiblement, parce que les produits de la décomposition électrolytique, se trouvant successivement et à très courts intervalles en présence l'un de l'autre sur chacune des électrodes, se combinent de nouveau. Le liquide, comme tout conducteur, s'échauffe par effet Joule.

Toutefois, il ne faudrait pas déduire de ce fait que la polarisation ne se produit pas; elle s'annule à la fin de chaque période, puis augmente, diminue, change de signe et ainsi de suite. L'effet de ces variations de polarisation donne lieu à une avance de phase de l'intensité par rapport à celle de la force électromotrice agissante et c'est pourquoi un bain électroly-

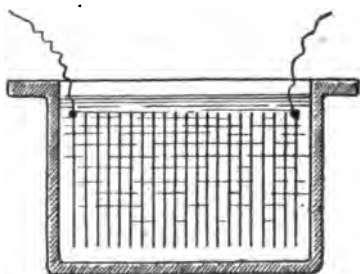


FIG. 62.

tique, intercalé dans un circuit à courant alternatif, se comporte comme un condensateur.

En pratique, ces condensateurs à liquide sont formés d'un certain nombre de plaques de fer séparées entre elles par des baguettes de fibre, le tout étant placé dans une cuve en fer contenant une

dissolution de carbonate de sodium (*fig. 62*). Le mode de connexion des plaques (en série ou en parallèle) ainsi que la densité de la dissolution de carbonate de sodium utilisée sont à déterminer expérimentalement pour chaque cas particulier.

Ces condensateurs, en raison de leur volume, ont une capacité

considérable ; leur échauffement et, conséquemment, leur consommation d'énergie lorsqu'ils sont en service est assez faible. C'est pour ces motifs que leur emploi présente des avantages pour produire des courants déphasés lors du démarrage des moteurs à courant alternatif simple (Voir chap. xv).

Dans d'autres cas, on combat les effets de la self-induction par des moteurs à courant alternatif synchrones surexcités (Voir chap. xiii) qui se comportent comme de véritables condensateurs.

CHAPITRE VIII

BOBINES DE RÉACTANCE

48. Circuit comportant du fer. — On a admis jusqu'à présent que les circuits, parcourus par un courant alternatif et qui étaient dépourvus de fer ou n'en contenaient que très peu, ne donnaient lieu, comme on le comprend, à aucune perte d'énergie. Mais, en réalité, soit par suite du phénomène d'hystérésis qui, à chaque cycle, absorbe une certaine quantité d'énergie électrique dépendant de la qualité, au point de vue magnétique, des matières premières employées, soit par suite de la production de courants de Foucault qui dépensent aussi une certaine quantité d'énergie électrique suivant que le fer est plus ou moins divisé, il se produit un *courant actif*, en outre du *courant magnétisant* (§ 38), dans tout circuit contenant du fer et parcouru par un courant sinusoïdal.

Ce courant actif a une intensité dont la valeur, multipliée par la tension aux bornes du circuit, donne la quantité totale d'énergie absorbée par la résistance ohmique du fil, par l'hystérésis et par les courants de Foucault.

Il est superflu maintenant de faire remarquer pourquoi l'intensité du courant qui passe dans une bobine à noyau de fer (*fig. 63*), sous l'action d'une certaine tension alternative entre les points A et B, intensité indiquée par un ampèremètre, ne donne pas la valeur efficace de l'intensité du courant actif I_a , ni celle du courant magnétisant I_μ , mais bien celle de

la somme de ces courants, les deux composantes étant considérées dans leur phase respective qui, comme on le sait, sont décalées d'un quart de période l'une par rapport à l'autre. Le courant total n'est pas figuré sur le diagramme de la figure 64.

L'emploi du wattmètre permet de déterminer le facteur de puissance k et, par conséquent, d'apprécier l'importance de chacune des deux composantes. L'intensité totale indiquée par l'ampèremètre est à cause de cela plus ou moins en retard, par rapport à

la tension, suivant la valeur du courant actif; en ce qui concerne le courant magnétisant, la composante active est faible si l'intensité est fortement décalée par rapport à la tension.

En général, principalement lorsque le noyau de fer est fermé sur lui-même et est constitué par des feuilles minces,

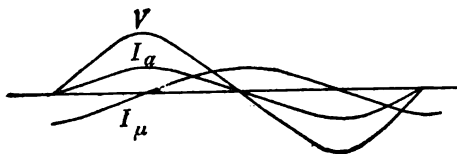


FIG. 64.

si une certaine tension alternative est appliquée aux bornes, le courant qui se produit dans le circuit est très faible; sa valeur n'est que quelques centièmes et parfois même quelques millièmes de celle que produirait une tension constante.

Il ne faut pas oublier que cela est dû à la force électromotrice de self-induction produite par les variations de flux. Ce flux varie comme l'intensité du courant, qui est fortement décalée par rapport à la tension agissante. D'autre part, la force électromotrice de self-induction reste décalée en retard de $1/4$ de période par rapport au flux. C'est pourquoi, entre

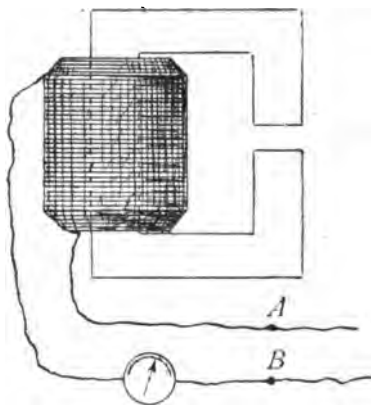


FIG. 63.

la tension agissante et la force électromotrice de self-induction, le décalage de phase atteint près de $1/2$ période, arrivant presque à l'opposition de phase (fig. 65).

La différence entre la valeur de la tension agissante et celle de la force électromotrice de self-induction est la valeur de la tension résultante, valeur qui est celle nécessaire pour que le courant total s'établisse à travers la résistance purement ohmique du circuit.

Quand le flux est intense, la valeur de la force électromotrice de self-induction est grande et, comme elle est

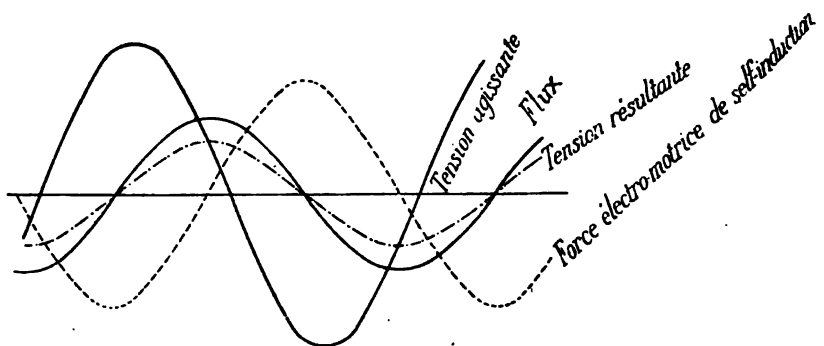


FIG. 65.

presque en opposition de phase avec la tension agissante, la valeur de la tension résultante reste très petite et suffit, comme on l'a dit, à faire passer le courant à travers la résistance purement ohmique du circuit.

L'impédance du circuit a également pour effet, dans ce cas, de réduire la tension efficace ou, ce qui revient au même, de réduire l'intensité du courant qui, sans l'impédance, avec la seule résistance ohmique, passe dans le circuit. Il faut mettre en évidence que ce résultat extrêmement important est obtenu avec une faible dépense d'énergie, énergie nécessaire pour compenser les pertes par hystérésis et par courants parasites (courants de Foucault). Par contre, si on veut obtenir le même résultat avec une résistance ohmique introduite dans le circuit, il n'y a pas économie d'énergie, parce

que cette dernière dépend de la tension efficace et de l'intensité du courant dans le circuit.

Un exemple fera mieux comprendre ce qui vient d'être dit. Entre les extrémités A et B d'un circuit (*fig. 66*) existe une différence de potentiel alternative de 100 volts efficaces.

Si l'on veut intercaler dans le circuit une lampe à arc

consommant 10 ampères sous 33 volts, il faut réduire la tension à 33 volts ou, ce qui revient au même, empêcher qu'il passe dans ce circuit un courant d'intensité supérieure à 10 ampères.

On peut, pour obtenir ce résultat, avoir recours à deux procédés :

On intercale dans le circuit, en même temps que la lampe, une résistance ohmique de 6,7 ohms (1^{re} disposition) afin de produire une chute de tension de $6,7 \cdot 10 = 67$ volts et n'en laisser que 33 de disponibles pour le fonctionnement de la lampe ($67 + 33 = 100$). Dans ce cas, la résistance absorbe une puissance égale à

$$67 \cdot 10 = 6,7 \cdot 10^2 = 670 \text{ watts.}$$

Si le courant était continu, ce serait le seul moyen pratique d'obtenir le résultat désiré. Mais, le courant étant alternatif, on peut obtenir le même résultat d'une autre manière, en intercalant dans le circuit une force contre-électromotrice, c'est-à-dire en intercalant une bobine de réactance (2^e disposition, *fig. 66*). Cette bobine doit avoir une faible résistance, mais une forte impédance et permet d'obtenir le résultat voulu avec une dépense minimum d'énergie ; si la bobine de réactance est bien calculée et bien construite, elle ne doit pas absorber plus de 60 à 70 watts.

Si le but est ainsi atteint par l'emploi d'une force contre-électromotrice (qui, à part de faibles pertes, ne nécessite aucune

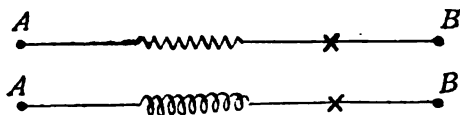


FIG. 66.

dépense d'énergie pour être produite), rien ne doit s'opposer à l'application du même procédé au courant continu. Théoriquement la chose est possible, non en utilisant une batterie de piles ou d'accumulateurs montée en opposition, parce que le courant résultant produirait des effets électrolytiques, mais bien en se servant d'une petite dynamo pouvant développer une force contre-électromotrice de 67 volts. Mais on voit que le remède serait pire que le mal dans le cas actuel, rien n'étant plus simple que l'insertion dans le circuit d'une résistance inerte, naturellement lorsqu'il s'agit du courant continu.

L'emploi du courant alternatif permet donc de produire, avec la plus grande facilité et une perte d'énergie minime, une force contre-électromotrice de self-induction avec un appareil peu coûteux, de dimensions restreintes et qui peut être installé partout.

49. Emploi de la bobine de réactance. — L'emploi d'une bobine de réactance à noyau de fer, à impédance plus ou moins réglable, est d'usage courant dans la pratique.

Pour faire varier l'impédance, il suffit de faire varier la réluctance du circuit magnétique parcouru par le flux ; en introduisant ou en retirant un noyau feuilleté ou un paquet de fils de fer dans la bobine, on peut faire varier l'impédance dans de très larges limites. C'est à ce procédé que l'on a recours pour obtenir des effets variés de lumière sur les scènes de théâtre, car il permet de modifier à volonté l'intensité lumineuse des lampes à incandescence.

Dans le cas d'un noyau ayant la forme que montre la figure 63, on peut diminuer l'impédance en augmentant l'entrefer ou l'augmenter en introduisant plus ou moins dans l'entrefer un morceau de fer.

L'emploi de la bobine de réactance est très généralisé comme résistance de réglage nécessaire au bon fonctionnement d'une lampe à arc à courant alternatif pour laquelle, comme pour les lampes à courant continu, le réglage s'effectue d'autant

mieux que la tension aux extrémités du circuit d'alimentation est plus élevée.

Il y a un autre cas dans lequel la bobine de réactance est très utilement employée, c'est lorsque, dans une *distribution à intensité constante*, on veut faire varier le nombre des appareils récepteurs en service, sans pour cela modifier la tension existant aux extrémités du circuit.

Ainsi, si l'on place trois lampes à arc entre les points A et B (*fig. 67*) d'un circuit où l'on maintient une différence de potentiel alternative efficace de 110 volts, on ne peut supprimer une de ces lampes qu'en lui substituant une bobine de réactance convenable qui introduit dans le circuit des arcs une force contre-électromotrice égale à la tension qu'exigeait la lampe. Un wattmètre intercalé dans le

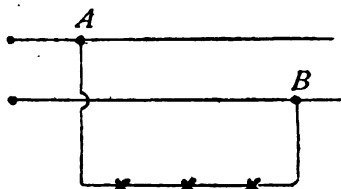


FIG. 67.

circuit montre que la consommation d'énergie est alors un peu plus grande que celle qu'absorbent les deux lampes et que les valeurs de la tension et de l'intensité sont restées les mêmes. Cela veut dire que l'intensité totale a été décalée en retard par rapport à la tension agissante par suite de la présence d'une force contre-électromotrice. Par conséquent, le facteur de puissance du circuit diminue. Ce cas particulier rentre donc dans le cas précédent.

Il est facile de comprendre qu'une bobine de réactance peut, sans consommation notable d'énergie, rester continuellement en dérivation sur la lampe à arc à laquelle elle doit se substituer, dans le cas où le circuit de cette lampe serait interrompu volontairement ou accidentellement.

Soit une distribution à intensité constante avec lampes à incandescence, système utilisé dans certains cas particuliers, par exemple pour l'éclairage du canal de la Baltique (*fig. 68*).

Si chaque lampe est munie d'une bobine de réactance placée en dérivation, la presque totalité de la composante active du

courant total passe dans la lampe, tandis que la composante magnétisante du courant passe dans la bobine ainsi que le reste de la composante active qui sert à compenser les diverses pertes. Cet effet est dû à ce fait que la bobine a été établie pour développer une force contre-électromotrice presque égale à la tension qu'exige la lampe, tout en consommant un courant très minime. Si

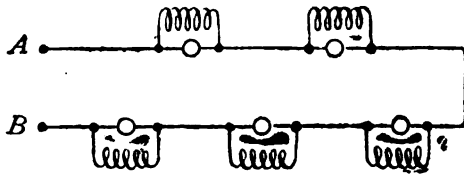


FIG. 68.

une lampe a son filament brisé ou qu'on la retire du circuit, la bobine ne change pas de fonction : elle est parcourue par la totalité du courant et la force

contre-électromotrice qu'elle développe augmente proportionnellement de valeur. Cette force contre-électromotrice n'est plus maintenant en dérivation sur la lampe, mais bien en série sur le circuit principal ; malgré cela l'intensité du courant ne change pas si la tension entre les points A et B reste constante, ce qui modifie le décalage entre la tension agissante et l'intensité du courant. En conséquence, l'intensité du courant subit un décalage plus grand, par rapport à la tension, qu'il ne l'était avant que la lampe ait été retirée du circuit.

Ce procédé permet de rendre le système autorégulateur et de maintenir dans le circuit une intensité constante quel que soit le nombre de lampes en service. Cette question sera, du reste, traitée plus complètement dans le chapitre XII, consacré aux *transformateurs*.

50. Construction des bobines de réactance. — Les bobines de réactance se composent de deux parties : l'enroulement en fil isolé et le noyau de fer.

L'enroulement est fait au tour sur une carcasse en matière isolante (carton, presspahn, fibre, ambroïne, etc.) ou encore en matière non magnétique (zinc, laiton, etc.). On peut également faire cet enroulement directement sur le noyau, mais,

dans tous les cas, il faut interposer une substance isolante.

Le noyau est feuilleté, c'est-à-dire constitué par un paquet de feuilles de tôle rectangulaires, dont le milieu est enlevé de manière à former une sorte de cadre. Ces tôles sont isolées entre elles avec du papier et certains constructeurs fixent directement le papier sur les tôles, à l'aide de colle de pâte, avant de procéder à leur découpage. Les tôles ont une épaisseur de 0,3 mm à 0,5 mm.

Le paquet de tôles est maintenu serré entre deux plaques extrêmes, de quelques millimètres d'épaisseur et en métal non magnétique, à l'aide de boulons, isolés magnétiquement des feuilles de tôle par un tube de papier et des disques de micanite. L'ensemble doit être serré très énergiquement, à bloc suivant l'expression usuelle, afin de réduire le noyau à son volume minimum et aussi pour empêcher les vibrations dont le bruit est désagréable, principalement lorsque les bobines de réactance sont installées dans un local fermé.

Souvent, dans les bobines de petites dimensions, afin d'éviter toute saillie, la tête et le pied des boulons sont coniques et noyés dans les plaques extrêmes.

Lorsque la bobine est enroulée au tour, il faut la faire en deux parties que l'on enfle ensuite sur le noyau, qui doit également être au moins en deux pièces. Cette manière d'opérer permet de diminuer beaucoup la quantité de tôle à employer en réduisant les déchets au minimum.

Pour obtenir avec une feuille rectangulaire deux morceaux en forme de L sans perte de matière, on peut constituer les deux parties du noyau comme l'indique la figure 69. En assemblant

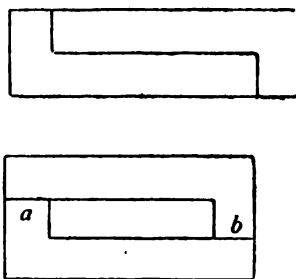


FIG. 69.

les deux pièces au moyen de boulons et de vis, on obtient un cadre rectangulaire.

Aux points de jonction *a* et *b*, les faces en regard doivent

être soigneusement rabotées et on intercale entre elles une feuille de papier. En réalité, le rabot ne produit pas une surface parfaitement dressée et les bavures des diverses tôles établissent des contacts d'une tôle à l'autre, avec production de courants de Foucault. C'est pour éviter que ces courants atteignent une plus grande valeur que l'on a le soin de ne pas mettre les surfaces directement en contact en interposant une feuille mince de papier, disposition qui ne modifie pas sensiblement la réluctance du noyau.

Ces détails de construction s'appliquent également aux transformateurs. Lorsqu'il faut laisser un entrefer, on fait une des pièces du cadre plus courte que l'autre, de manière à obtenir un circuit magnétique partiellement ouvert. Pour assembler les deux pièces, on introduit dans l'entrefer un morceau de bois dur de même épaisseur que l'entrefer:

CHAPITRE IX

COURANTS POLYPHASÉS

51. Systèmes de courants alternatifs. — Tant que l'énergie électrique obtenue sous forme de courant alternatif simple n'a été utilisée que pour l'éclairage, la production de ce courant alternatif suffisait à tous les besoins, d'autant plus que les installations étaient des plus rudimentaires. Mais, pour pouvoir obtenir pratiquement aux extrémités d'un circuit une différence de potentiel constante, on essaya de produire, à l'aide d'un enroulement spécial de l'induit, plusieurs forces électromotrices alternatives ayant entre elles une différence de phase et pouvant s'ajouter convenablement (comme c'est le cas dans les dynamos à courant continu); de même, dans certains cas particuliers où les variations de l'intensité du courant et, par suite, celles du champ magnétique qu'il produit ne permettaient pas d'obtenir le résultat voulu, on essaya aussi d'utiliser simultanément des courants convenablement décalés de phase entre eux. Cette tentative fut couronnée de succès et c'est à l'emploi de ces systèmes de courants alternatifs qu'est due la solution du problème si important de la transmission électrique de l'énergie à distance.

En examinant la question, on voit aussi que la transmission d'énergie avec un courant alternatif simple (*fig. 70*) constitue un véritable système de courants alternatifs. En réalité, le courant dans le conducteur de ligne *a* est toujours égal et de

sens contraire à celui qui passe dans le conducteur b ; ces deux courants sont constamment en opposition de phase (fig. 71), c'est-à-dire qu'ils peuvent être considérés comme deux courants alternatifs décalés de $1/2$ période l'un par rapport à l'autre.

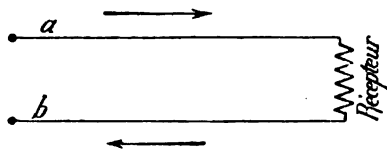


FIG. 70.

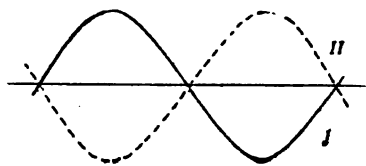


FIG. 71.

Il n'est pas inutile de faire remarquer comment l'observation qui précède a sa raison d'être dans ce fait que toute transmission d'énergie à courant alternatif simple peut être considérée comme une transmission d'énergie à deux courants, ce double courant étant composé de deux éléments en concordance de phase.

On a, en réalité, une pareille transmission (fig. 72). G_1 et G_2 sont deux alternateurs disposés pour que leurs forces électro-

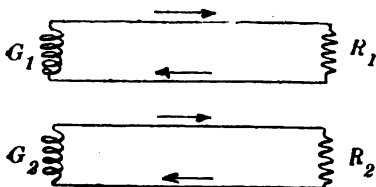


FIG. 72.

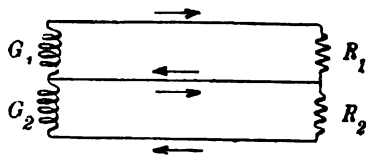


FIG. 73.

motrices soient en concordance de phase. Si les deux récepteurs R_1 et R_2 sont identiques, les intensités de courant sur la ligne sont de même valeur et en concordance de phase. En considérant les courants qui passent dans les deux conducteurs intermédiaires, on remarque que ces deux courants sont en opposition.

Il vient aussitôt à l'idée la possibilité de remplacer les deux conducteurs par un conducteur unique, comme dans un système à trois fils (fig. 73). Mais ce troisième conducteur central

paraît inutile, puisque *la somme des courants qui y passent est constamment égale à zéro* et, en le supprimant, on retombe dans le cas de la transmission à courant alternatif simple qui a servi de point de départ aux considérations précédentes. Donc, lorsque le courant qui est fourni par l'alternateur G_2 a la même valeur et est en concordance de phase avec celui que produit l'alternateur G_1 , le système de ces deux courants se réduit au cas d'un courant alternatif simple.

Si ces deux courants sont décalés de $1/4$ de période (fig. 74), le remplacement des deux conducteurs intermédiaires par un seul peut encore s'effectuer parfaitement et permettre ainsi une économie dans les dépenses d'installation. Mais alors le courant dans le troisième conduc-

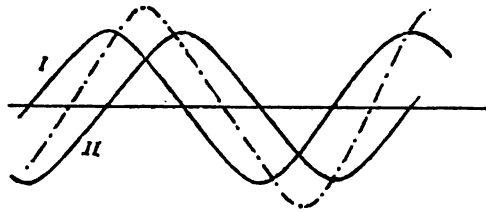


FIG. 74.

teur a une valeur efficace bien déterminée et une phase intermédiaire entre les deux autres, présentant un maximum correspondant au moment où les courants I et II ont même valeur et même signe. Ce maximum est $\sqrt{2} = 1,414$ fois plus grand que le maximum de chacun des deux autres courants.

Avec un système *diphassé* de courants alternatifs, il est possible d'économiser un conducteur sur quatre, sans apporter aucune perturbation dans la transmission.

Si l'intensité du courant dans un des circuits particuliers vient à augmenter, la transmission continue à s'effectuer dans de bonnes conditions, parce que l'intensité du courant dans le conducteur central augmente proportionnellement, en présentant un maximum plus grand que celui qu'il avait tout d'abord. La différence de phase serait modifiée, comme il est facile du reste de le vérifier en traçant le diagramme.

Le système diphassé se prête parfaitement à certaines applications pour lesquelles le courant alternatif simple ne saurait convenir; mais il est encore préférable d'avoir recours à un

ystème de trois courants décalés de $1/3$ de période, système qui reçoit chaque jour dans l'industrie des applications plus nombreuses et sur lequel il est indispensable de s'étendre plus longuement.

52. Système triphasé. — Soient trois circuits, actuellement parfaitement distincts et parcourus chacun par un courant alternatif. Les trois courants ont même valeur et sont décalés,

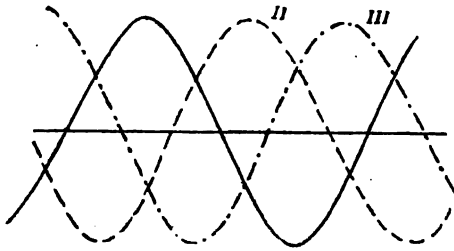


FIG. 75.

l'un par rapport à l'autre, de $1/3$ de période (fig. 75). Dans ces conditions, leurs valeurs successives peuvent être représentées par

trois sinusoïdes d'égale amplitude se succédant à $1/3$ de période.

Les valeurs successives de trois courants alternatifs, satisfaisant à ces conditions, peuvent aussi être représentées de la manière suivante. Sur une feuille de papier à dessin, on trace deux circonférences tangentes C et C (fig. 76), et l'on donne une teinte rose à l'une et une teinte jaune à l'autre. Avec une épingle, fixée au point de tangence, on fixe un disque de carton sur lequel on a tracé des rayons, distants l'un de l'autre de 120° ($1/3$ de circonférence), suivant lesquels on a pratiqué trois fentes I, II et III de longueur au moins égale à celle du diamètre des circonférences C, C. En faisant tourner le disque avec la main à l'aide d'une manivelle en bois fixée dans le carton et en lui imprimant un mouvement uniforme, on voit apparaître à travers les fentes des segments colorés de grandeurs continuellement variables. Ces segments représentent, pour chacune des fentes considérées, les valeurs successives de l'un des trois courants alternatifs. La teinte du segment indique le sens de ces courants, rose, par exemple, pour le positif et jaune pour le négatif.

C'est ainsi, du reste, que se produisent les trois forces élec-

tromotrices respectives qui prennent naissance dans trois

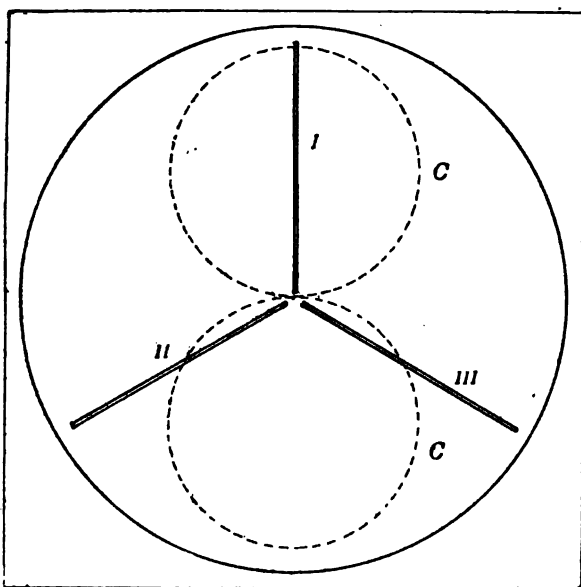


FIG. 76.

bobines placées, à 120° l'une de l'autre, sur un noyau de fer tournant d'un mouvement uniforme dans un champ magnétique produit par un inducteur bipolaire (fig. 77). En reliant les extrémités de chaque bobine à deux bagues métalliques isolées, fixées sur l'arbre

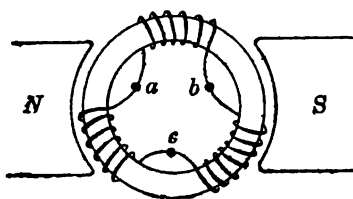


FIG. 77.

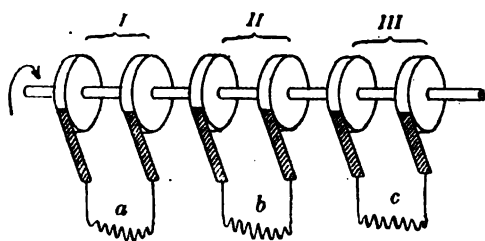


FIG. 78.

et sur lesquelles appuient des balais reliés au circuit d'utilisation, chaque bobine fournit respectivement aux circuits *a*, *b* et *c* (fig. 78) un courant alternatif,

ces trois courants étant décalés entre eux de $1/3$ de période.

On a ainsi constitué une transmission d'énergie comportant six fils de ligne. Mais, par suite d'une propriété caractéristique dont jouit le système triphasé, ces six conducteurs peuvent être réduits à trois, parce que chacun de ces conducteurs sert, en quelque sorte, de fil de retour aux courants qui circulent dans les deux autres (Voir § 53 et 54).

Il est facile de constater, en examinant le diagramme figure 75 et en contrôlant ensuite avec le dispositif du disque mobile, que, à chaque instant, un des trois courants a une valeur égale et de signe contraire à la somme des deux autres; si l'un des trois courants passe par une valeur nulle à l'instant considéré, l'un des deux autres a une valeur égale et de signe contraire à celle du troisième. On en déduit comme conséquence immédiate que *la somme des valeurs instantanées des trois courants est constamment nulle*, résultat qui s'applique à trois grandeurs sinusoïdales quelconques lorsqu'elles ont même amplitude, même fréquence et qu'elles sont décalées de $1/3$ de période.

53. Montage en étoile. — Si l'on considère encore trois circuits complets et disposés comme l'indique la figure 79, les trois conducteurs p , q et r peuvent être considérés comme conducteurs de retour de trois circuits, quoique, avec le courant alternatif, le conducteur de retour, au vrai sens de ce mot, n'existe pas, chaque conducteur étant successivement fil d'aller et fil de retour. En remplaçant ces trois conducteurs par un seul, ainsi que le montre la figure 80, ce conducteur unique est parcouru par un courant égal à la somme des trois i_1 , i_2 , i_3 ; mais, comme il a été déjà dit, cette somme a constamment une valeur nulle. Donc, ce conducteur peut être supprimé et l'on arrive alors à la disposition représentée figure 81. C'est pourquoi il est possible, avec trois conducteurs seulement, d'établir une transmission électrique d'énergie avec trois courants alternatifs constituant un système triphasé.

A un instant quelconque, le courant l ayant une valeur égale et de signe contraire à la somme des deux autres, cela veut dire que, lorsqu'il se dirige vers le centre O , au départ, les

deux autres s'en éloignent et la connexion indiquée est parfaitement exacte, puisque le retour du courant I s'effectue par

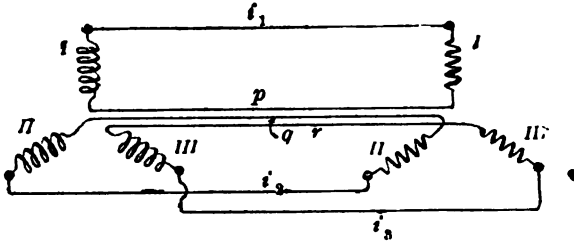


FIG. 79.

les circuits II et III. De même, à l'arrivée et au même moment, le courant I s'éloigne de O_1 , tandis que les deux courants II et III se dirigent vers le centre O_1 .

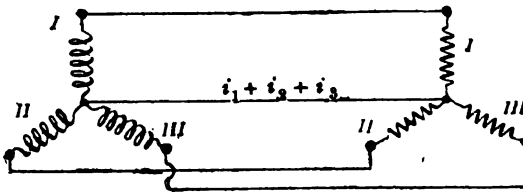


FIG. 80.

Au moment où l'un de ces courants passe par une valeur nulle, par exemple le courant II, le courant I a une tension qui s'augmente de celle du courant III et, dans les circuits

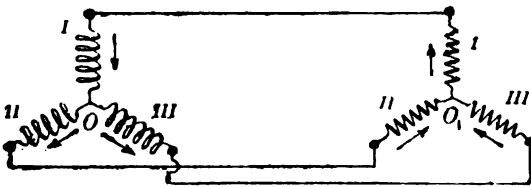


FIG. 81.

I et III (en supposant à ce moment le circuit II supprimé), l'intensité est égale partout et le courant circule sous l'action d'une force électromotrice (au moment considéré) qui a une valeur double de celle qui agit sur l'un quelconque des deux

circuits, même si, à ce moment, les forces électromotrices sont égales. Dans ce qui précède, on suppose les trois circuits identiques.

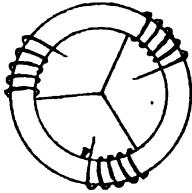


FIG. 82.

Ce mode de couplage des circuits reliant l'alternateur et les récepteurs est appelé *montage en étoile* ou *couplage ouvert*. Il suffit alors de placer trois bagues au lieu de six sur l'alternateur pour recueillir les courants, parce que les trois extrémités antérieures des bobines ou les trois extrémités postérieures (ce qui est indifférent) sont reliées ensemble et le point de liaison, appelé *point neutre*, doit être parfaitement isolé (fig. 82).

54. Montage en triangle. — Les trois circuits peuvent encore être combinés d'une autre manière. En les disposant suivant les trois côtés d'un triangle équilatéral, au lieu de les placer suivant les trois rayons à 120° d'une circonférence, on a

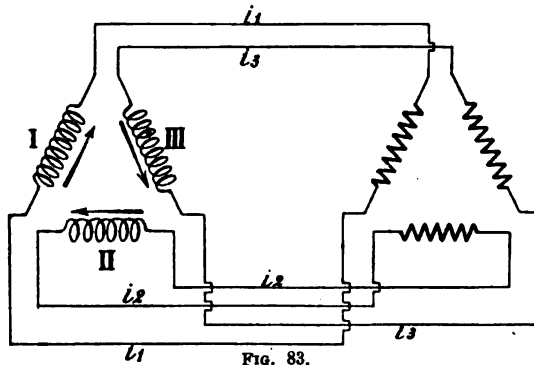


FIG. 83.

toujours les courants de deux quelconques des circuits voisins l'un de l'autre. Les conducteurs de la ligne peuvent être réduits de six à trois (fig. 83) en réunissant les courants i_2i_3 ; i_3i_2 ; i_2i_1 ; dans ce cas, les conducteurs sont parcourus par la différence des valeurs de ces courants, autrement dit par la différence algébrique de leurs valeurs à chaque instant.

Il s'agit en effet d'une différence, parce qu'on doit admettre

comme positif un certain sens du courant, par exemple en considérant comme positif un courant qui circule dans les enroulements dans le sens du mouvement des aiguilles d'une montre. Les conducteurs de la ligne sont, par suite, parcourus à chaque moment par des courants dont la valeur est égale à la différence :

$$\begin{aligned} i_1 - i_3 \\ i_3 - i_2 \\ i_2 - i_1 \text{ (fig. 84).} \end{aligned}$$

Il ne peut en être autrement, parce que les trois courants dans les conducteurs de la ligne constituent un système triphasé

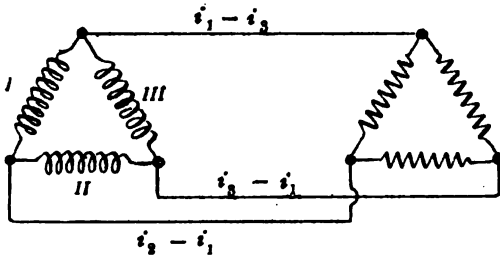


FIG. 84.

comme dans l'alternateur et dans les récepteurs. En réalité, on a à chaque instant

$$(i_1 - i_3) + (i_3 - i_2) + (i_2 - i_1) = 0.$$

Au moment où le courant II passe par une valeur nulle, les courants I et III ont une valeur égale, mais de sens contraire, et, dans le conducteur $i_1 - i_3$, l'intensité est maximum.

Ce mode de montage porte le nom de *couplage en triangle* pour le distinguer du montage en étoile; on le désigne aussi sous le nom de *couplage fermé*.

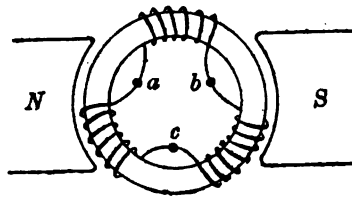


FIG. 85.

Dans la pratique, un alternateur bipolaire avec montage en triangle doit avoir ses trois bagues de prise de courant reliées respectivement aux trois points a, b, c (fig. 85). Si l'enroulement est continu sur la totalité de l'anneau (anneau Gramme

ou Pacinotti), il suffit d'établir trois prises de courant en trois points équidistants et de les relier respectivement aux trois bagues pour obtenir des courants triphasés. C'est ce qui a été du reste indiqué dans le paragraphe 3 pour transformer une petite dynamo à courant continu en alternateur.

55. Intensité et différence de potentiel dans un système triphasé monté en étoile. — Si, dans un système triphasé en charge, on suppose, pour un instant, que les trois circuits des récepteurs sont identiques, il en résulte une identité complète pour

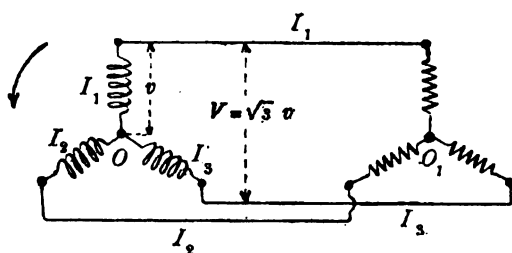


FIG. 86.

les trois courants en ce qui concerne leur valeur efficace et la différence de potentiel entre les bornes de l'alternateur et le centre de l'étoile (fig. 86).

La valeur de l'intensité du courant dans les conducteurs de ligne est la même que dans les circuits correspondants de l'alternateur ; par conséquent, la valeur de la différence de potentiel V entre deux conducteurs de la ligne est celle de la différence de potentiel v , correspondant à un seul des enroulements de l'alternateur, multipliée par $\sqrt{3}$. En réalité, la différence de potentiel entre deux quelconques des conducteurs de la ligne au départ est, à chaque instant, égale à la différence des tensions aux bornes des deux enroulements correspondants de l'alternateur, ce qui concorde parfaitement à ce qui a été dit au sujet de l'intensité dans le paragraphe précédent. La construction graphique montre que la valeur maximum de la différence de potentiel est $\sqrt{3}$ fois celle de l'une des tensions composantes.

Ces tensions sont décalées de $1/3$ de période et la valeur efficace de V reste, comme il a été dit, $\sqrt{3}$ fois celle de v , ce

dont, du reste, on peut se rendre compte en examinant le graphique figure 87. Si les intensités sont en concordance de phase avec les tensions v , le diagramme montre que la courbe V divise en deux parties égales le segment t_1 ; or ce segment représente $1/6$ de période, soit 60° . Par suite, la tension V retarde de 30° sur l'intensité du courant I_1 , conséquemment elle est en avance de $240 - 30 = 210^\circ$ sur l'intensité du courant I_3 , c'est-à-dire retarde de $120 + 30 = 150^\circ$.

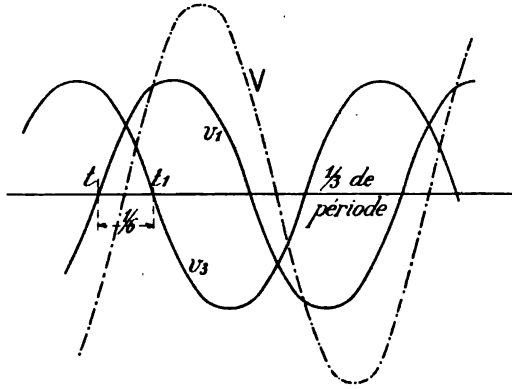


FIG. 87.

Ce raisonnement, fait pour un circuit, s'applique également aux deux autres qui sont absolument symétriques.

Les tensions aux bornes des trois circuits de récepteurs, entre O_1 et les conducteurs de la ligne, sont égales à V diminué des chutes dues à l'impédance de la ligne.

56. Intensité et différence de potentiel dans un système triphasé monté en triangle. — Si les circuits sont montés en

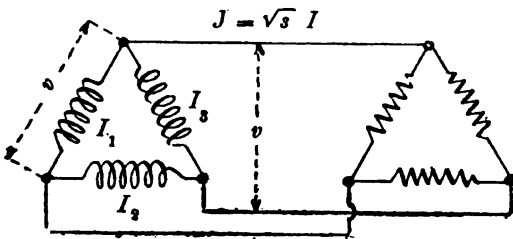


FIG. 88.

triangle (fig. 88), le raisonnement, fait d'abord pour les tensions, s'applique de même aux intensités.

Par conséquent les valeurs efficaces de l'inten-

sité en ligne sont $\sqrt{3}$ fois celles du courant dans les enroulements de l'alternateur ou dans les trois circuits de récepteurs ;

mais les différences de potentiel entre les trois conducteurs de ligne au départ sont égales aux tensions efficaces aux bornes de chaque enroulement. Par analogie avec le cas précédent, l'intensité du courant J est en retard de 30° par rapport à l'intensité I_1 et de 150° par rapport à l'intensité I_3 .

A l'aide d'instruments appropriés, on peut vérifier les valeurs efficaces des tensions et des intensités et, entre ces valeurs et les valeurs efficaces de l'intensité et de la tension de chaque circuit considéré seul, on trouve le rapport indiqué.

57. Choix du mode de montage. — Le montage en étoile convient tout particulièrement pour les alternateurs et les moteurs dans les installations à courant alternatif pour transport électrique d'énergie, parce que la transmission s'effectue sous une différence de potentiel supérieure de 73 0/0 à celle qui existe aux bornes de chaque enroulement de l'alternateur et que, par suite, le bon isolement de ces enroulements est plus facile à obtenir. Ainsi, dans un transport d'énergie avec courants triphasés sous 10 000 volts de différence de potentiel entre les fils de ligne, si on monte les circuits de l'alternateur en étoile, la tension aux bornes de chacun d'eux sera seulement de

$$10\,000 : \sqrt{3} = 5\,780 \text{ volts,}$$

ce qui constitue un grand avantage.

Au contraire, le montage en triangle, rarement employé pour les circuits de l'alternateur, est très usité pour les circuits de récepteurs, surtout si ces récepteurs sont des moteurs, parce que les moteurs sont généralement alimentés par des courants à basse tension, la tension dans ce cas étant réduite à l'aide de transformateurs montés en triangle.

Si, dans un générateur, avec circuits montés en triangle, les trois forces électromotrices développées n'ont pas exactement des valeurs identiques, leur somme n'est pas constamment nulle et, par suite de la force électromotrice résultante,

il peut se produire un courant local dans l'enroulement induit fermé sur lui-même, courant qui produit un échauffement anormal. Le même fait peut également se produire dans un alternateur dont les circuits induits sont montés en étoile, mais la force électromotrice résultante n'a, dans ce cas, qu'une action minime, le courant anormal ainsi produit devant parcourir la totalité du circuit.

Le montage en triangle assure l'indépendance des circuits des récepteurs, propriété qui présente peu d'importance lorsque

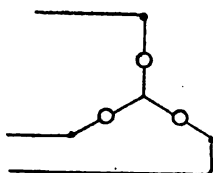


Fig. 89.

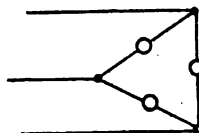


Fig. 90.

les récepteurs sont des moteurs, mais qui constitue un avantage précieux si ces récepteurs sont des lampes.

Si un circuit comporte, par exemple, trois lampes identiques de 100 volts montées en étoile (*fig. 89*) et que l'une d'elles s'éteigne ou soit retirée du circuit, les deux autres ne fonctionnent plus régulièrement, parce que, au lieu des 200 volts efficaces de tension qui leur sont nécessaires, par suite de l'ouverture du troisième circuit, il ne reste qu'une tension disponible normale de $100 \cdot \sqrt{3} = 173$ volts.

Si une deuxième lampe est encore retirée du circuit, la troisième ne peut plus fonctionner.

Si, au contraire, les trois lampes sont montées en triangle (*fig. 90*), elles sont alors complètement indépendantes et, à part la faible chute de tension en ligne provoquée par l'extinction de deux des lampes, celle qui reste en service continue à fonctionner normalement.

Toutefois il n'est pas indispensable que, les récepteurs étant montés en triangle, les circuits de l'alternateur soient

couplés aussi de cette manière; ces derniers peuvent être montés en étoile. Aussi, dans les installations d'éclairage, cette

disposition (*fig. 91*) est-elle fréquemment employée.

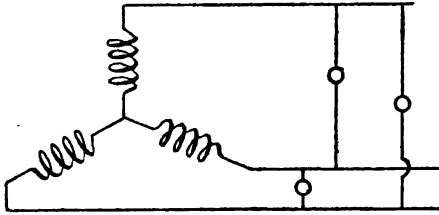


FIG. 91.

58. Système triphasé non équilibré.

— Jusqu'ici on a supposé que les trois circuits de récepteurs

avaient la même impédance ou encore que l'un des circuits ne fonctionnait pas, tandis que les deux autres étaient en charge. Il convient d'examiner ce qui se produit lorsque l'impédance ou même la seule résistance ohmique d'un circuit est modifiée.

Considérons d'abord le cas le plus simple et qui, du reste, est le plus intéressant, dans une distribution d'énergie pour l'éclairage.

Si l'un des circuits comporte deux lampes tandis que les deux autres n'en comportent qu'une et que ces circuits soient montés en étoile (*fig. 92*), le fonctionnement n'est plus possible parce que la distribution des potentiels n'est plus régulière : le circuit ayant la plus faible, résistance a une tension disponible trop faible, tandis que les deux autres ont une tension trop élevée et, par suite, les deux lampes *a* et *b* ont une intensité lumineuse excessive.

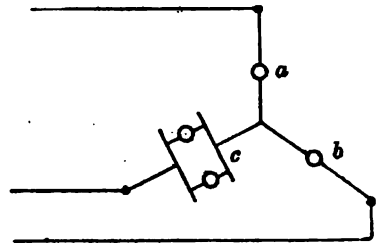


FIG. 92.

Sauf le cas dans lequel la charge augmente uniformément sur les trois circuits, il est impossible, avec un système triphasé à trois conducteurs de ligne, d'avoir un dispositif auto-régulateur lorsque les trois circuits de récepteurs sont montés

en étoile. L'autorégulation est toutefois possible en établissant un quatrième conducteur réunissant les centres O et O' des deux étoiles (Voir le dernier alinéa de ce paragraphe); mais alors on n'a plus un système triphasé pur et simple.

Ce résultat peut être obtenu en montant les trois circuits en triangle, parce qu'alors les tensions PQ , QR et RP sont maintenues par l'alternateur et il est possible d'avoir des charges inégales dans les trois circuits (*fig. 93*). Il se produira sans doute quelques inégalités dans les tensions, par suite des perturbations qu'entraînent ces inégalités dans les charges; le décalage entre les tensions et les intensités variera alors, puisque, dans tout système triphasé, il faut toujours que la somme des intensités soit nulle dans les conducteurs de la ligne, de même que la somme des trois tensions dans l'alternateur.

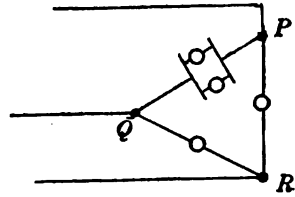


FIG. 93.

Il semble paradoxal, à première vue, que, dans un circuit constitué comme le montre la figure 94 (étant donné que les

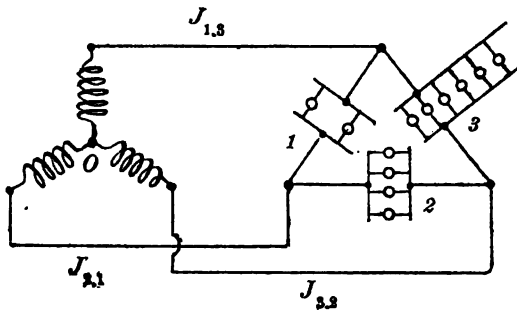


FIG. 94.

tensions aux bornes des circuits 1, 2 et 3 sont égales, décalées de $1/3$ de période et d'allure sinusoïdale), les trois intensités $J_{1,3}$, $J_{2,1}$, $J_{3,2}$ dans les fils de ligne, qui forcément doivent avoir des valeurs inégales si les trois circuits ont des charges différentes, aient une somme constamment nulle. Mais cela

doit être, parce qu'autrement au point O il y aurait alors accumulation de charge électrique pendant une partie de la période et une décharge pendant l'autre partie, ce qui serait contraire à la première loi de Kirchhoff.

On peut du reste se rendre compte de cette propriété particulière du système triphasé en traçant trois courbes sinusoïdales (fig. 95) décalées de $1/3$ de période et d'amplitude

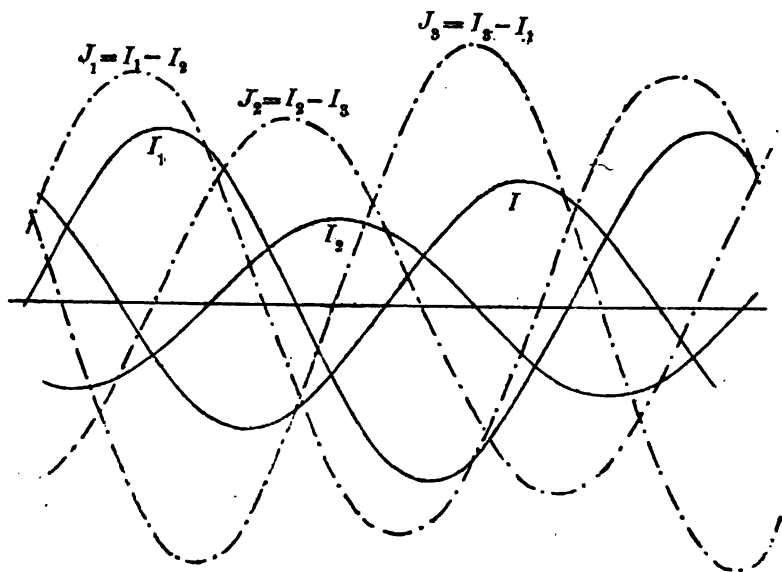


FIG. 95.

différente. En établissant les trois courbes qui ont pour ordonnée la différence des ordonnées des premières courbes, prises deux à deux, on trouve que ces courbes $J_{1,3}$, $J_{2,1}$, $J_{3,2}$, constituent encore un système triphasé et que leur somme, à un moment quelconque, a une valeur nulle ; mais ces courbes ne sont plus décalées de 120° l'une par rapport à l'autre ; elles forment entre elles des angles différents et leurs valeurs efficaces ne sont plus les mêmes.

Pratiquement le système peut être considéré comme autorégulateur en ce sens que, si la répartition de la charge sur les trois circuits n'est pas trop inégale, les tensions restent

presque égales et cela sans avoir recours à un système de régulation spécial dans le circuit le plus chargé.

Un groupement en étoile de circuits de récepteurs peut être rendu pratiquement autorégulateur par l'adjonction d'un quatrième conducteur de ligne reliant les centres O et O' des deux étoiles du départ et de l'arrivée, ainsi que cela a été déjà indiqué ; mais, dans ce cas, l'installation perd un peu de sa simplicité. Dans la pratique, on utilise souvent ce dispositif, parce qu'il permet de réaliser une économie notable dans le poids des conducteurs. On pourrait, il est vrai, supprimer ce quatrième conducteur, si les deux centres O et O' étaient mis en communication avec une bonne terre ; mais ce mode de procéder, utilisé aux États-Unis, est proscrit par les règlements dans les pays d'Europe.

59. Mesure de l'énergie électrique fournie ou utilisée.

— Pour mesurer l'énergie électrique débitée par un générateur triphasé, c'est-à-dire utilisée par un circuit récepteur triphasé, on se sert toujours du wattmètre. Si les circuits sont également chargés, la puissance moyenne totale est égale à trois fois la puissance moyenne d'un circuit considéré seul. Si les trois circuits ont des charges inégales, il est indispensable de faire trois lectures, une sur chacun d'eux.

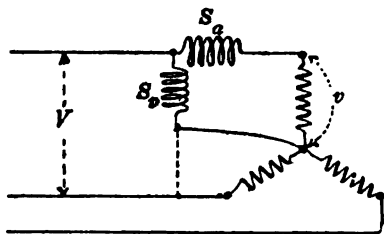


Fig. 96.

Lorsque les récepteurs sont montés en étoile et que les trois circuits sont également chargés et ne présentent pas d'induction (*fig. 96*), on intercale dans un des conducteurs de ligne la bobine en gros fil des ampères du wattmètre S_a et l'on met la bobine en fil fin des volts S_v en dérivation sur le conducteur de ligne, d'une part, et sur le centre de l'étoile, d'autre part. Si W est la quantité d'énergie absorbée indiquée par l'instrument, la puissance moyenne totale est

$$P = 3 W.$$

Lorsque le centre de l'étoile n'est pas à la portée de l'opérateur, la bobine en fil fin du wattmètre doit alors être mise en dérivation sur deux des conducteurs de ligne, afin de prendre la différence de potentiel V existant entre deux des bornes du circuit des récepteurs. Dans ce cas, si W_1 représente la lecture faite au wattmètre, la puissance moyenne totale est

$$P = 2 W_1.$$

En effet, la puissance totale, comme on vient de le voir, est

$$P = 3 W = 3 I v;$$

en mettant la bobine en fil fin du wattmètre en v , le wattmètre^{re} indique une puissance dont la valeur est donnée par la relation

$$W_1 = k I V,$$

comme on l'a démontré dans le paragraphe 37.

En se reportant à la construction graphique représentée par la figure 45 (p. 90) et en la prenant en sens inverse, dans le cas actuel, le décalage étant de 30° entre la tension V et l'intensité I (§ 55), on a pour k la valeur 0,865 ou, plus exactement,

$$k = \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

D'autre part,

$$V = \sqrt{3} \cdot v;$$

en substituant, on obtient, par conséquent,

$$W_1 = k I V = \frac{\sqrt{3}}{2} I \cdot \sqrt{3} v = \frac{3}{2} I v$$

ou

$$W_1 = \frac{P}{2}.$$

En utilisant deux wattmètres dont les bobines en gros fil sont intercalées respectivement sur deux des conducteurs et dont les bobines en fil fin sont reliées au troisième conducteur, le décalage étant de 30° pour chaque wattmètre et les charges se trouvant équilibrées, les indications qu'ils fournissent sont

identiques et la somme de ces dernières fait connaître la puissance totale.

Lorsque les circuits de récepteurs sont montés en triangle (fig. 97) et si la charge sur les trois branches est équilibrée et non inductive, on procède comme suit. Si l'un des côtés du triangle est facilement accessible et que l'on puisse y intercaler la bobine en gros fil Sa du wattmètre, on met en dérivation la bobine en fil fin Sv' et la puissance totale, exprimée en watts, s'obtient en

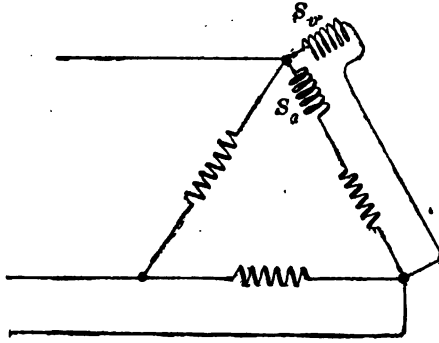


FIG. 97.

multipliant par 3 le nombre lu sur l'instrument. Si, au contraire, la bobine en gros fil Sa ne peut être intercalée que sur l'un des conducteurs, l'intensité du courant est $\sqrt{3}$ fois plus grande et la puissance moyenne totale est égale à deux fois celle qu'indique l'instrument.

Quand les circuits de réception, tout en étant équilibrés au point de vue de la charge, présentent de l'induction, c'est-à-dire quand l'intensité n'est pas en concordance de phase avec la tension agissante, la mesure de la puissance totale absorbée peut s'effectuer avec une seule lecture, en la multipliant par trois, à la condition toutefois, dans le cas du montage en étoile, que le centre de cette dernière soit accessible pour la mesure de la tension et, dans le cas du montage en triangle, que l'un des côtés du triangle soit à la disposition de l'opérateur pour y intercaler la spirale en gros fil pour la mesure de l'intensité.

Dans tous les autres cas, qui seront examinés dans le tome II, il est toujours nécessaire de faire au moins deux lectures en se servant, soit d'un seul wattmètre que l'on installe successivement sur chacun des deux circuits, soit, ce qui est préférable, en utilisant deux instruments installés comme il est

dit ci-dessus et sur lesquels les lectures se font simultanément.

Mais, si la charge est inductive, les décalages de la tension par rapport à l'intensité ne sont plus les mêmes, supérieurs à 30° pour l'un et inférieurs à 30° pour l'autre. Les deux indications ne sont plus identiques, mais leur somme fait connaître encore la puissance totale.

Dans le cas d'un système triphasé également chargé et dont le point neutre O est inaccessible (c'est le cas d'un alternateur,

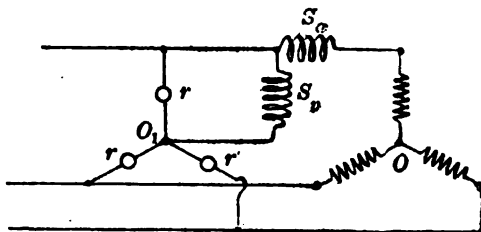


Fig. 98.

par exemple), on peut créer un point neutre artificiel (Fig. 98) en montant en étoile sur les trois conducteurs trois résistances égales r non inductives. En plaçant alors la bobine en fil fin S_v du wattmètre en dérivation sur O_1 et un des fils de ligne, la puissance moyenne totale est

$$P = 3W$$

si W est la puissance lue sur le wattmètre et cela, ainsi qu'on l'a déjà dit, quoique la charge soit inductive.

Les trois résistances r peuvent être constituées par trois lampes à incandescence ou par trois groupes de lampes en série; mais, dans ce cas, il faut d'abord s'assurer qu'elles présentent une résistance identique sous la tension à laquelle elles doivent être soumises. On peut aussi faire trois lectures en changeant de branche chaque fois les lampes ou les groupes de lampes et en prenant ensuite la moyenne des résultats obtenus. De plus, il ne faut pas oublier que les lampes absorbent une certaine quantité d'énergie qui doit entrer en ligne de compte, si l'on ne veut pas avoir un résultat erroné.

CHAPITRE X

CHAMPS MAGNÉTIQUES PRODUITS PAR LES COURANTS ALTERNATIFS

60. Phénomènes produits par un flux alternatif. — On a étudié dans les chapitres II et III les phénomènes produits par un courant alternatif sur le circuit même qu'il parcourt ainsi que sur un second circuit fixe placé à proximité sur le parcours du flux, dans des conditions telles que leur tendance à se déplacer soit empêchée par la fixation du système. Il convient maintenant d'examiner les phénomènes qui se produisent dans un circuit, sous l'action de l'induction mutuelle, lorsque ce circuit est mobile, c'est-à-dire libre de se mettre en mouvement, ainsi que l'effet dû à la présence d'un écran magnétique qui le soustrait totalement ou partiellement à l'action du flux alternatif.

Les phénomènes qui se produisent dans ces conditions et qu'il est facile de vérifier expérimentalement ont été observés pour la première fois par le professeur Élihu Thomson.

Pour effectuer ces expériences, il faut avoir à sa disposition un puissant électro-aimant à courant alternatif, avec noyau droit constitué par un faisceau de fils de fer doux.

Ces expériences se font encore mieux avec un petit électro-aimant à noyau feuilleté, dans le circuit duquel est intercalé un interrupteur de Wehnelt qui permet d'obtenir un courant variable de très grande fréquence.

Si on enfle sur l'extrémité saillante du noyau un anneau assez gros, en cuivre ou mieux en aluminium, et que l'on envoie le courant dans l'enroulement de l'électro-aimant, il semble, au premier abord, que l'anneau doit rester immobile, puisqu'il est le siège d'un courant induit et que tout courant qui se trouve dans un champ magnétique, quoique tendant bien à se déplacer, doit rester immobile puisque les actions produites doivent se neutraliser si l'on tient compte des considérations suivantes :

Lorsqu'on suspend, parallèlement aux spires, un anneau autour d'un électro-aimant parcouru par un courant continu, si on excite cet électro-aimant, il se produit un champ magnétique; le courant induit dans l'anneau donne naissance à un flux de sens contraire et l'anneau est repoussé. En supprimant le courant inducteur, c'est-à-dire le champ magnétique, le courant induit dans l'anneau change de sens et l'anneau est attiré. On peut en déduire que, si le courant qui excite l'électro-aimant est alternatif,

à chaque période il se produira deux fois une attraction et deux fois une répulsion et, ces actions se compensant, l'anneau doit rester immobile.

Mais il ne faut pas oublier que l'intensité du courant $A' B' C' D' \dots$ est décalée en retard, par suite de la self-induc-

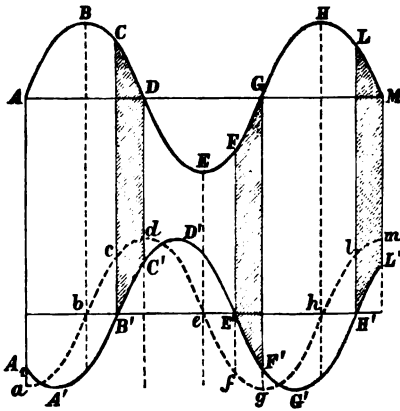


FIG. 99.

tion, sur la force électromotrice induite $a b c d$ (fig. 99). La courbe de cette force électromotrice induite suit, comme on l'a déjà vu, celle du flux alternatif $A B C D \dots$ à la distance de $1/4$ de période. Si l'intensité était encore décalée en retard de $1/4$ de période, la force d'attraction (flux et intensité de même sens) serait compensée par la force de répulsion (flux et inten-

sité de sens contraire). Si, au contraire, l'intensité est décalée de plus de $1/4$ de période, l'attraction se produit seulement dans les parties hachurées sur la figure 99, tandis que, dans les autres, il y a répulsion. Cette dernière étant prédominante, l'anneau tend à sortir du noyau sur lequel il est enfilé (*fig. 100*) et il est repoussé si la force de répulsion est plus grande que l'action contraire de la pesanteur. Pour effectuer cette expérience plus simplement, on peut compenser l'action de la pesanteur en attachant l'anneau à l'une des extrémités d'un fil passant sur une petite poulie, l'autre extrémité libre étant munie d'un poids équilibrant exactement celui de l'anneau. En disposant l'anneau à une distance de quelques millimètres au-dessus du noyau, le même phénomène se produit également.

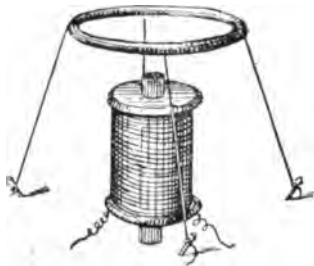


FIG. 100.

En interposant entre l'anneau et le noyau une lame de cuivre, la répulsion n'a pas lieu. Cette lame de cuivre constitue un écran en ce sens que le courant induit dans cette lame produit un flux alternatif qui est précisément de sens opposé au flux inducteur, parce que cette lame a une résistance très faible et une self-induction négligeable. Au delà de la lame, il n'y a plus de flux et l'anneau n'est plus le siège de phénomènes d'induction.

En disposant convenablement un écran approprié, il est possible de faire tourner un disque soumis à l'action d'un flux alternatif.

On prend un disque d'aluminium ou de cuivre (*fig. 101*) bien équilibré et on le fait reposer par son centre sur un pivot ou encore on le suspend horizontalement à l'aide d'un fil. Si, à l'aide de l'électro-aimant qui vient d'être décrit, on fait agir un flux alternatif sur la face inférieure du disque vers la périphérie, il se développe dans le disque des courants

induits, plus ou moins circulaires, qui se ferment sur eux-mêmes en suivant un circuit de faible résistance. La figure 101

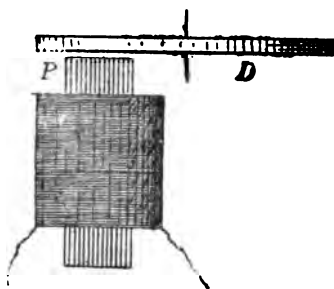
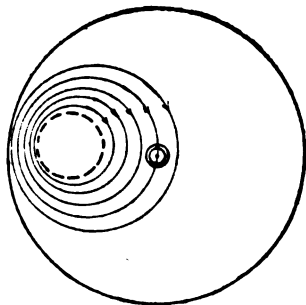


FIG. 101.

montre la direction de ces courants lorsque le pôle de l'électro-aimant, placé au-dessous du disque, est un pôle Nord et que le flux augmente. On comprend, dans ces conditions, qu'il ne se produise aucun mouvement de rotation.

Mais, si entre l'électro-aimant et le disque on interpose un secteur métallique S, en aluminium ou en cuivre, de manière que ce secteur couvre partiellement le noyau de l'électro-aimant, il ne se développe plus de courants induits dans la partie du disque protégée par le secteur formant écran, mais il s'en produit dans la partie non protégée, ces courants suivant des circuits

dont la forme est indiquée approximativement sur la figure 102.

Des courants parasites analogues se développent également dans le secteur formant écran. Par rapport à l'axe de symétrie qui va du centre du disque au pôle, ces courants parasites sont constamment parallèles et, par suite, s'attirent. Le secteur étant fixe, le disque se met en mouvement. Le mouvement ne peut se produire que dans une seule direction, car la

partie du disque soumise à l'action du champ alternatif tend constamment à se porter vers la partie protégée par l'écran.

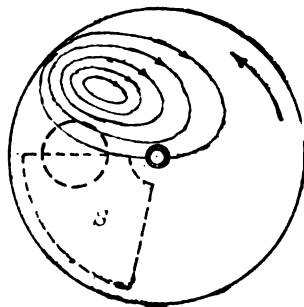


FIG. 102.

Ce phénomène est très souvent utilisé. Par exemple, dans un des types de lampe à arc différentielle à courant alternatif de la maison Schuckert : le mouvement des charbons s'effectue par suite de la rotation d'un disque d'aluminium aux extrémités d'un diamètre duquel agissent deux bobines, dont l'une est montée en série et l'autre en dérivation, toutes deux étant munies de secteurs de cuivre remplissant le rôle d'écrans magnétiques. Suivant que l'action de l'une ou de l'autre de ces bobines prédomine, le déplacement se produit dans un sens ou dans l'autre pour écarter ou pour rapprocher les charbons.

Dans le compteur Blathy, le même phénomène est utilisé pour produire un couple moteur pouvant équilibrer les résistances dues aux frottements.

Enfin, si on suspend un anneau ou un cadre de cuivre devant le noyau d'un électro-aimant parcouru par un courant alternatif, on constate

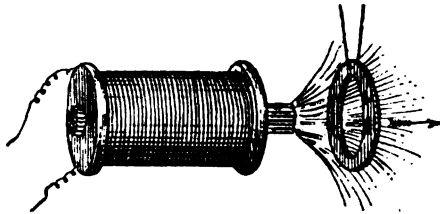


FIG. 103.

qu'il subit une certaine répulsion ; mais, si l'anneau est incliné par rapport à la direction du flux (*fig. 103*), le phénomène de répulsion est alors masqué par un autre, c'est-à-dire par la rotation de l'anneau autour de son axe de suspension, à moins qu'il ne vienne se placer parallèlement aux lignes de force du champ et alors le mouvement de rotation s'arrête.

Ce phénomène est dû au décalage de phase de l'intensité par rapport à la force électromotrice induite. En effet, les variations du flux donnent naissance à des courants induits dans la spire fermée sur elle-même (anneau ou rectangle). Si cette spire est perpendiculaire au flux, les actions électromagnétiques du champ et du courant, en ce qui concerne la rotation, se font équilibre ; lorsque, au contraire, la spire est légèrement déplacée, la direction des forces électromagnétiques ne passe plus par l'axe de suspension et il se pro-

duit un couple alternatif. Lorsque l'intensité est en concordance de phase avec la force électromotrice, la moyenne des valeurs positives du couple est égale à la moyenne des valeurs négatives et la spire reste immobile; s'il y a décalage en retard de l'intensité, la moyenne des valeurs négatives est plus grande que la moyenne des valeurs positives et la spire prend un mouvement de rotation jusqu'à ce que son plan se trouve parallèle aux lignes de force, position pour laquelle le mouvement de rotation cesse.

Ce mouvement de rotation est maximum lorsque le plan de la spire est incliné de 45° sur la direction du flux.

Lorsqu'on oppose une force antagoniste (ressort en spirale, fil de suspension, etc.) au mouvement de rotation de la spire, le dispositif ainsi constitué peut être utilisé, comme électrodynamomètre d'un genre spécial, pour la mesure de l'intensité des courants alternatifs (galvanomètres de Bellati et de Giltay).

61. Combinaison de flux magnétiques alternatifs.

Champs tournants. — La combinaison convenable de deux flux magnétiques alternatifs peut donner lieu à des phénomènes qui présentent une certaine analogie avec ceux que l'on

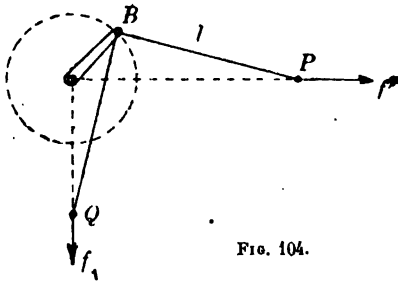


FIG. 104.

obtient avec deux forces alternatives, agissant, dans des conditions déterminées de direction et de phase, sur un système matériel.

Par exemple, si, par l'intermédiaire de deux bielles l et l (fig. 104), on fait agir sur un bouton de manivelle

B deux forces alternatives f et f_1 (produites par exemple par les deux pistons d'un moteur à vapeur) et que ces deux forces soient décalées l'une par rapport à l'autre de $1/4$ de période (c'est-à-dire que les maxima de l'une coïncident avec les points de valeur nulle de l'autre et réciproquement), le bouton de manivelle prend un mouvement circulaire par l'effet d'une

force tangentielle presque constante. Le temps que met le bouton pour effectuer un tour correspond exactement à la période de la force motrice.

En supposant que ces deux forces alternatives soient représentées par deux courbes sinusoïdales décalées de $1/4$ de période (*fig. 105*), il y a à examiner les valeurs qu'elles ont aux différents points de la période.

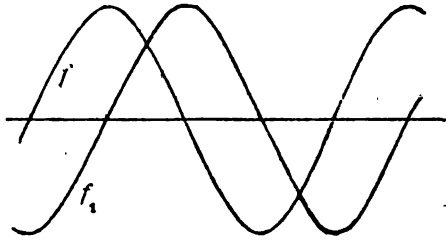


FIG. 105.

En négligeant l'obliquité de la bielle, en reportant ces forces sur le bouton de la manivelle

qui doit se trouver dans la position correspondant à l'instant considéré de la période et en appliquant la règle du parallélogramme, on trouve pour chaque point une résultante égale et toujours dans une direction tangentielle.

On peut également obtenir un mouvement de rotation avec trois forces alternatives décalées de $1/3$ de période, en supposant qu'elles aient chacune même période et qu'elles agissent simultanément sur le bouton de manivelle, suivant trois directions placées à 120° l'une de l'autre.

Des effets analogues à ceux qui viennent d'être décrits dans l'exemple cinématique peuvent être réalisés par la combinaison de deux champs alternatifs disposés à angle droit l'un par rapport à l'autre, à condition qu'il y ait un retard de phase de $1/4$ de période entre les deux flux; il se produit alors un champ magnétique tournant. De même, en prenant trois champs alternatifs disposés à 120° l'un de l'autre, pourvu qu'ils soient décalés entre eux de $1/3$ de période, on obtient un champ tournant constant.

C'est au regretté professeur Galileo Ferraris qu'appartient l'idée heureuse et géniale de la découverte des champs tournants, dont l'importance scientifique et pratique est considérable. C'est à cette découverte qu'est due la solution complète

du problème important de la transmission électrique de l'énergie à distance.

Ferraris, en examinant le phénomène de la rotation du plan de polarisation de la lumière, fut conduit, par un de ces raisonnements de grande simplicité qui sont le propre du véritable génie, à concevoir la possibilité de réaliser un flux magnétique tournant, d'intensité constante, par la combinaison de deux flux alternatifs.

L'idée du champ magnétique tournant n'était pas nouvelle, puisque Babbage et Herschel, en inversant la célèbre expérience d'Arago (rotation d'un disque de cuivre placé au-dessous d'un aimant), firent tourner un aimant sous un disque de cuivre et avaient ainsi réalisé, dès 1825, un champ magnétique tournant; mais l'idée géniale de Ferraris est d'avoir pu obtenir ce champ tournant au moyen de deux courants agissant sur des circuits fixes.

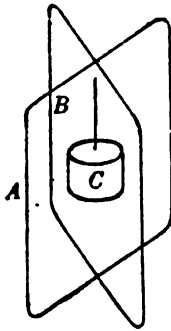


FIG. 106.

Ferraris prit deux cadres rectangulaires A et B (fig. 106) qu'il disposa à angle droit l'un par rapport à l'autre et fit passer respectivement, dans chacun de ces cadres, un courant alternatif; ces deux courants avaient même période et même intensité et étaient décalés l'un par rapport à l'autre de $1/4$ de période. Il suspendit au centre de ce système un léger cylindre de cuivre C afin de vérifier s'il pouvait obtenir le mou-

vement de rotation de ce cylindre comme cela s'était produit dans l'expérience de Babbage et Herschel pour le disque de cuivre soumis à l'action du champ. L'expérience lui montra l'exactitude de ses prévisions et le *champ Ferraris*, qui présente une si grande importance dans la réalisation du transport électrique de l'énergie à distance, était trouvé.

La figure 107 est la reproduction photographique du véritable appareil primitif qui servit à Ferraris pour effectuer sa première expérience.

Pour mieux analyser le phénomène, on peut supposer que,

dans l'espace occupé par le cylindre de cuivre, le champ magnétique produit par chacun des deux courants a une répartition uniforme et qu'il varie d'intensité suivant les ordonnées d'une sinusoïde. Dans ces conditions, en un point quelconque, agissent deux forces variables f, f_1 dont les directions sont à angle droit l'une par rapport à l'autre (*fig. 108*) et dont la résultante F est une force magnétique constante se déplaçant dans l'espace avec une vitesse uniforme, à la condition que



FIG. 107.

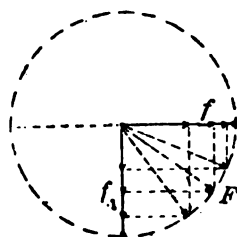


FIG. 108.

les deux forces f et f_1 aient des valeurs variant respectivement comme les ordonnées de deux sinusoïdes décalées de $1/4$ de période.

Dans ces conditions, en chaque point de l'espace occupé par le cylindre de cuivre, ce dernier est traversé par un flux d'intensité constante et d'amplitude maximum, mais tournant (champ Ferraris); ce flux effectue un tour complet dans un temps égal à celui de la période du courant alternatif.

Le mouvement de ce champ magnétique constant donne naissance, dans le cylindre de cuivre, à des courants induits qui, comme l'indique la loi de Lenz, sont de sens tel qu'ils réagissent toujours sur le champ magnétique qui les a produits; il se forme ainsi une sorte de lien élastique immatériel entre le champ et les courants. Ces derniers tendant toujours à suivre le champ qui leur a donné naissance, le circuit dans lequel ils se sont développés se met à tourner.

La vitesse angulaire du cylindre de cuivre est, dans tous

les cas, plus faible que celle du champ, parce que la présence d'une force électromotrice d'induction est liée à l'existence d'un mouvement relatif (§ 20). La différence qui existe entre la vitesse angulaire du champ tournant et celle du cylindre est appelée *glissement*.

Il n'est pas encore opportun de déduire de ce fait les conséquences qui en découlent et sur lesquelles on aura l'occasion

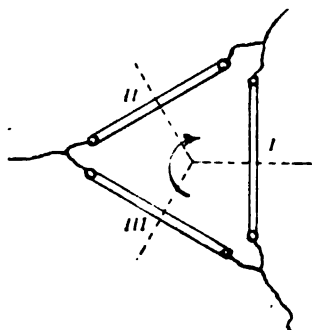


FIG. 109.

de revenir, à propos de l'étude des moteurs. Il y a lieu pourtant de faire remarquer que, si l'on a trois spires disposées dans des plans verticaux et formant entre elles des angles de 60° (fig. 109) et que l'on fasse passer respectivement dans chacune de ces trois spires trois courants alternatifs ayant des valeurs efficaces égales, mais décalés l'un par

rapport à l'autre de $1/3$ de période, les champs alternatifs auxquels ils donnent naissance sont décalés de 120° et, dans l'espace compris entre les trois spires, leur résultante est un champ tournant unique, d'intensité constante, champ qui effectue un tour complet par période du courant.

La petite dynamo à courant continu, pourvue de trois anneaux permettant de recueillir des courants alternatifs, dynamo dont il a été question dans le paragraphe 6, peut être utilisée avec avantage pour reproduire les expériences fondamentales relatives au champ tournant et l'on ne saurait trop engager ceux qui le peuvent à effectuer eux-mêmes ces expériences; c'est le meilleur moyen de se rendre compte de cet intéressant phénomène.

Ainsi, en imprimant une faible vitesse angulaire à la dynamo, on obtient un champ qui tourne lentement et qu'il est facile de rendre visible à l'aide du spectre magnétique : la limaille de fer se met à tourner et la force centrifuge en projette les parcelles à l'extérieur.

Si le courant est assez intense et que le nombre de spires des trois bobines soit suffisant, on peut réaliser une curieuse expérience.

On place dans le champ magnétique un petit disque de verre muni d'un rebord en carton et l'on pose sur lui un œuf creux en cuivre ou en aluminium¹. Tout d'abord, l'œuf se met à tourner d'une manière désordonnée, puis plus rapidement, jusqu'à ce que, d'un mouvement brusque, il se dresse sur sa pointe et continue ainsi à tourner autour de son grand axe, que l'on appelle axe spontané de rotation. De même, un disque un peu grand de cuivre ou d'aluminium, à face légèrement convexe et légèrement arrondi sur les bords, se met à tourner et se redresse progressivement jusqu'à ce qu'il arrive à tourner autour d'un de ses diamètres.

Ces phénomènes se produisent toutes les fois que l'on imprime un mouvement de rotation à un corps libre qui tend à tourner autour d'un axe de chaque côté duquel la masse est uniformément distribuée; c'est là une conséquence du principe de l'inertie.

62. Champs tournants utilisés industriellement. —

Les considérations qui viennent d'être développées sont basées sur cette supposition que les flux alternatifs composants s'établissent dans l'air; mais, dans la pratique, pour les obtenir plus intenses, on a recours au fer. Les lignes de force suivent alors le trajet qui présente la plus grande perméabilité et le champ produit, tout en étant tournant, change de configuration. C'est pourquoi, lorsque les bobines qui produisent le champ sont entourées de fer et ont un noyau également en fer, les lignes de force ne sont plus parallèles et distribuées d'une manière uniforme, mais suivent le chemin qui présente la plus grande perméabilité et deviennent rayonnantes (*fig. 110*); *le*

1. On peut se procurer facilement cet objet en recouvrant de cuivre par galvanoplastie une coquille d'œuf, ce qui donne un œuf plus léger que s'il était tout en métal et l'expérience n'en réussit que mieux.

champ tournant prend une forme pratiquement sinusoïdale, en ce sens que son intensité mesurée dans la direction des rayons varie comme les ordonnées d'une sinusoïde. Le champ

représenté figure 110 tourne et accomplit un tour complet dans le temps T qui est celui de la période du courant.

En disposant convenablement plusieurs groupes de bobines, on peut obtenir un champ Ferraris multipolaire; celui que montre la figure 111 est hexapolaire. La vitesse angulaire du champ tournant

est réduite en proportion du nombre de champs produits, trois dans la figure 111.

C'est pourquoi, pendant une période T , le champ Ferraris tourne, dans le même temps, de l'angle compris entre deux pôles de même nom et le centre, 120° dans le cas de la figure 111. En général, pendant le temps T , le champ se déplace de la valeur de l'arc embrassé par le groupe de bobines destiné à le produire. Il s'ensuit qu'en prenant un nombre convenable de champs élémentaires, le champ Ferraris multipo-

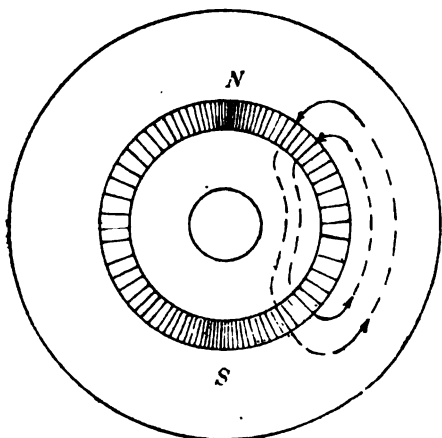


FIG. 110.

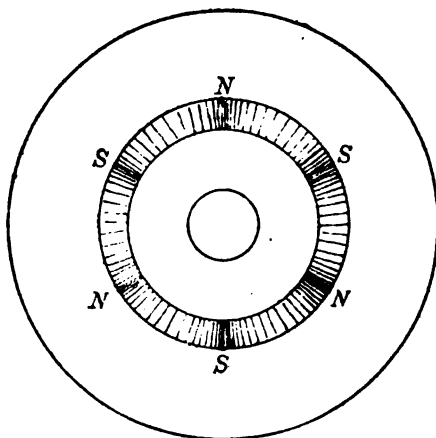


FIG. 111.

laire peut se déplacer avec une vitesse angulaire très réduite.

Par exemple, si la période du courant alternatif est de $1/50$ de seconde et que le champ ait 20 pôles, pour chaque alternance complète, le champ tournant effectue $1/10^\circ$ de tour et un tour complet demande $1/5^\circ$ de seconde.

CHAPITRE XI

ALTERNATEURS

63. Généralités sur les alternateurs. — On désigne sous le nom d'*alternateurs* les machines dynamo-électriques construites spécialement pour fournir dans le circuit extérieur ou circuit d'utilisation un ou plusieurs courants alternatifs, sous une différence de potentiel déterminée. Cette différence de potentiel peut être de quelques dizaines de volts, comme c'est le cas pour certaines applications électro-métallurgiques, aussi bien que de plusieurs milliers de volts, comme l'exige la transmission électrique de l'énergie à grande distance. Les dynamos à courant continu, modifiées par l'adjonction d'anneaux collecteurs et par des connexions spéciales de l'enroulement de l'induit, peuvent aussi débiter des courants alternatifs; mais ce type de dynamo est plutôt utilisé comme *transformateur tournant*, ainsi qu'on le verra dans le chapitre xvi.

Les alternateurs industriels sont construits et établis suivant les applications auxquelles ils sont destinés, pour une fréquence variant de 40 à 50 périodes ou pour une fréquence voisine de 25 périodes. Lorsque le courant alternatif est utilisé seulement pour alimenter une installation d'éclairage électrique, c'est-à-dire comprenant des lampes et des moteurs, il est impossible d'utiliser des alternateurs dont la fréquence est inférieure à 40 périodes, car les lampes à arc aussi bien que les lampes à incandescence ne fonctionneraient pas convenablement. Si, au contraire, il n'y a pas de service d'éclairage à assurer, tout au moins directement, il est préférable d'avoir

un alternateur à basse fréquence, à cause du fonctionnement et de la construction des moteurs et des convertisseurs à alimenter ; mais, dans ce cas, le prix d'achat des générateurs, transformateurs, moteurs et convertisseurs est plus élevé.

Tout alternateur comporte comme organes essentiels un inducteur et un induit, l'inducteur étant excité par le courant continu que fournit une dynamo spéciale appelée *excitatrice*, actionnée soit par le moteur même qui commande l'alternateur, soit par un moteur spécial absolument indépendant. Dans le premier cas, l'induit de l'excitatrice est généralement monté sur l'arbre de l'alternateur (fig. 112), ce qui constitue une excellente disposition, tant au point de vue esthétique qu'à



FIG. 112.

celui de l'économie d'emplacement, quoique l'excitatrice doive, pour tourner à la vitesse angulaire de l'alternateur, avoir des dimensions plus grandes que celles qu'elle aurait normalement pour la même puissance.

L'énergie dépensée pour l'excitation des alternateurs d'une installation représente environ 2 à 3 0/0 de la puissance totale. Dans la plupart des cas, il est utile de pouvoir disposer d'une ou de plusieurs excitatrices (indépendamment des machines de réserve) actionnées par des moteurs indépendants et cela dans le but d'éviter, pour l'excitatrice, les brusques variations de vitesse que peuvent subir les alternateurs par suite de soudaines variations de charge. C'est la raison pour laquelle, même avec des alternateurs de puissance moyenne, il est préférable, dans certains cas déterminés, d'installer des excitatrices indépendantes.

64. Divers types d'alternateurs. — Depuis l'époque où l'utilisation pratique des transformateurs à courant alternatif développa l'emploi des alternateurs, de nombreux types ont été réalisés ; mais bien peu nombreux sont ceux qui ont reçu la sanction de la pratique comme remplissant les diverses conditions de construction et d'utilisation industrielle. Aujourd'hui presque tous les constructeurs sont d'accord pour reconnaître la supériorité des alternateurs à pôles alternés, sans pour cela avoir complètement abandonné l'alternateur à flux ondulé, dont l'emploi, dans certains cas, assez rares du reste, est à recommander (Voir § 17).

Des essais ont été faits récemment pour créer un nouveau type d'alternateur qui a la propriété, si on l'excite par un courant alternatif, de fournir à un circuit des courants alternatifs de fréquence égale à celle du courant d'excitation et tout à fait indépendante de la vitesse angulaire de la partie mobile. Il sera question de cet alternateur dans le tome II, sans entrer, à son sujet, dans de grands détails, car il n'est pas encore possible de se prononcer sur la valeur de ce type de machine qui, du reste jusqu'à présent, n'a reçu que très peu d'applications industrielles.

Les alternateurs industriels sont toujours multipolaires, sauf dans certains cas très spéciaux. En effet, pour obtenir une fréquence de 50 périodes avec une machine bipolaire, il faudrait qu'elle fasse 50 tours par seconde, ce qui donne une vitesse angulaire de 3000 tours par minute. Cette vitesse angulaire et même de plus grandes sont faciles à obtenir avec les turbines à vapeur, qui, au moins pour les grandes puissances, peuvent rivaliser, au point de vue de la consommation, avec les meilleurs moteurs à vapeur à un ou plusieurs cylindres ; ces turbines présentent en outre des avantages spéciaux dont on n'a pas à parler dans cet ouvrage. En dehors de ce mode spécial de commande, encore peu répandu, on peut dire que tous les alternateurs sont généralement multipolaires et ont un nombre de pôles variant suivant la fréquence désirée et la vitesse angulaire de l'organe mobile.

Si p représente le nombre de paires de pôles et n le nombre de tours par seconde que fait l'organe mobile, la fréquence est donnée par la relation :

$$f = p \cdot n.$$

Il en résulte que, pour une fréquence donnée, le nombre de pôles doit augmenter proportionnellement à la diminution du nombre de tours.

Dans certains alternateurs, l'inducteur est mobile et l'induit fixe ; dans d'autres, c'est l'induit qui est mobile, tandis que l'inducteur est fixe. Il y a enfin d'autres alternateurs, ceux à flux ondulé, où l'induit ainsi que la bobine excitatrice sont fixes, le seul organe mobile étant l'inducteur constitué par une armature en fer.

Pour capter les courants produits par un alternateur, si l'induit est mobile, on relie les extrémités de l'enroulement à deux bagues isolées, montées sur l'arbre et sur chacune desquelles appuie un balai. Lorsque l'induit est fixe, des bornes auxquelles aboutissent les extrémités des circuits de l'induit suffisent pour assurer la communication avec le circuit d'utilisation ; le courant d'excitation est, dans ce cas, amené aux bobines de l'inducteur mobile par l'intermédiaire de balais et de deux bagues isolées fixées sur l'arbre. Dans les alternateurs à flux ondulé, tous les circuits étant fixes, des bornes suffisent.

En ce qui concerne les alternateurs triphasés, les courants sont captés d'une manière analogue, avec cette seule différence que le nombre de bagues ou de bornes est porté à trois.

65. Classification des alternateurs. — Les alternateurs peuvent être classés de différentes manières suivant le point de vue auquel on se place ; mais la classification la plus rationnelle consiste à considérer le système inducteur et l'on a alors deux catégories :

- 1° *Les alternateurs à flux alternés ;*
- 2° *Les alternateurs à flux ondulé.*

Il a été déjà parlé de ces deux types de génératrices dans le chapitre II, paragraphe 17.

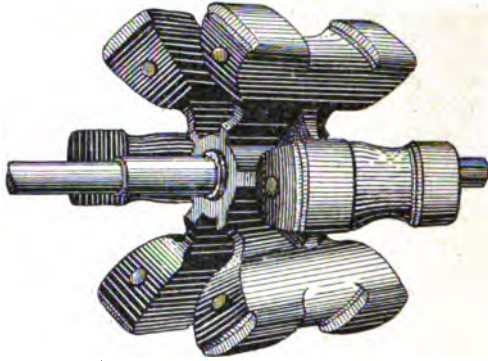


FIG. 113.

Dans les alternateurs à flux alternés, le système inducteur est constitué par une série de pôles alternativement Nord et

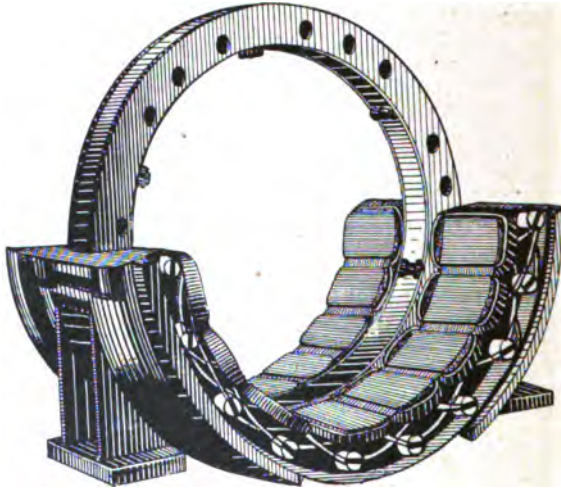


FIG. 114.

Sud, en regard desquels est disposé l'enroulement induit, l'un des deux organes étant mobile.

Dans les alternateurs à flux ondulé, le système inducteur

comporte aussi une série de pôles Nord et Sud ; mais le plan du flux de chaque circuit magnétique, considéré isolément, au lieu d'être perpendiculaire à l'axe de rotation, lui est parallèle. L'excitation est produite par une bobine unique qui entoure la partie centrale du système inducteur, de sorte que tous les pôles Nord de la machine sont situés d'un même côté et les pôles Sud de l'autre.

Il est facile de se rendre compte de la disposition donnée aux alternateurs à flux ondulé en examinant les figures 113 et 114, qui représentent, la première le système inducteur d'un alternateur à flux ondulé construit par les ateliers d'Oerlikon et la seconde l'induit de la même machine ; dans cette dernière figure, on voit également la bobine inductrice unique, placée concentriquement à l'induit.

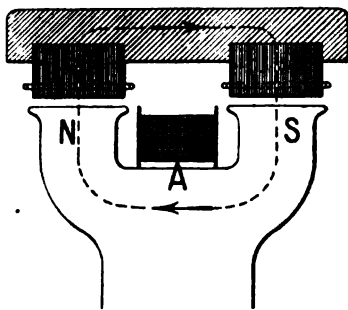


FIG. 115.

La figure 115 est une coupe d'un alternateur à flux ondulé, la bobine excitatrice unique A étant disposée entre les pôles N et S. Le circuit magnétique se ferme à travers une carcasse de fonte ou d'acier coulé extra-doux,

dans laquelle sont fixés deux grands anneaux formés de feuilles minces de tôle, isolées entre elles et constituant le noyau de l'induit sur lequel sont disposés les enroulements. Par construction, ce dispositif nécessite deux enroulements pour l'induit ; mais il est possible de les relier entre eux suivant le mode qui convient le mieux ou bien de les laisser indépendants.

Ce type d'alternateur se prête à diverses combinaisons spéciales. Par exemple, si l'un des deux induits a un nombre de spires différent de celui de l'autre, on peut réaliser un alternateur avec deux tensions différentes ; de même, si le nombre des pôles Nord de l'inducteur n'est pas le même que celui des pôles Sud, on peut réaliser un alternateur à deux fréquences.

Enfin, en décalant d'un certain angle les pôles Nord par rapport aux pôles Sud, on peut rendre unique le système induit, ou bien obtenir deux forces électromotrices alternatives décalées de phase. Mais, avec cette disposition des pièces polaires, on augmente le parcours des lignes de force et il faut, par conséquent, un courant de plus grande intensité pour l'excitation. C'est pour ce motif que la disposition de circuit magnétique que représente la figure 115 est celle qui est le plus généralement utilisée pour les alternateurs à flux ondulé.

La désignation d'alternateurs à flux ondulé a été donnée parce que le flux, coupé par une spire de l'induit pendant le fonctionnement de la machine, n'est pas successivement positif et négatif, comme dans les génératrices à pôles alternés, mais varie constamment entre une valeur minimum et une valeur maximum sans jamais changer de sens (§ 17).

Dans les alternateurs à flux ondulé, l'organe mobile est toujours l'inducteur; de plus, la bobine centrale excitatrice peut être fixe en la centrant convenablement de l'extérieur à l'aide de trois vis traversant l'induit. Dans ce cas, l'alternateur ne comporte aucun conducteur mobile et c'est pour cela que ce genre de génératrice est parfois désigné sous le nom d'*alternateur à cuivre fixe*.

Dans les génératrices à flux alternés, au contraire, l'organe mobile peut être l'inducteur aussi bien que l'induit. Dans les génératrices de faible puissance, on préfère généralement la seconde disposition; pour celles de grande puissance, il vaut mieux rendre l'inducteur mobile, tant au point de vue des facilités de construction qu'au point de vue du rendement.

Si l'inducteur est mobile, le courant d'excitation lui est fourni par l'intermédiaire de deux bagues métalliques, isolées de l'arbre, sur lesquelles appuient des balais, ordinairement en graphite. Dans le cas où l'induit est mobile, le courant produit par la génératrice est capté à l'aide de deux bagues ou de trois sur lesquelles appuient des balais; deux bagues si le courant produit est simple, trois bagues si la génératrice

donne des courants triphasés. En ce qui concerne les alternateurs diphasés, il faut, suivant les cas, trois ou quatre bagues; mais il n'est pas nécessaire d'insister sur ce sujet, car l'alternateur triphasé est aujourd'hui presque toujours préféré.

Le fait de pouvoir, dans l'alternateur à flux ondulé, rendre fixes tous les enroulements constitue, à première vue, un avantage très important. Les constructeurs eux-mêmes ont commis l'erreur de préférer pendant un certain temps ce genre d'alternateurs à celui à pôles alternés. Mais l'expérience a démontré que, par suite de la forme même du circuit magnétique, la partie de flux réellement utilisée pour l'induction était de beaucoup inférieure au flux total produit, parce qu'il se produisait des fuites magnétiques très notables, d'autant plus importantes que, pour réduire le poids de la machine, le fer de l'inducteur était diminué et fonctionnait alors presque à son point de saturation.

Dans les alternateurs à flux alternés, la force électromotrice induite est proportionnelle au *maximum absolu* du flux de force traversant la section de l'induit, tandis que, dans les alternateurs à flux ondulé, cette force électromotrice est proportionnelle à la différence :

$$f_1 - f_2,$$

f_1 étant le flux maximum qui traverse la spire lorsqu'elle se trouve exactement en regard du pôle, comme le montre la figure 116, et f_2 étant le flux minimum qui traverse cette spire lorsqu'elle se trouve entre deux pôles consécutifs, le second de ces pôles ayant une action contraire à celle du premier en ce qui concerne la force électromotrice

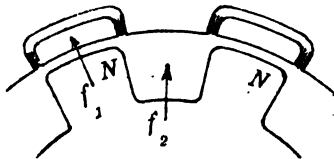


FIG. 116.

induite dans une bobine déterminée. Donc une partie du flux produit agit en sens contraire dans les alternateurs à flux ondulé.

Les flux f_3 et f_4 (fig. 117) sont des *flux de dispersion* : le premier, f_3 , part du pôle pour pénétrer dans le noyau de l'induit, mais sans traverser la bobine; le second, f_4 , part du pôle Nord sur le côté pour arriver directement sur le pôle Sud à travers l'air, sans passer par le circuit magnétique.

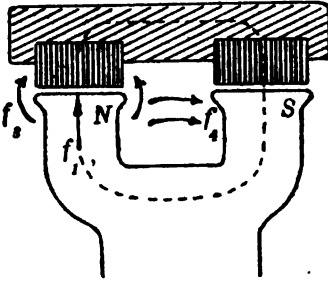


FIG. 117.

C'est pour cela qu'on revient aujourd'hui au type d'alternateur à pôles alternés et qu'on n'utilise les alternateurs à flux ondulé que dans certains cas spéciaux. Du reste, il y a lieu de faire remarquer que les

alternateurs à flux ondulé peuvent être aussi bons que ceux à flux alternés, car, pour éviter les fuites magnétiques, il suffit de calculer la machine pour avoir une induction moins élevée dans le fer et alors, dans ces conditions, l'alternateur a les mêmes qualités que celui à flux alterné, mais il est beaucoup plus lourd.

Un autre inconvénient à signaler est le suivant : si les deux entrefers respectifs des deux enroulements induits ne sont pas rigoureusement identiques, les effets d'attraction qui s'exercent pour chacun d'eux entre les parties magnétiques en présence ne s'équilibrent pas complètement et il se produit alors des efforts mécaniques considérables sur les supports et sur les coussinets.

Les alternateurs à flux ondulé ont été principalement préférés lorsque des constructeurs n'osaient pas encore se risquer à établir des alternateurs à flux alternés fonctionnant à de grandes vitesses tangentielles, de crainte de compromettre la solidité mécanique des enroulements soumis à l'action d'une force centrifuge très élevée. Lorsque la vitesse angulaire de l'organe mobile de l'alternateur est fixée et la fréquence déterminée, le nombre de pôles s'en déduit facilement. Suivant la puissance de l'alternateur, l'espace dans lequel peuvent être

distribués les pôles est limité et il ne faut pas songer à réaliser des pôles très longs dans le sens de leur axe et très étroits dans le sens de la largeur pour produire un flux de valeur déterminée, c'est-à-dire de réduire l'espace périphérique qu'occupent les pôles. Par suite, en donnant aux pôles des dimensions convenables, il était nécessaire de les répartir sur une surface périphérique supérieure à celle qui était imposée par la vitesse tangentielle maximum admise et qui était de 20 à 25 mètres par seconde. C'est pourquoi, dans les cas où il fallait réaliser de grandes vitesses tangentielles, l'alternateur à circuit fixe donnait une solution très satisfaisante, puisque aucun des enroulements n'était en mouvement et que l'on pouvait alors atteindre des vitesses périphériques relativement considérables, quelquefois plus de 50 mètres par seconde.

Mais, du jour où la pratique a sanctionné pour les enroulements des bobines inductrices des



FIG. 118.

alternés (lorsque le système inducteur est mobile) l'emploi de conducteurs à section carrée ou mieux de ruban de cuivre (*fig. 118*), pour remplacer les fils cylindriques, on a pu obtenir une solidité mécanique qui permet aux bobines inductrices de supporter sans inconvénients des vitesses tangentielles de 34 à 40 mètres par seconde. Depuis, l'alternateur à flux ondulé a été presque complètement délaissé, au point qu'il ne s'en construit presque plus. On ne l'utilise maintenant que dans les cas où la commande est effectuée par des moteurs à grande vitesse angulaire (turbines à vapeur par exemple), dont la vitesse tangentielle est supérieure à 50 mètres par seconde.

66. Pôles et épanouissements polaires des alternateurs. — La carcasse sur laquelle sont fixés les noyaux polaires des inducteurs d'alternateurs à flux alternés (et dans ce qui suit il ne sera question que de ce type, à moins d'indication contraire) est en fonte ou en acier coulé. Au point de vue de la diminution de poids, l'acier coulé est préférable; mais, si l'inducteur doit avoir un poids considérable, il vaut mieux employer la fonte. C'est le cas qui se présente lorsque l'alternateur est commandé directement par un moteur à faible vitesse et que l'inducteur sert de volant à ce moteur.

Les noyaux polaires qui font saillie en dehors de la carcasse peuvent être massifs ou feuilletés. Pour donner les motifs qui ont engagé plusieurs constructeurs à utiliser encore des noyaux entièrement feuilletés au lieu de se contenter simplement de constituer ainsi les pièces polaires, afin d'éviter les courants parasites (courants de Foucault), il est nécessaire d'anticiper sur certaines explications qui seront données ultérieurement.

67. Effets produits par la réaction d'induit. — Quand une dynamo fonctionne, qu'elle soit à courant continu ou à courant alternatif, le courant qui circule dans l'induit donne naissance à un flux magnétique de réaction qui produit une distorsion du flux principal et se ferme partiellement à travers les pôles inducteurs. Dans l'étude des dynamos à courant continu, on a appris que de la valeur de ce flux de réaction dépend la *chute de tension*, c'est-à-dire la baisse de tension qui se produit lorsque la dynamo passe du fonctionnement à vide au fonctionnement à pleine charge, l'intensité du courant d'excitation restant constante.

Ne pouvant diminuer la valeur des ampères-tours qui produisent ce flux de réaction, le seul moyen à employer pour diminuer sa valeur consiste à lui constituer un circuit de perméabilité aussi faible que possible, c'est-à-dire de réluctance élevée; comme ce circuit se ferme en partie à travers les pôles inducteurs, qui sont déjà saturés par le flux principal du courant d'excitation, ces pôles présentent une réluctance

considérable qui s'oppose à l'établissement du flux de réaction d'induit.

C'est pour ce motif que, dans un grand nombre de types de dynamos à courant continu bien construites, les extrémités des pièces polaires vont en diminuant d'épaisseur du côté de la sortie du flux, parce, que le flux de réaction d'induit tendant à se fermer à travers les pièces polaires, ces dernières se trouvent complètement saturées déjà à faible charge. Certains constructeurs ne se contentent pas seulement d'amincir les extrémités des pièces polaires, mais ils allongent, en outre, l'une des extrémités dans le sens du mouvement (*fig. 119*), parce que le flux principal, tendant à se concentrer sous l'extrémité de sortie à cause de la distorsion que subit le champ, reste, avec cette disposition, mieux distribué dans l'entrefer.

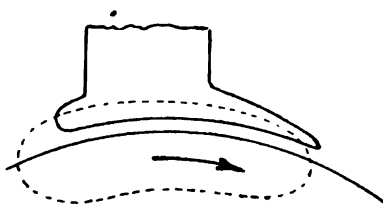


FIG. 119.

Dans les alternateurs, lorsque l'intensité est en concordance de phase avec la force électromotrice, le flux de réaction d'induit se ferme à travers les extrémités des pièces polaires seulement, comme dans les dynamos à courant continu; il suffit alors de saturer ces extrémités pour diminuer la chute de tension. Mais l'intensité reste toujours un peu décalée, quand ce ne serait qu'à cause de la self-induction de l'induit, et elle l'est d'autant plus que le circuit extérieur a un facteur de puissance moins élevé.

Dans ces conditions, comme on le verra plus loin, le flux de réaction d'induit se ferme partiellement à travers le circuit magnétique principal en affaiblissant fortement le flux d'excitation et en donnant lieu à une chute de tension notable.

C'est pourquoi dans les alternateurs, spécialement dans ceux qui sont destinés à alimenter des moteurs, il convient de saturer non seulement les extrémités des pièces polaires, mais aussi le noyau du système inducteur. A ce propos, se pose la

question s'il convient de préférer les noyaux feuilletés aux noyaux massifs.

A première vue, on ne saisit pas l'utilité de cette question, parce qu'il est aussi facile de saturer un noyau massif qu'un noyau feuilleté. Mais, au point de vue construction, il n'en est pas de même, parce que, pour obtenir la saturation nécessaire, il est indispensable de connaître très exactement les propriétés magnétiques du fer employé. Les propriétés magnétiques des tôles sont faciles à déterminer, puisqu'on peut établir la courbe de perméabilité avant de construire la machine ; on ne peut procéder de même pour les noyaux massifs, car les propriétés magnétiques du fer varient suivant diverses circonstances d'une coulée à l'autre, ce qui fait qu'un alternateur, calculé d'après les coefficients obtenus pour un autre, construit antérieurement, peut ne plus donner exactement les mêmes résultats.

Faut-il en conclure que, pour alimenter des circuits ayant un facteur de puissance peu élevé, il est préférable d'employer des alternateurs dont le système inducteur a un noyau fortement saturé, cas dans lequel le constructeur proposera très probablement des noyaux feuilletés ? Une pareille conclusion serait prématurée, parce que si les alternateurs à noyau fortement saturé permettent d'éviter une forte chute de tension, ils présentent par contre l'inconvénient de laisser moins de marge pour les variations de tension obtenues par l'excitation. Dans certains cas, il est pourtant nécessaire de prévoir des limites très grandes pour ces variations.

C'est pour ces divers motifs que les inducteurs à noyau massif et faiblement saturés sont aujourd'hui préférés, d'autant plus que l'on peut obtenir une petite chute de tension en augmentant l'entrefer, disposition qui s'oppose à l'établissement du flux de réaction d'induit et qui oblige, par suite, à donner un poids plus considérable au système inducteur.

68. Forme des noyaux polaires. — En ce qui concerne la forme donnée aux noyaux de bobines inductrices, leur section est rectangulaire, ovale ou ronde. Avec les noyaux feuil-

letés, la section est forcément rectangulaire; les noyaux à section ovale sont principalement employés dans les alternateurs de faible puissance, étant donné leur faible développement périphérique et aussi pour profiter, au moins en partie, des avantages que présente la section circulaire, qui, à égalité de surface, présente le développement périphérique minimum. A cause de cet avantage, les noyaux à section circulaire sont toujours préférables, chaque fois qu'il est possible de les employer, car l'enroulement des bobines, à égalité du nombre des spires, présente un développement minimum pour une section déterminée.

La longueur des noyaux polaires ou plutôt leur hauteur suivant l'axe est aussi l'objet de nombreuses études de la part des constructeurs. Des pôles de grande hauteur entraînent une faible épaisseur pour l'enroulement, augmentent la longueur du circuit magnétique et facilitent les fuites magnétiques de noyau à noyau, d'où affaiblissement du flux utile; des pôles trop courts présentent des avantages au point de vue magnétique, mais l'épaisseur de l'enroulement devient trop considérable et il s'ensuit que la surface de refroidissement est très limitée et, par suite, le rendement diminue.

69. Épanouissements polaires. — Les épanouissements polaires dont sont munis les noyaux des bobines inductrices servent à porter le flux développé dans les noyaux sous les bobines de l'induit. Ces pièces polaires peuvent être massives ou feuilletées;

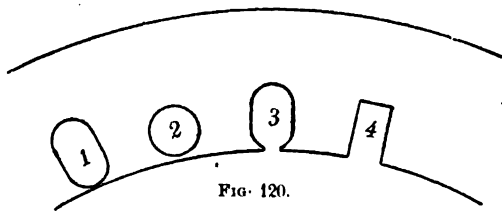


FIG. 120.

dans un cas comme dans l'autre, elles ont une forme appropriée de manière à rendre l'entrefer d'épaisseur uniforme ou variable.

La question des pièces polaires feuilletées ou massives est liée à celle de la nature du noyau de l'induit, qui peut être complètement lisse, c'est-à-dire muni de trous (1 et 2, *fig.* 120), ou

bien denté, c'est-à-dire pourvu de rainures à peine ouvertes (3) ou encore de rainures ouvertes de section plus ou moins rectangulaire (4).

Dans les deux premiers cas et presque toujours dans le troisième, le flux dans l'entrefer est presque uniformément distribué, sans pour cela éviter une légère production de courants de Foucault dans les épanouissements polaires, qui peuvent être massifs. Dans le quatrième cas, c'est-à-dire avec des rainures

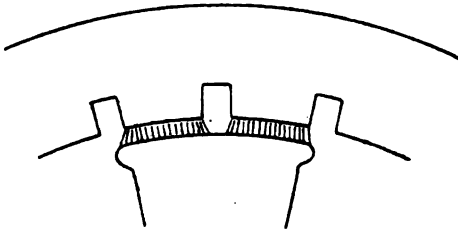


FIG. 121.

de section plus ou moins rectangulaire et ouvertes, comme dans les dynamos à courant continu à induit denté, le flux est divisé en faisceaux (fig. 121); il y a ondulation du flux le long des génératrices

de la surface des épanouissements polaires et, par suite, production de courants parasites intenses qui consomment de l'énergie en pure perte. Il suffit alors d'employer des épanouissements polaires feuilletés pour éviter cet inconvénient.

Toutefois, dans les alternateurs triphasés avec noyau d'induit muni de rainures à section rectangulaire, on peut utiliser des pièces polaires massives, pourvu que le nombre de rainures soit au moins de 6 par pôle, le flux se trouvant alors presque uniformément distribué, à condition toutefois que la rainure n'ait pas une largeur supérieure à 50 0/0 de l'épaisseur correspondante de l'entrefer moyen. Avec les pièces polaires massives, on évite une difficulté de construction qui est de les fixer à un noyau massif; en outre, les pièces polaires massives présentent encore un autre avantage dont il sera parlé à l'occasion du couplage des alternateurs.

On désigne sous le nom de *pas* d'un alternateur la distance qui sépare deux pôles consécutifs de nom contraire¹, l'arc em-

1. Dans les alternateurs à pôles de même nom, le pas est la moitié de l'intervalle qui sépare deux pôles successifs.

brassé par les pièces polaires variant suivant les constructeurs de 0,50 à 0,75 de la longueur du pas; c'est généralement la valeur de $\frac{2}{3}$ qui est la plus employée. Lorsque l'arc embrassé est petit, l'induction dans l'entrefer atteint une valeur trop élevée; quand l'arc est trop grand, il se produit des dérivations magnétiques entre les pôles voisins, comme le montre la figure 122.

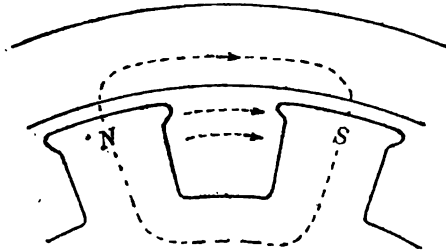


FIG. 122.

Les constructeurs consciencieux donnent à la surface extérieure des pièces polaires une

courbure un peu plus grande que celle qui correspond au rayon (*c*, fig. 123) ou bien abattent les angles aux extrémités

(*b*, fig. 123), afin d'obtenir une courbe de force électromotrice presque sinusoïdale, au lieu de l'avoir aplatie ou pointue. C'est pourquoi, si les pièces polaires ont la forme indiquée en *a* (fig. 123), les

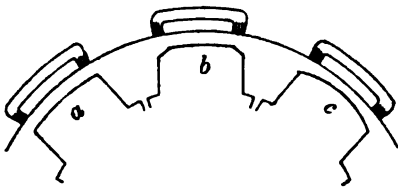


FIG. 123.

conducteurs d'une section de l'induit se trouvent placés brusquement dans le champ maximum et la force électromotrice induite a une

valeur presque constante pendant tout le temps que la section induite n'est pas sortie du champ; la courbe

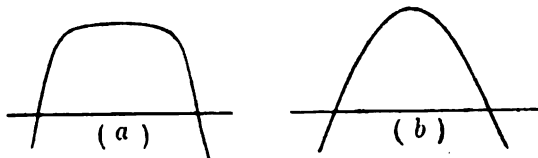


FIG. 124.

présente alors l'allure que montre la figure 124 en *a*. Au contraire, si les pièces polaires ont la forme indiquée en *b* ou en *c* (fig. 123), les conducteurs de la section de l'induit entrent

dans un champ dont l'intensité va d'abord en augmentant, puis en diminuant et la courbe de la force électromotrice a alors l'allure que montre la figure 124 en *b*. Pour donner à la surface des pièces polaires une courbure différente de celle du rayon de rotation, il faut effectuer un travail supplémentaire de construction assez important; c'est pourquoi on préfère généralement arriver presque au même résultat en abattant les angles des extrémités en forme de plan incliné.

Dans les machines à pôles alternés, la force électromotrice pendant le premier quart de la période est toujours symétrique à celle du deuxième quart; dans les alternateurs à flux ondulé, la force électromotrice aux mêmes moments est dissymétrique (Voir chapitre vi).

70. Induits des alternateurs. — L'induit, qui, dans les alternateurs à flux ondulé, est toujours disposé à l'extérieur,

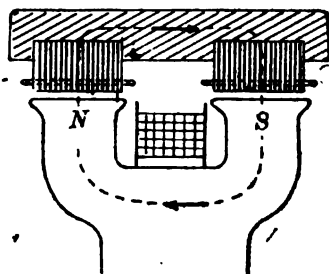


Fig. 125.

peut, dans les machines à pôles alternés, être aussi bien à l'extérieur qu'à l'intérieur.

Dans les alternateurs à flux ondulé, le noyau d'induit est constitué par deux anneaux feuilletés entourant l'inducteur et reliés entre eux au point de vue magnétique par une carcasse ou couronne de fonte ou d'acier coulé (fig. 125). La nécessité d'avoir

un noyau d'induit feuilleté, au moins dans les parties qui entourent les pièces polaires, devient évidente lorsqu'on sait que le flux en cet endroit subit de fortes variations. Dans la carcasse, au contraire, le flux, pour une charge déterminée, reste presque constant, comme du reste dans les autres parties du circuit magnétique et c'est pourquoi la carcasse peut être massive.

Sur la périphérie intérieure du noyau d'induit sont logés les conducteurs de l'enroulement, soit dans des trous, soit

dans des rainures ; il sera donné ultérieurement des détails à ce sujet.

Dans les machines à flux alternés, chacun des circuits magnétiques est perpendiculaire à l'axe au lieu de lui être parallèle. Les deux induits qu'il y a dans les alternateurs à flux ondulé sont ici remplacés par un induit unique¹ qui est fixe et constitué par un anneau feuilleté supporté par une carcasse généralement en fonte, lorsque l'induit est à l'extérieur. Lorsque l'induit est à l'intérieur, c'est-à-dire mobile, c'est la disposition inverse qui est adoptée, mais l'ensemble reste le même. Le noyau d'induit est alors supporté par une étoile, en bronze ou en fonte, clavetée sur l'arbre, tandis que les bobines inductrices font saillie à l'intérieur d'une carcasse de fonte ou d'acier coulé, comme dans les dynamos multipolaires à courant continu.

Pour les alternateurs de faible puissance, il est préférable d'avoir l'induit mobile et placé à l'intérieur, quoique cette disposition réduise toujours l'espace angulaire nécessaire pour placer les bobines inductrices ; mais on peut alors donner plus de largeur à la machine dans le sens de l'axe et l'on arrive ainsi à des types d'alternateurs qui, au point de vue de la forme, se rapprochent beaucoup de celle des dynamos à courant continu.

Dans les alternateurs de grande puissance, la largeur de la machine dans le sens de l'axe est toujours relativement faible, parce que l'espace nécessaire pour la bonne répartition du flux se retrouve en augmentant convenablement le diamètre de la machine, à la condition toutefois que la vitesse tangentielle de l'organe mobile n'atteigne pas une valeur trop élevée. On a ainsi des alternateurs de forme assez élancée, tout en leur conservant la solidité mécanique nécessaire.

Dans les alternateurs de grand diamètre, l'induit doit être solidement maintenu ; à cet effet on munit la carcasse à laquelle il est fixé de nervures qui lui donnent une grande

1. Il se construit aussi des alternateurs à flux ondulé qui n'ont qu'un seul induit.

rigidité, car cet organe est soumis à des efforts considérables et à de grandes vibrations.

A ce sujet, il est utile de faire remarquer qu'il est de la plus grande importance que l'induit soit parfaitement centré, car il est soumis à une attraction considérable exercée par les pôles du système inducteur. Pour se rendre compte de la valeur de cette force d'attraction, il suffit d'indiquer que, dans un alternateur ordinaire, chaque centimètre carré de surface polaire exerce sur chaque centimètre carré de surface de l'induit un effort qui est rarement inférieur à 1,5 kg. Lorsque l'induit est parfaitement centré, ces efforts, qui s'exercent tous dans une direction rayonnante, s'équilibrent mutuellement; mais le moindre défaut de centrage fait que l'entrefer n'est plus uniforme; par suite, les efforts d'attraction ne sont plus équilibrés et il peut s'ensuivre de graves conséquences.

L'induit ainsi que la carcasse qui le supporte doivent être disposés pour qu'il soit possible de leur faire subir de petits déplacements dans tous les sens, de manière à pouvoir régler le centrage au moins au dixième de millimètre. Les divers dispositifs employés pour obtenir ce résultat varient suivant les constructeurs.

Un dispositif ingénieux et élégant pour assurer la rigidité de l'induit et de la carcasse est celui qu'emploie quelquefois la maison Brown, Boveri et C^{ie}, dispositif qui consiste à faire supporter la caisse en fonte de la carcasse par deux séries de bras rayonnants (*fig.* 126). Grâce à cette disposition, l'induit ne repose pas directement sur le sol, mais sur deux anneaux venus de fonte avec le palier de la machine à vapeur. Dans ces conditions, la carcasse peut tourner à volonté autour de ces anneaux lorsqu'on procède au nettoyage ou à une réparation. Pendant le fonctionnement de l'alternateur, l'induit est maintenu par des vis de butée fixées dans deux plaques de fonte que l'on scelle dans le sol.

Il y a à examiner maintenant les dispositions données à la surface de l'induit, surface périphérique intérieure s'il s'agit d'un alternateur dans lequel l'induit entoure l'inducteur ou

surface périphérique extérieure lorsque l'induit est placé concentriquement à l'inducteur.

Le noyau de l'induit peut avoir une surface parfaitement lisse. Dans ce cas, les conducteurs constituant l'enroulement sont logés dans des trous oblongs ou circulaires faits d'avance dans les tôles, avant de les assembler, à l'aide d'une machine à découper (*fig. 121, 1 et 2*).

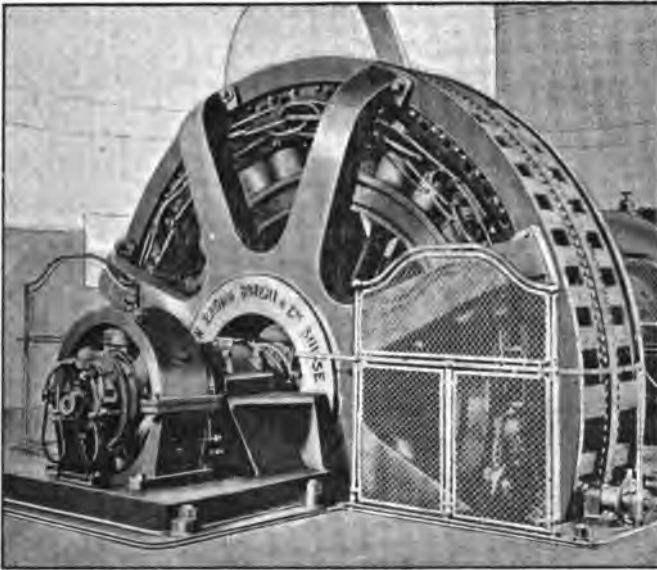


FIG. 126.

Cette disposition constitue des avantages à un certain point de vue, mais, d'un autre côté, présente aussi des inconvénients. Elle est avantageuse en ce sens que le flux se distribue d'une manière uniforme et que tous les conducteurs logés dans le même trou sont soumis simultanément à la même induction (Voir § 21). La réluctance de l'entrefer est minimum et, par suite, pour obtenir une induction donnée, il faut, pour l'excitation, un courant d'intensité moindre qu'avec une autre disposition. Mais, par contre, la self-induction de l'enroulement induit est augmentée, car le flux développé par le courant et

d'où dépend la valeur de la self-induction, au lieu de se fermer complètement à travers l'entrefer (*fig. 127, B*), comme cela se produit dans les noyaux munis de rainures ouvertes, se ferme partiellement à travers la partie de fer du noyau qui

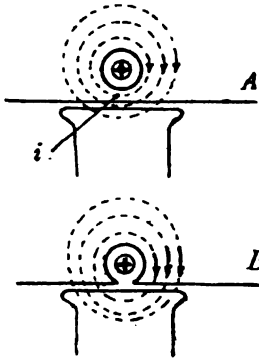


FIG. 127.

sépare le trou de la surface en i (*fig. 127, A*); quoique l'épaisseur de cette portion du noyau soit réduite au minimum et, par suite, se trouve toujours saturée, le flux de réaction est plus considérable que dans le cas de la rainure ouverte. Généralement cette disposition constitue un inconvénient, mais elle présente certains avantages lorsque l'alternateur, pendant son fonctionnement, est susceptible d'être mis en court-circuit (par exemple, lorsqu'il ali-

mente des fours électriques), parce qu'alors la self-induction considérable produite fait que l'intensité du courant, lors du court-circuit, ne dépasse pas le double ou le triple de l'intensité normale.

Les considérations qui précèdent sont relatives à la partie électrique; mais, au point de vue construction, il y a avantage à loger l'enroulement dans des trous, car on peut ainsi placer les conducteurs dans des tubes isolants, ce qui permet d'obtenir un meilleur isolement, surtout dans les alternateurs à haute tension (15 000 volts et au delà); dans ces conditions, l'enroulement de l'induit exige une main-d'œuvre très coûteuse, par suite de l'obligation d'enfiler les conducteurs dans les trous qui leur servent de logement.

Généralement, les constructeurs préfèrent, sauf dans certains cas spéciaux, pratiquer dans le noyau une fente transversale assez étroite qui n'enlève aucune des qualités de l'alternateur, c'est-à-dire réduit la self-induction de l'induit et permet d'introduire plus facilement les conducteurs de l'enroulement, étant donné que l'on peut pratiquer une ouverture longitudinale dans le tube isolant.

Actuellement et surtout pour les alternateurs de grande puissance, on préfère les noyaux dentés comportant des rainures destinées à recevoir les bobines induites. Avec ce système, chaque section de l'enroulement peut être façonnée séparément sur gabarit, isolée avec tout le soin possible et essayée une fois mise en place; en cas d'avarie, une bobine peut être facilement remplacée sans démonter l'induit; il suffit d'enlever simplement un des pôles de l'inducteur.

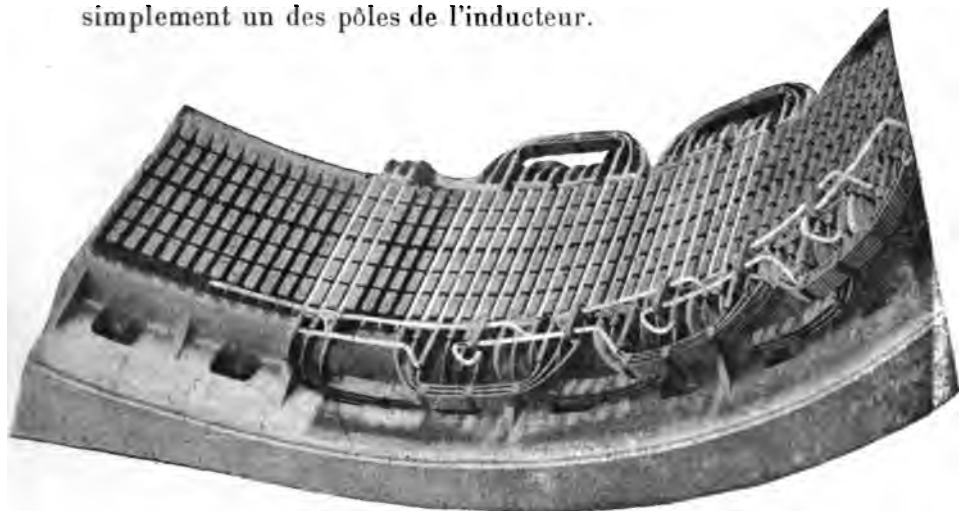


FIG. 128.

Les avantages que présente ce mode de construction sont supérieurs de beaucoup aux inconvénients, qui sont une plus grande réluctance de l'entrefer et, par suite, une intensité plus grande du courant d'excitation pour obtenir le flux nécessaire, parce que le flux tend à se diviser en faisceaux, ce qui entraîne l'obligation, si les rainures sont larges, d'utiliser des pièces polaires feuilletées. Mais il est facile de remédier à cet inconvénient en répartissant les conducteurs d'une même section dans deux ou plusieurs rainures voisines (*fig. 128*), ce qui permet, en outre, d'obtenir une courbe de force électromotrice se rapprochant beaucoup de la sinusöide, comme on le verra plus loin. Dans ce cas, les pièces polaires peuvent être massives.

La répartition des conducteurs d'une même section dans plusieurs rainures (5 au maximum) présente encore l'avantage de diminuer la réaction d'induit et, par suite, de diminuer la chute de tension.

71. Enroulement de l'induit. — Suivant que l'alternateur doit fournir du courant alternatif simple ou des courants triphasés, le nombre de bobines de l'enroulement varie ainsi que leur disposition.

Si on suppose l'entrefer développé en plan, l'enroulement d'un alternateur simple peut être effectué soit comme l'indique le schéma *a* (Voir la planche I), soit comme le montre le schéma *b*. La première disposition est dite à *bobine courte*, parce que chaque spire induite a une largeur presque égale à celle des pièces polaires, soit environ les $2/3$ du pas. La seconde disposition est désignée sous le nom de *bobine longue*, parce que chaque bobine a une largeur presque égale au pas de la machine.

Dans le premier cas, il n'y a qu'un seul côté de la spire qui soit soumis à l'induction ; dans le second cas, au contraire, les

deux côtés sont soumis en même temps à l'induction et il s'y développe des forces électromotrices qui s'ajoutent.

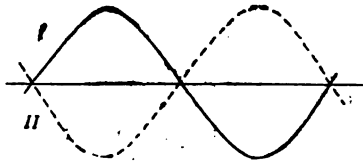


FIG. 129.

Il est facile de voir que les forces électromotrices induites dans les bobines de rang impair, aussi bien dans le cas des bobines courtes que dans celui des bobines longues, sont opposées en phase à celles qui sont induites dans les spires de rang pair (*fig. 129*) ; donc, si on veut relier en série les différentes sections de l'induit afin d'obtenir une force électromotrice élevée, et c'est là le cas qui se présente généralement, il faut enrouler ou relier en sens opposé les sections de rang pair, par exemple, par rapport à celles de rang impair.

Avec le mode d'enroulement à bobines courtes, les conducteurs d'une même section sont logés dans un trou fermé ou demi-ouvert ou bien dans une rainure; au contraire, lorsque l'enroulement est constitué par des bobines longues, système fréquemment utilisé pour les alternateurs simples, chaque trou ou rainure reçoit les conducteurs de deux sections voisines (dispositions *b* et *c*, planche I).

Dans les alternateurs à basse tension, les conducteurs constituant une bobine peuvent être réduits à deux seules barres de section rectangulaire ou cylindrique (*fig. 130*).



FIG. 130.

Le professeur Sylvanus P. Thompson a donné une règle mnémonique très simple pour reconnaître le sens de la force électromotrice dans un conducteur placé dans une direction déterminée sous un pôle inducteur.

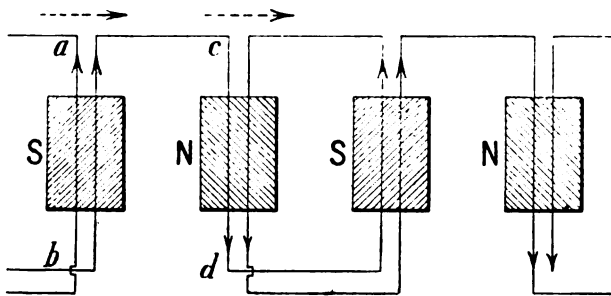


FIG. 131.

Soient SNSN... les pôles d'un alternateur (*fig. 131*). En marquant les pôles Nord et Sud à l'aide de hachures inclinées

vers la gauche, pour les pôles Sud, et de hachures inclinées vers la droite, pour les pôles Nord, on remarque que, pour les pôles Nord, la direction des hachures est la même que celle du jambage du milieu de la lettre N. Le sens de ces hachures a sa raison d'être; si au lieu de la ligne *ab*, représentant un conducteur, on place sur le dessin de la face polaire une feuille de carton dans laquelle on a pratiqué une fente étroite et qu'on la déplace vers la droite dans la direction indiquée par les flèches en pointillé, la fente, en passant devant les hachures, donne l'illusion d'un mouvement qui donne le sens du courant.

Le schéma donné par la figure 131 se rapporte à un alternateur simple dont l'enroulement à bobines longues est constitué par des barres.

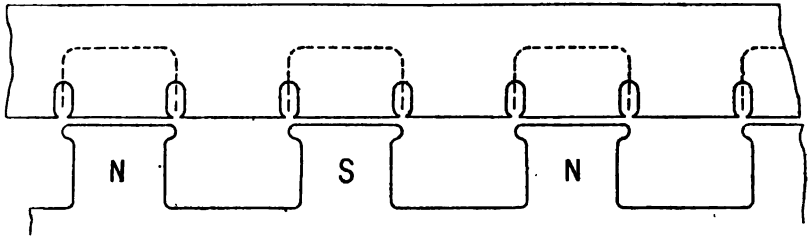
La disposition indiquée en *c* sur la planche I se rapporte à un alternateur simple à flux ondulé dont l'enroulement est à bobines longues.

Il y a lieu de remarquer que l'enroulement à bobines longues est universellement employé pour les alternateurs simples, parce que, avec le même nombre de conducteurs, on obtient une force électromotrice plus élevée.

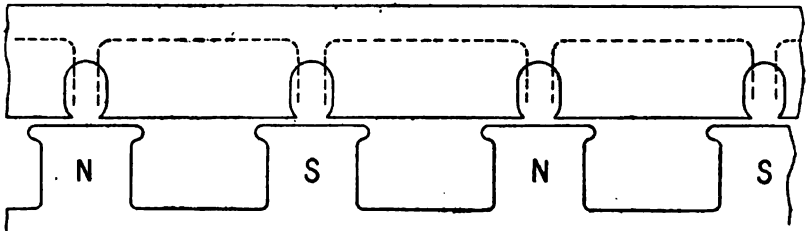
Quelquefois, dans les alternateurs de grande puissance, au lieu de placer les conducteurs d'une même section dans une seule rainure, on les dispose moitié dans une rainure et moitié dans la rainure voisine (dispositions *f*, *i*, *l*, planche II). Cette disposition présente deux avantages : on obtient d'abord une meilleure distribution du flux et, de plus, la forme de la courbe de la force électromotrice se rapproche davantage d'une sinusoïde. Au contraire, lorsque les conducteurs d'une même section sont placés dans une même rainure, la courbe de la force électromotrice est aplatie, parce qu'elle contient une harmonique du troisième ordre (Voir *a*, *fig.* 124). En divisant les conducteurs en deux faisceaux, les forces électromotrices, développées dans chacun d'eux, diffèrent en grandeur et en phase et leur somme est approximativement une sinusoïde.

Dans les alternateurs diphasés, l'intervalle correspondant

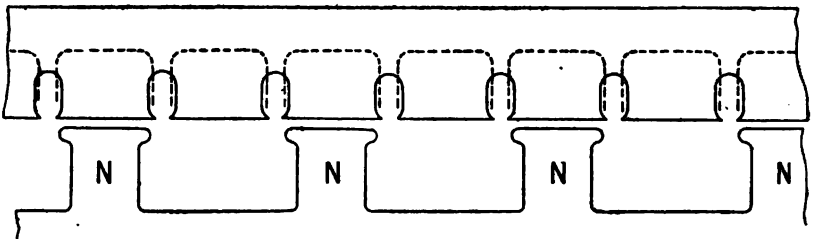
PLANCHE I



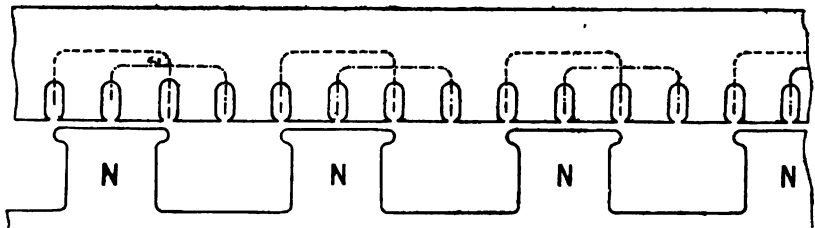
(a) Alternateur simple. — Pôles alternés. — Bobines courtes.



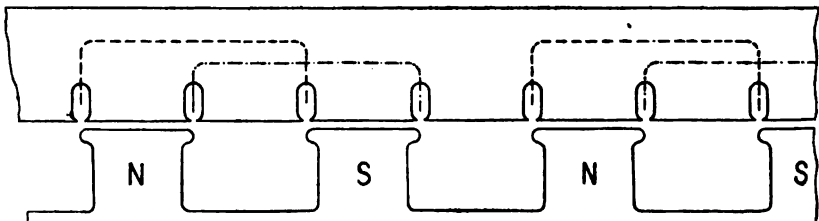
(b) Alternateur simple. — Pôles alternés. — Bobines longues.



(c) Alternateur simple. — Homopolaire. — Bobines longues.

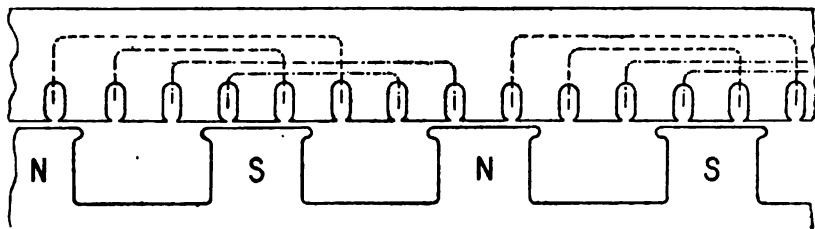


(d) Alternateur diphasé. — Homopolaire. — Bobines courtes.

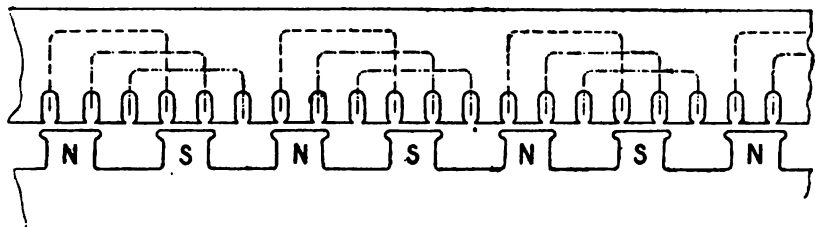


(e) Alternateur diphasé. — Pôles alternés. — Bobines longues.

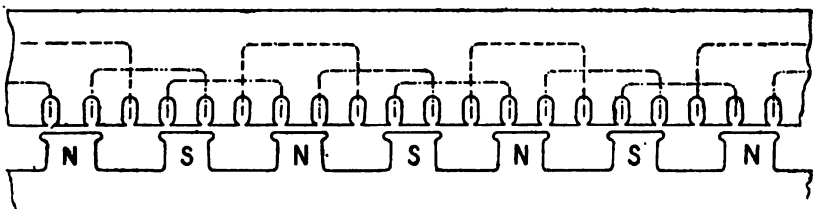
PLANCHE II



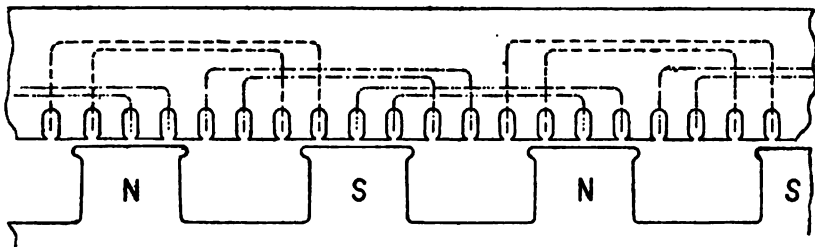
(f) Alternateur diphasé. — Pôles alternés. — Bobines longues.
Sections d'induit subdivisées.



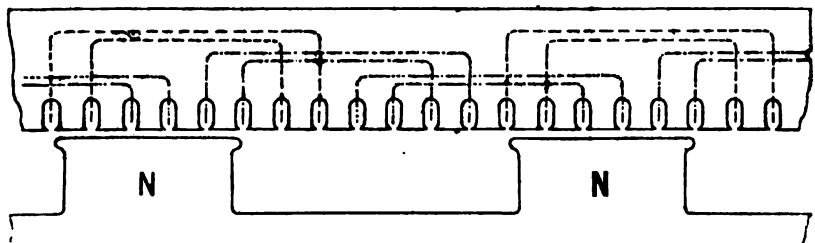
(g) Alternateur triphasé. — Pôles alternés. — Bobines longues.



(A) Alternateur triphasé. — Pôles alternés. — Bobines longues.



(i) Alternateur triphasé. — Pôles alternés. — Bobines longues.
Sections de l'induit subdivisées.



(l) Alternateur triphasé. — Homopolaire. — Bobines longues.
Sections de l'induit subdivisées.

au pas (§ 68) est divisé en deux parties dans chacune desquelles sont répartis respectivement les conducteurs des deux séries de bobines (dispositions *d*, *e*, *f*, planches I et II).

Dans les alternateurs triphasés, l'intervalle entre deux pôles de même nom, intervalle correspondant à une période complète, est divisé en trois parties, chacune d'elles recevant une des trois séries de bobines induites (dispositions *g*, *h*, *i*, *l*, planche II).

Dans ces conditions, les phases des trois forces électromotrices induites sont décalées de 120° l'une par rapport à l'autre, c'est-à-dire d'un tiers de période.

Dans les alternateurs polyphasés, on peut constituer un enroulement avec des bobines courtes et alors, si les pôles sont alternés, les bobines ne se chevauchent pas. On peut se rendre compte de cette disposition par le schéma *a* (planche I), en sup-



FIG. 132.

posant une seconde série de bobines placées dans l'espace laissé libre entre chacune des bobines de la première série; chaque rainure reçoit alors les conducteurs de deux bobines. Si, au contraire, l'alternateur est à pôles de mêmes noms (disposition *d*, planche I) ou encore s'il est à pôles alternés avec enroulement en bobines longues (disposition *e*, planche I), les bobines forcément doivent se chevaucher.

Pour empêcher que les conducteurs des diverses bobines viennent à se toucher sur les côtés de l'induit, on doit les replier dans des plans différents comme le montre la figure 132.

La distance qui doit séparer les diverses bobines entre elles

sur les côtés de l'induit varie d'après la différence de potentiel qui existe entre elles; dans certains alternateurs, où la tension atteint 10 000 volts et au delà, cette distance doit être supérieure à 0,10 m, si l'on veut empêcher qu'une étincelle, éclatant entre deux bobines voisines, endommage l'enroulement.

Dans les alternateurs de grande puissance, afin d'éviter l'emploi de pôles feuilletés, les conducteurs d'une même section sont répartis dans plusieurs rainures (dispositions *f*, *i* et *l*, planche II). C'est pourquoi, dans les alternateurs triphasés, le nombre de rainures par pôle doit être au minimum de trois et peut être de six ou de neuf; ce nombre est porté à quinze dans les grands alternateurs construits par l'*Allgemeine Elektrizitäts Gesellschaft* de Berlin pour les stations centrales de Moabit et de la Sprée.

Certains constructeurs utilisent d'autres dispositions. C'est ainsi que la maison Ganz, pour certains alternateurs, emploie deux rainures et demie par pôle et par phase, c'est-à-dire que, dans un des champs magnétiques, les conducteurs d'une section sont logés dans deux rainures et, dans le champ magnétique suivant, dans trois rainures.

Il est à remarquer qu'en multipliant le nombre de rainures, on obtient une meilleure répartition du flux et une meilleure forme de la courbe de force électromotrice; par contre, on perd un espace notable pour l'isolement nécessaire à établir entre les conducteurs et le fer du noyau.

Les enroulements représentés en *g* et en *h* (planche II) sont équivalents; avec la première disposition, il est possible de diviser l'induit en plusieurs parties sans toucher à l'enroulement, tandis qu'avec la seconde disposition, cela n'est pas possible. Dans les alternateurs de grande puissance, l'induit est toujours divisé au moins en deux parties; chacune d'elles a un enroulement d'un type déterminé. Ces divers enroulements sont ensuite reliés entre eux de la manière qui convient le mieux suivant l'application que l'on a en vue.

Pour compléter les renseignements qui viennent d'être donnés, il y a lieu de faire remarquer que les diverses bobines

d'un induit peuvent être reliées entre elles de différentes manières, de façon à obtenir une force électromotrice de valeur déterminée. Les combinaisons sont naturellement nombreuses.

Lorsqu'on veut obtenir une force électromotrice assez basse, il est préférable, au lieu de relier en quantité les diverses bobines, de constituer l'enroulement avec des barres, afin que chaque spire soit le siège d'une petite force électromotrice; dans ces conditions ces diverses spires sont reliées en tension (*fig. 133*).

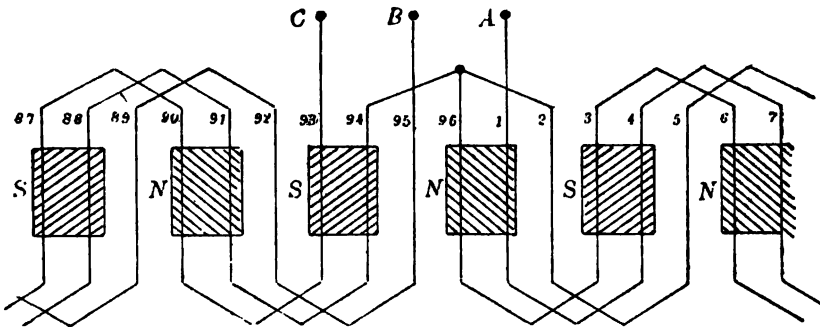


FIG. 133.

Dans les alternateurs triphasés, les trois enroulements peuvent être couplés en étoile ou en triangle; le couplage en étoile est préférable, comme on l'a indiqué dans le paragraphe 57. Le schéma (*fig. 133*) représente un enroulement avec barres comprenant trois circuits de trente-deux conducteurs chacun, reliés entre eux de la manière suivante :

Groupe A	=	1, 4, 7, 10	91, 94
— B	=	95, 92, 89, 86	5, 2
— C	=	93, 90, 87, 84	3, 96

Les extrémités des conducteurs 94, 2, 96 sont reliés ensemble et forment le centre de l'étoile; les conducteurs 1, 95, 93 sont reliés respectivement aux trois bornes A, B, C, de l'alternateur.

Si chaque section de l'enroulement, au lieu d'être constituée par des barres, était formée de plusieurs conducteurs, les lignes du schéma représenteraient chacune un faisceau de conducteurs et les connexions des bobines entre elles seraient faites comme le montre la figure 134.

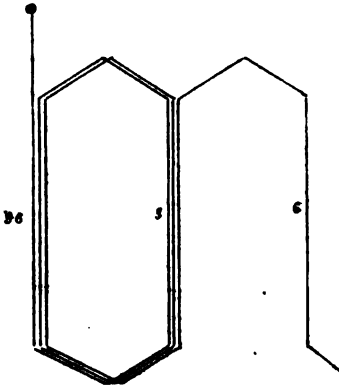


FIG. 134.

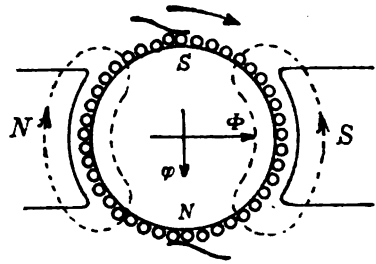


FIG. 135.

72. Réaction d'induit dans les alternateurs. — Il est utile de rappeler ici quelques faits relatifs à l'étude des dynamos à courant continu.

Dans une dynamo à courant continu (*fig. 135*) qui fonctionne sous une certaine charge, si les balais sont disposés perpendiculairement au champ principal Φ , le flux propre de l'induit φ reste perpendiculaire au flux principal et la combinaison de ces deux flux produit une simple distorsion du champ dans le sens du mouvement (*fig. 136 a*). Le flux se condense sous les extrémités de sortie des pièces polaires affaiblissant proportionnellement le flux sous les extrémités d'entrée, mais le flux total utile produisant l'induction reste le même et augmente même légèrement.

Mais si, comme on doit du reste toujours le faire, les balais sont décalés dans le sens du mouvement, afin d'éviter la production d'étincelles au collecteur, le flux de l'induit φ se déplace d'un angle égal, sa direction suivant toujours celle des balais. Décomposant ce flux φ en ses deux éléments, φ_1 (dans la direction de Φ) et φ_2 (perpendiculaire à Φ) (*fig. 136 b*), le

flux φ_1 , étant de sens contraire à Φ , affaiblit le champ principal et l'autre flux φ_2 , se composant avec le flux restant $\Phi - \varphi_1$, produit le véritable champ qui est déformé dans le sens du mouvement.

Au contraire, si on exagère la production d'étincelles en décalant les balais en sens inverse de la direction du mouvement, le flux φ formera avec Φ un angle aigu (fig. 136 γ) et la composante φ_1 s'ajoute au flux Φ en le renforçant. Dans ce cas, le flux résultant Φ_r aura une valeur plus grande que le flux Φ dû à l'inducteur.

Du reste, sans qu'il soit nécessaire de décomposer le flux φ en ses éléments, on comprend facilement que, lorsque les balais sont décalés dans le sens du mouvement, le flux résultant Φ_r , dû aux flux Φ et φ , ait une valeur plus faible que le flux principal Φ et que, au contraire, en décalant les balais en sens opposé, la valeur du flux résultant Φ_r soit plus grande que celle de Φ .

Ces phénomènes, joints à l'inévitable dispersion du flux et à la perte de charge produite par la résistance ohmique de l'enroulement, sont la cause que la différence de potentiel entre les balais diffère de la force électromotrice induite dans l'enroulement. L'ensemble de ces phénomènes s'appelle *réaction d'induit*.

Des phénomènes du même genre se produisent dans les alternateurs : le décalage des balais en avant dans la dynamo à courant continu correspond, dans l'alternateur, au cas où la force électromotrice est en avance sur l'intensité et alors le champ magnétique est affaibli ; lorsque la force électromotrice

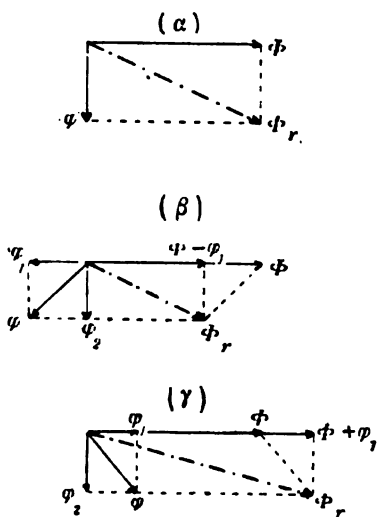


FIG. 136.

est en retard sur l'intensité, ce qui correspond au décalage en arrière des balais d'une dynamo, l'intensité du champ magnétique augmente.

Ces actions, dues à la self-induction du circuit induit (qui agit toujours pour produire un décalage en retard de l'intensité) et au facteur de puissance du circuit extérieur (agissant tantôt dans le même sens, aussi bien qu'en sens contraire si

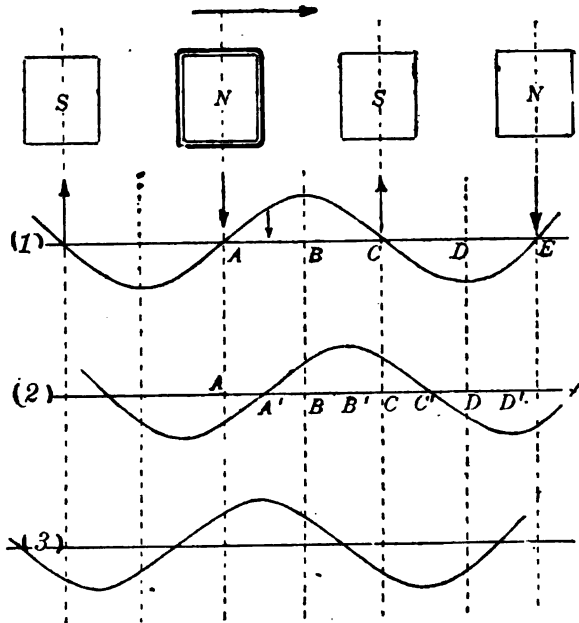


FIG. 137.

le circuit comporte un condensateur ou un moteur synchrone), sont très importantes et méritent d'être examinées en détail.

Si on considère, pour prendre un exemple simple, une spire d'alternateur simple à bobine courte (*fig. 137*), on sait que la force électromotrice induite a une valeur nulle lorsqu'elle se trouve en face d'un pôle, puisque alors il ne se produit aucune variation de flux. Si l'intensité est en concordance de phase avec la force électromotrice, elle peut être représentée par la courbe 1 (*fig. 137*), et la même courbe peut représenter également le flux produit par l'induit, celui-

ci augmentant presque proportionnellement avec l'intensité du courant. De A en C, le flux d'induit a toujours une direction déterminée et de C en E, il est toujours de sens opposé. D'autre part, le flux principal produit par l'inducteur va en diminuant dans la spire dans son trajet de A jusqu'en B et en augmentant (après s'être inversé) de B jusqu'en C. Les deux actions se compensent à la fin de la demi-période et l'on peut dire que, dans ce cas, la réaction d'induit est nulle, abstraction faite de la chute de tension due à la résistance ohmique de l'enroulement induit.

Mais, lorsque l'intensité est décalée en retard par rapport à la force électromotrice (courbe 2, *fig. 137*), la réaction d'induit ne renforce le flux que dans les trajets A'B et C'D, tandis qu'elle le diminue dans les autres parties du parcours. L'affaiblissement du flux a une valeur supérieure à son renforcement et la valeur moyenne de la force électromotrice induite, due à la variation moyenne du flux résultant, est plus faible que dans le premier cas considéré.

Inversement, si l'intensité est décalée en avance sur la force électromotrice (courbe 3, *fig. 137*), l'action renforçante est supérieure à l'action affaiblissante et la force électromotrice a une valeur plus élevée que celle qui est due à l'action seule du flux produit par l'inducteur.

Dans le cas de la courbe 2, si le retard de phase est de $1/4$ de période (ce qu'il n'est pas possible d'obtenir en pratique), les deux flux, de l'inducteur et de l'induit, sont constamment de sens opposé et l'affaiblissement de l'intensité du champ est maximum. Au contraire, dans le cas de la courbe 3, si l'avance de phase est de $1/4$ de période, l'augmentation d'intensité du champ est maximum.

Ayant ainsi expliqué l'action qui produit l'affaiblissement ou le renforcement du champ produit par l'induit, il convient d'examiner dans quelles conditions se produit alors le flux inducteur. C'est qu'en effet, si à un flux constant on enlève ou on ajoute un flux variable, théoriquement on doit obtenir un flux pulsatoire.

Dans les alternateurs simples, les choses se passent ainsi, et c'est principalement à ce fait qu'est dû le ronflement sourd caractéristique qui se produit pendant le fonctionnement de ces machines. Les pulsations sont plus accentuées dans un alternateur à induit denté et s'atténuent lorsque l'induit est lisse ; la forme de la courbe de l'intensité influe aussi notablement sur les fluctuations du champ. Il ne faut pas perdre de vue que ces variations du flux résultant sont grandement annulées par les spires qui se trouvent en court-circuit sur l'excitatrice, parce que ces spires présentent une grande self-induction. Chaque variation du flux auquel elles sont soumises donne naissance à un courant induit qui, à son tour, produit un flux, lequel réagit sur le flux principal pour empêcher les pulsations et le rendre presque constant ; il est entendu que ce qui reste presque constant est le *flux résultant*, c'est-à-dire la résultante des flux produits par l'inducteur et par l'induit.

Dans les alternateurs triphasés, il se produit également une réaction d'induit, mais dont l'action diffère un peu, parce que les courants alternatifs produisent un champ magnétique qui, comme on l'a vu paragraphe 62, prend une forme sinusoïdale dans l'entrefer et se déplace constamment avec le champ inducteur. Il se produit encore une augmentation ou un affaiblissement du champ magnétique de l'induit, mais les pulsations du flux disparaissent ou presque et la machine ne produit que peu ou pas de ronflement pendant qu'elle fonctionne, surtout si l'induit est lisse ou à trous fendus longitudinalement.

Si l'on a intérêt à obtenir, autant que possible, un flux résultant constant afin que la courbe de force électromotrice se rapproche de la sinusoïde, on peut munir les pôles de l'inducteur de *circuits amortisseurs* qui, tout en assurant un fonctionnement plus sûr, lors de la marche en parallèle des alternateurs, comme on le verra plus loin, servent encore d'écrans magnétiques, en ce sens qu'ils s'opposent à n'importe quelle variation du champ, pour la même raison que celle qui a été donnée à propos de la self-induction des bobines de l'induit de l'excitatrice.

Ces circuits amortisseurs sont constitués, soit par de simples pièces de cuivre qui forment pont entre un pôle et le suivant, tout en étant isolées électriquement; soit par des anneaux de cuivre qui entourent l'extrémité des noyaux polaires; soit enfin par des tiges de cuivre enfoncées dans les noyaux près de leur extrémité et soigneusement isolées (*fig.* 138),

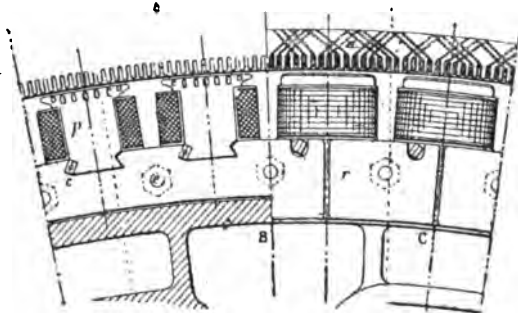


FIG. 138.

tiges reliées entre elles par des lames disposées sur les côtés, une sur le côté droit du noyau, l'autre sur le côté gauche.

73. Régulation de la tension d'un alternateur. — L'effet du flux dû à l'induit, la dispersion inévitable du flux inducteur et la résistance ohmique de l'enroulement induit sont autant de causes qui font que la tension d'un alternateur a ordinairement une valeur plus faible que celle de la force électromotrice induite pour une excitation égale. On dit *ordinairement*, parce que, lorsque l'alternateur alimente des convertisseurs, par exemple, il peut se produire l'effet contraire, l'intensité pouvant être décalée en avance de la force électromotrice, puisque la réaction d'induit a alors pour effet d'augmenter la valeur du champ qui ordinairement est affaibli (§ 72).

La *chute de tension* d'un alternateur est la différence entre la valeur de la force électromotrice pendant la marche à vide et celle de la tension en charge pour une même excitation; la

tension utile peut, suivant les cas, être plus grande ou plus petite que la force électromotrice. Dans la plupart des applications, la tension est plus faible que la force électromotrice et cette chute de tension constitue, d'après sa valeur, une sorte de coefficient de mérite de l'alternateur considéré. Mais, si l'alternateur peut éventuellement être sujet à des mises en court-circuit, par exemple lorsqu'il alimente des fours électriques, il est alors utile qu'il présente une notable chute de tension.

C'est pourquoi le *courant de court circuit* d'un alternateur n'est jamais dangereux au point de vue de la conservation de la machine, pourvu que sa durée ne soit pas excessive. Dans les alternateurs à faible chute de tension, l'intensité maximum ne dépasse pas six fois l'intensité normale et généralement elle est moindre. Dans les alternateurs à forte chute de tension, l'intensité du courant de court-circuit est tout au plus le double ou le triple de l'intensité normale.

Ce résultat est dû à ce fait que, dans un alternateur en court-circuit, l'intensité reste presque en quadrature¹ avec la force électromotrice produite par l'inducteur (en retard de $1/4$ de période); l'affaiblissement du champ provoqué par la réaction d'induit est alors maximum (§ 72) et le champ résultant est, par conséquent, plus faible et donne naissance à une force électromotrice de valeur plus petite².

Pour un alternateur donné, la chute de tension varie avec la charge; elle varie également avec le facteur de puissance du réseau, augmentant lorsque ce dernier diminue (*fig. 139*). C'est pourquoi la réaction d'induit et la dispersion augmentent

1. Deux courbes représentatives de force électromotrice ou d'intensité périodique sont en quadrature lorsque aux maxima de l'une correspondent exactement les minima de l'autre et réciproquement.

2. Il y a lieu de remarquer que cette force électromotrice est en réalité la *force électromotrice résultante* dans la spire et que l'intensité reste en concordance de phase avec elle, parce qu'il a été tenu compte de la self-induction dans les composantes du champ magnétique.

En général, ces problèmes et d'autres analogues peuvent toujours être traités de deux manières différentes pour la détermination de la valeur de la force électromotrice résultante dans un circuit. Dans le premier cas, on considère

beaucoup lorsque le facteur de puissance diminue. En fait, l'intensité du courant doit être plus grande, à égalité de tension, pour une même charge (§ 38) et cela, joint au décalage en retard de l'intensité par rapport à la force électromotrice a pour résultat d'accentuer l'action affaiblissante de la réaction d'induit. Aussi, dans un alternateur bien établi, la chute de tension, qui est de 5 0/0 et quelquefois moins lorsque la charge n'est pas inductive, atteint jusqu'à 30 0/0 quand le facteur de puissance n'est que de 0,7 ou de 0,6, principalement si le type d'alternateur considéré donne lieu à de fortes dispersions de flux.

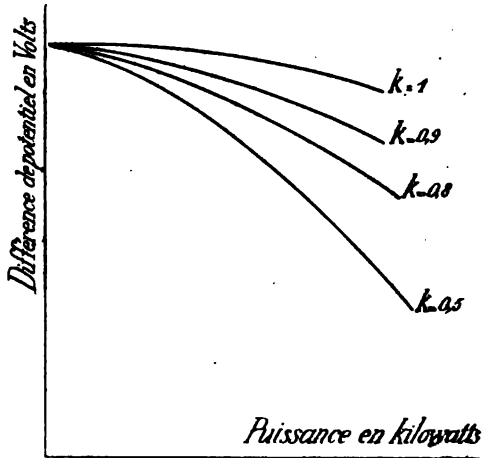


FIG. 139.

Il est toujours indispensable de pouvoir régler la tension, soit pour la maintenir constante, soit pour l'augmenter graduellement avec la charge. On arrive à ce réglage en faisant varier la tension du courant continu d'excitation des inducteurs, tension que l'on règle à son tour en agissant sur le rhéostat de champ de l'excitatrice, si cela est suffisant; ou par tout autre moyen tel que l'insertion de résistances dans le circuit inducteur de l'alternateur. Généralement, le rhéostat de champ de l'excitatrice suffit pour effectuer ce réglage.

la force électromotrice induite par le flux principal et on la compose avec celle due à la réaction d'induit; on obtient ainsi la force électromotrice résultante; dans le second cas, on ne considère que la force électromotrice résultante, due au flux résultant produit par la combinaison des divers flux de force en présence.

Il y a intérêt à considérer les phénomènes d'induction comme dus aux variations d'un flux déterminé et c'est pourquoi on donne la préférence à cette seconde méthode pour expliquer les phénomènes qui se produisent dans les machines et appareils électriques industriels.

Quelquefois, cette régulation de la tension doit s'effectuer automatiquement, comme c'est le cas, par exemple, d'un réseau où se produisent de brusques et importantes variations de charge ; il faut, dans ce cas, faire varier automatiquement la valeur du courant d'excitation dans l'inducteur de l'alternateur qui, alors, est dit *compoundé*. Nombreuses sont les solutions imaginées dans ce but ; toutes sont plus ou moins compliquées et ne sont pas encore sorties de la période d'essai. Le point commun des diverses solutions proposées est que l'on utilise le courant de l'alternateur avec des dispositifs appropriés qui, suivant les variations de charge, modifient le courant d'excitation de façon à maintenir constante la différence de potentiel aux bornes de l'alternateur. On dit que l'alternateur est hypercompoundé si la tension, au lieu de rester constante, augmente avec la charge.

74. Applications des alternateurs triphasés. — Le courant alternatif simple se prête facilement à la distribution électrique de l'énergie pour l'éclairage, mais il ne se prête pas aussi bien aux distributions d'énergie pour force motrice et encore moins s'il est nécessaire de prévoir la transformation du courant alternatif en courant continu, lors d'un développement à prévoir de l'installation.

Les courants triphasés donnent une excellente solution dans les deux derniers cas et ils sont aussi avantageux que le courant alternatif simple en ce qui concerne la distribution d'énergie pour l'éclairage. Il est vrai qu'une canalisation à trois conducteurs est plus compliquée qu'une canalisation à deux ; mais, d'un autre côté, étant donné l'économie de poids de cuivre qui résulte du système triphasé, pour une perte en ligne égale (Voir chap. XIX), il y a tout avantage à recourir à ce dernier. On peut alors affecter un des circuits, lorsqu'ils sont montés en triangle, et deux, s'ils sont montés en étoile, à la distribution d'énergie pour l'éclairage, en utilisant les trois conducteurs pour la distribution de force motrice.

A ce sujet, on doit remarquer que l'induit d'un alternateur

triphase est beaucoup mieux utilisé que celui d'un alternateur simple, car, pour ce dernier, on ne l'utilise que partiellement; par suite, à égalité de puissance et de vitesse angulaire, l'alternateur triphasé est plus économique.

Aujourd'hui, le système triphasé reçoit des applications de plus en plus nombreuses à cause des avantages qu'il présente et, si l'on construit encore des alternateurs simples et des alternateurs diphasés, c'est pour répondre à des besoins spéciaux de plus en plus rares, constituant de véritables exceptions.

75. Rendement des alternateurs. — Comme dans toute machine, le rendement industriel d'un alternateur est donné par le rapport entre la puissance utile qu'il fournit et la puissance qu'il absorbe pour son fonctionnement. La différence entre la puissance absorbée et la puissance fournie donne la valeur des pertes, qui sont : pertes par effet Joule dans l'induit et dans l'inducteur, pertes dues à l'hystérésis et aux courants parasites et enfin celles dues aux frottements.

Ces dernières seules ne changent pas, parce que l'alternateur fonctionne à vitesse angulaire constante; les autres varient plus ou moins suivant la charge.

Cela est mis en évidence par le diagramme que reproduit la figure 140 et qui donne les divers rendements pour cent, suivant la charge, d'un alternateur triphasé de 750 kilowatts, la

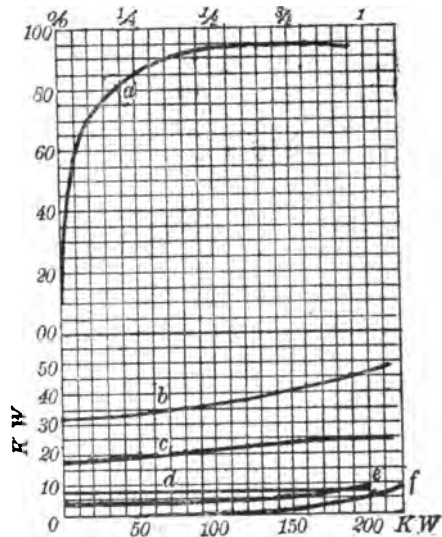


FIG. 140.

- a. Courbe du rendement.
- b. Pertes totales.
- c. Pertes dans le fer.
- d. Pertes par frottements.
- e. Pertes dans le cuivre de l'inducteur.
- f. Pertes dans le cuivre de l'induit.

valeur particulière des diverses pertes et la valeur des pertes totales pour les différentes charges.

La construction des alternateurs est aujourd'hui arrivée à un tel point de perfection, qu'une machine de 100 kilowatts atteint facilement un rendement de 90 0/0. On comprend facilement, d'après les faits déjà exposés, qu'un alternateur fonctionnant sur un circuit inductif ait un rendement plus faible, puisque, dans ce cas, à puissance égale et avec la même tension, l'intensité du courant doit être plus grande et que, par conséquent, l'excitation doit être renforcée.

Pratiquement, on peut admettre que les pertes dans un alternateur bien établi sont celles qu'indique le tableau suivant :

	30 kilowatts 0/0	100 kilowatts 0,0	500 kilowatts 0,0
rI^2 dans l'induit.....	2 à 4	$1\frac{1}{3}$ à 3	1 à $1\frac{1}{2}$
rI^2 dans l'inducteur....	$1\frac{1}{2}$ à 4	1 à $2\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$ à $1\frac{1}{2}$
Pertes dans le fer.....	2 à 4	$1\frac{1}{2}$ à 3	1 à 2
Frottements.....	2 à 4	$1\frac{1}{2}$ à 3	1 à 2

Bien entendu, le rendement de l'excitatrice est mis en dehors et doit être évalué séparément. Ce rendement est généralement compris entre 80 et 90 0/0 et la puissance de l'excitatrice est égale ordinairement à 2 ou 3 0/0 de celle de l'alternateur.

Les alternateurs polyphasés ont, à égalité de conditions, un rendement supérieur à celui des alternateurs simples, parce que les matières sont mieux utilisées et que, par conséquent, les pertes sont moindres.

CHAPITRE XII

TRANSFORMATEURS

76. Principe des transformateurs statiques à courant alternatif. — A propos de l'induction mutuelle, dans le chapitre III, on a vu que l'établissement et la disparition d'un flux magnétique dans un noyau de fer donnait naissance à une force électromotrice d'induction dans une spire disposée de manière à être traversée complètement ou partiellement par le flux. La valeur de cette force électromotrice est directement proportionnelle à la valeur maximum du flux et inversement proportionnelle au temps que le flux met pour passer d'une valeur maximum à une valeur nulle ou vice versa.

Si, au lieu d'une spire, on en met deux, trois ou un plus grand nombre, chacune d'elles, en admettant qu'elles soient toutes traversées par le même flux, devient le siège d'une force électromotrice de même valeur. En reliant les spires en tension, c'est-à-dire en enroulant sur le noyau un fil conducteur isolé, de manière à constituer une bobine, la valeur de la force électromotrice totale est la somme des forces électromotrices développées dans chacune des spires.

Lorsque le flux de force, au lieu d'être produit par un courant interrompu, est dû à un courant alternatif (et dans ce cas le noyau doit être feuilleté pour éviter autant que possible la production de courants de Foucault), ce flux est aussi alternatif et ses variations successives peuvent être représentées par la courbe sinusoïdale habituelle.

On comprend facilement (§ 22) pourquoi, dans ces conditions, une spire soumise à l'induction mutuelle devient le siège d'une force électromotrice alternative décalée de $1/4$ de période par rapport au flux. Si les spires sur lesquelles se produisent les effets d'induction mutuelle sont très nombreuses, la force électromotrice totale est la somme des forces électromotrices développées dans chacune des spires.

Lorsque ce second circuit est fermé sur une résistance quelconque, il s'y produit un courant alternatif qui dure pendant tout le temps que le noyau donne naissance à un flux alternatif. On a donc ainsi la possibilité de développer dans un circuit un courant alternatif par suite des effets d'induction mutuelle dus à un autre circuit dans lequel passe un courant alternatif. Les deux circuits ainsi constitués sont complètement indépendants l'un de l'autre au point de vue électrique, mais sont dépendants au point de vue magnétique; les deux parties de cet appareil sont fixes.

L'ensemble constitué par deux bobines, dont l'une, dite *bobine primaire*, est parcourue par un courant alternatif de fréquence déterminée, et dont l'autre, dite *bobine secondaire*, est soumise à l'induction de la première, constitue un *transformateur*. Les effets d'induction sont augmentés par la présence d'un noyau de fer qui augmente le flux de force. La bobine secondaire, lorsque son circuit est fermé sur une résistance, produit un courant alternatif. On ajoute quelquefois au nom de transformateur le qualificatif de *statique* pour indiquer que tous les organes de l'appareil sont fixes, afin de le distinguer d'appareils destinés à un but analogue dans lesquels il y a des organes mobiles.

On peut se demander quel est l'intérêt que présente, au point de vue industriel, un appareil de ce genre, puisqu'on obtient un courant alternatif en l'alimentant également avec du courant alternatif et que les deux ont la même fréquence. Pourquoi ne pas utiliser directement le courant alternatif qui circule dans le primaire du transformateur pour alimenter les récepteurs? A cela on peut répondre qu'effectivement le cou-

rant du circuit secondaire à la même fréquence que celui qui alimente le primaire, mais on a la faculté de modifier à volonté, et dans de grandes limites, les facteurs de l'énergie (tension et intensité); c'est précisément cette propriété du transformateur qui donne une importance considérable à cet appareil dû, au moins en ce qui concerne son principe, à l'invention de Gaulard et de Gibbs.

Il convient d'étudier maintenant les phénomènes qui se produisent dans un transformateur.

Le circuit secondaire d'un transformateur se compose d'une bobine enroulée sur un noyau de fer et de récepteurs qui utilisent une certaine quantité d'énergie électrique fournie par le circuit primaire. La loi de la conservation de l'énergie indique que, abstraction faite des pertes inévitables, les quantités d'énergie fournies au circuit pri-

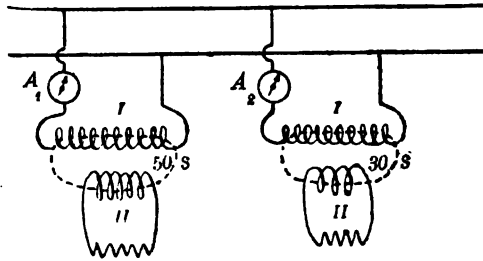


FIG. 141.

maire et dépensées dans le circuit secondaire sont équivalentes. C'est le flux de force magnétique développé dans le noyau de fer qui, par suite des effets d'induction mutuelle, transporte l'énergie d'un circuit à l'autre.

Ce point fondamental établi, il convient d'examiner les phénomènes qui se produisent lorsque deux transformateurs ont un circuit primaire identique, un noyau de fer semblable et un circuit secondaire différent (*fig. 141*). Le circuit secondaire du premier transformateur comporte, par exemple, 50 spires, tandis que celui du second n'en a que 30. La tension du circuit d'alimentation aux bornes des deux circuits primaires est la même, les deux transformateurs étant montés en dérivation sur les deux conducteurs d'une canalisation alimentée par un seul alternateur. On intercale des résistances dans chacun des circuits secondaires, que l'on règle de manière à obtenir

dans les ampèremètres A_1 et A_2 des déviations identiques, c'est-à-dire indiquant la même intensité de courant. On peut déduire des indications des ampèremètres que la quantité d'énergie électrique fournie aux deux circuits primaires est la même. En négligeant les pertes, on peut aussi conclure de ce fait que la quantité d'énergie dépensée dans chacun des deux circuits secondaires est la même, mais qu'elle n'est pas utilisée dans les mêmes conditions.

Le flux a évidemment la même valeur dans chacun des deux noyaux de fer et la force électromotrice induite dans une spire est également la même pour toutes. Soit, par exemple, une force électromotrice de 1 volt développée dans chaque spire du circuit secondaire; dans ces conditions, la force électromotrice disponible aux bornes du circuit secondaire du premier transformateur est de 50 volts, puisqu'il comporte 50 spires, et elle n'est que de 30 volts dans le circuit secondaire du second transformateur. Mais, puisque la quantité d'énergie est la même dans les deux, il s'ensuit que l'intensité du courant est différente. Si la quantité d'énergie mise en jeu dans chacun des transformateurs est de 1 kilowatt, l'intensité du courant dans le premier est égale à :

$$\frac{1\ 000}{50} = 20 \text{ ampères,}$$

tandis que, dans le second, elle est de :

$$\frac{1\ 000}{30} = 33,3 \text{ ampères.}$$

L'expérience confirme entièrement ces déductions et l'on voit comment, avec un flux magnétique alternatif de valeur déterminée, il est possible de transmettre une certaine quantité d'énergie électrique du circuit primaire au circuit d'utilisation dans lequel on peut faire varier à son gré la tension sous laquelle l'énergie électrique est utilisée.

Le circuit primaire étant, au point de vue électrique, tout à fait indépendant du circuit secondaire, on peut, en le cal-

culant en conséquence, l'alimenter sous une tension déterminée faible, grande ou très grande; l'on comprend pourquoi le transformateur statique est un système dans lequel une certaine quantité d'énergie électrique fournie au circuit primaire sous forme de courant alternatif à une tension déterminée peut être transmise au circuit secondaire dans lequel la même quantité d'énergie est utilisée sous la tension qui convient le mieux.

Le nom de *transformateur* a été donné à cet appareil parce qu'il *transforme les facteurs de l'énergie*. Donc, une quantité donnée d'énergie peut être fournie à cet appareil à haute tension et avec une faible intensité et il peut ensuite la distribuer à basse tension et avec une grande intensité. La réciproque se produit également et est souvent utilisée dans l'industrie. Enfin, dans certains cas particuliers, on utilise des transformateurs dans lesquels les facteurs de l'énergie sont les mêmes dans les deux circuits.

77. Rapport de transformation. — On désigne sous le nom de *rapport de transformation* d'un transformateur le rapport entre la tension de la canalisation d'alimentation aux bornes du circuit primaire et la tension sous laquelle la canalisation d'utilisation est alimentée par le circuit secondaire. Ainsi, si le primaire d'un transformateur reçoit le courant sous une différence de potentiel de 2000 volts et que cette différence de potentiel soit seulement de 100 volts aux bornes du secondaire, le rapport de transformation est égal à 20.

On démontre, et l'expérience le confirme, que le rapport de transformation est pratiquement égal au rapport existant entre le nombre de spires des circuits primaire et secondaire. C'est pourquoi, si le nombre de spires est très différent sur chacun des deux enroulements, le poids de cuivre employé reste le même pour chacun d'eux : en effet, dans le circuit où la différence de potentiel est très grande, l'intensité est faible et un conducteur de faible section suffit ; au contraire, dans le circuit où la différence de potentiel est faible, l'intensité du courant,

pour une même quantité d'énergie, est grande et il est nécessaire que la section du fil soit proportionnelle à cette intensité.

78. Analogie mécanique. — Le levier, qui est la plus simple des machines, et tous les appareils dérivant plus ou moins directement du levier sont, au point de vue mécanique, ce que le transformateur est au point de vue électrique. Le levier transforme les facteurs du travail mécanique comme le transformateur modifie ceux de l'énergie électrique et de l'utilité du levier en mécanique on peut immédiatement en déduire celle du transformateur dans les nombreuses applications de l'énergie électrique.

Dans le cas du levier, on comprend, naturellement et sans explications, qu'il doit y avoir égalité entre le travail dépensé et le travail obtenu et qu'à un effort résistant de valeur déterminé doit correspondre un effort égal de même valeur ; il en est de même pour le transformateur électrique.

Dans le transformateur, il y a un circuit primaire relié aux conducteurs d'alimentation ; il semble, à première vue, que la quantité d'énergie absorbée par le transformateur doit être constante ; mais les choses ne se passent pas ainsi, car, comme on le verra plus loin, la quantité d'énergie absorbée par le transformateur varie avec celle que fournit le circuit secondaire au réseau d'utilisation et c'est ce phénomène qui constitue le mécanisme autorégulateur du transformateur électrique.

Si on voulait pousser encore plus loin l'analogie, on pourrait remarquer que, dans le levier, c'est la tige rigide qui transporte l'énergie d'une extrémité à l'autre, tandis que, dans le transformateur, c'est le flux magnétique qui effectue cette transmission. Le levier peut transmettre l'énergie mécanique de différentes manières ; de même un flux de valeur donnée peut transmettre d'un circuit à un autre une quantité d'énergie petite ou grande.

Soit un levier en équilibre, ce qui correspond à un transformateur dont le circuit secondaire est ouvert. Dans un levier

de longueur donnée, c'est la position du point d'appui qui détermine le rapport entre la force agissante et la force résistante; dans le transformateur, le flux reste constant et ce sont les deux enroulements qui déterminent le rapport entre la tension du circuit d'alimentation et celle du circuit d'utilisation. Le rapport des bras du levier correspond au rapport du nombre de spires des deux circuits primaire et secondaire du transformateur.

Le flux reste constant dans le noyau du transformateur et il n'augmente pas avec l'intensité du courant dans le circuit primaire; il varie légèrement pourtant suivant la charge et l'on en donnera plus loin les raisons.

79. Autorégulation du transformateur. — A première vue, on ne voit pas pourquoi la quantité d'énergie absorbée par le circuit primaire d'un transformateur est automatiquement proportionnelle à celle que fournit le circuit secondaire. C'est là un fait qui demande quelques explications.

Il convient de rappeler, à ce propos, le résultat constaté dans le paragraphe 23 à propos de l'action qu'un circuit, soumis à l'induction mutuelle, exerce sur le flux qui a donné naissance à cette induction. On comprend alors que, si un noyau de fer est muni de deux enroulements, le premier relié à un générateur et le second fermé sur une résistance, le courant qui prend naissance dans ce dernier, par exemple au moment de l'ouverture ou de la fermeture du circuit, réagit par son propre flux sur le flux principal et tend à diminuer la self-induction apparente du premier circuit.

Dans un transformateur, il se produit le même phénomène, parce que, comme dans l'exemple qui vient d'être cité, on se trouve en présence d'un courant qui circule dans le circuit primaire et qui agit par induction mutuelle sur un second circuit; ce courant étant régulièrement alternatif, c'est-à-dire croissant et décroissant, au lieu d'être un courant unique interrompu, cela ne change rien au caractère du phénomène et le résultat doit être le même. La présence du circuit secon-

daire dans lequel se produit un courant alternatif a pour effet de diminuer la self-induction apparente du circuit primaire, permettant ainsi à ce dernier d'être traversé par un courant plus intense et, par conséquent, de consommer une plus grande quantité de l'énergie électrique fournie par la canalisation.

L'autorégulation d'un transformateur s'effectue de la manière suivante : soit, par exemple, le cas, qui se présente le plus souvent dans la pratique, d'un transformateur dont le circuit secondaire alimente des lampes à incandescence

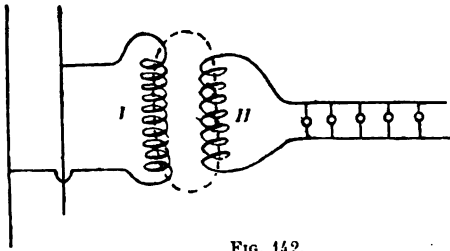


FIG. 142.

(fig. 142). Si on suppose le circuit secondaire ouvert, c'est-à-dire toutes les lampes hors circuit, le transformateur devient une simple bobine d'induction et le courant que reçoit le circuit pri-

maire de la canalisation qui l'alimente à tension constante ne dépasse pas 2 à 6 0/0 du courant qu'il absorberait s'il fonctionnait à pleine charge. Mais le courant qu'il absorbe à circuit secondaire ouvert est presque en totalité un courant magnétisant (Voir chapitre VIII) qui n'entraîne aucune consommation d'énergie à la fin de chaque demi-période et il n'y a qu'une faible partie de ce courant qui soit réellement actif et dont l'énergie est dissipée par effet Joule, par hystérésis et par courants de Foucault. D'après ce qui a été dit paragraphe 48, l'intensité est fortement décalée par rapport à la force électromotrice agissante.

Si l'on vient à allumer une lampe, il se produit aussitôt, dans le circuit secondaire, sous l'action de la force électromotrice induite, un courant de 1 ampère efficace par exemple et ce courant réagit aussitôt sur le circuit primaire pour en diminuer la self-induction apparente. L'impédance du circuit primaire devient, par suite, plus faible, le courant actif augmente

et on peut démontrer qu'il augmente proportionnellement à la quantité d'énergie utilisée dans la lampe.

Lorsqu'on met en circuit une deuxième lampe, l'intensité du courant dans le circuit secondaire prend une valeur deux fois plus grande et l'action que le circuit secondaire exerce sur le circuit primaire est également deux fois plus considérable; par conséquent, la self-induction apparente du circuit primaire diminue dans la même proportion et le courant actif croît en conséquence. Il en est de même lorsqu'une troisième, quatrième, etc., lampe est mise en service. Dans ces conditions, un transformateur alimenté à potentiel constant est un appareil autorégulateur, puisque, si on maintient constante la différence de potentiel aux bornes du circuit primaire, la force électromotrice agissante est également constante aux bornes du circuit secondaire. Cette force électromotrice peut être considérée comme constante, parce que le flux créé par le courant magnétisant peut également être considéré comme constant. En effet, c'est la seule composante active qui augmente, la composante magnétisant restant pratiquement constante.

En ne tenant pas compte des pertes, l'énergie fournie par la canalisation au circuit primaire du transformateur se retrouve, avec le rapport de transformation, dans le circuit d'utilisation relié aux bornes du secondaire.

La section des conducteurs constituant les enroulements du transformateur limite seule le nombre de lampes que l'on peut alimenter, à cause de l'échauffement de ces enroulements par effet Joule.

Pour vérifier le transport d'énergie du primaire au secondaire ou du circuit d'alimentation au circuit d'utilisation, il suffit d'avoir un wattmètre à sa disposition et de l'intercaler sur le circuit primaire. Lorsque le secondaire a son circuit ouvert, le wattmètre indique la puissance consommée dans le circuit primaire par l'hystérésis, les courants de Foucault et l'effet Joule, ce dernier étant négligeable à vide, vu la faible intensité du courant. En mettant ensuite des lampes en circuit, on constate que l'énergie absorbée par le circuit primaire

augmente proportionnellement avec le nombre de lampes en service.

Il est peut-être difficile de comprendre à première vue pourquoi le flux reste constant, mais il suffit d'observer que le flux alternatif qui reste pratiquement constant, en passant par ses valeurs successives, est le *flux résultant* qui se produit dans le noyau, c'est-à-dire le flux qui est la somme algébrique, à chaque instant, du flux produit par le courant primaire et de celui qui prend naissance dans le circuit secondaire. On a vu que, lorsque l'intensité du courant augmente dans le circuit secondaire, elle augmente proportionnellement dans le circuit primaire; le flux développé par le circuit secondaire réagit naturellement sur celui qui est dû au circuit primaire et un transformateur, où l'on peut considérer les pertes comme négligeables, se comporte de telle manière que le flux résultant reste, comme il a été dit, pratiquement constant. Naturellement, il n'est pas constant dans le sens absolu du mot, c'est-à-dire qu'il ne varie pas, puisqu'il s'agit toujours d'un courant alternatif; mais, bien entendu, il faut comprendre que sa valeur maximum, par exemple, reste toujours la même.

Dans ce qui précède, on a donné une explication du phénomène, mais il y a une autre manière de l'interpréter, déjà indiquée, qui consiste à décomposer le courant en ses composantes active et magnétisante. Lorsque le circuit secondaire ou d'utilisation ne comporte que des lampes à incandescence, le courant est complètement actif et ce n'est que dans le circuit primaire ou d'alimentation qu'il y a une composante magnétisante qui sert à produire le flux. Mais, lorsque la charge augmente, il n'y a que la composante active du courant qui prenne une valeur plus grande, comme on l'a vu ci-dessus, et la composante magnétisante reste constante; par suite, le flux reste également constant ainsi que la valeur efficace de la force électromotrice induite dans le circuit secondaire.

Tel est le mécanisme de l'autorégulation; il reste maintenant à examiner quelle est la cause physique qui produit l'affaiblissement de la force électromotrice induite dans le circuit pri-

maire. A ce propos, il convient de rappeler que, s'il ne se produisait pas une certaine diminution des effets de la self-induction, aucune augmentation d'intensité du courant primaire ne serait possible. Le flux résultant ne reste pas absolument constant, comme on l'a admis jusqu'à présent, mais s'affaiblit légèrement d'une quantité suffisante pour permettre l'augmentation de l'intensité du courant; c'est pourquoi on constate une faible chute de tension dans le circuit secondaire.

Le flux qui produit la force électromotrice utile dans le circuit secondaire donne également naissance à une force électromotrice dans le circuit primaire. Un exemple montrera d'une manière suffisante que cette force électromotrice, et par suite aussi le flux qui la produit, ne subissent que de faibles variations pour permettre à l'intensité du courant dans le circuit primaire de prendre des valeurs très grandes.

Soit un transformateur d'une puissance de 10 kilowatts alimenté sous une différence de potentiel de 1 000 volts efficaces. Son circuit primaire a une résistance de 2 ohms. On a vu précédemment (chap. VIII) qu'en marche à vide, il absorbe à peine 0,5 ampère.

La force contre-électromotrice résultante dans le circuit doit être, dans ces conditions:

$$0,5 \cdot 2 = 1 \text{ volt.}$$

C'est pourquoi la force électromotrice induite par le flux est de 999 volts

$$1\,000 - 999 = 1.$$

En réalité, cette force électromotrice, est légèrement supérieure, parce que, dans ces conditions, la force électromotrice induite n'est pas en opposition complète de phase avec la tension agissante.

A pleine charge, au contraire, l'intensité du courant dans le circuit primaire est de 10 ampères et la valeur de la force contre-électromotrice résultante est:

$$10 \cdot 2 = 20 \text{ volts;}$$

c'est pourquoi la force électromotrice induite, qui est maintenant presque complètement en opposition de phase avec la tension agissante, descend à :

$$1\ 000 - 20 = 980 \text{ volts,}$$

afin de permettre au courant de prendre une intensité plus grande. Si la valeur de la force électromotrice induite diminue de 2 0/0 environ, le flux résultant dans le circuit magnétique doit diminuer dans la même proportion. Mais cette diminution, comme le montre l'exemple cité, est si faible que l'on peut dire que le flux dans un transformateur est pratiquement constant. Il est facile de voir que, si la résistance ohmique de l'enroulement primaire était plus faible, la diminution nécessaire du flux serait encore moindre. En fait, si l'enroulement primaire pouvait être établi de manière à n'avoir qu'une résistance nulle, le flux resterait constant.

On admet, de même, que dans un moteur à vapeur la vitesse angulaire est pratiquement constante et l'on sait pourtant qu'elle diminue légèrement avec les augmentations de charge. C'est précisément par suite de ce ralentissement que, le régulateur entrant en fonctionnement, la consommation de vapeur fournie par la chaudière devient plus grande et l'énergie développée croît proportionnellement à l'augmentation de la charge. Des phénomènes analogues, quoique de nature tout à fait différente, se produisent dans un transformateur.

Il reste encore un point à élucider avant de terminer cette étude.

On a déjà vu que, lorsque le circuit secondaire est sans induction, le courant qui y circule est entièrement actif. Mais, lorsque ce circuit est inductif, le courant dans le circuit secondaire comporte une composante magnétisante qui, conformément à la loi naturelle, s'oppose à l'effet de la composante magnétisante du courant établi dans le circuit primaire. Il s'ensuit que, devant toujours avoir le même flux résultant, tant que la tension du circuit d'alimentation reste constante, la composante magnétisante dans l'enroulement primaire doit aug-

menter de valeur, valeur qui doit être d'autant plus grande que le circuit secondaire présente une plus forte induction.

S'il n'y a point de fuites magnétiques dans le transformateur, c'est-à-dire si la totalité du flux produit par le courant de l'enroulement primaire traversait en totalité ce circuit secondaire et si également tout le flux développé par le courant de l'enroulement secondaire passait entièrement par l'enroulement primaire, la force électromotrice induite dans l'enroulement secondaire resterait constante, même si ce circuit secondaire présentait de l'induction, à la condition, toutefois, que la tension du courant d'alimentation restât constante, abstraction faite de la résistance ohmique de l'enroulement primaire.

Dans la pratique, comme on le verra plus loin, paragraphe 79, les fuites magnétiques ne peuvent jamais être complètement évitées et, dans ces conditions, la chute de tension est plus considérable. Avec une charge inductive, cette chute de tension s'accroît encore pour les raisons qui suivent.

Pour une puissance déterminée, l'intensité du courant est d'autant plus grande que l'inductance du circuit alimenté est plus considérable, et l'effet produit par les fuites magnétiques est d'autant plus sensible que l'intensité du courant est plus grande. On voit que, pour la même puissance et avec le même transformateur, la différence de potentiel aux bornes du circuit secondaire est d'autant plus petite que la charge présente une plus grande induction, lorsque le transformateur a des fuites magnétiques. Ce sont là des effets qui se produisent dans tous les cas que l'on rencontre dans la pratique.

En résumant maintenant les phénomènes qui viennent d'être exposés, on voit que, lorsqu'un transformateur fonctionne sous charge, le courant qui passe dans son circuit primaire a deux composantes : l'une qui produit le flux (composante magnétisante) et l'autre (composante active) qui fournit l'énergie au circuit d'utilisation, énergie dont les facteurs sont modifiés.

Le courant magnétisant remplit ici le même rôle que le courant d'excitation dans une dynamo et le flux dû à ce courant

produit dans le circuit secondaire la force électromotrice utile, force électromotrice qui tend à s'affaiblir lorsque la charge augmente. Lorsqu'on veut qu'elle reprenne sa valeur primitive, il est nécessaire d'augmenter l'intensité du courant d'excitation. Dans une dynamo, on obtient ce résultat en élevant la tension aux bornes du circuit d'excitation; de même, dans un transformateur, il suffit d'augmenter légèrement la tension du courant d'alimentation aux bornes du circuit primaire. C'est précisément ce que l'on fait dans la pratique.

La force électromotrice dans le circuit secondaire est due à un flux alternatif et le courant s'établit dès que ce circuit est fermé sur une résistance. A ce moment, il y a une certaine quantité d'énergie électrique mise en jeu et cette énergie est fournie par le circuit d'alimentation, par suite de l'affaiblissement de la force électromotrice induite dans le circuit primaire du transformateur.

On peut, en y réfléchissant, constater que le phénomène de la production d'une force électromotrice dans une dynamo présente une analogie complète avec le même phénomène dans un transformateur. Mais, tandis que dans la dynamo le rapport entre la quantité d'énergie dépensée et celle qui est recueillie dépend de la valeur plus ou moins grande des forces électromagnétiques réagissantes entre le courant dans les conducteurs de l'induit et le champ magnétique dû à l'inducteur (§ 5), dans le transformateur ce rapport de transformation s'effectue d'une autre manière.

En électrotechnique, on doit tenir compte de ce fait que les phénomènes observés, malgré la diversité des moyens employés pour les obtenir, sont tous dus à une cause unique si l'on remonte à la source même d'énergie. Dans le cas actuel, on peut admettre que la dynamo est actionnée par un moteur électrique et, alors, il y a analogie complète au point de vue du mode de fonctionnement et du résultat obtenu entre cette dynamo et le transformateur, la transformation s'opérant dans les deux cas par des procédés ne différant seulement entre eux que par quelques détails.

Dans le groupe moteur-dynamo, il y a transformation d'énergie électrique en énergie électrique. Cette énergie peut être fournie au moteur sous une tension déterminée n'ayant aucun rapport avec la tension pour laquelle la dynamo a été établie. Plus la quantité d'énergie débitée par la dynamo est grande, plus grande aussi est la quantité d'énergie fournie au moteur par le circuit d'alimentation ; ce dernier alimente, suivant les besoins de la charge, l'excitation du moteur, **sous une tension** que l'on peut admettre constante, et fournit une quantité d'énergie en rapport avec la charge de la dynamo. L'analogie avec les phénomènes qui se produisent dans un transformateur est donc d'autant plus complète que, comme dans le transformateur, le champ du moteur électrique alimenté à tension constante reste aussi pratiquement constant et qu'un courant plus intense passe dans l'induit lorsque, sous l'action d'une augmentation de charge, il prend une vitesse angulaire plus faible et, par suite, développe une force contre-électromotrice moindre. Dans le transformateur, l'intensité du courant augmente aussi dans son circuit primaire lorsque, le flux résultant s'affaiblissant, la force contre-électromotrice due à la self-induction diminue. Dans le groupe moteur-dynamo, c'est le mouvement qui effectue le transport de l'énergie ; dans le transformateur, c'est le flux qui remplit le même rôle. Ce flux est alternatif. Or, il est de la plus grande importance de remarquer que le mouvement dans le système moteur-dynamo a pour effet de rendre alternatif le flux dans les spires des divers organes constituant l'ensemble du système.

Les deux appareils, moteur-dynamo et transformateur, quoique différents en ce qui concerne leurs dispositions, sont donc identiques au point de vue du résultat obtenu et la transformation s'effectue par un procédé identique. Il ne peut en être autrement, car la nature agit toujours de manière à simplifier le plus possible ses procédés et il serait incompréhensible que, pour arriver à un même résultat, la nature utilisât des phénomènes différents.

En réfléchissant aux considérations qui viennent d'être déve-

loppés, on peut se faire une idée nette et précise du mode de fonctionnement d'un transformateur pour courant alternatif et même pousser encore plus loin l'analogie en supposant que le moteur et la dynamo soient réunis en une seule machine. En effet, si, sur l'induit d'un moteur, on dispose un second enroulement dont les extrémités aboutissent à un collecteur, permettant ainsi de recueillir l'énergie électrique due à la transformation de l'énergie mécanique, un seul champ magnétique suffit pour le moteur et la dynamo ainsi réunis, de même qu'il n'y a qu'un seul champ magnétique dans un transformateur. Les deux machines permettent d'obtenir le même résultat et il n'y a d'autre différence entre elles que dans le dispositif utilisé pour obtenir les variations de flux agissant sur les enroulements.

Le transformateur pour courant alternatif ne comportant aucun organe mobile n'exige, par suite, aucune surveillance pendant son fonctionnement, ce qui constitue un grand avantage au point de vue de ses applications industrielles. Aucun électricien n'aura l'idée de transformer les facteurs de l'énergie à l'aide d'un transformateur tournant, si le courant fourni est alternatif et qu'il doit être distribué également sous forme de courant alternatif avec la même fréquence, puisque le transformateur statique remplit parfaitement le même but. Il n'en est pas de même lorsqu'il faut transformer les facteurs de l'énergie d'un courant continu ou encore lorsqu'il est nécessaire de transformer un courant alternatif en courant continu ou réciproquement ; dans ces divers cas, la seule solution possible est de passer par l'intermédiaire d'un transformateur tournant (Voir chap. xvi).

80. Types industriels de transformateurs statiques. —

La dépendance magnétique des deux circuits primaire et secondaire d'un transformateur, circuits complètement isolés l'un de l'autre, s'obtient en pratique au moyen d'un noyau feuilleté constituant le circuit magnétique. Il y a deux dispositions habituellement employées : dans l'une les circuits élec-

triques entourent le noyau de fer et alors le transformateur est dit à *noyau*; dans l'autre, le fer du circuit magnétique enveloppe les circuits électriques primaire et secondaire et l'on a un transformateur *cuirassé*.

Dans le transformateur à noyau (*fig. 143*), les deux bobines sont exposées à l'action refroidissante de l'air; dans le transformateur cuirassé (*fig. 144*), elles sont presque complètement entourées par le fer.

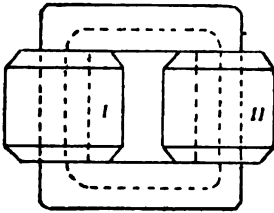


FIG. 143.

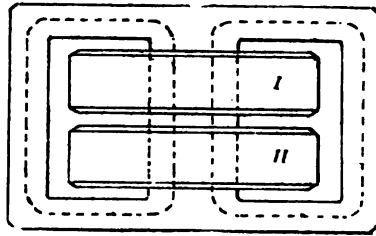


FIG. 144.

Dans le type cuirassé, le circuit magnétique est dédoublé, sa réluctance est moindre et la production du champ nécessite un nombre d'ampères-tours plus faible pour obtenir une même intensité de champ que dans le transformateur à noyau de même puissance et dans lequel les pertes sont les mêmes.

En général, il faut une plus grande quantité de cuivre dans le transformateur à noyau que dans le type cuirassé; en ce qui concerne la quantité de fer, c'est le contraire qui a lieu.

Dans les deux cas, le circuit magnétique est toujours fermé afin que le flux, abstraction faite des fuites magnétiques inévitables, passe entièrement par le fer. Il serait trop coûteux et peu pratique, au point de vue construction, de constituer entièrement le circuit magnétique en fer en employant des tôles d'une seule pièce. En outre, pour que la construction d'un transformateur soit rendue pratique, il est indispensable que les bobines soient faites sur le tour ou sur gabarit, ce qui oblige à avoir un circuit magnétique en plusieurs pièces et, par conséquent, avec des joints constituant des entrefers. C'est pourquoi les noyaux ou les cuirasses sont toujours faits en

deux ou plusieurs parties que l'on assemble après avoir mis en place les bobines.

Pour les transformateurs de faible puissance et, par conséquent, de petites dimensions, le noyau peut être constitué en deux pièces ayant la forme d'un L, disposées comme cela a été indiqué dans le paragraphe 50 pour les bobines de réactance. On peut également le constituer avec un paquet de tôles découpées en forme d'U et fermer ensuite le circuit magnétique avec un paquet de tôles droites posées par-dessus. Dans les transformateurs de grandes dimensions, le noyau est toujours constitué par 4 paquets de tôle et, naturellement, avec ce mode de construction, les joints sont plus nombreux.

En ce qui concerne les transformateurs cuirassés, le circuit magnétique peut être constitué par deux paquets de tôles découpées en forme d'E que l'on place ensuite, bout à bout, l'un contre l'autre, après avoir au préalable glissé sur la branche centrale les deux bobines primaire et secondaire. C'est la

disposition ordinairement employée par la maison Ganz de Budapest.

On peut aussi procéder d'une autre manière : on découpe les feuilles de tôle de manière à leur donner la forme indiquée en A sur la figure 145 ;

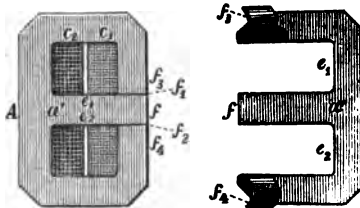


FIG. 145.

on coupe ensuite une des branches extérieures en f_1 et f_2 de façon que l'on puisse relever les deux côtés f_3 et f_4 . Chaque feuille de tôle ainsi préparée, on l'enfile dans les bobines et, cela fait, on abaisse successivement les côtés f_3 et f_4 de chacune des feuilles de tôle en prenant le soin d'introduire alternativement une lame à droite, puis une à gauche des bobines, de façon à partager les joints sur les deux côtés du transformateur. A l'aide d'étriers et de boulons appropriés, on serre convenablement les feuilles de tôle les unes contre les autres et le transformateur terminé a alors l'aspect extérieur que représente la figure 146.

Dans les transformateurs à noyau, on interpose dans chaque joint une mince feuille de papier afin d'éviter au point de contact la production de courants de Foucault.

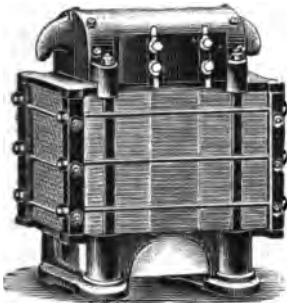


FIG. 146.

Il ne faut point songer, en effet, avec les tôles minces, n'ayant qu'une épaisseur de $\frac{4}{10}$ de millimètre, d'obtenir au point de jonction une continuité parfaite; il n'est guère possible, en effet, d'obtenir que l'extrémité

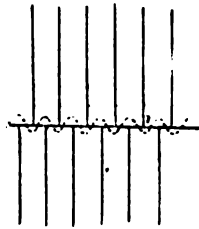


FIG. 147.

de chaque lame se trouve exactement en regard de l'extrémité de la lame correspondante (fig. 147). Dans ces conditions, les feuilles de papier, servant à isoler entre elles les feuilles de tôle constituant le noyau, se trouvent également déplacées par rapport aux feuilles correspondantes de l'autre face du joint à effectuer et il se produirait à travers le joint des communications entre feuilles de tôle voisines, ce qui aurait pour conséquence la production de courants parasites, si l'on ne prenait la précaution d'interposer une feuille de papier dans le joint.



FIG. 148.

L'interposition dans le joint d'une feuille isolante est doublement nécessaire lorsque les feuilles de tôle constituant le noyau se coupent à angle droit dans les joints, comme c'est le cas dans certains trans-

formateurs triphasés tels que celui que représente la figure 148, qui est un transformateur du type Siemens et Halske.

Il est vrai que l'interposition dans le joint d'une feuille isolante, ayant généralement 0,03 millimètre d'épaisseur, augmente la réluctance du circuit, mais les avantages que présente cette disposition au point de vue des facilités de construction compensent largement ce petit inconvénient.

Le papier servant à isoler les tôles l'une de l'autre, au lieu d'être interposé entre elles au moment où l'on constitue le paquet, est collé d'avance sur une des faces des tôles avant que ces dernières soient découpées à la machine. Mais, comme dans ce genre de construction on cherche toujours à simplifier et aussi à réaliser des économies, on a essayé de supprimer le papier interposé entre chaque feuille de tôle en plongeant les tôles dans une dissolution alcoolique concentrée de gomme-laque (d'un emploi journalier dans les usines de constructions électriques); après les avoir séchées, on en forme des paquets. Toutefois, ce mode de procéder présente un inconvénient qui ne se manifeste qu'après un certain temps de fonctionnement du transformateur : on sait que, lorsqu'il est en charge, un transformateur développe une assez grande quantité de chaleur, suffisante pour amener la fusion de la gomme-laque qui, sous l'action de la pression exercée par les boulons, s'échappe par les bords libres; dans ces conditions, au bout d'un certain temps, la compacité du circuit magnétique n'existe plus. Cette compacité est pourtant indispensable si l'on ne veut pas perdre un espace utile pour la section du fer et si l'on veut éviter les vibrations et la résonance du circuit magnétique.

Les boulons qui servent à maintenir pressées les lames de tôle les unes contre les autres doivent être complètement isolés de ces dernières dans toute leur longueur; ils doivent, en outre, être serrés à refus; certains constructeurs rivent les têtes de ces boulons.

Les constructeurs doivent avoir la précaution de donner au périmètre des bobines, pour une section de flux déterminée, le moins de développement possible; la forme circulaire est

celle qui répond le mieux à ce but ; mais il n'est pas toujours possible de l'employer. En général, toutes les fois que les tôles sont découpées en forme de L, d'U ou d'E, le circuit magnétique est naturellement parallépipédique. Au lieu de donner dans ce cas une forme rectangulaire aux bobines, forme qui serait la plus rationnelle parce que l'on emploierait moins de cuivre, on donne aux bobines une forme circulaire (*fig. 149*), d'abord à cause des facilités qu'il y a pour effectuer l'enroulement, mais principalement pour laisser, entre le noyau et les bobines, un espace vide où l'air puisse facilement circuler, de manière à constituer des canaux de ventilation lorsque les noyaux sont disposés verticalement.

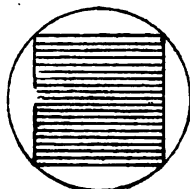


FIG. 149.

En consentant à établir un plus grand nombre de joints, on peut concilier les deux exigences : section minimum des bobines et facilité de ventilation, mais seulement pour des transformateurs de grandes dimensions, car, pour les petits

transformateurs, il est indispensable de n'avoir que le moins de joints possible, si l'on veut que leur fonctionnement à vide soit économique, c'est-à-dire si l'on veut réduire au minimum l'intensité du courant magnétisant.

Pour établir de grands transformateurs, conciliant les deux exigences, on procède de la manière suivante : avec des séries successives de paquets de tôles p (*fig. 150*),

de dimensions différentes, on constitue une sorte de colonne dont la section a la forme indiquée sur la figure 150 et sur ce noyau on enfle des bobines circulaires l . Avec cette disposition, on conserve en c, c, \dots des canaux de ventilation permettant la circulation de l'huile lorsque le transformateur est refroidi

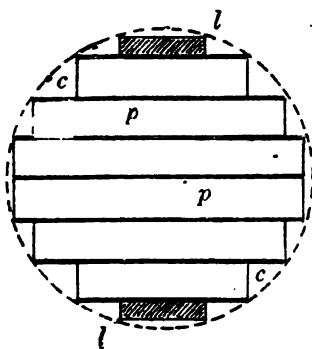


FIG. 150.

artificiellement. Les diverses colonnes sont reliées magnétiquement entre elles par un paquet de tôles à section rectangulaire.

Dans les transformateurs de grande puissance, on ménage des canaux de ventilation entre les divers paquets de tôles (*fig. 151*), comme on le fait, du

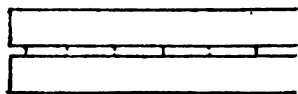


FIG. 151.

reste, pour les noyaux d'induit des grands alternateurs. On utilise à cet effet, pour séparer les paquets de tôles, des bandes de bronze, mais il est plus économique

de placer au-dessus de chaque paquet une feuille de tôle de 1,5 mm d'épaisseur, dans laquelle on découpe plusieurs fenêtres, mais en ayant soin de laisser attaché un des côtés du carré, de manière qu'en repliant à angle droit la partie découpée, comme le montre la figure 152, on puisse ménager un intervalle entre ce paquet et le suivant.

Les surfaces en présence dans les joints doivent être soigneusement dressées et les diverses parties du circuit magnétique doivent, une fois le transformateur monté, être solidement serrées entre elles à l'aide d'étriers fixés à la carcasse, afin d'empêcher les vibrations et le ronflement de l'appareil lors de son fonctionnement.

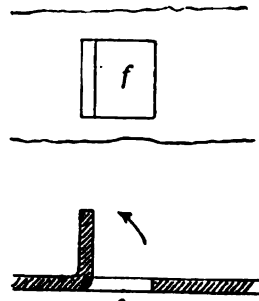


FIG. 152.

En ce qui concerne la partie électrique du transformateur le but à atteindre est de disposer la bobine secondaire de manière qu'elle soit complètement embrassée par le flux que produit le courant magnétisant. Mais il n'est pas possible d'éviter une dispersion du flux, spécialement si les deux circuits primaire et secondaire sont placés dans deux parties distinctes du circuit magnétique, et cela parce que le flux antagoniste, développé par la bobine secondaire, oblige une faible partie du flux principal à se fermer à travers l'air (*fig. 153*).

On pourrait éviter cet inconvénient en enroulant simultanément les deux circuits sur une bobine unique, mais cela n'est pas réalisable à cause de l'isolement insuffisant obtenu dans ces conditions. On peut toutefois obtenir un meilleur résultat en plaçant les deux bobines concentriquement (*fig. 154*), mais il faut alors apporter un soin tout particulier pour réaliser un excellent isolement entre les deux bobines. Cette disposition

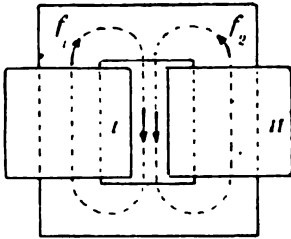


FIG. 153.



FIG. 154.

est utilisée quelquefois dans les petits transformateurs, quoiqu'elle entraîne à employer plus de fil qu'il ne serait nécessaire pour l'enroulement de la bobine extérieure.

Quant à la disposition que représentent les figures 143 et 153, elle n'est pas à recommander ; du reste, elle n'est jamais employée.

Aujourd'hui, les transformateurs de 10 kilowatts et au-dessus et même parfois les transformateurs de faible puissance, lorsqu'ils sont alimentés par des courants à haute tension, sont constitués par des séries de petites bobines alternativement primaires et secondaires (*fig. 155*). Dans ces conditions, la dispersion du flux est réduite au minimum, parce que le flux suit plus facilement le circuit magnétique ; en outre, la construction du transformateur est simplifiée, l'isolement est plus facile à assurer et les réparations sont rendues plus commodes.

Chacune de ces bobines élémentaires est soigneusement

isolée de ses voisines et est fixée sur le noyau à l'aide de coins en bois afin d'éviter tout déplacement. Les bobines sont



Fig. 155.

enroulées sur le tour et enveloppées de ruban soigneusement recouvert de gomme-laque. On leur donne ainsi la rigidité mécanique nécessaire pour qu'on puisse les mettre en place, sans avoir recours à des supports spéciaux qui ne pourraient être qu'en matière isolante, car, s'ils étaient métalliques, ils donneraient lieu à la production de courants de Foucault très intenses.

Les bobines sont généralement doubles, c'est-à-dire constituées par deux bobines reliées électriquement

par les extrémités de l'enroulement qui se trouvent vers l'intérieur (fig. 156). Cette disposition présente cet avantage que le commencement et la fin de l'enroulement se trouvent placés extérieurement, ce qui facilite beaucoup l'établissement des connexions des diverses bobines du transformateur. Mais l'avantage plus important que présente cette disposition consiste surtout dans la répartition de la tension entre deux fils ou parties de fil consécutifs. Soit, par exemple, une bobine comportant cinq couches de spires et 20 spires par couche; si la différence de potentiel entre les deux extrémités de l'enroulement est de 500 volts, la différence de potentiel maximum entre deux fils voisins, le premier et le quarantième dans l'ordre d'enroule-

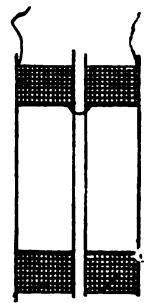


Fig. 156.

ment, est de

$$\frac{500}{(5 \cdot 20)} \cdot 40 = 200 \text{ volts.}$$

Avec la disposition de bobines doubles, reliées comme il a été indiqué, la différence de potentiel maximum entre deux spires appartenant à deux couches consécutives est réduite de moitié. Pour plus de précaution, on interpose entre les deux bobines élémentaires, au moment de leur juxtaposition, un disque en matière isolante et on les vernit à la gomme-laque en les maintenant solidement par un ruban.

Les connexions destinées à relier les bobines primaires sont établies sur un des côtés du transformateur et celles des bobines secondaires sur le côté opposé.

Généralement, les bobines du circuit à haute tension sont reliées en tension, tandis que celles qui fournissent le courant à basse tension sont couplées en quantité. Le couplage en quantité pour les bobines à basse tension présente des avantages au point de vue de la construction, car on comprend qu'il est plus commode de faire dix bobines ayant chacune 200 spires de fil de 4 mm² de section que d'enrouler sur une seule bobine 200 spires de fil de 40 mm² de section ou, encore, de faire dix bobines de 20 spires chacune, plutôt que d'en faire une seule de 200 spires avec du fil de même section.

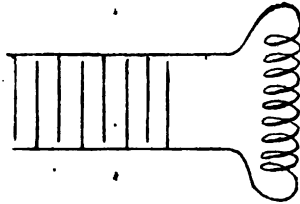


FIG. 157.

Lorsque les transformateurs doivent fournir un courant de grande intensité, c'est-à-dire de quelques milliers d'ampères, comme c'est le cas pour l'alimentation de fours électriques, les conducteurs du courant sont constitués par des lames disposées en chicane (*fig. 157*) et maintenues à la distance voulue par l'interposition d'isolateurs, afin de réduire au minimum le flux produit par le circuit, car ce flux, à cause des variations qu'il subit, donne naissance à une force contre-électromotrice considérable de self-induction par suite de l'énorme intensité du courant. Cette remarque s'applique du reste toujours à tous les

circuits dans lesquels passent des courants alternatifs d'intensité élevée.

Dans les installations industrielles à courants triphasés, on

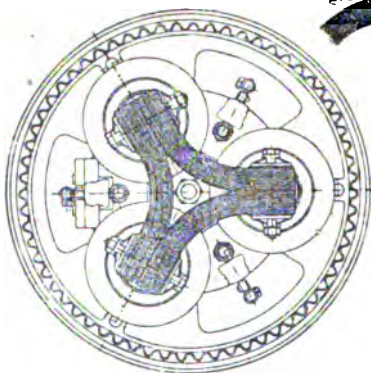
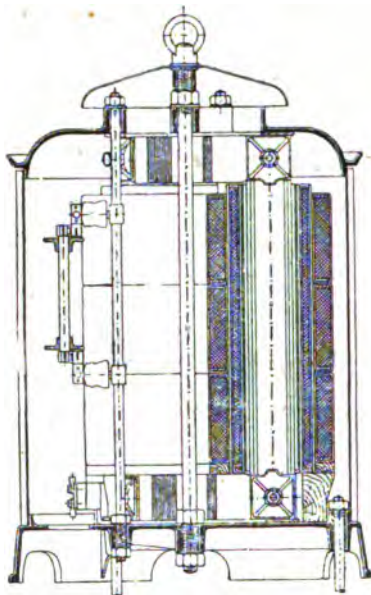


FIG. 158.

ces flux étant alternatifs deviennent sensiblement égaux.

Les transformateurs triphasés peuvent être à noyau ou cuirassés; mais ceux à noyaux sont préférables.

peut utiliser trois transformateurs simples en couplant leurs enroulements soit en triangle, soit en étoile, suivant la disposition qui convient le mieux. Toutefois, lorsque cela est possible, il est préférable d'employer des transformateurs triphasés, qui ne diffèrent des transformateurs simples que par ce fait que les divers enroulements primaires et secondaires sont montés sur un noyau magnétique unique de forme appropriée. On réalise une économie notable dans le prix d'achat, parce qu'un transformateur triphasé de 300 kilowatts, par exemple, est d'un prix moins élevé que trois transformateurs simples de 100 kilowatts chacun; de plus, on obtient ainsi un certain équilibre des tensions lorsque les charges sont différentes sur les trois circuits, parce que le flux dans le noyau est la résultante des flux développés dans les deux autres;

Sur les trois colonnes constituant les noyaux, on enfile les bobines primaires et secondaires ; chaque colonne correspond à une phase et on les relie magnétiquement ensemble, en haut et en bas, au moyen de traverses feuilletées solidement boulonnées (*fig. 148*).

On obtient une meilleure répartition du flux en disposant les trois colonnes suivant les sommets d'un triangle équilatéral et en les reliant ensuite à l'aide d'une traverse à trois branches (*fig. 158*) ; cette disposition est également préférable à la précédente en ce qui concerne le refroidissement.

On peut également relier magnétiquement les trois colonnes en entourant leurs trois extrémités, en haut et en bas, d'une sorte d'enroulement fait en rubans de fer de largeur convenable et comportant un nombre de tours suffisant ; les spires ainsi constituées sont isolées entre elles par interposition de papier.

Toutefois, il est à remarquer que les deux dernières dispositions qui viennent d'être décrites nécessitent une plus grande quantité de fer, ce qui fait que les pertes par hystérésis sont plus considérables.

Pour les petits transformateurs triphasés, la dernière disposition appliquée par la maison Ganz de Budapest consiste à modifier le type de transformateur simple cuirassé en transformateur triphasé à noyau (*fig. 159*).

Il existe beaucoup d'autres dispositifs de transformateurs triphasés ; mais on n'a décrit ici que les principaux types.



FIG. 159.

81. Transformateurs pour hautes tensions. — Les tensions de quelques milliers de volts sont bien suffisantes pour effectuer économiquement une distribution électrique d'énergie dans un rayon de quelques kilomètres, mais ces tensions

deviennent insuffisantes lorsqu'il s'agit de transporter à de grandes distances de considérables quantités d'énergie, parce que, dans ces conditions, il faut limiter nécessairement l'intensité du courant à transporter pour qu'il soit possible d'utiliser des conducteurs de section relativement faible et, par conséquent, économiques, ce qui entraîne l'obligation d'adopter des tensions considérables. On a de nombreux exemples de transmissions électriques d'énergie dans lesquelles la tension du courant alternatif atteint 40 000 volts, et il est à prévoir que l'on arrivera à utiliser des tensions encore plus élevées, quoique, jadis, dans les installations à 40 000 volts, on ait constaté des phénomènes secondaires qui peuvent avoir des effets fâcheux au point de vue de la bonne marche de l'installation.

Il n'est certainement pas impossible de construire des alternateurs pouvant directement fournir de l'énergie électrique sous des tensions aussi élevées ; mais le coût de la construction d'un tel alternateur serait excessif et présenterait de grandes difficultés et des dangers pendant son fonctionnement. Dans ces conditions, il est préférable que l'alternateur ou les alternateurs débitent le courant sous une tension modérée et d'utiliser au départ des transformateurs qui élèvent la tension à la valeur voulue, tandis qu'à l'arrivée d'autres transformateurs abaissent la tension pour desservir les centres d'utilisation du courant.

Les constructeurs ont constaté que les matières isolantes telles que le bois, le papier, les presspahn, etc., qui donnent d'excellents résultats au point de vue de leur emploi dans les transformateurs à tension assez limitée, ne peuvent plus être employées pour des tensions supérieures à 10 000 ou 15 000 volts. D'autre part, le remplacement de ces matières isolantes par d'autres plus efficaces, telles que le mica, la micaïte, l'ambroïne, etc., rend les frais de construction plus élevés, ce qui diminue dans une assez large mesure les avantages inhérents à l'emploi de très hautes tensions.

On a évité cet inconvénient en profitant de ce que tous les organes du transformateur sont fixes pour l'immerger complè-

tement dans l'huile en employant d'autres matières isolantes cuites dans l'huile.

Le pouvoir isolant de l'huile est de beaucoup supérieur à celui de l'air. Pour donner une idée de la valeur du pouvoir isolant de l'huile, il suffit de citer ce fait que la distance explosive entre deux pointes placées dans l'air est de 100 mm pour une différence de potentiel de 50 000 volts, distance qui est



FIG. 160.

réduite à 50 mm lorsque les pointes sont immergées dans l'huile minérale lourde et à 25 mm seulement dans l'huile légère de colza. D'autre part, il convient de constater que les matières isolantes d'usage courant, immergées dans l'huile ou mieux chauffées à 125° dans un bain d'huile, acquièrent un pouvoir isolant beaucoup plus élevé. Ainsi, par exemple, si l'on appuie deux pôles sur les faces opposées d'une planchette de hêtre sec desséché de 10 mm d'épaisseur et que l'on fasse aboutir à ces pôles les deux conducteurs d'un alternateur ou d'un transformateur en charge, on constate qu'il y a production d'étincelles avec une tension de 20 000 volts efficaces; en soumettant la plan-

chette à un traitement permettant de lui enlever toute trace d'humidité et de sève (à l'aide d'un dispositif thermo-pneumatique), puis en la chauffant dans un bain d'huile, l'étincelle ne se produit que lorsque la différence de potentiel atteint 60 000 volts.

Dans ces conditions, il était naturel que les constructeurs utilisent l'immersion dans l'huile pour éviter l'emploi de matières isolantes d'un prix élevé et l'on a ainsi réalisé des transformateurs dans lesquels on a employé du bois, du papier, du presspahn, etc. comme isolants, transformateurs placés ensuite dans une enveloppe en fer ou en fonte remplie d'huile et qui, ainsi constitués, peuvent supporter sans inconvénient des tensions de 100 000 volts efficaces. La figure 160 représente un transformateur à bain d'huile pour très hautes tensions, construit par la maison Brown, Boveri et C^{ie}.

En outre, l'huile est un bien meilleur conducteur de la chaleur que l'air, ce qui facilite beaucoup le refroidissement du transformateur. Ce point sera, du reste, examiné plus loin, dans le paragraphe 84.

82. Chute de tension dans les transformateurs. — On a déjà longuement expliqué, dans le paragraphe 79, et clairement démontré que la tension dans le circuit secondaire ne pouvait rester constante lorsque la charge venait à augmenter. En admettant que la dispersion du flux soit négligeable, il y a à considérer l'affaiblissement du flux résultant, affaiblissement qui permet à l'intensité du courant de prendre une valeur plus grande dans le circuit primaire, mais qui induit dans le secondaire une force électromotrice plus faible. Du reste la dispersion existe toujours, ce qui produit une plus forte chute de tension. Cet effet est d'autant plus accentué que la charge du circuit secondaire est plus inductive (page 211). Il y a, en outre, une autre cause qui augmente la chute de tension, c'est la résistance ohmique du circuit secondaire du transformateur à sa température normale de fonctionnement.

Si pourtant on maintient constante la différence de poten-

tiel du réseau d'alimentation aux bornes du circuit primaire, pendant que la charge dans le circuit secondaire passe de zéro au maximum, la tension aux bornes de ce dernier est toujours plus faible de quelques pour cent, surtout si la charge effective est inférieure à la charge apparente, c'est-à-dire si la charge est inductive.

Dans les transformateurs bien établis, cette chute de tension est assez faible, environ de 1,5 à 3 0/0, et n'atteint 5 à 6 0/0 qu'avec une charge inductive. Dans la pratique, cette chute de tension peut être plus considérable si la tension du circuit d'alimentation diminue avec la charge ; mais, dans ce cas, la plus grande partie de cette baisse de tension n'est pas imputable au transformateur, mais bien à la canalisation principale ou au type d'alternateur employé.

On comprend facilement que, dans les transformateurs de faible puissance, cette chute de tension soit plus considérable, parce que la dispersion du flux est plus grande relativement que dans les transformateurs de grande puissance. Cela tient à ce qu'il serait trop coûteux, dans les petits transformateurs, de fractionner en plusieurs bobines chacun des circuits primaire et secondaire, disposition qui permet d'éviter les dispersions de flux ; généralement les transformateurs de faible puissance n'ont qu'une bobine pour chacun des deux circuits primaire et secondaire, ces deux bobines étant superposées.

On donnera, dans le paragraphe 86, les moyens à employer pour faire varier la différence de potentiel aux bornes d'un circuit lorsque la tension du circuit d'alimentation reste constante.

83. Choix des transformateurs. — Dans le choix d'un type de transformateur il y a lieu de se préoccuper du service qu'il doit effectuer : éclairage, force motrice ou les deux réunis.

Si le transformateur ne doit alimenter que des lampes, il est indispensable de maintenir constante, autant que possible, la différence de potentiel aux bornes du circuit. Le but à atteindre serait d'obtenir que la tension augmentât légèrement de valeur en même temps que la charge croîtrait, afin de com-

penser de cette manière la majeure partie des chutes de tension qui se produisent dans les conducteurs du réseau d'alimentation ; mais, pour arriver à ce résultat, il faudrait que la tension augmentât de quelques pour cent dans le circuit primaire et, par suite, dans l'alternateur. Dans un réseau de distribution, il n'est pas possible d'obtenir que la charge augmente proportionnellement et simultanément dans chacun des transformateurs alimentés, surtout si chacun d'eux est de faible puissance ; il arrive que quelques-uns sont au maximum de charge, tandis que les autres ont une charge nulle ou insignifiante et réciproquement. Dans ces conditions, on ne peut que maintenir constante la différence de potentiel du circuit primaire au point où aboutissent les conducteurs principaux venant de la station centrale et d'où partent les conducteurs dérivés alimentant les divers transformateurs, qui doivent être choisis d'un type approprié, capable de maintenir une tension pratiquement constante.

Lorsque les transformateurs ne doivent alimenter que des moteurs, si la tension vient à baisser quelquefois lorsqu'ils fonctionnent à pleine charge, au moment de la mise en route par exemple, cela ne présente aucun inconvénient.

Enfin, si les transformateurs doivent assurer en même temps un service d'éclairage et un service de force motrice, leur puissance doit être largement prévue et il faut alors employer un transformateur de puissance supérieure à celle qui est strictement nécessaire, afin que les variations de tension ne dépassent pas 2 à 3 0/0, quelles que soient les variations de charge, si l'on veut que les lampes produisent un éclairage pratiquement fixe.

Lorsqu'on examine la question de savoir si un transformateur déterminé convient au service qu'il a à assurer, il ne suffit pas seulement de tenir compte de sa chute de tension suivant que la charge est inductive ou non, il faut encore savoir comment il se comporte au point de vue du refroidissement.

Dans les transformateurs, il se produit des pertes dans le

fer, dues presque en totalité à l'hystérésis et, pour une faible partie, aux courants parasites, ainsi que des pertes dans le cuivre par effet Joule, pertes qui se traduisent par un développement de chaleur; quant aux pertes qui se produisent dans les conducteurs sous forme de courants parasites, on peut les considérer comme négligeables. Mais, tandis que les pertes dans le fer sont pratiquement constantes, quelle que soit la charge, puisque le flux est lui-même constant, il n'en est pas de même pour les pertes par effet Joule dans le cuivre, car elles augmentent proportionnellement au carré de la charge. A pleine charge, les pertes dans le fer et dans le cuivre d'un transformateur bien établi sont presque égales.

La température d'un transformateur en fonctionnement augmente très lentement et cette élévation de température est d'autant plus lente que le transformateur est de plus grandes dimensions; la température normale de régime n'est quelquefois atteinte qu'après un jour et plus de marche.

Ici se pose une question analogue à celle du choix d'un moteur à courant continu pour déterminer quel est le type qui convient le mieux pour un travail donné. Ainsi, par exemple, on veut obtenir un travail correspondant à une puissance de 20 chevaux, mais avec un fonctionnement intermittent. Dans ces conditions, un moteur pouvant donner 10 à 15 chevaux en marche continue sera largement suffisant.

Dans le transformateur qui est toujours soumis à la tension du réseau, les pertes dans le fer, comme on l'a déjà dit, restent constantes. Si ce transformateur alimente des lampes, il ne fonctionne à pleine charge qu'environ trois heures sur vingt-quatre et, en négligeant la chute de tension, il peut supporter une surcharge notable sans courir le risque d'être détérioré; il en est de même si le transformateur alimente un moteur à fonctionnement intermittent. Mais il en est tout autrement si le moteur doit fonctionner d'une manière continue ou si l'appareil desservi, tel un four électrique, fonctionne sans arrêt, c'est-à-dire vingt-quatre heures par jour; dans ces conditions, il n'est pas possible que le transformateur supporte une surcharge

et il faut le choisir de puissance suffisante pour qu'il puisse assurer le service sans inconvénients.

84. Refroidissement des transformateurs. — Indépendamment de la chute de tension, la charge que peut supporter un transformateur dépend aussi de son échauffement; il est facile de comprendre qu'en employant un dispositif de refroidissement on puisse augmenter la charge. Comme dans le transformateur tous les organes sont fixes, rien n'est plus facile que de le refroidir artificiellement. On pourrait avoir l'idée de diminuer l'échauffement en augmentant les dimensions du transformateur, afin de limiter la perte en watts par centimètre carré de la surface exposée à l'air; mais le simple bon sens montre qu'on obtiendrait ainsi un transformateur de dimensions exagérées, lourd et très coûteux. Dans ces conditions, on ne peut songer à utiliser pareille disposition pour des transformateurs de grande puissance; tout au plus, pourrait-on l'utiliser pour de petits transformateurs de faible puissance.

Les transformateurs de faible puissance présentent toujours une surface libre suffisante pour qu'ils se refroidissent naturellement. Il n'y a pas évidemment de limite précise qui indique qu'il est opportun d'abandonner le refroidissement naturel pour employer un dispositif de refroidissement artificiel, dispositif qui comporte toujours une dépense supplémentaire qui peut parfois être exactement compensée par l'achat d'un transformateur à refroidissement naturel de plus grandes dimensions. Mais, dans les transformateurs de grande puissance, 200 kilowatts et au-dessus, l'emploi de dispositifs de refroidissement artificiel est toujours à recommander, parce que la dépense supplémentaire qui en résulte, quoique importante, est peu de chose par rapport à l'économie de matière nécessitée par la construction du transformateur.

Trois systèmes peuvent être employés pour refroidir artificiellement un transformateur;

1° La ventilation;

2° L'immersion dans l'huile ;

3° L'immersion dans l'huile maintenue à basse température par une circulation d'eau froide.

En pratique, chacun de ces trois modes de refroidissement est largement employé ; mais, dans le cas de tensions très élevées, les deux derniers systèmes doivent être préférés pour les motifs qui ont été indiqués dans le paragraphe 81.

Pour refroidir un transformateur par ventilation, on le place dans une enveloppe métallique, à l'intérieur de laquelle on produit un courant d'air énergique. La figure 161 représente un transformateur de la *General Electric Company* refroidi par ce procédé. Le transformateur Ganz (*fig. 155*), cité précédemment, est également refroidi par une circulation d'air, les deux colonnes qui le constituent étant, à cet effet, recouvertes d'une enveloppe métallique.



FIG. 161.

Le courant d'air peut être obtenu, à volonté, soit par tirage naturel, soit par tirage forcé ou enfin par insufflation. L'air doit être débarrassé des poussières avant de pénétrer dans le transformateur, car ces poussières, se déposant sur les organes du transformateur, peuvent donner lieu, principalement lorsqu'il est alimenté par des courants à haute tension, à des décharges, sous forme d'étincelles, qui endommageraient rapidement ses organes.

Le refroidissement par immersion dans l'huile s'obtient en plaçant le transformateur dans un récipient cylindrique (*fig. 160*), ou parallépipédique à surface lisse ou mieux ondulée (*fig. 158*) que l'on remplit d'huile. Avant de placer le couvercle, il faut s'assurer qu'il reste un certain espace libre ou

ménager une ouverture, afin de permettre à l'huile de se dilater librement, car le coefficient de dilatation de certaines huiles est parfois assez élevé. En négligeant cette précaution, on s'exposerait à détériorer l'enveloppe par suite de la pression exercée à l'intérieur par l'effet de la dilatation.

Le coefficient de conductibilité calorifique de l'huile étant plus grand que celui de l'air, la chaleur développée dans le transformateur se transmet plus facilement à l'enveloppe extérieure, qui est en contact direct avec l'air. Par suite de la différence de température entre l'enveloppe du transformateur et l'air ambiant, la chaleur se dissipe en partie par radiation et en partie par convection. Le refroidissement est naturellement d'autant plus énergique que la surface extérieure de l'enveloppe du transformateur est plus grande; c'est pour cela que ces enveloppes sont généralement ondulées ou bien munies de nervures lorsqu'elles sont en fonte.

Lorsqu'il est nécessaire d'obtenir un refroidissement encore plus énergique, on établit une circulation d'huile à l'aide d'une pompe et d'un réservoir disposé de manière que l'huile qu'il reçoit chaude en ressorte froide.

On peut aussi opérer le refroidissement en disposant dans l'huile un serpentín dans lequel circule un courant d'eau froide. Ce système est très efficace, mais exige de grandes précautions. Il faut d'abord prendre les dispositions nécessaires pour éviter qu'il se produise une fuite d'eau à l'intérieur du transformateur, car cela pourrait avoir des conséquences désastreuses; si la circulation de l'eau est obtenue à l'aide d'une pompe, il est préférable d'aspirer l'eau que de la refouler dans le serpentín. En second lieu, le serpentín doit être disposé de manière à être complètement entouré par le courant d'huile qui se produit à l'intérieur de l'enveloppe; le mieux consiste à le placer dans le haut, mais de façon à ce qu'il soit toujours recouvert par l'huile, afin d'éviter toute condensation d'humidité sur sa surface. Dans la figure 162, qui représente un transformateur Brown-Boveri à refroidissement par circulation d'eau, on voit le transformateur et son enveloppe, la partie

supérieure de cette dernière étant élargie afin de recevoir le serpentín.

On a remarqué qu'autour de la paroi extérieure du tube de refroidissement il se forme une couche d'huile, d'environ 5 mm d'épaisseur, qui reste immobile et que le calorique doit traverser avant de se répandre dans la masse d'huile en mouvement. La résistance thermique de cette couche d'huile,



FIG. 162.

comparée à celle du tube du serpentín, est telle qu'il n'y a aucun avantage à établir ce tube en cuivre plutôt qu'en fer.

Le refroidissement par circulation d'eau a permis d'apporter des améliorations très importantes aux transformateurs; il a permis en effet de porter l'induction dans le fer à une limite très élevée (environ 13000 gauss par centimètre carré) et d'augmenter la densité du courant dans les conducteurs. Dans ces conditions, on a pu réaliser des transformateurs moins lourds, peu encombrants, ayant un excellent rendement et capables de supporter des tensions très élevées à cause des

propriétés isolantes de l'huile, qui, pénétrant dans tous les interstices, remédie en quelque sorte à tous les petits défauts d'isolement qui peuvent se produire avec le temps.

85. Rendement des transformateurs. — D'après ce qui a été déjà exposé précédemment relativement aux transformateurs, on a pu prévoir que cet appareil devait avoir un rendement très élevé. Du fait que pendant le fonctionnement à vide les seules pertes sont celles qui se produisent dans le fer, on peut en déduire que l'on obtiendra encore un bon rendement lorsque le transformateur fonctionnera à charge très réduite. Ainsi un transformateur triphasé Brown-Boveri de 250 kilowatts, avec refroidissement par l'huile et circulation d'eau et à la température du régime normal de fonctionnement, présente les rendements suivants pour diverses charges :

1/8 de la charge	87 0/0
1/3 —	94
1/2 —	97
3/4 —	97,6
Pleine charge.....	98
1,25 de la pleine charge	98,15

Dans les petits transformateurs n'ayant que quelques kilowatts de puissance, le rendement n'atteint pas un chiffre aussi élevé; mais, lorsqu'ils sont bien construits, on atteint facilement un rendement de 94 à 95 0/0.

Lorsque le transformateur doit rester toujours en circuit, quoique le circuit secondaire reste ouvert, cas qui se présente très fréquemment dans les installations d'éclairage, et si, de plus, l'énergie électrique revient à un prix assez élevé, la question du rendement présente alors une grande importance, car 1 0/0 seulement de gain sur le rendement moyen d'un transformateur constitue à la fin de l'année une somme importante. Cette question sera du reste examinée de plus près dans une autre partie de l'ouvrage. Il est à remarquer que l'on peut démontrer que le rendement maximum d'un transforma-

teur est obtenu avec la charge pour laquelle les pertes dans le fer et dans le cuivre sont sensiblement égales. Par suite, si un transformateur ne doit servir que pour alimenter des lampes, il convient de choisir un type dans lequel les pertes dans le fer sont un peu inférieures, à pleine charge, à celles qui se produisent dans le cuivre, afin de tenir compte de cette condition que le transformateur n'a qu'une faible charge pendant la plus grande partie du temps. Si, au contraire, le transformateur alimente les moteurs d'une distribution d'énergie et reste, par conséquent, en charge pendant la totalité de la journée, il est préférable de choisir un type dans lequel les pertes dans le fer soient plus grandes que les pertes dans le cuivre, parce qu'il est établi plus économiquement en ce qui concerne la construction et, par suite, est d'un prix moins élevé.

85. Applications des transformateurs. — L'application la plus fréquente des transformateurs est, ainsi que cela a été indiqué au commencement de ce chapitre, de transmettre l'énergie électrique d'un circuit à haute tension à un autre circuit à basse tension et réciproquement. Le transformateur a reçu bien d'autres applications dont quelques-unes ne seront que signalées, tandis que les autres seront exposées à mesure que l'occasion se présentera.

Lorsque le transformateur est utilisé pour *élever la tension*, il peut comporter des circuits fixes ou des circuits mobiles.

Un exemple emprunté à la pratique va permettre de fixer les idées à ce sujet.

Dans une installation à courant alternatif, avec une canalisation principale de longueur considérable, il peut se présenter le cas où, pour satisfaire à de nouvelles demandes d'énergie, il devienne nécessaire d'abaisser la tension dans le réseau de distribution, parce que les alternateurs ne peuvent plus augmenter leur force électromotrice et qu'ils fonctionnent avec pleine saturation du fer. D'autre part, la perte en ligne a atteint la limite maximum acceptable pour la tension de distribution admise. En augmentant la charge et en admettant que la ten-

sion reste constante au départ, la perte de charge en ligne augmente. Pour éviter dans le circuit secondaire la chute de tension qui est la conséquence de ce fait, il n'y a que deux moyens à employer :

- 1° Remplacer tous les appareils récepteurs par d'autres exigeant une différence de potentiel moindre à leurs bornes;
- 2° Renforcer la ligne.

Pourtant, il y a un autre procédé plus simple qui consiste à créer dans le circuit de ligne une force électromotrice supplémentaire qui s'ajoute à la force électromotrice principale. A

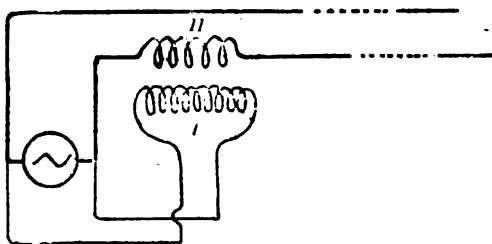


Fig. 163.

cet effet, dans la station génératrice même, on monte en série sur la canalisation principale le circuit secondaire d'un transformateur et l'on alimente directement le circuit primaire avec l'alternateur (fig. 163), ou encore par une dérivation établie sur les barres principales du tableau de distribution où sont amenés les conducteurs venant des bornes des alternateurs. Les connexions sont établies de manière que la force électromotrice induite dans le circuit secondaire s'ajoute à celle que produit l'alternateur. La puissance du transformateur à installer dans ces conditions est généralement assez faible; elle est donnée approximativement, exprimée en watts, par le produit obtenu en multipliant la valeur de la force électromotrice supplémentaire par la valeur de l'intensité maximum du courant sur la ligne.

Lorsqu'on veut faire varier graduellement la valeur de la force électromotrice supplémentaire, il faut utiliser un transformateur construit spécialement, dans lequel le circuit secon

daire est rendu mobile par rapport au circuit primaire, afin de pouvoir faire varier à volonté le flux utile auquel est soumis le circuit secondaire ou, ce qui est encore préférable et permet d'arriver au même résultat, de rendre mobile une partie du circuit magnétique de façon à faire varier le flux dans le circuit secondaire. La figure 164 représente un transformateur à rapport de transformation variable construit par la *General Electric Company*.

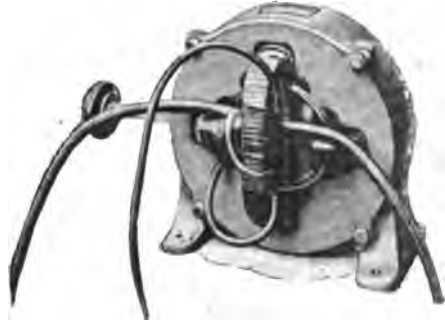


FIG. 164.

Pour élever graduellement la tension dans un circuit d'alimentation triphasé, on peut aussi utiliser un

moteur asynchrone dont l'induit est rendu fixe (Voir chap. xvi).

Dans la plupart des cas, le transformateur est construit de manière à présenter le moins de dispersion possible du flux, afin d'obtenir une tension constante aux bornes du circuit secondaire; mais, en construisant le transformateur de manière à augmenter notablement la dispersion, on peut obtenir un

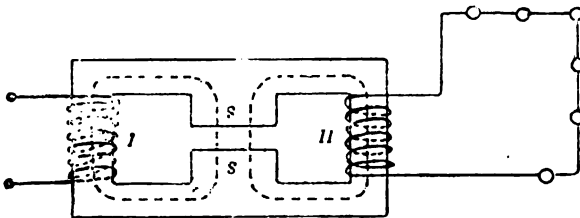


FIG. 165.

transformateur autorégulateur pour intensité constante. Ainsi, lorsque le noyau magnétique présente des saillies *ss*, comme on le voit sur la figure 165, tant que le courant a une intensité nulle dans le secondaire, la dispersion est nulle ou presque nulle, parce qu'il ne se produit pas de flux secondaire de réaction et que le flux dû au circuit primaire suit alors son parcours

naturel dans le fer. Si, au contraire, le circuit secondaire est fermé et, par conséquent, est parcouru par un courant, le flux auquel ce dernier donne naissance oblige une partie du flux primaire à passer à travers l'air par *ss*. Plus l'intensité du courant est grande dans le secondaire et plus nombreuses sont les lignes de force passant en *ss*, ce qui a pour conséquence d'affaiblir la valeur de la force électromotrice induite dans le circuit secondaire.

Si, d'abord, toutes les lampes en série alimentées par le transformateur sont en fonctionnement et si l'on vient à en retirer une en la mettant, par exemple, en court-circuit, la résistance de la canalisation diminuant, l'intensité doit augmenter ; elle prendrait, en effet, une valeur plus grande, si la force électromotrice induite ne diminuait pas proportionnellement par suite de la dispersion qui est plus forte à mesure que

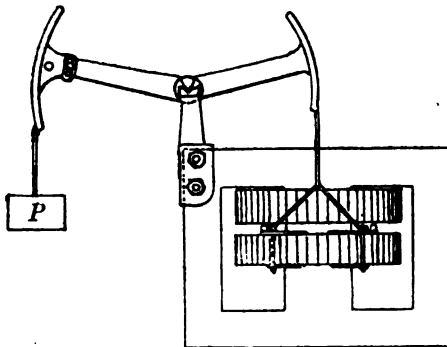


FIG. 166.

l'intensité augmente. Il s'établit, par suite, une sorte d'équilibre et l'intensité dans le circuit reste constante.

Ce dispositif de régulation de l'intensité n'est efficace que dans des limites assez restreintes. Afin de pouvoir obtenir une auto-régulation de l'inten-

sité dans des limites plus étendues, la *General Electric Company* a réalisé un transformateur dont la dispersion peut être rendue assez considérable en déplaçant automatiquement le circuit secondaire. A cet effet, la bobine secondaire est suspendue à une des extrémités d'un levier, dont l'extrémité opposée porte un poids réglable (*fig. 166*). Les bobines, primaire et secondaire, sont enfilées sur le noyau central du circuit magnétique cuirassé. La bobine primaire est fixe, tandis que la bobine secondaire peut glisser le long du noyau.

son poids étant équilibré, comme on l'a déjà dit, par un poids suspendu à l'autre extrémité du levier qui la supporte.

Lorsque le circuit secondaire est fermé, il se produit une répulsion entre les deux bobines primaire et secondaire et le poids P est réglé de manière à équilibrer exactement la bobine secondaire lorsque l'intensité du courant a une valeur déterminée. Si, dans ces conditions, on retire une lampe du circuit, la résistance de ce dernier diminue et le courant prenant alors une intensité plus grande augmente l'action de répulsion qui s'exerce entre les deux bobines et, par conséquent, la distance qui les sépare. Par suite, les fuites magnétiques sont plus grandes, la force électromotrice induite dans la bobine secondaire diminue et l'intensité du courant est automatiquement ramenée à sa valeur primitive.



FIG. 167.

La figure 167 représente le type de transformateur construit par la *General Electric Company* pour alimenter des lampes à incandescence dans un circuit à intensité constante.

Les bobines de réactance, dont il a été longuement question dans le chapitre VIII, peuvent être considérées comme un transformateur dont le rapport de transformation est égal à l'unité.

Soit, par exemple, le cas dans lequel une bobine de réactance est montée constamment en dérivation sur une lampe placée dans un circuit de distribution en série (*fig. 168 α*). Ce cas est identique à celui de la disposition montrée en β (*fig. 168*) où la lampe est alimentée par le circuit secondaire CD d'un

transformateur dont le rapport de transformation est égal à 1, tous les circuits primaires AB étant montés en série. Lorsque la lampe ne fonctionne pas, il est facile de voir que les deux dispositions sont identiques; lorsque, au contraire, la lampe fonctionne, la disposition β montre que le courant utile passe

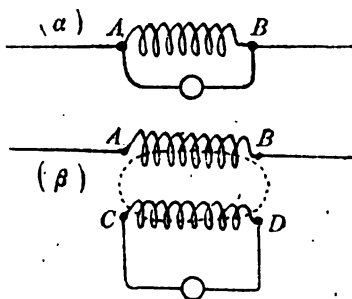


Fig. 168.

dans AB et que l'intensité de ce courant a une valeur égale, mais qu'il est de sens contraire à celui qui passe dans DC et qui alimente la lampe. Ce courant actif pourrait être envoyé directement dans la lampe sans qu'il soit nécessaire de le faire passer dans les bobines. En effet, la tension entre A et B étant égale à la tension existant

entre C et D, on pourrait réunir entre eux les points AC et BD des deux enroulements. D'autre part, le nombre de spires dans chacun d'eux étant le même, on peut se demander, puisque les deux circuits sont montés en parallèle, pourquoi on n'emploie pas un seul enroulement et, dans ce cas, il y a à examiner quel est le courant qui le parcourrait. Evidemment, le courant doit être la somme de ceux qui passaient d'abord dans les spires : le courant actif en AB étant d'intensité égale et de sens contraire à celui qui circule en CD, ces deux courants s'annulent dans l'enroulement unique; il va donc directement de A à la lampe et de la lampe à la ligne par B. Dans ces conditions, la bobine n'est plus parcourue que par le courant magnétisant.

Cette disposition est donc identique à celle qui est donnée en α (fig. 168), comme on l'a déjà expliqué dans le paragraphe 49.

La bobine de réactance peut également être utilisée comme *auto-transformateur* pour *diviser la tension*; c'est pourquoi elle est largement employée pour rendre indépendantes les lampes à arc montées en série sur un circuit à intensité constante.

Soit une bobine de réactance aux bornes de laquelle agit une différence de potentiel alternative de 70 volts. Si au milieu de l'enroulement, au point C, on établit une dérivation, on peut disposer entre les points A et C et entre les points C et B d'une tension de 35 volts (*fig. 169*). En intercalant entre les points B et C une lampe à arc de 10 ampères, on voit que la bobine n'est parcourue que par un courant acclif de 5 ampères seulement, en dehors naturellement du courant

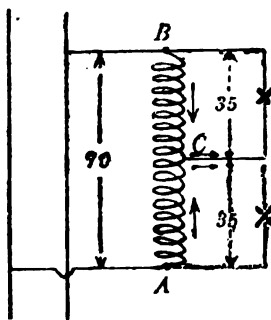


FIG. 169.

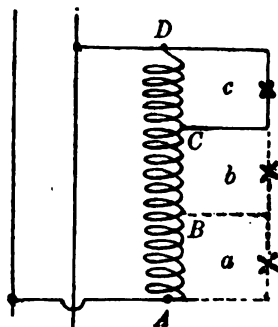


FIG. 170.

magnétisant préexistant. C'est pourquoi le courant venant du circuit d'alimentation, arrivant en C, passe de préférence par la lampe plutôt que par la partie CB de la bobine, à cause de la self-induction que présente cette dernière, et retourne à la canalisation par le point B. Si ce courant a une intensité de 5 ampères, il donne naissance, dans la partie BC de la bobine, à un courant induit de même valeur, mais de sens opposé, et les deux courants, s'ajoutant en C, alimentent la lampe, qui, par conséquent, reçoit le courant de la canalisation et le courant induit développé en BC.

Dans ces conditions, la bobine de réactance remplit le rôle d'un transformateur dont le rapport de transformation serait égal à 2. En négligeant les pertes, la puissance fournie par la canalisation est égale à celle que consomme la lampe.

$$70 \cdot 5 = 35 \cdot 10 = 350 \text{ watts.}$$

Si la bobine de réactance est divisée en trois sections (*fig. 170*).

avec une différence de potentiel aux bornes de 105 volts, on a aux bornes de chaque dérivation une tension de 35 volts.

$$35 \cdot 3 = 105 \text{ volts.}$$

Dans ces conditions, à travers chacune des sections *a* et *b* s'établit un courant de

$$\frac{10}{3} = 3,33 \text{ ampères,}$$

et ces deux sections de la bobine agissant simultanément sur la section *c* donnent chacune naissance à un courant induit de 3,33 ampères, soit au total 6,66 ampères, ce qui fait qu'une lampe insérée en *a* est alimentée par un courant de 10 ampères.

En insérant entre B et C une deuxième lampe, la section AB est parcourue par un courant de 6,66 ampères sous une tension de 35 volts, courant qui donne naissance dans la section BD, aux bornes de laquelle existe une différence de potentiel double (70 volts), à un courant induit dont l'intensité n'est que de 3,33 ampères. Par suite, le groupe de deux lampes est alimenté par un courant d'intensité égale à

$$6,66 + 3,33 = 10 \text{ ampères.}$$

Dans le cas où les trois lampes fonctionnent simultanément, la bobine n'est parcourue que par le courant magnétisant.

En pratique, pour rendre minimum la dispersion du flux, les deux, trois ou un plus grand nombre de bobines constituant les subdivisions de l'enroulement sont superposées les unes aux autres sur la partie centrale d'un noyau unique (*fig. 171*), l'enroulement étant toujours effectué dans le même sens, et l'appareil fonctionne comme un dispositif électromagnétique de compensation entre deux circuits.

Ce système est parfois utilisé pour égaliser la tension dans des circuits de lampes à incandescence inégalement chargés et alimentés sous une tension double, triple, etc. de celle que requiert une lampe, suivant le nombre de circuits alimentés. C'est la disposition employée quelquefois à Milan, où la tension

dans le réseau de distribution est de 150 volts, tandis que les lampes à incandescence sont de 75 volts. Mais, si l'emploi d'auto-transformateurs, qui consomment du courant magnétisant et diminuent le facteur de puissance de l'installation, est justifié dans le cas où il y a des lampes à arc à alimenter, il n'en est plus de même lorsqu'il s'agit de lampes à incandescence, puisqu'on en trouve maintenant d'excellentes pour des tensions de 150 volts et plus.

Lorsqu'il faut alimenter une seule lampe à arc, fonctionnant

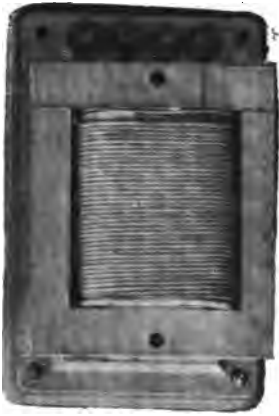


Fig. 171.

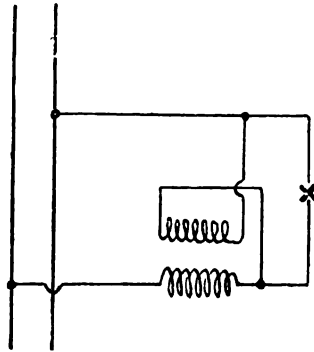


Fig. 172.

sous une tension de 30 à 35 volts, avec un circuit à tension plus élevée, on peut employer une disposition mixte (*fig. 172*). L'appareil est un véritable transformateur, mais se rapproche pourtant de la bobine de réactance. La lampe est montée en série avec le circuit primaire qui remplit alors le rôle d'une bobine de réactance pour abaisser la différence de potentiel aux bornes de la lampe à 35 volts; d'autre part, la lampe est alimentée par le circuit secondaire, monté en dérivation sur ses bornes.

Il est presque impossible d'énumérer les nombreuses et diverses applications des transformateurs; mais on ne peut passer sous silence celle qui a été indiquée dans le paragraphe 36

et qui consiste à l'utiliser comme réducteur de tension pour les voltmètres, le primaire du transformateur étant dans ce cas monté en dérivation sur les conducteurs de la canalisation.

Pour la mesure des courants intenses et aussi afin de ne pas intercaler directement les instruments sur les conducteurs principaux, le transformateur est utilisé comme *réducteur d'intensité* pour les ampèremètres. Le circuit primaire est alors monté en série sur l'un des conducteurs de la ligne. Pour cette application, le transformateur doit avoir beaucoup de fer, parce que ce dernier doit être toujours loin d'atteindre sa saturation, si l'on veut que le flux et, par suite, la force électromotrice induite dans le circuit secondaire augmente proportionnellement à l'intensité du courant dans le primaire, c'est-à-dire à l'intensité du courant de la ligne.

CHAPITRE XIII

MOTEURS SYNCHRONES

87. Principe des moteurs synchrones. — La notion de *synchronisme* est inhérente aux phénomènes périodiques, c'est-à-dire aux phénomènes qui se reproduisent à des intervalles de temps réguliers. Lorsque ces intervalles de temps sont identiquement les mêmes pour deux phénomènes distincts, on dit qu'ils sont en synchronisme : ainsi, deux pendules d'égale longueur oscillent synchroniquement.

Dans le cas particulier des moteurs à courant alternatif, ces moteurs sont synchrones lorsque leur vitesse angulaire dépend absolument de la fréquence du courant qui les alimente, en ce sens que la vitesse angulaire du moteur reste invariable, quelle que soit sa charge, tant que la fréquence du courant qui l'alimente reste constante.

Il y a lieu d'étudier successivement le moteur synchrone à courant alternatif simple et le moteur synchrone à courants polyphasés.

88. Moteur synchrone à courant alternatif simple. — On peut se faire une idée exacte du fonctionnement d'un moteur synchrone à courant alternatif en rappelant les phénomènes qui se produisent dans une transmission d'énergie à courant continu.

Dans la dynamo génératrice on a un champ magnétique pratiquement constant qui donne naissance à une force électro-

motrice dans les spires de l'induit lorsque ce dernier est mis en mouvement. Le collecteur de la dynamo a pour objet de transmettre dans le circuit extérieur, toujours dans le même sens, le courant dû à la force électromotrice, en invertissant les communications de l'enroulement induit avec le circuit extérieur à l'instant précis où le courant change de sens. Le collecteur du moteur à courant continu, ce dernier constituant le récepteur placé à l'autre extrémité de la ligne, remplit une fonction opposée à celle du collecteur de la dynamo génératrice; en effet, par suite de l'inversion des communications entre les extrémités du circuit induit et celles du circuit extérieur, le courant change de sens au moment voulu, c'est-à-dire au moment où l'action électromagnétique répulsive due au pôle Nord, par exemple, vient à cesser, en même temps que l'action attractive du pôle Sud commence à se produire; c'est pourquoi l'induit est toujours entraîné à se mouvoir dans une direction déterminée.

Le rôle rempli par les deux collecteurs est donc le même, mais les actions produites sont opposées. Étant donné ce fait, il est naturel de rechercher s'il ne serait pas possible d'effectuer une transmission d'énergie sans utiliser les deux collecteurs, en transmettant directement sur la ligne le courant produit par la force électromotrice alternative qui est développée dans l'induit de la dynamo génératrice et en admettant, pour simplifier l'explication, que cet enroulement induit est limité à une seule spire; à l'arrivée, le courant alternatif de la ligne serait transmis directement aussi à l'induit du moteur, supposé constitué également par une seule spire.

Au point de vue théorique, rien ne s'oppose à ce que le moteur, placé dans ces conditions, soit actionné; au point de vue pratique, le même résultat peut encore être obtenu; mais, au point de vue théorique et, à plus forte raison, au point de vue pratique, il y a une condition indispensable à remplir pour obtenir le résultat voulu, c'est que la vitesse angulaire de la spire du moteur doit être telle qu'elle permette à la force électromagnétique développée d'agir toujours dans le sens

favorable au mouvement de rotation, c'est-à-dire que la spire doit se trouver soumise à l'action d'un des pôles inducteurs pendant la première demi-période et à l'action de l'autre pendant la seconde demi-période.

La vitesse angulaire de la spire est donc absolument liée à la fréquence du courant qui l'alimente et ce genre de moteur a reçu pour cela le qualificatif de *synchrone*. Il ne faut pas oublier qu'un moteur synchrone a une vitesse angulaire déterminée, en relation nécessaire et invariable avec la fréquence du courant alternatif qui l'alimente, vitesse qui est absolument indépendante de la charge et de l'intensité du champ magnétique inducteur.

Dans un moteur synchrone, la spire de l'induit doit effectuer un tour dans le temps correspondant à une période; mais si l'inducteur, au lieu d'être bipolaire, comporte quatre pôles, la spire ne doit alors effectuer qu'un demi-tour par période; par conséquent, la vitesse angulaire du moteur est d'autant plus petite que le nombre de champs polaires inducteurs est plus grand. Si p est le nombre de champs polaires et n le nombre de tours par seconde, le moteur doit satisfaire à l'égalité suivante :

$$f = p \cdot n,$$

dans laquelle f est la fréquence du courant; c'est du reste la même relation qui a été trouvée pour les génératrices (§ 64).

Dans le moteur à courant continu, la vitesse angulaire est indépendante de toute relation analogue, parce que l'action électromagnétique produite est toujours de sens favorable au mouvement; cette action électromagnétique n'est pas fonction de la vitesse angulaire de l'induit et elle s'exerce ainsi grâce à la présence du collecteur et de ses balais.

Un moteur à courant continu peut être alimenté indifféremment par des piles, des accumulateurs ou des dynamos bipolaires ou multipolaires; le moteur synchrone à courant alternatif, au contraire, ne peut fonctionner qu'à une vitesse angulaire

déterminée, dépendant de la fréquence du courant alternatif qui l'alimente et, par conséquent, du type d'alternateur produisant ce courant.

Dans une transmission d'énergie à courant continu, le même type de machine peut être utilisé à volonté soit comme génératrice, soit comme moteur. Il en est de même pour une transmission synchrone à courant alternatif; mais, dans ce cas, la vitesse angulaire de la génératrice et celle de la réceptrice ne sont égales qu'à la condition que le nombre de champs polaires soit égal dans les deux machines. Pour une fréquence déterminée, les vitesses angulaires sont inversement proportionnelles au nombre respectif de champs polaires.

La possibilité d'avoir un moteur à vitesse angulaire invariable peut, dans certains cas, constituer un avantage; mais, dans la plupart des cas qui se rencontrent dans la pratique, cet avantage disparaît, principalement lorsque la charge que doit supporter le moteur est sujette à de brusques variations. On comprend, en effet, que, chaque fois que ces variations de charge viennent à se produire, la vitesse angulaire du moteur, par suite de l'inertie, doit subir des variations qui compromettent son bon fonctionnement, puisque cette vitesse est absolument dépendante de la fréquence du courant. On reviendra, du reste, sur ce sujet un peu plus loin.

Pour le moment, il y a lieu de remarquer que le moteur synchrone à courant alternatif simple présente dans son emploi une difficulté importante, c'est le démarrage. Dans le moteur à courant continu, quelle que soit la vitesse angulaire de la partie mobile, la concordance des actions électromagnétiques qui se produisent entre les pôles et le courant circulant dans l'induit existe continuellement et se maintient toujours; il n'en est pas ainsi dans le moteur synchrone, parce que cette concordance des actions magnétiques commence à peine à se produire seulement à l'instant où la vitesse angulaire de l'organe mobile est celle qui correspond au synchronisme.

C'est pour ce motif que, si le courant dans la spire s'inverse

avant que cette spire ait dépassé la ligne neutre (*fig. 173*), le couple moteur¹ change de signe et le mouvement de l'induit est ralenti, ce ralentissement augmentant à chaque tour jusqu'à l'arrêt complet.

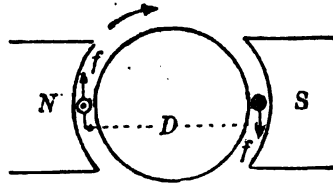


FIG. 173.

C'est pour cela que le moteur synchrone à courant alternatif ne démarre pas, même à vide, sans le secours d'une impulsion étrangère et qu'il est indispensable, en outre, qu'il soit amené à la vitesse de synchronisme. Ce n'est que lorsque ces conditions sont réalisées que l'on peut le mettre en circuit et lui appliquer la charge. C'est aussi pour les mêmes raisons que ce genre de moteurs ne peut supporter de brusques surcharges.

89. Moteur synchrone à courants polyphasés. — Le fonctionnement d'un moteur synchrone à courants polyphasés, constitué comme un alternateur polyphasé ordinaire, est encore plus facile à comprendre si l'on tient compte de ce fait que, lorsque le circuit de l'induit est parcouru par le courant, il donne naissance à un ou à plusieurs champs tournants.

Pour simplifier l'explication, on peut admettre qu'il ne se produit qu'un seul champ tournant et que l'organe mobile du moteur est l'inducteur.

Le champ magnétique tournant présente deux pôles diamétralement opposés sur la périphérie interne et chacun d'eux effectue un tour complet dans le temps correspondant à la période du courant.

Les deux pôles S et N de l'inducteur, disposés aux extrémités

1. Si f (*fig. 173*) est la force électromagnétique qui agit sur les deux conducteurs de la spire pour lui imprimer un mouvement dans une certaine direction, deux actions agissent sur l'induit pour lui imprimer son mouvement de rotation; chacun de ces efforts est égal à $f \cdot \frac{D}{2}$ et la somme $2 \cdot f \cdot \frac{D}{2} = f \cdot D$ est appelée couple moteur.

d'un même diamètre (*fig. 174*), sont constamment attirés par les pôles du champ tournant et prennent également un mouvement de rotation. Il est facile de comprendre que ce moteur ne peut fonctionner d'une manière régulière qu'à la condition que l'inducteur tourne à la même vitesse angulaire que le



FIG. 174.

champ magnétique, c'est-à-dire lorsque le synchronisme est établi. Dans le cas où le synchronisme n'existerait pas, l'inducteur serait soumis, à chaque tour, à des répulsions, sa vitesse en conséquence se ralentirait et, au bout de peu de temps, cette vitesse serait nulle.

La difficulté du démarrage existe également pour le moteur synchrone polyphasé, mais à un moindre degré que pour le moteur synchrone à courant alternatif simple, comme on le verra plus loin.

90. Excitation des moteurs synchrones. — Les moteurs synchrones à courants alternatifs simples ou polyphasés exigent pour leur fonctionnement, indépendamment du courant alternatif qui les alimente, un courant continu destiné à exciter l'inducteur et à produire un champ magnétique constant, ce qui présente une nouvelle difficulté ou, tout au moins, une complication.

L'excitation d'un moteur synchrone peut être obtenue de trois manières différentes :

1° Par l'emploi d'une excitatrice spéciale comme pour les alternateurs ; c'est la solution à adopter lorsque le moteur a une certaine puissance. L'emploi d'une excitatrice spéciale présente cet avantage qu'elle peut être aussi utilisée comme moteur pour le démarrage, en l'actionnant par une batterie d'accumulateurs ; on évite ainsi toute difficulté lors du démarrage du moteur synchrone auquel elle est reliée. Il suffit pour cela

d'une batterie de faible puissance qui peut être chargée pendant la marche à l'aide d'une dérivation du courant fourni par l'excitatrice;

2° Les petits moteurs peuvent être excités par un courant redressé que l'on obtient directement du circuit d'alimentation par l'intermédiaire d'un collecteur, pourvu de ses balais, monté sur l'extrémité de l'arbre du moteur; on réalise ainsi une sorte de dispositif d'auto-excitation. Toutefois, malgré l'emploi d'un collecteur approprié qui atténue les ondulations du courant, on n'obtient jamais qu'un flux inducteur ondulé qui nuit fortement à la stabilité de marche du moteur. En outre, si la tension dans le circuit d'alimentation est assez élevée, il est indispensable d'abaisser la tension du courant redressé si l'on veut éviter la production de fortes étincelles au collecteur;

3° Avec les moteurs synchrones polyphasés à inducteur fixe et à induit mobile, on peut obtenir une véritable autoexcitation à courant continu comme avec un enroulement de dynamo à courant continu. On a indiqué, dans le paragraphe 54, comment on pouvait réaliser un alternateur triphasé avec une dynamo bipolaire à courant continu à circuit induit fermé, en établissant trois prises de courant également distantes. On a ainsi un enroulement d'induit couplé en triangle. Mais rien n'empêche que, sur l'extrémité de l'arbre opposée à celle sur laquelle sont montées les trois bagues destinées à recueillir les courants triphasés, on place un collecteur ordinaire qui recueille le courant continu nécessaire pour l'excitation. En donnant des proportions convenables à ce collecteur, on peut aussi l'utiliser pour faire démarrer le moteur.

Ce dernier mode d'excitation est, comme le précédent, fondé sur le redressement du courant alternatif, mais il lui est préférable; il est utilisé en France par la Société *l'Éclairage électrique* et aux États-Unis par la *Compagnie Fort-Wayne*. Ce système d'excitation présente, toutefois, quelques inconvénients, entre autres celui de ne pouvoir s'appliquer qu'à des moteurs à inducteur fixe, car, si l'inducteur était mobile et

l'induit fixe, il serait nécessaire de faire tourner les balais sur le collecteur fixe. En outre, il est indispensable que l'induit ait un enroulement fermé qui ne convient pas pour les hautes tensions. Mais l'inconvénient le plus sérieux consiste en ce fait que ce mode d'excitation ne peut assurer la stabilité de marche du moteur et cela pour des causes qu'il n'y a pas lieu d'examiner ici.

En résumé, pour les moteurs de faible puissance, l'autoexcitation peut convenir pour produire le champ inducteur, mais, dans les moteurs plus puissants, l'excitation séparée présente plus de sûreté au point de vue de la stabilité de marche et une plus grande facilité pour le réglage de l'intensité du champ inducteur.

91. Types industriels de moteurs synchrones. — Les moteurs synchrones à courant alternatif simple ou à courants polyphasés sont, comme on l'a déjà dit, de véritables alternateurs dont ils ne diffèrent que par quelques dispositifs de détail concernant l'excitation. Ils peuvent être établis avec un inducteur fixe et un induit mobile ou réciproquement; on peut également les disposer pour qu'ils présentent une très faible réaction d'induit et qu'ils développent un champ magnétique inducteur puissant afin de leur assurer un bon fonctionnement.

Quoiqu'il soit plus difficile d'établir un petit moteur avec un grand nombre de pôles que lorsqu'il s'agit d'un moteur de grande puissance, à cause de l'espace disponible, la construction des petits moteurs synchrones, pour des fréquences de 40 à 60 périodes, ne présente pas de difficultés spéciales si l'on peut admettre une grande vitesse angulaire, parce que cette vitesse est toujours inférieure à celle qui correspond au maximum des effets admissibles de la force centrifuge. Par contre, il est beaucoup plus difficile de construire un petit moteur synchrone à faible vitesse angulaire, à cause du peu d'espace disponible pour loger les noyaux polaires et leur enroulement.

92. Démarrage des moteurs synchrones. — Il n'y a pas lieu ici de donner des renseignements détaillés sur la pratique du démarrage des moteurs et on ne peut que donner au lecteur le conseil de recourir à un bon manuel pratique. On se bornera ici à exposer simplement les principes généraux concernant le démarrage des moteurs synchrones à courant alternatif simple et des moteurs synchrones à courants polyphasés.

Lorsqu'un moteur à courant alternatif simple est installé avec une excitatrice spéciale, on peut utiliser cette excitatrice pour mettre le moteur en marche en l'alimentant avec le courant fourni par une batterie d'accumulateurs. Cette batterie doit être prévue en conséquence, parce que, si l'organe mobile du moteur a un poids assez élevé, on court le risque de brûler l'induit de l'excitatrice; c'est pourquoi il est indispensable d'utiliser, dans ce cas spécial, un rhéostat de démarrage pour moteur à courant continu.

Dans certains autres cas, on se sert d'un autre moteur pour mettre en mouvement le moteur synchrone. Ce moteur peut être quelconque et sa puissance doit être environ égale au dixième de celle du moteur qu'il doit mettre en route; il doit, en outre, être construit de manière à pouvoir supporter une surcharge pendant quelques secondes. Généralement on emploie un moteur asynchrone à courant alternatif (Voir chap. xiv).

Le moteur auxiliaire, une fois en marche normale, ne doit pas actionner brusquement le moteur synchrone, à cause de l'inertie que présente ce dernier, si l'on veut éviter un grand ralentissement et peut-être aussi l'arrêt complet du moteur auxiliaire. Dans ces conditions, la charge à appliquer au moteur auxiliaire doit être graduellement augmentée et, à cet effet, il est indispensable que le moteur synchrone soit commandé par l'intermédiaire d'un accouplement à friction ou par tout autre dispositif cinématique permettant d'augmenter peu à peu la vitesse angulaire jusqu'à ce que l'on arrive à atteindre celle du synchronisme.

La figure 175 montre le dispositif adopté par la *General Electric Company*. Un petit moteur asynchrone, que l'on voit sur la gauche, actionne le moteur synchrone par un train d'engrenages, mais la roue à rochet est folle sur son arbre et



FIG. 175.

se trouve en prise ou non par l'intermédiaire d'un embrayage à friction.

Pour faire démarrer le moteur principal, on commence par mettre en marche le moteur asynchrone puis on augmente graduellement la vitesse angulaire du moteur synchrone et, lorsque ce dernier a atteint son régime normal, c'est-à-dire le synchronisme, on relie le moteur au circuit après avoir préalablement excité les inducteurs. Dès que le moteur synchrone fonctionne régulièrement, on débraye l'accouplement qui le reliait au moteur auxiliaire et on coupe le circuit de ce dernier.

Les deux procédés de démarrage qui viennent d'être indiqués pour les moteurs synchrones à courant alternatif simple sont également applicables aux moteurs polyphasés, mais, pour ces derniers, on peut utiliser un procédé plus simple, ces moteurs pouvant toujours ou presque toujours démarrer spontanément à vide, lorsqu'on les alimente avec des courants polyphasés en prenant la précaution de réduire la tension à

l'aide d'un rhéostat métallique ou liquide. Si l'on a recours à des bobines de réactance, elles doivent être construites de manière à pouvoir faire varier depuis zéro jusqu'au maximum le nombre de spires utilisées pour l'alimentation des circuits du moteur (*fig. 176*).

Les courants polyphasés produisent un champ tournant qui, lorsque l'inducteur n'est pas excité, donne naissance à de puissants courants de Foucault dans les pièces polaires dont l'action est encore renforcée par les circuits amortisseurs (§ 72) disposés à l'extrémité des pièces polaires. L'action mutuelle due au champ

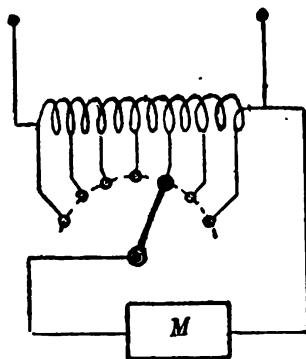


FIG. 176.

tournant et aux courants de Foucault produit un couple moteur qui fait tourner l'organe mobile dans un sens tel qu'une fois le synchronisme atteint, les pôles du champ tournant se trouvent en correspondance avec les pôles de noms contraires de l'inducteur et alors le mouvement de rotation se continue d'une manière constante. Si l'induit est fixe, l'inducteur se meut dans le même sens que le champ tournant, de manière à rester en concordance avec lui une fois le synchronisme atteint. Si, au contraire, c'est l'inducteur qui est fixe, le champ tournant dû au courant de l'induit reste fixe dans l'espace, parce que l'induit tourne en sens opposé au mouvement de rotation du champ et, comme les deux vitesses sont égales, le champ reste fixe. Il est facile d'expliquer ce fait, en prenant un moteur appartenant au premier type, c'est-à-dire à induit fixe; si on le monte sur deux pivots qui lui communiquent un mouvement de rotation égal et de sens contraire à celui de l'inducteur, on se trouve dans le cas du second type de moteur à induit mobile et à inducteur fixe.

Si l'on veut éviter l'emploi de circuits amortisseurs, il suffit de donner un plus grand développement aux pièces polaires

de l'inducteur et de les faire massives, afin de faciliter ainsi la production de puissants courants de Foucault. Dans certains moteurs bien construits, les effets d'hystérésis qui se produisent dans les pièces polaires feuilletées donnent naissance à un couple moteur suffisant pour le faire démarrer à vide et l'amener au synchronisme, ce qui s'explique par ce fait que, pendant la rotation du champ, l'attraction est plus considérable dans le sens du mouvement que dans le sens inverse, par suite du retard de l'effet magnétisant par rapport aux variations du champ qui le produit.

Un autre procédé de démarrage peut également être employé avec les moteurs à courant alternatif simple en disposant sur l'induit un second enroulement. Cet enroulement supplémentaire rend le moteur diphasé lors du démarrage si on l'alimente par un second courant alternatif, décalé d'environ $1/4$ de période. Ce courant est produit en utilisant un des moyens qui seront indiqués ultérieurement dans le chapitre xv pour le démarrage des moteurs asynchrones à courant alternatif simple. On a ainsi réalisé un champ tournant plus ou moins parfait et ondulé, mais qui suffit pour obtenir le démarrage.

93. Indicateurs de synchronisme. — Jusqu'à présent, il a été question des procédés de démarrage des moteurs, sans qu'il ait été indiqué quels sont les moyens dont on dispose pour reconnaître l'instant où le synchronisme est atteint et où il convient d'envoyer le courant alternatif ou continu, ou bien les deux, suivant les cas.

Pour reconnaître le moment où le synchronisme est atteint, on peut utiliser un dispositif stroboscopique (Voir § 12). Pour cela, on dispose sur l'arbre du moteur un disque divisé en secteurs alternativement blancs et noirs, dont le nombre doit être égal à celui des pôles de la machine ; ces secteurs doivent être soigneusement placés en regard des pôles auxquels ils correspondent et le disque est ensuite fortement éclairé à l'aide d'une lampe à arc. Comme la lampe émet deux fois par période son intensité lumineuse maximum, le disque paratt

immobile lorsque sa vitesse angulaire est celle du synchronisme. Une fois le synchronisme obtenu, on commence par exciter l'inducteur, puis on ferme le circuit de l'induit sur la canalisation.

L'emploi d'*indicateurs de synchronisme*, constitués par des lampes à incandescence, simplifie la manœuvre et cette méthode peut être utilisée lorsqu'on effectue le démarrage avec du courant continu ou à l'aide d'un moteur auxiliaire.

Dès que le moteur a commencé à démarrer, on excite faiblement l'inducteur et l'on établit une dérivation reliant le circuit

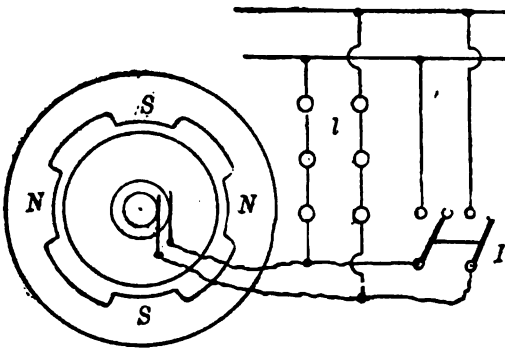


FIG. 177.

d'alimentation à l'induit à travers un groupe de lampes à incandescence montées en série; ces lampes doivent, en fonctionnement normal, exiger une différence de potentiel au moins deux fois égale à celle qui existe entre les conducteurs du circuit d'alimentation. Tout étant ainsi disposé, on laisse, en attendant, l'interrupteur principal ouvert (*fig. 177*).

Dans ces conditions, les lampes sont alimentées par un courant dû à la force électromotrice résultante produite, d'une part, par la tension de la canalisation et, d'autre part, par la force électromotrice développée dans l'induit du moteur synchrone qui fonctionne alors comme génératrice. Cette force électromotrice résultante a des fréquences différentes de celle de la tension sur le réseau d'alimentation, parce que, à certains moments, les deux composantes ont une action concor-

dante, tandis qu'à d'autres instants leur action est opposée ; les lampes indiquent nettement ces variations, qu'on appelle *battements*, parce qu'elles sont tantôt poussées à l'incandescence et tantôt simplement amenées au rouge. Mais, à mesure que la vitesse angulaire du moteur s'approche de celle du synchronisme, les battements deviennent de plus en plus lents. Lorsque ces battements ne se produisent plus qu'à des intervalles de quelques secondes, le phénomène prend un caractère de stabilité qui indique que l'on arrive presque au synchronisme et l'on saisit le moment où les deux séries de lampes sont éteintes pour fermer l'interrupteur principal, retirer la dérivation dans laquelle se trouvent les lampes et supprimer enfin le dispositif de démarrage (Voir chap. xvii, *Synchronisation*). Le moteur est alors prêt à recevoir sa charge, qu'il faut néanmoins n'appliquer que progressivement, afin d'éviter que le ralentissement de l'organe mobile qui en est la conséquence ne dépasse une certaine limite, au delà de laquelle la valeur du couple moteur diminuerait et deviendrait inférieure au couple résistant ; dans ce cas, le synchronisme se perdrait et l'on serait dans l'obligation d'arrêter le moteur et de procéder à un nouveau démarrage.

On peut se demander pourquoi il est nécessaire, pour mettre le moteur en circuit, d'attendre que les lampes soient éteintes, c'est-à-dire le moment où la tension dans le réseau d'alimentation est en opposition de phase avec la force électromotrice développée dans le moteur. La raison est facile à donner et elle est due à ce fait que, dans un moteur idéal n'ayant aucune perte et fonctionnant sans frottements, il n'y aurait pas de dépense d'énergie pour maintenir sa vitesse à vide, c'est-à-dire que le courant aurait une valeur nulle ; or, ce courant est nul ou d'intensité très faible lorsque les lampes ne fonctionnent pas, parce que, à ce moment, la force électromotrice développée dans l'induit du moteur est en opposition avec la tension du réseau d'alimentation ; c'est donc, par conséquent, le moment le plus favorable pour effectuer la mise en circuit. En mettant le moteur en circuit au moment où les lampes

fonctionnent, la tension du réseau est en concordance de phase avec la force électromotrice développée dans le moteur et alors les actions qui s'exercent entre les pôles magnétiques de l'inducteur et du champ tournant s'opposent au mouvement de rotation de l'organe mobile au lieu de le favoriser.

Lorsque le démarrage s'effectue sans excitation de l'inducteur, en faisant fonctionner le moteur comme un moteur asynchrone, la méthode qui vient d'être indiquée n'est plus applicable et il faut alors disposer les lampes de l'indicateur de phase en dérivation sur les bornes du circuit inducteur soumis à l'induction du flux variable de l'induit. Au début, une force électromotrice assez considérable est induite dans le circuit de l'inducteur et les lampes brillent d'un vif éclat; puis leur éclat diminue peu à peu à mesure que la vitesse angulaire de l'organe mobile va en augmentant; leur éclat est minimum lorsque l'on est près d'atteindre la vitesse de synchronisme. Il n'est pas possible d'obtenir complètement la synchronisation, parce que, comme on le verra plus loin, dans un moteur asynchrone, la vitesse angulaire de l'organe mobile doit forcément être inférieure à celle du champ tournant. Mais, comme la vitesse obtenue au moment où les lampes ont leur minimum d'éclat diffère très peu de la vitesse de synchronisme, il n'y a qu'à exciter alors le moteur et à supprimer les lampes; le synchronisme s'établit aussitôt de lui-même et la consommation du courant fourni par le réseau d'alimentation devient instantanément minimum par suite de la suppression du courant magnétisant qui était absorbé jusqu'à ce moment.

Le sens de la force électromotrice au moment où l'on ferme le circuit inducteur n'est pas déterminé, mais cela ne présente pas, en général, une grande importance; toutefois, on conçoit que la synchronisation s'effectue d'autant plus facilement que le sens du courant est celui qui est le plus favorable.

Il est utile d'insérer dans le circuit de l'induit une bobine de réactance réglable afin d'éviter que le courant n'atteigne une trop grande intensité et aussi, par suite de la réaction

produite, d'empêcher la production des harmoniques nuisibles du flux (Voir plus loin, § 96). Il est utile aussi de fermer l'inducteur sur un circuit de très grande résistance (groupe de lampes en série) pendant quelques instants lors de la mise en marche. En effet, ses spires sont alors le siège d'un flux alternatif dont la fréquence est très voisine de celle des courants circulant dans l'induit et les forces électromotrices produites dans l'enroulement, ordinairement en fil fin, sont très élevées. Dès que le moteur a atteint une certaine vitesse, on peut réduire le nombre de lampes pour saisir plus facilement l'instant où le synchronisme est atteint.

Pour terminer ce qui est relatif aux procédés de démarrage, il faut ajouter que, si l'on met simultanément en route l'alternateur et le moteur, si ce dernier est à champ tournant, on peut obtenir la synchronisation aussitôt que l'on ferme le circuit d'excitation du moteur, en ayant soin de donner à ce dernier une certaine impulsion initiale. Son mouvement de rotation s'accroît de plus en plus jusqu'à ce que la génératrice ait atteint sa vitesse normale.

94. Influence de l'excitation. Emploi des moteurs synchrones. — On verra, dans le chapitre suivant, que les moteurs asynchrones, principalement les moteurs polyphasés, ne présentent pas les inconvénients des moteurs synchrones. Ces derniers fonctionnent à vitesse constante, mais présentent des difficultés en ce qui concerne le démarrage; en outre, ils ne peuvent supporter de brusques surcharges. Malgré cela, ils sont encore assez employés dans l'industrie, plus qu'ils ne devraient l'être, à cause d'une qualité précieuse qui leur est particulière. Cette qualité est la propriété qu'ils possèdent de pouvoir, non seulement amener l'intensité du courant d'alimentation en phase avec la tension agissante, mais encore de la décaler en avant. Dans le cas où il y a concordance de phase, le facteur de puissance du circuit (§ 37) dans lequel se trouve le moteur est égal à 1; pour une tension déterminée, l'intensité du courant a alors la valeur minimum compatible avec la charge

du moteur et l'énergie, dissipée par effet Joule, est également réduite au minimum. Ces faits sont une conséquence de la vitesse constante du moteur synchrone et il s'ensuit qu'il est possible de produire dans l'induit une force électromotrice notablement supérieure à la tension du réseau d'alimentation, en augmentant convenablement l'intensité du courant d'excitation. Pour mieux faire comprendre les effets produits dans un moteur synchrone, par suite des variations du courant d'excitation, il suffit de rappeler ce qui se passe dans un moteur à courant continu, à excitation indépendante ou en dérivation.

L'inducteur étant excité et le courant étant envoyé dans l'induit, ce dernier se met à tourner et développe une force électromotrice qui, conformément à la loi de Lenz, est de sens contraire à celle du courant qui alimente le moteur. Si V est la tension du réseau alimentant l'induit, e la force contre-électromotrice développée par la rotation de l'induit, r la résistance de l'induit toujours très faible, l'intensité du courant d'alimentation est donnée par la relation

$$I = \frac{V - e}{r}.$$

Lorsque la charge augmente, la vitesse angulaire diminue, le champ restant constant ; cette vitesse diminue de la valeur nécessaire pour permettre à la force contre-électromotrice de prendre une nouvelle valeur e' pour que l'intensité I' corresponde à la charge appliquée :

$$I' = \frac{V - e'}{r}.$$

Si la charge reste constante et que l'on vienne à modifier l'intensité du champ magnétique, la vitesse angulaire doit également varier, parce que la force contre-électromotrice a une valeur qui dépend directement de l'intensité du champ, de la vitesse angulaire et du nombre de spires de l'induit,

nombre qui ne change pas. Par suite, si la charge est constante, la valeur de l'intensité I doit rester la même et, consé-
quemment aussi, celle de la force contre-électromotrice e' .
Donc, si l'intensité du champ magnétique augmente, il faut
diminuer la vitesse angulaire ; il faut, au contraire, aug-
menter cette dernière si l'intensité du champ diminue.

Aucun de ces phénomènes ne se produit dans un moteur
synchrone à courant alternatif. La force contre-électromotrice,
c'est-à-dire la force électromotrice développée par suite du
mouvement de rotation de l'induit, a une valeur qui dépend
uniquement de l'intensité du champ produit par l'inducteur ;
en effet, lorsque le moteur fonctionne à son régime normal,
sa vitesse angulaire est constante et, d'autre part, le nombre
de spires de l'induit est invariable. C'est pour cela qu'on peut
à volonté donner à cette force contre-électromotrice une valeur
plus petite, égale ou plus grande que la tension du réseau
d'alimentation aux bornes du moteur, sans pour cela compro-
mettre la stabilité de marche de ce dernier ainsi que le dé-
montre la pratique.

En négligeant les pertes, afin de simplifier l'explication,
c'est-à-dire en admettant un rendement égal à l'unité, ce qui
n'enlève rien à l'exactitude du raisonnement suivant, on peut
dire que la puissance P développée par le moteur est égale
à la quantité d'énergie que lui fournit par seconde le réseau
d'alimentation ; cette quantité d'énergie est en général égale
(§ 37) à kVI , k étant le facteur de puissance, V la tension du
réseau d'alimentation et I l'intensité du courant dans le cir-
cuit, intensité dont la valeur est donnée par la lecture de
l'ampèremètre. Donc

$$P = k . V . I.$$

Or, dans le cas actuel, la valeur de I dépend de la tension
résultante due à la tension agissante V diminuée de la force
contre-électromotrice du moteur E .

Si on augmente l'excitation, E prend une valeur plus grande
et l'intensité I doit varier, étant donné que V est supposé

constant. Si cette augmentation d'intensité du champ se produit pendant que la charge est constante, I variant dans un sens donné, k doit se modifier en sens opposé et il ne peut se produire d'autre effet, parce que P ne varie pas et que, dans ces conditions, la loi de la conservation de l'énergie est satisfaite. En faisant varier graduellement l'intensité du courant d'excitation d'un moteur synchrone, tandis que la charge reste constante, il se produit le phénomène que représente graphiquement la figure 178.

Avec une faible excitation, l'intensité du courant dans l'induit du moteur prend une certaine valeur; à mesure que l'on augmente l'excitation, l'intensité du courant dans l'induit diminue jusqu'au moment où elle prend une valeur minimum.

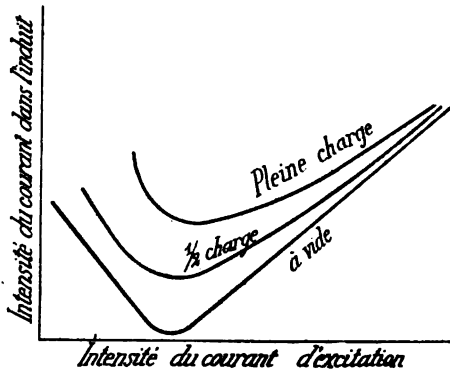


FIG. 178.

Pendant ce temps, l'intensité du courant reste toujours décalée en retard par rapport à la tension aux bornes du moteur. En augmentant encore l'excitation, l'intensité du courant dans l'induit reprend ses valeurs primitives; mais alors, du fait que la force contre-électromotrice a une valeur différente de celle qu'elle avait au début, il doit y avoir un autre élément modifié; c'est justement le décalage de l'intensité du courant qui, précédemment, était décalée en retard par rapport à la tension et qui maintenant est décalée en avance. On doit déduire de ce qui précède que l'intensité minimum du courant correspond au moment où le retard est nul et où, par conséquent, le facteur de puissance est égal à l'unité ($k = 1$).

On peut donner de ce fait l'explication physique suivante : un courant alternatif décalé en retard, par rapport à la tension

agissante, affaiblit le champ inducteur lorsqu'il s'agit d'une génératrice; dans un moteur, au contraire, le même phénomène a pour effet de renforcer ce champ; ce fait est analogue au déplacement des balais dans une dynamo à courant continu (§ 73). Si la charge du moteur reste constante, la composante active du courant ne varie pas; la seule qui puisse varier est la composante magnétisante. Cette composante magnétisante augmente l'intensité du champ lorsque le courant total est décalé en retard; elle l'affaiblit, au contraire, quand le courant total est en avance sur la tension.

Dans un moteur synchrone, si l'intensité est décalée en retard par rapport à la tension agissante, le champ utile est dû, en partie, au courant d'excitation et, pour l'autre partie, à la composante magnétisante ou de réaction. En augmentant l'intensité du courant d'excitation, la charge restant constante, la composante magnétisante doit diminuer et réciproquement, afin que le champ magnétique inducteur résultant ait une intensité constante. Ceci se produit jusqu'au moment où le courant résultant se trouve en concordance de phase avec la tension et alors la composante magnétisante est supprimée.

En augmentant l'intensité du courant d'excitation au delà de cette limite, le champ deviendrait trop intense si la composante magnétisante, qui alors intervient de nouveau, ne venait affaiblir le champ, décalant alors l'intensité résultante (lue sur l'ampèremètre) en avance, par rapport à la tension, au lieu de la décaler en retard.

On peut expliquer le phénomène d'une autre manière: pour une valeur déterminée de l'intensité du courant dans l'induit, il se produit une force électromotrice résultante dont la valeur est celle de la tension aux bornes du moteur, diminuée de celle de la force contre-électromotrice induite. Pour une certaine charge, la valeur de la force contre-électromotrice reste invariable et, par conséquent, l'intensité du champ ne doit pas varier puisque la vitesse angulaire est constante. En augmentant l'intensité du champ par l'excitation, cette augmentation est

annulée par le champ contraire, dû au courant de réaction auquel il donne naissance ; l'effet inverse se produit lorsqu'on vient à diminuer l'excitation.

En résumé, en faisant varier convenablement l'excitation d'un moteur synchrone, il est possible de mettre en concordance de phase l'intensité du courant avec la tension aux bornes ; en surexcitant le moteur, il est possible aussi de décaler l'intensité en avance et, dans ce cas, le moteur se comporte comme un condensateur (§ 44).

Dans ces conditions, si l'on tient compte de ce fait que les moteurs asynchrones ont un facteur de puissance $k = 0,8$ environ et que, par suite, leur fonctionnement exige une intensité de courant supérieure de 20 0/0 à celle qui leur serait strictement nécessaire si le facteur de puissance était égal à l'unité ; que, d'autre part, une plus grande intensité de courant entraîne des pertes plus considérables par effet Joule, on comprend que, dans beaucoup de cas, la possibilité d'obtenir un facteur de puissance égal à l'unité, dans une transmission d'énergie utilisant des moteurs synchrones, fasse préférer ce type de moteur, au moins toutes les fois que les inconvénients qu'il présente ne sont pas de nature à empêcher leur emploi pour l'application que l'on a en vue.

Lorsque l'emploi de moteurs asynchrones est seul possible pour l'application que l'on veut réaliser, on peut placer un moteur synchrone en dérivation à l'extrémité de la ligne ; en faisant fonctionner ce moteur à vide et en le surexcitant, on peut amener en concordance de phase, tout au moins dans la ligne et dans les génératrices, le courant et la force électromotrice. Dans ces conditions, il est possible de régler le système pour que le décalage en retard de l'intensité produit par les moteurs asynchrones soit compensé par le décalage en avance dû aux moteurs synchrones. C'est ce qui a été expliqué en d'autres termes dans le paragraphe 46, à propos du condensateur qui peut fournir à un appareil inductif, auquel il est relié, le courant magnétisant nécessaire à ce dernier.

Dans le cas considéré, l'appareil inductif est la génératrice

même, qui présente toujours une certaine self-induction ; cette self-induction produit une chute de tension supérieure à celle que produit la seule résistance ohmique et l'insertion en dérivation d'un moteur synchrone sur la ligne peut avoir pour effet, s'il est convenablement excité, d'augmenter la valeur de la tension sur la ligne et aux bornes de la génératrice. En outre, si on surexcite le moteur de façon à décaler le courant en avance par rapport à la force électromotrice de la génératrice, la réaction d'induit de cette dernière agit alors, pendant une période, sur l'inducteur pour rendre l'action magnétisante supérieure à l'action démagnétisante, tandis que c'est le contraire qui se produit ordinairement (§ 74) ; dans ces conditions, pour une même excitation, la tension aux bornes peut devenir supérieure à la valeur de la force électromotrice lors du fonctionnement à vide de l'alternateur.

On sait qu'en abaissant la tension d'un alternateur au-dessous de sa valeur normale, la valeur de l'intensité du courant qu'il peut débiter est également limitée ; il est alors facile de comprendre pourquoi un facteur de puissance peu élevé peut limiter considérablement la puissance efficace d'une génératrice. Dans ce cas, l'emploi d'un moteur synchrone permettant de faire fonctionner l'alternateur, comme il le ferait sur une résistance non inductive, est tout à fait indiqué.

Après avoir examiné le fonctionnement d'un moteur synchrone lorsque la charge et la tension aux bornes sont constantes, mais l'excitation variable, il reste à examiner comment ce moteur se comporte quand, la tension et l'excitation restant constantes, la charge vient à varier.

Il importe d'abord de faire connaître qu'il ne peut se produire une opposition complète de phase entre la tension et la force contre-électromotrice, parce que, en admettant que leurs valeurs efficaces soient égales (on sait que la force électromotrice peut avoir une valeur plus grande, égale ou plus faible que celle de la tension), il se produit entre elles un décalage qui donne lieu à une force électromotrice résultante et, par conséquent, à la production d'un courant dans l'induit. Dans

ces conditions, s'il se produit une augmentation de charge, le moteur retarde légèrement, sa vitesse angulaire restant toutefois la même, le décalage entre la tension et la force contre-électromotrice est plus grand et l'intensité du courant augmente ainsi que le couple moteur.

L'effet contraire se produit lorsque la charge diminue. Par conséquent, l'intensité du courant se règle automatiquement, suivant les variations de charge, par suite du décalage en retard plus ou moins accentué de la force contre-électromotrice développée par rapport à la tension agissante, retard qui se traduit par un déplacement plus ou moins grand de l'organe mobile du moteur par rapport à la position correspondant à l'opposition complète entre la tension et la force contre-électromotrice.

Malgré les avantages réels que présente le moteur synchrone à cause de son rendement, comme son installation nécessite une dépense appréciable et que, comme toute machine, il exige une certaine surveillance et un certain entretien augmentant les dépenses d'exploitation, on ne peut toujours recommander son emploi, si ce n'est dans certains cas spéciaux, lorsqu'on veut, par exemple, empêcher les effets nuisibles de la self-induction dus à d'autres moteurs ou à certains appareils tels que les transformateurs, les génératrices, les lampes à arc, etc.

Il est encore un fait sur lequel on doit porter son attention, c'est que la régularité de fonctionnement d'un moteur synchrone exige que la tension du réseau d'alimentation aux bornes du moteur ne subisse pas de variations brusques, parce qu'alors le couple moteur n'est plus proportionné au couple résistant; si le couple moteur est trop faible, la vitesse du moteur diminue, le synchronisme se perd et le moteur finit par s'arrêter.

C'est pour ce motif que les courts circuits produits par les décharges atmosphériques sur une longue ligne aérienne font brusquement baisser la tension des génératrices et produisent quelquefois la désynchronisation des moteurs synchrones alimentés par le réseau.

95. Mouvements oscillants dans un moteur synchrone. Emploi de circuits amortisseurs. — Si les propriétés utiles du moteur synchrone, propriétés qui ont été exposées dans les paragraphes précédents, rendent son emploi préférable dans certaines applications, il ne faut pas oublier que sa raison d'être est d'avoir une vitesse angulaire rigoureusement constante et correspondant à la fréquence du courant alternatif qui l'alimente. Or l'organe mobile du moteur possède toujours une certaine inertie et les forces qui agissent sur lui interviennent fortement pour le placer dans des conditions de stabilité plus ou moins bonnes.

Pour simplifier l'explication, on peut supposer que l'on se trouve en présence d'un moteur triphasé alimenté par une génératrice actionnée par une turbine hydraulique ou à vapeur. La turbine a un couple moteur constant et la vitesse de la génératrice reste pratiquement uniforme. Par suite, la vitesse angulaire du moteur ne peut être le moins du monde affectée de ce chef; en effet, tant que la charge supportée par le moteur ne varie pas, son fonctionnement est parfaitement régulier.

Mais, au moment où la charge varie, si elle vient par exemple à augmenter, il se produit deux phénomènes dus à ce fait que le couple moteur du moteur triphasé est inférieur au couple résistant. L'intensité du courant varie alors et augmente de manière à produire un couple moteur pouvant équilibrer le couple résistant; cette augmentation de l'intensité du courant se produit d'autant plus rapidement que la self-induction de l'induit est plus faible et c'est pour ce motif, comme on l'a déjà dit, qu'on cherche en pratique à la rendre aussi faible que possible. Mais pendant ce temps, qui peut être très court, la majeure partie du couple moteur nécessaire est fournie par l'inertie de l'organe mobile et, de ce fait, ce dernier subit un petit ralentissement; la force d'inertie qui en résulte donne naissance au couple moteur supplémentaire nécessaire. Un nouveau régime électrique s'établit alors et l'organe mobile du moteur reprend sa position normale par l'action du couple électromagnétique ainsi produit; mais, par suite de l'inertie,

la position normale est légèrement dépassée et il se produit alors un mouvement en arrière; ces deux actions se continuent en donnant lieu à des oscillations de l'organe mobile autour de sa position normale. Cet état oscillatoire se continuerait indéfiniment, mais les frottements et les courants parasites qui se développent arrêtent plus ou moins vite ces oscillations et ramènent le moteur à son régime normal de fonctionnement.

On voit, d'après ce qui précède, qu'une certaine inertie est nécessaire pour fournir un couple moteur supplémentaire au moment où la charge du moteur varie, afin qu'un nouveau régime électrique s'établisse; d'autre part, il convient de ne pas exagérer cette inertie, si l'on ne veut pas exagérer les mouvements oscillants. Il résulte de ces considérations que, à conditions égales, l'inertie doit être d'autant plus faible que la self-induction que présente l'induit est plus petite; mais il ne faut pas perdre de vue que, si le moteur commande des machines par l'intermédiaire d'un accouplement rigide, l'inertie de ces machines s'ajoute à celle du moteur.

Des phénomènes identiques, mais inverses, se produisent lorsque la charge du moteur diminue au lieu d'augmenter.

Ces oscillations du moteur, qui disparaissent très souvent lorsqu'on fait varier le courant d'excitation, n'entraînent généralement pas la perte du synchronisme du moteur, car les oscillations effectuées par l'organe mobile autour de sa position moyenne ne dépassent pas l'*angle de stabilité*, angle dans les limites duquel chaque ralentissement produit une augmentation du couple moteur et chaque augmentation de vitesse, une diminution de ce même couple moteur. Mais, lorsque le moteur reçoit une forte et brusque augmentation de charge, la perte de synchronisme est inévitable si la première oscillation dépasse l'amplitude de l'angle de stabilité. Si, au contraire, l'oscillation est due à une diminution du couple résistant, il ne peut en résulter aucun inconvénient parce que, dans ces conditions, si l'angle de stabilité est dépassé par la première oscillation en avant, il ne le sera certainement pas par l'oscillation suivante en arrière, qui est plus petite.

De toute manière, ces oscillations, lors même qu'elles n'entraînent pas la désynchronisation, donnent lieu à des variations de force contre-électromotrice, d'intensité et de décalage ; elles ont encore une répercussion fâcheuse très notable sur la ligne et les génératrices, en donnant lieu à des variations de tension suffisamment importantes pour rendre le fonctionnement des lampes absolument impossible. Dans ces conditions, on voit que l'installation d'un moteur synchrone doit être faite judicieusement, si l'on veut éviter de graves mécomptes.

On a supposé jusqu'à présent que la génératrice fonctionnait à une vitesse angulaire rigoureusement constante, comme c'est le cas lorsqu'elle est actionnée par une machine à couple moteur constant. Mais, lorsque cette machine a un couple moteur variable, comme c'est le cas pour un moteur à vapeur par exemple, il se produit une variation de vitesse à chaque tour, variation qui se reproduit également sur le moteur synchrone alimenté par cette génératrice.

Ces variations de vitesse angulaire donnent lieu dans le moteur synchrone à un véritable état oscillatoire à période lente ; ces oscillations peuvent également être produites par la machine qui est actionnée par le moteur synchrone, lorsque cette machine a un couple résistant périodiquement variable. Lorsque les impulsions dues à ces oscillations lentes favorisent celles dues aux irrégularités de vitesse de la génératrice, c'est-à-dire si la période des premières est un sous-multiple de celle des oscillations lentes, ces dernières peuvent être amplifiées au point d'entraîner la complète désynchronisation du moteur. De même le mouvement d'un pendule peut être amplifié, de manière à dépasser son amplitude normale, par de très petites impulsions se produisant à intervalles réguliers, quoique assez longs, mais toujours dans le sens favorable au mouvement.

Dans les installations comportant des moteurs synchrones, le choix des moteurs commandant les génératrices doit être l'objet d'une étude très attentive si l'on veut être certain que le bon fonctionnement de l'installation soit assuré (Voir aussi chap. xvii).

Toutefois, il est possible, non d'empêcher ces oscillations de se produire, mais d'éviter qu'elles prennent une trop grande amplitude en les amortissant rapidement; à cet effet, il est recommandé que les moteurs synchrones soient munis de circuits amortisseurs, dont il a été question dans le paragraphe 71, afin de donner à la force électromotrice une allure sinusoïdale ou presque sinusoïdale. Il est utile également de munir les alternateurs de circuits amortisseurs.

Ainsi, dans un moteur synchrone triphasé, les pôles de l'induit conservent une position invariable par rapport à ceux de l'inducteur, tant que son fonctionnement est régulier et sa charge constante. Si une oscillation vient à se superposer au mouvement de rotation, il y a variation du flux dans les circuits amortisseurs, car ce flux a successivement des vitesses plus grandes et moins grandes que celle du flux du champ tournant.

Les courants induits intenses qui prennent alors naissance produisent un couple correcteur qui agit comme le ferait un frein et qui tend à ramener la vitesse à celle du synchronisme. Une fois la stabilité de marche obtenue, les circuits amortisseurs n'agissent plus.

Les phénomènes sont plus complexes lorsqu'il s'agit d'un moteur synchrone à courant alternatif simple. Le flux alternatif d'un champ magnétique peut être considéré comme la résultante de deux champs magnétiques tournant avec la même vitesse angulaire,

mais en sens inverse et ayant des intensités constantes et égales, pour chacun d'eux, à la moitié de la valeur maximum du flux alternatif. Ce phénomène présente une certaine analogie avec le dispositif cinématique que montre la figure 179 et dans lequel deux manivelles (qui pourraient également être disposées le long d'un même axe), animées d'un mouvement circulaire, mais de sens inverse, produisent un mouvement rectiligne harmonique simple.

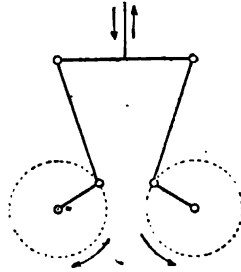


FIG. 179.

Les deux flux tournants composants ont, par rapport à l'organe mobile d'un moteur synchrone animé d'une vitesse angulaire ω , l'un une vitesse nulle, l'autre une vitesse égale à 2ω . Le premier de ces flux n'a aucune action sur les circuits amortisseurs tant que la vitesse est suffisamment uniforme et ne donne naissance à des courants induits dans ces circuits qu'au moment où une oscillation se produit en avant ou en arrière par rapport à eux. Le second flux tournant, au contraire, animé par rapport aux circuits amortisseurs d'une vitesse égale à 2ω , donne constamment naissance à des courants de Foucault d'une telle intensité que le champ magnétique qu'ils produisent est presque égal à celui qui leur a donné naissance et par conséquent le neutralisent. On peut donc dire que ces circuits amortisseurs agissent sur le second flux composant comme le ferait un écran magnétique qui empêcherait le flux de les traverser.

Par suite, le premier flux composant reste seul comme champ tournant actif et, à ce point de vue, le moteur synchrone à courant alternatif simple se comporte comme un moteur polyphasé.

Il est évident que l'action régulatrice due à cette sorte d'écran magnétique est d'autant plus efficace que la résistance ohmique de ces circuits fermés sur eux-mêmes est plus faible et qu'ils sont plus complètement traversés par le flux de l'induit (Voir § 72).

96. Rendement des moteurs synchrones et choix du type à employer. — Le rendement des moteurs synchrones bien construits ne diffère pas de celui des bons alternateurs, puisque leur construction est identique et que les pertes sont les mêmes.

Mais, pour qu'un type de moteur convienne parfaitement à une installation déterminée, il est indispensable que ce moteur se rapproche le plus possible, au point de vue des détails de construction, des alternateurs qui doivent alimenter la canalisation sur laquelle il est branché. Ainsi, par exemple,

la forme de la courbe de la force contre-électromotrice du moteur peut différer notablement de celle de la force électromotrice de l'alternateur. Dans ces conditions, la force électromotrice résultante, de laquelle dépend la valeur de l'intensité du courant, contient alors des harmoniques qui donnent naissance à des courants parasites donnant lieu à des dérangements dans l'installation. Il est vrai que l'on peut toujours chercher à atténuer ces harmoniques en intercalant une bobine de réactance entre la ligne et le moteur, cette bobine de réactance tendant, par sa nature même, à s'opposer à toute variation du flux et cela d'autant plus énergiquement que les variations de flux sont plus rapides; mais ce procédé présente l'inconvénient d'introduire dans le circuit une self-induction inutile et souvent nuisible, pouvant compromettre la stabilité de fonctionnement. Toutefois, si le coefficient de régularité (chap. xvii) des moteurs qui commandent les génératrices n'est pas très élevé et que la tension des génératrices ait des tendances à osciller, la bobine de réactance peut être utilisée avec avantage pour empêcher les oscillations qui pourraient se produire dans les moteurs synchrones installés sur le réseau. C'est ce qui a été fait récemment dans le réseau de distribution de Prague et l'on a obtenu de bons résultats.

En ce qui concerne les harmoniques, il est toujours utile de faire usage de circuits amortisseurs qui ont pour effet de modifier la forme de la courbe de force électromotrice pour la rendre pratiquement sinusoïdale.

Les moteurs synchrones polyphasés sont moins lourds à puissance égale que les moteurs synchrones à courant alternatif simple, parce que les matières sont mieux utilisées, constatation qui a déjà été faite à propos des alternateurs. Aussi le rendement, toutes choses égales d'ailleurs, est légèrement supérieur.

Pour terminer, il y a lieu de recommander, lors du choix d'un type de moteur, de s'assurer que l'excitation peut être modifiée dans de larges limites, afin de rendre possible le fonctionnement lorsqu'il est surexcité.

CHAPITRE XIV

MOTEURS ASYNCHRONES POLYPHASÉS

97. Principe fondamental des moteurs à champ tournant. — Dans le chapitre x, on a déjà exposé le principe du champ tournant de Ferraris, dont le moteur asynchrone est une application. Il convient maintenant de faire une étude plus complète de ce phénomène, afin de faciliter l'explication du fonctionnement de cette catégorie de moteurs.

Soit un moteur bipolaire à courant continu modifié de manière à rendre l'inducteur aussi bien que l'induit mobiles autour de leur axe. L'inducteur, par l'intermédiaire d'un dispositif particulier, est alimenté par du courant continu ; l'induit a un enroulement constitué par plusieurs spires de grande section fermées en court-circuit sur elles-mêmes (*fig.* 180).

Dans ces conditions, l'inducteur étant excité et l'induit n'étant parcouru par aucun courant, il ne se produit pas de couple moteur et les deux organes restent fixes. Mais, si on fait tourner l'inducteur avec une certaine vitesse angulaire constante, dans le sens indiqué par la flèche, en lui fournissant de l'énergie mécanique, les spires de l'induit sont alors traversées par un flux variable ; sous l'action de ces variations de flux, il se développe dans chacune des spires une force électromotrice et aussi un courant, puisqu'elles ont leur circuit fermé. Ces courants, d'après la loi de Lenz, réagissent

sur le flux qui les a produits et développent, en conséquence, un couple moteur qui met l'induit en mouvement ; on réalise ainsi une transformation d'énergie mécanique en énergie mécanique.

Les courants qui se produisent dans les spires ont une très petite intensité tant que l'induit tourne à vide ; ils sont suffisants pour développer le couple moteur nécessaire pour vaincre

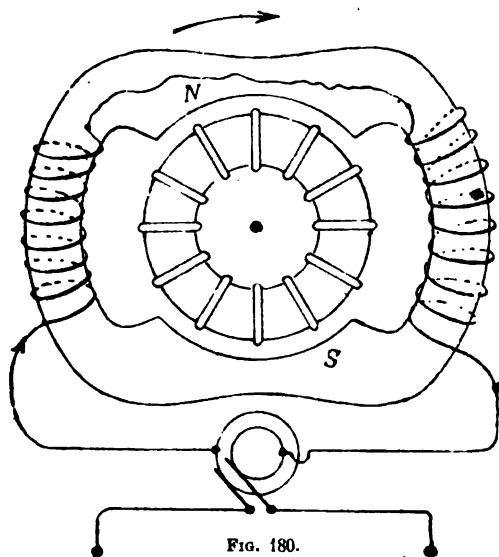


FIG. 180.

les résistances dues aux frottements et, puisque dans un moteur le couple est proportionnel au produit obtenu en multipliant la valeur de l'intensité du champ par celle de l'intensité du courant dans les spires de l'induit, si on admet que le premier soit constant quand le couple moteur est faible, l'intensité du courant dans l'induit doit être également faible. Mais, si le moteur doit supporter une charge, obligeant ainsi l'induit à surmonter un couple résistant, il est nécessaire que l'intensité du courant prenne une valeur plus grande, afin que le couple moteur puisse surmonter le couple résistant.

Il importe de rechercher à quel phénomène spontané sont dues les variations d'intensité du courant dans l'induit lorsque la charge du moteur vient elle-même à varier.

Dans un moteur à courant continu ordinaire, excité en dérivation et, par conséquent, à champ constant, l'intensité du courant dans l'induit augmente spontanément dès que la charge devient plus grande par suite de la diminution de vitesse que subit l'induit ; dans ces conditions, la force contre-électromotrice baisse et la tension utile appliquée aux balais agit pour augmenter l'intensité du courant.

Dans le moteur considéré ici à inducteur tournant et avec induit ayant des spires fermées en court circuit, le courant développé dans ces spires est dû à la force électromotrice développée par le mouvement relatif de l'un des organes par rapport à l'autre. On sait que l'induit est animé d'une vitesse angulaire qui se rapproche beaucoup de celle de l'inducteur, mais sans pouvoir l'égaliser, parce que, si les vitesses angulaires des deux organes étaient les mêmes, le mouvement relatif n'existerait plus et alors il ne pourrait y avoir développement d'une force électromotrice et, par suite, de courant. Le mouvement relatif est produit par la différence qui existe entre les vitesses angulaires de l'inducteur et de l'induit, différence que l'on nomme *glissement* (Voir § 61). La force électromotrice augmente proportionnellement à ce glissement et, par suite, l'intensité du courant dans l'induit augmente également, mais sans suivre cependant la même loi.

Si la résistance des spires est faible, il suffit d'une force électromotrice de valeur assez petite pour produire un courant intense ; par conséquent, le glissement sera faible (quelques pour cent ou fractions de pour cent de la vitesse angulaire de l'inducteur, jamais plus) ; toutefois il augmentera en même temps que la charge proportionnellement à la diminution de la vitesse.

Ce type particulier de moteur à courant continu, que l'on peut très bien qualifier de *moteur à champ tournant*, réalise, en quelque sorte, un joint électromagnétique entre la machine motrice et la machine à actionner ; ce genre de moteur peut avantageusement être utilisé dans beaucoup de cas, particulièrement lorsqu'il est important d'éviter de brusques secousses, lors d'une variation subite de charge. La puissance est proportion-

nelle à la charge résistante, puisque, quand l'intensité du courant augmente dans les spires, l'action répulsive qui se produit entre l'inducteur et l'induit augmente et un effort plus considérable est nécessaire pour maintenir constante la vitesse de l'inducteur. On comprend facilement cette tendance à la répulsion, puisque le mouvement de l'induit retarde sur celui de l'inducteur.

De ce qui précède, on pourrait conclure que le couple résistant peut croître dans n'importe quelles limites, à la condition que les spires aient une section suffisante pour supporter le passage du courant sans subir un échauffement anormal. Mais, en réalité, il n'en est pas ainsi, la self-induction que présentent les spires imposant une limite à l'augmentation de la charge, c'est-à-dire du couple résistant.

Pour mieux faire comprendre cette action, il suffit de savoir que les courants qui se développent dans les spires sont les mêmes que ceux qui se développeraient si, l'inducteur étant fixe, on faisait tourner l'induit en sens inverse avec une vitesse angulaire égale au glissement. Ainsi, par exemple, si l'inducteur tourne de gauche à droite à la vitesse angulaire constante de 20 tours par seconde et que, pour une charge déterminée, l'induit effectue 18 tours par seconde, dans ces conditions le glissement est égal à 2 tours par seconde. Les courants qui se développent alors dans les spires de l'induit ont la même intensité que si, l'inducteur étant fixe, on faisait tourner l'induit de droite à gauche avec une vitesse angulaire de 2 tours par seconde. Naturellement les courants ainsi produits sont alternatifs.

Lorsque la self-induction est négligeable, l'intensité reste en concordance de phase avec la force électromotrice et le courant se distribue comme le montre la figure 181 (α). Si, au contraire, la self-induction n'est pas négligeable, l'intensité est décalée en retard par rapport à la force électromotrice (β , *fig.* 181) et elle est d'autant plus décalée (γ , *fig.* 181) que la self-induction est plus considérable; c'est pour cela que, sous un même pôle, il peut se trouver des conducteurs induits parcourus par des courants de sens contraires. On sait, d'autre part (§ 22), que les effets produits par la self-induction augmentent avec

la fréquence, c'est-à-dire, dans le cas actuel, augmentent avec la vitesse angulaire de l'induit qui a été admise égale au glissement.

Dans le moteur à courant continu et à champ tournant dont il est question ici, puisque le glissement augmente en même temps que la charge, les effets de la self-induction des spires doivent aussi augmenter et l'intensité est décalée en retard. Tant que tous les conducteurs, se trouvant soumis à l'action

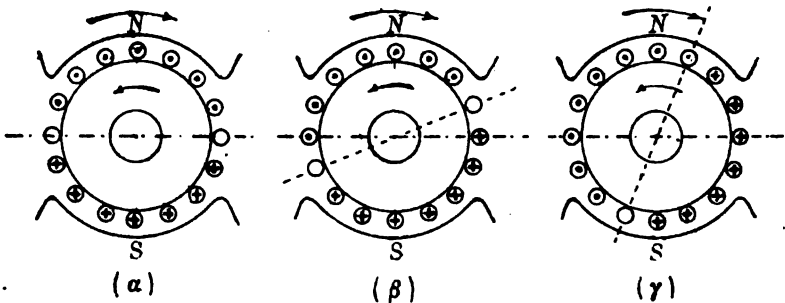


Fig. 181.

d'un même pôle, sont parcourus par des courants de même sens, le couple moteur prend une valeur qui augmente comme la charge, puisque l'intensité prend des valeurs de plus en plus grandes. Mais, dès que, par suite de la diminution de vitesse angulaire de l'induit, c'est-à-dire par suite de l'augmentation du glissement, les effets de la self-induction deviennent plus grands, il peut alors se trouver sous un même pôle des conducteurs parcourus par des courants de sens inverse à celui qui favorise le mouvement de rotation de l'induit et le couple moteur se trouve en conséquence affaibli. Dans ces conditions, le couple moteur n'est plus en rapport avec le couple résistant; il diminue constamment et la vitesse décroît rapidement jusqu'à l'arrêt de l'induit. Ce résultat très important prouve que le moteur à champ tournant a un couple moteur maximum dans certaines conditions de vitesse, couple dont la valeur ne doit jamais être dépassée si l'on veut obtenir un fonctionnement régulier.

variation de charge est promptement compensé par une variation en sens opposé du couple moteur. Cela ne se produit pas pour les différentes valeurs de la vitesse comprises entre les points B et P de la courbe, pour lesquelles une diminution du couple moteur correspond à une diminution de vitesse.

Les effets de la self-induction, toujours nuisibles, le sont particulièrement au moment du démarrage, parce que le couple moteur peut être, de ce fait, tellement faible qu'il ne peut atteindre la valeur nécessaire pour vaincre les seules résistances passives, étant admis que le moteur n'a aucune charge extérieure à vaincre. Pour éviter cet inconvénient, on peut recourir au dispositif qui a été indiqué dans le paragraphe 22 et qui consiste à intercaler dans les spires une résistance purement ohmique, sans rien modifier aux autres conditions. L'augmentation de résistance a certainement un effet nuisible en ce qui concerne l'intensité du courant, mais, par contre, favorable au point de vue du retard causé par la self-induction, retard qui est alors réduit à son minimum. Lors du démarrage, le second de ces effets l'emporte sur le premier et le couple moteur obtenu a une valeur plus grande. Aussi le couple moteur maximum est-il atteint par un glissement plus grand que le précédent; en d'autres termes, la vitesse angulaire diminue avec l'augmentation de charge plus rapidement que dans le premier cas (courbe en pointillé, *fig. 182*).

On peut augmenter la résistance ohmique de manière à rendre le couple moteur maximum lors du démarrage (courbe tracée en points et traits, *fig. 182*). Cette propriété est utilisée dans certains cas et l'explication en sera donnée ultérieurement.

Les phénomènes qui viennent d'être exposés relativement au joint électromagnétique, pris comme point de départ de cette étude, permettent d'expliquer facilement ceux qui se produisent dans un véritable moteur dont le champ tournant est obtenu par la combinaison de deux, de trois ou d'un plus grand nombre de courants alternatifs (§ 61), convenablement décalés l'un par rapport à l'autre, et agissant sur un induit

constitué par des conducteurs disposés dans des trous ou dans des rainures pratiqués dans un noyau feuilleté.

Dans ces conditions, l'inducteur est fixe, parce que le champ tourne par l'action des courants. L'on ne se trouve plus alors en présence d'une transformation d'énergie mécanique en énergie mécanique, mais bien en présence d'une transformation d'énergie électrique en énergie mécanique; à une augmentation de charge du moteur correspond alors une dépense plus considérable de l'énergie électrique fournie par la ligne à l'inducteur.

98. Moteurs polyphasés à champ tournant ou de Ferraris. — On donne le nom de champ Ferraris à tout champ tournant produit par des courants alternatifs; donc un moteur à champ tournant comporte deux organes essentiels, un fixe et un mobile; il est indifférent que ce soit la partie fixe ou la partie mobile qui reçoive le courant de la ligne d'alimentation, ou que ce soit celle dans laquelle se produisent des courants induits, s'il est convenu que l'organe fixe s'appelle *stator*, tandis que l'on donne le nom de *rotor* à l'organe mobile. C'est généralement le stator qui est relié au circuit d'alimentation.

Ces moteurs sont dits *asynchrones*, par suite de ce fait que le rotor a tendance à atteindre une vitesse angulaire égale à celle du champ tournant, vitesse correspondant au synchronisme, mais qu'il ne peut jamais égaler, restant ainsi non synchrone, d'où le nom qui a été donné à ce type de moteurs. La tendance qu'a le rotor à prendre la vitesse de synchronisme est due à ce que tout système, mis en mouvement par un champ magnétique mobile, tend à devenir immobile par rapport à lui.

Les moteurs asynchrones polyphasés sont essentiellement constitués par deux anneaux feuilletés servant de noyaux (*fig. 183*).

L'un d'eux reçoit l'enroulement dans lequel circulent les courants destinés à produire le champ tournant; l'autre

reçoit les conducteurs dans lesquels prennent naissance les courants dus simplement à l'induction mutuelle.

On a déjà exposé complètement, dans le paragraphe 97, comment se produit le couple moteur et comment varie le glissement. Il reste à examiner maintenant pour quelle raison

l'énergie électrique absorbée est toujours proportionnée à l'énergie mécanique fournie.

A cet effet, il suffit de se reporter à ce qui a été exposé relativement à l'autorégulation des transformateurs dans le paragraphe 79, puisqu'en réalité le moteur à champ tournant est un véritable transformateur, comportant, comme ce dernier,

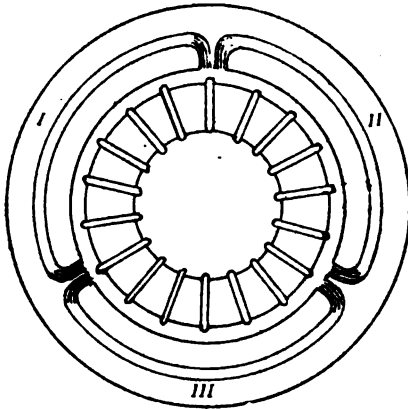


FIG. 183.

un circuit primaire, un circuit secondaire et un circuit magnétique, et n'en différant que par ce fait que, dans le transformateur, les deux circuits sont fixes, tandis que dans le moteur polyphasé asynchrone un des circuits est fixe et l'autre est mobile.

Dans le transformateur, les courants induits dans le secondaire par le primaire sont utilisés pour diverses applications en dehors du transformateur même ; dans le moteur à champ tournant les courants induits sont utilisés dans la machine même pour produire de l'énergie mécanique, et cela, en réagissant sur les champs magnétiques qui leur ont donné naissance.

Comme conséquence immédiate de l'analogie qui existe entre ces deux appareils, on peut en déduire que l'on doit autant que possible éviter les fuites magnétiques dans ce genre de moteurs, en ayant soin de les construire de manière que le flux produit par un des circuits embrasse aussi complètement que possible l'autre circuit ; c'est pour ce motif qu'il est

important de réduire au minimum l'épaisseur de l'entrefer entre le rotor et le stator.

Si toutes les spires du rotor (supposé pour le moment être l'induit du joint électromagnétique à courant continu) ont leur circuit ouvert, les courants de Foucault dans le noyau feuilleté et les effets de l'hystérésis peuvent être considérés comme négligeables. Si l'on fait passer dans le stator trois courants alternatifs décalés de $1/3$ de période, il se développe un champ tournant, mais ces trois courants ne produisent aucun travail, abstraction faite des pertes par effet Joule dans le stator, car ce sont seulement des courants magnétisants décalés en retard de $1/4$ de période par rapport à la tension agissant aux bornes du moteur. En réalité, ce retard est seulement voisin de 90° , parce qu'une partie des courants est énergétique, afin de compenser les diverses pertes.

Si on considère, au contraire, le moteur en fonctionnement normal avec toutes les spires du rotor fermées sur elles-mêmes, alors les courants qui prennent naissance dans les spires produisent un champ magnétique qui réagit sur celui du stator. Ce champ magnétique, dû au rotor, tourne dans l'espace plus vite que lui, car il a la même vitesse angulaire que le champ produit par le stator et suit la même direction; mais il est plus ou moins décalé suivant la charge et cela quelle que soit la vitesse du rotor.

Ce fait, à première vue paradoxal, s'explique facilement par l'observation faite précédemment que les courants dans le rotor sont de même nature que ceux qui se produiraient si le champ magnétique principal était fixe et que l'on fasse tourner le rotor en sens inverse avec une vitesse angulaire égale à la valeur du glissement. Dans ces conditions, la distribution des courants dans l'espace reste fixe, c'est-à-dire que, lorsqu'une spire, dans son mouvement de rotation, prend la place de la spire qui la précède, le courant qui la parcourt est le même que celui qui parcourait la spire dont elle a pris la place. Alors, autour du rotor, les courants ne se modifient pas au point de vue magnétique et le champ résultant qu'ils produisent

reste fixe dans l'espace comme le champ principal ; ce champ résultant est seulement plus ou moins décalé par rapport au champ principal, comme du reste cela se produit dans un moteur à courant continu.

Dans le moteur à champ tournant, le champ magnétique du stator tourne, celui du rotor tourne également, mais reste fixe par rapport au premier, puisqu'il se déplace avec la même vitesse. Le champ magnétique développé par le rotor réagit sur celui du stator et il se produit un champ résultant et, de même que dans les transformateurs (§ 79), ce champ résultant reste presque constant, quelle que soit la charge. Lorsque l'intensité des courants développés dans le rotor croît par suite d'un plus grand glissement dû à une augmentation de la charge, le champ qu'ils développent augmente d'intensité ; celui du stator doit aussi prendre proportionnellement une intensité plus grande, afin que le champ résultant reste constant, résultat qui ne s'obtient que par une plus grande intensité du courant alimentant le moteur. En résumé, c'est toujours par une baisse de la force électromotrice induite par les variations du flux dans le stator que l'intensité du courant croît dans ce dernier ; cette baisse est due à la présence du circuit secondaire (rotor) sur lequel agit par induction mutuelle le circuit primaire (stator) (§ 22).

Donc, le moteur à champ tournant constitue un véritable transformateur. Les causes qui produisent l'augmentation de l'intensité du courant dans le circuit secondaire ou rotor sont différentes pour les deux appareils : glissement plus grand pour le moteur, impédance plus faible du circuit primaire pour le transformateur ; mais, essentiellement, le phénomène du transport de l'énergie d'un circuit à un autre se produit d'une manière identique et le mécanisme de l'autorégulation, si on peut s'exprimer ainsi, est aussi le même.

Le facteur de puissance du circuit du stator, dépendant du décalage en retard des intensités sur les tensions, est très faible lors du fonctionnement à vide, augmente graduellement avec la charge et peut atteindre une valeur

d'environ 0,90 à pleine charge pour les moteurs bien construits.

99. Insertion de résistances dans le rotor. — On a vu, dans le paragraphe 97, que, pour obtenir un couple moteur énergique au moment du démarrage, il était utile de donner aux spires du circuit induit une résistance ohmique suffisante pour combattre les effets nuisibles de la self-induction. Toutefois, dans la plupart des cas qui se présentent dans la pratique, il est nécessaire que le couple moteur maximum s'obtienne pour une vitesse atteignant presque celle du fonctionnement à vide, afin que, pour les limites extrêmes des variations de charge, le nombre de tours ne varie pas plus de 3 à 6 0/0; dans ces conditions, pour arriver à ce résultat, il faut donner au circuit induit une résistance assez faible.

Afin de concilier ces deux exigences, les moteurs industriels d'une certaine puissance ont un rotor constitué de manière que, au moment du démarrage, on puisse intercaler dans le circuit les résistances nécessaires que l'on supprime ensuite graduellement à mesure que la vitesse angulaire s'accroît et que l'on supprime totalement au moment où la vitesse maximum est atteinte.

A ce point de vue, le moteur à courant continu est certainement supérieur au moteur à champ tournant (en limitant la comparaison à un moteur à champ tournant dans lequel la tension du courant d'alimentation est maintenue constante), parce que, dans le moteur à courant continu, on peut donner au couple, lors du démarrage, une valeur aussi grande que l'on veut, en augmentant simplement la valeur de l'intensité du courant dans l'induit; il n'y a d'autre limite à cette augmentation d'intensité que celle qui est imposée par l'échauffement; l'on peut ainsi, sans inconvénient, tripler et même quadrupler le couple moteur normal. Dans les moteurs à champ tournant, en ce qui concerne le démarrage, les effets de la self-induction sont d'autant plus accentués que le moteur est plus puissant; c'est pourquoi, tandis que, dans les petits moteurs

jusqu'à 2 ou 3 chevaux, on peut supprimer les résistances en mettant l'enroulement du rotor en court circuit et en démarant à vide, dans les moteurs plus puissants, même en démarant à vide, l'emploi de résistances est indispensable, parce que le couple moteur, lors du démarrage, peut être tellement faible qu'il ne peut même pas être supérieur au couple résistance dû aux simples frottements. De plus, en procédant au démarrage d'un moteur puissant sans utiliser des résistances, il se produirait dans le rotor, par suite de la grandeur du glissement, des courants de très grande intensité qui exigeraient que le stator reçoive de la ligne des courants ayant une intensité au moins double ou triple de l'intensité normale. Cette augmentation d'intensité du courant d'alimentation ne pourrait se produire sans abaisser, d'une façon notable, la tension sur la ligne, inconvénient très grand si le même réseau alimente un service d'éclairage.

Par contre, le moteur à champ tournant, qui, comme le moteur à courant continu en dérivation, possède la propriété d'avoir une vitesse presque constante, quelle que soit la charge, présente sur le moteur à courant continu l'avantage de ne pas nécessiter de collecteur, organe toujours délicat et exigeant, dans certains cas, principalement lorsqu'il se produit de fortes étincelles, des réparations très onéreuses.

Comme les deux circuits d'un moteur à champ tournant ne dépendent l'un de l'autre qu'au point de vue magnétique, il est possible d'alimenter un des circuits par le courant d'une ligne à haute tension sans qu'il en résulte aucun danger pour celui qui est chargé de la surveillance, si ce circuit est celui du stator, dans lequel on n'a jamais de résistances à intercaler. Cette propriété est précieuse et peut contribuer notamment à la solution du très intéressant problème de la traction électrique appliquée aux grandes lignes de chemins de fer.

Les moteurs à champ tournant exigent qu'un soin tout particulier soit apporté à l'entretien des coussinets et des paliers, car, pour que ces moteurs aient un bon rendement, il est indis-

pensable de réduire l'entrefer au minimum que permet le fonctionnement mécanique (Voir § 97) et une usure de 1 mm seulement dans les coussinets peut causer un décentrage suffisant pour que le rotor frotte contre le stator, défaut dont on comprend toute l'importance et la gravité.

100. Constitution des moteurs polyphasés à champ tournant. — Les moteurs industriels à champ Ferraris (*fig. 184*) sont formés de deux anneaux concentriques, chacun d'eux étant

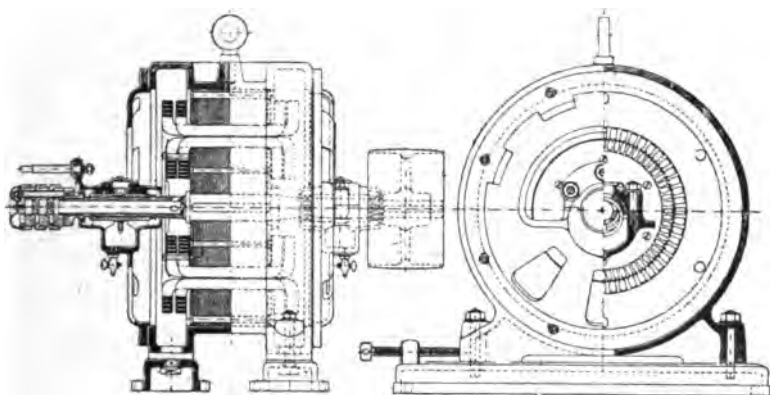


FIG. 184.

constitué par des paquets de tôles minces isolées entre elles par du papier ou du vernis. Ces rondelles sont d'une seule pièce dans les petits moteurs et formées de plusieurs segments dans les moteurs de grandes dimensions, afin d'éviter les pertes inutiles de matière.

La partie mobile ou rotor est concentrique au stator et se trouve à l'intérieur. Entre les deux organes, on laisse un entrefer très petit de 0,8 à 1,5 mm, ce qui exige une grande précision de construction, les supports devant être soigneusement ajustés; de plus, les coussinets doivent être en métal très dur afin de réduire leur usure au minimum.



FIG. 185.

La figure 185 représente le stator et le rotor d'un moteur asynchrone Siemens et Halske.

101. Stator. — On a vu, dans le paragraphe 62, que, si un champ tournant parfait se produit à travers des masses de fer séparées par un entrefer, le flux, dans cet entrefer, se distribue pratiquement d'une manière sinusoïdale. Pour obtenir ce résultat, il faudrait avoir recours à une grande quantité de courants polyphasés, de phases voisines, alimentant dans chaque champ une série de fils placés près de l'entrefer.

En pratique, les courants alternatifs sont au nombre de deux ou de trois et, dans certains cas, peuvent être au nombre de six (montage en triangle étoilé) lorsqu'un courant, après avoir parcouru un enroulement ouvert, se dédouble de manière que les deux modes de groupement se trouvent combinés (*fig. 186*). Les six courants ainsi obtenus sont décalés, l'un par rapport à l'autre, de 60° . Mais, comme dans le montage en triangle (enroulement fermé) l'intensité est $\sqrt{3}$ fois plus faible que dans le montage en étoile (enroulement ouvert), il est nécessaire de compenser cette différence d'intensité du champ produit par un plus grand nombre de spires, car cette intensité dépend, comme on le sait, du nombre d'ampères-tours.

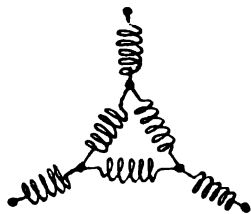


FIG. 186.

Le nombre de courants étant ainsi limité, on arrive assez bien à modifier le champ de manière à le rendre presque sinusoïdal dans l'entrefer, en subdivisant chaque faisceau de conducteurs actifs en plusieurs petits groupes, chacun d'eux étant logé dans un des trous ou des rainures pratiqués sur la périphérie intérieure du noyau annulaire. On arrive ainsi à obtenir que le flux tournant rencontre partout une réluctance presque constante.

La figure 187 représente un stator de moteur asynchrone triphasé dont chaque faisceau de conducteurs actifs est réparti dans trois trous.

Les moteurs à champ tournant sont tous multipolaires (§ 62); s'il en était autrement, à cause des fréquences usuelles, on



FIG. 187.

obtiendrait des vitesses angulaires excessives. L'enroulement inducteur est, à cause de cela, établi de manière à constituer deux ou plusieurs champs tournants. La vitesse angulaire du rotor est naturellement réduite en proportion, parce que chaque champ tournant parcourt l'arc de cercle occupé par la partie de l'enroulement qui lui est affectée en un temps correspondant à une période.

Les rainures pratiquées sur la périphérie intérieure du stator peuvent être circulaires, rectangulaires ou ovales (comme dans

les induits d'alternateurs) et sont généralement à demi fermées, au lieu de l'être complètement, pour éviter que le flux ne vienne à se fermer directement par la périphérie des trous (§ 69). Certains constructeurs, entre autres la Compagnie Westinghouse, logent les conducteurs du stator dans des rainures rectangulaires, ce qui leur permet de construire les bobines sur gabarit avant de les mettre en place et de leur donner un meilleur isolement; toutefois, ce mode de construction, toutes choses égales d'ailleurs, diminue notablement la section utile pour le passage du flux. D'un autre côté, il permet de remplacer facilement une section défectueuse, ce qui est un avantage principalement pour les moteurs destinés à la traction; dans ce cas, on peut employer l'enroulement en anneau (*fig. 188*), qui est, incontestablement, celui qui se prête le mieux aux réparations.

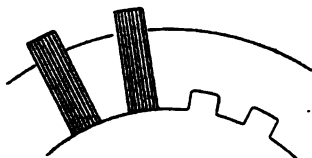


FIG. 188.

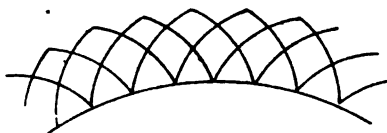


FIG. 189.

L'enroulement peut aussi être constitué par des barres toutes les fois que la tension du réseau d'alimentation est assez basse et le moteur très puissant. Les connexions entre les diverses sections, que l'enroulement soit constitué par des spires ou par des barres, sont faites comme dans les enroulements en tambour, sauf en ce qui concerne le cas, cité plus haut, de l'enroulement en anneau. A cet effet, les conducteurs sont reliés entre eux, sur les côtés du noyau annulaire du stator, soit par l'intermédiaire d'arcs de cercle, soit par l'intermédiaire de développantes (*fig. 189*), mais disposés de façon que chaque enroulement particulier reste parfaitement isolé des autres.

Le stator comporte autant de circuits que de phases et ces circuits sont groupés entre eux en étoile ou en triangle.

Toutefois, il est toujours possible, à l'aide d'un commutateur, de passer d'un système de groupement à l'autre ; on peut alors faire varier le nombre des ampères-tours dans le rapport de 1 à $\sqrt{3} = 1,73$, pour chacun des circuits, ce qui peut présenter des avantages pour obtenir un couple moteur plus énergique dans certaines conditions, pour le démarrage par exemple.



FIG. 190.

Il est inutile de donner ici de plus amples détails sur la construction du stator ; il suffit d'ajouter que les paquets d'anneaux de tôle sont maintenus, sur chaque face, par un anneau plus épais ; l'ensemble est enfermé dans une carcasse en fonte en deux pièces, dont l'intérieur est muni de joues qui maintiennent le noyau. Les deux pièces de la carcasse sont assemblées et maintenues par des boulons. Dans les petits moteurs, la carcasse en fonte porte, venus de fonte, les paliers destinés à recevoir l'arbre du rotor. Cette carcasse est percée de larges ouvertures destinées à faciliter la ventilation nécessaire pour dissiper la chaleur produite par l'hystérésis, les courants de Foucault et l'effet Joule. Dans certains cas, afin de faciliter le refroidissement et aussi pour consolider la carcasse du stator, cette dernière porte extérieurement des nervures (*fig. 190*).

Il est rare que le cas se présente d'avoir à modifier les circuits du stator. Il est donc possible de relier ce dernier directement à la ligne, sans avoir recours à l'intermédiaire de balais et de bagues de prise de courant ; dans ces conditions, la tension du courant alimentant le moteur peut être aussi élevée que l'on veut et il n'y a aucun inconvénient à relier directement un moteur à champ tournant à une canalisation à haute tension, sans passer par l'intermédiaire d'un transformateur. Cette propriété constitue, en dehors des autres, un avantage appréciable pour les moteurs polyphasés asynchrones, propriété qu'ils partagent du reste avec les moteurs synchrones. Il existe en fonctionnement des moteurs polyphasés asynchrones de puissance moyenne, 50 chevaux par exemple, qui sont alimentés directement par une canalisation à 3 000 volts et même plus.

102. Rotor. — On sait qu'un cylindre creux en cuivre, placé dans un champ tournant, se met à tourner sous l'action des courants parasites qui se développent en lui (§ 100). Le même résultat peut être obtenu en faisant tourner autour

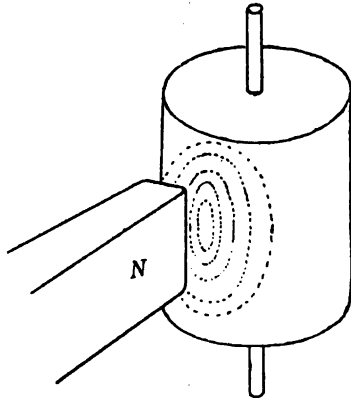


FIG. 191.

de ce cylindre un aimant permanent, comme le montre la figure 191, dans laquelle est représenté seulement un des pôles (Nord). Les courants induits dans le cylindre développent constamment un pôle Sud sur sa surface et, en vertu de l'attraction produite entre ces deux pôles de noms contraires, le cylindre a tendance à suivre le pôle de l'aimant dans son mouvement.

Il est facile de voir que l'on obtiendra un meilleur résultat en obligeant le courant à suivre un parcours bien déterminé, vertical et horizontal, en pratiquant dans le cylindre de cuivre

des ouvertures verticales (*fig. 192*), c'est-à-dire en réalisant une série de conducteurs longitudinaux reliés, à chacune de leurs extrémités, par un anneau métallique. Si on place un rotor ainsi constitué sur un noyau de fer, on améliore considérablement les conditions du circuit magnétique, puisque, avec un même nombre d'ampères-tours dans le stator, le champ tournant dans l'entrefer est rendu beaucoup plus intense.

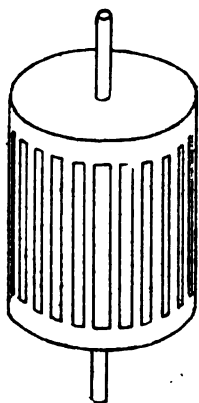


Fig. 192.

Le champ intense ainsi obtenu donne non seulement naissance à des courants induits de plus grande intensité, mais permet encore de développer un couple moteur plus énergique.

Un simple cylindre massif de fer pourrait aussi servir de rotor, étant donné la basse fréquence des courants induits qui s'y développent; mais la conductance relativement faible du fer limiterait dans une large mesure l'intensité des courants induits. C'est pourquoi il est préférable de prendre un noyau de fer feuilleté, convenant beaucoup mieux

qu'un noyau massif au point de vue magnétique, et de développer les courants induits dans des conducteurs en cuivre qui doivent être soigneusement isolés du noyau.

Il est facile de voir que l'on peut encore perfectionner ce dispositif en obligeant les courants induits par un pôle à fermer leurs circuits par des trajets également utiles au point de vue mécanique. Ainsi, dans un moteur à champ tournant unique, le courant induit par un pôle dans une partie de la spire placée sous l'action du flux qu'il développe, passe également dans le conducteur qui lui est relié pour compléter la spire, conducteur placé à 180° du premier (comme dans un moteur bipolaire à courant continu avec enroulement en tambour) et qui se trouve alors soumis au flux du pôle de nom contraire; dans ces conditions, les deux conducteurs longitudinaux de la spire contribuent à développer le couple

moteur. Si le moteur comporte quatre pôles, l'arc sous-tendu par les spires est de 90° et, s'il en comporte six, cet arc est de 60° et ainsi de suite.

Ce mode de construction de l'enroulement avec spires présente aussi l'avantage de permettre l'insertion convenable de résistance dans le circuit, ce qui, comme on le verra, est quelquefois absolument indispensable.

Ces deux modes de construction sont appliqués dans les rotors des moteurs à champ tournant, car ces rotors peuvent être constitués, soit avec des conducteurs dont les extrémités sont toutes reliées ensemble d'un côté et de l'autre à l'aide de deux anneaux de cuivre de grande section, et on réalise alors le type dit *en cage d'écureuil* ou *en court circuit*, soit avec des conducteurs ou spires convenablement reliés entre eux, et l'on a alors le type dit *à enroulement*.

Dans un cas comme dans l'autre, les conducteurs ou les groupes de conducteurs sont logés dans des trous pratiqués sur le pourtour de la périphérie du noyau du rotor (*fig. 193*); mais on évite que le nombre de trous du rotor soit égal à celui des trous du stator; il faut, au contraire, calculer ces deux nombres pour qu'ils n'admettent jamais un diviseur commun. Cette précaution est indispensable afin d'éviter que, par suite d'une parfaite symétrie des deux enroulements, la tendance à se mettre en mouvement soit trop faible ou nulle, au moment du démarrage, car alors le moteur fonctionnerait comme un simple transformateur statique. Grâce à la dissymétrie des courants, on développe, dès le début du démarrage, un couple moteur énergétique.

Le type à cage d'écureuil ne nécessite pas d'explications particulières; il est couramment employé pour les moteurs de

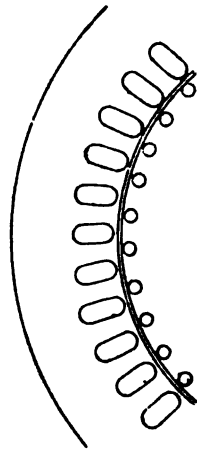


FIG. 193.

faible puissance et, dans quelques cas, pour des moteurs puissants, à cause de sa solidité mécanique et de l'absence complète de bagues de contact et de balais.

On voit, dans le bas et à gauche de la figure 194, l'aspect extérieur d'un rotor de ce type.

On peut démontrer, en ce qui concerne le rendement, que les deux types sont équivalents ; mais, lorsqu'il est nécessaire de

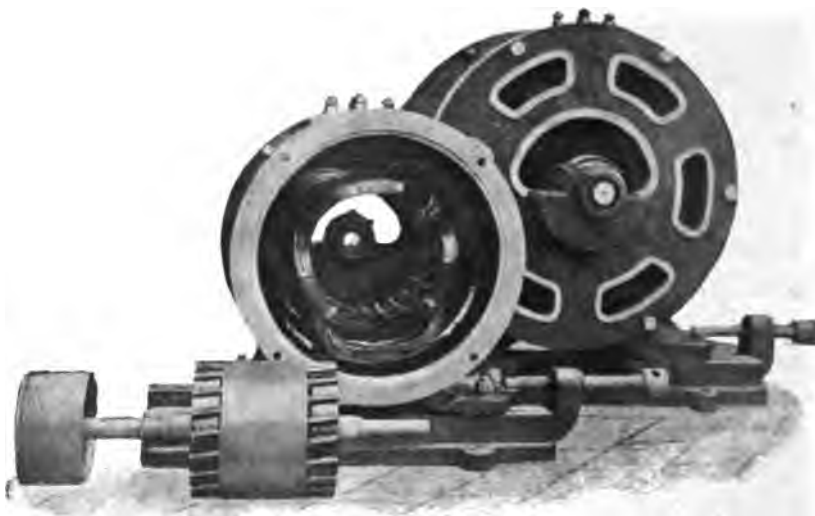


FIG. 194.

pouvoir intercaler des résistances dans le circuit du rotor, le type à enroulement est alors le seul que l'on puisse utiliser.

Les modes de groupement des spires ou de groupes de spires peuvent être très divers, mais l'enroulement en tambour est celui qui est habituellement employé. Ordinairement, le rotor est enroulé d'après le même système que le stator ; si le stator comporte un enroulement triphasé, le rotor est également à enroulement triphasé.

La figure 195 montre le circuit d'une phase de rotor pour moteur à champ tournant à 6 pôles (3 champs polaires) ; les conducteurs 2, 5, 8..., etc., 3, 6, 9..., etc., ne sont pas représentés sur la figure et appartiennent aux deux autres phases qui

s'intercalent entre les premières. Par conséquent, il y a au total 18 conducteurs actifs, ou bien 18 faisceaux de conducteurs et, dans ce dernier cas, chaque faisceau peut occuper deux ou trois trous.

Dans le cas où l'enroulement est constitué par des spires, celles qui sont numérotées dans la figure 195 sont les conducteurs terminaux ; mais, entre les conducteurs 7 et 10, par

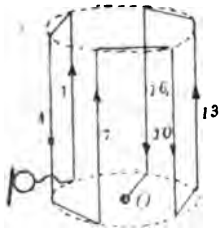


FIG. 195.

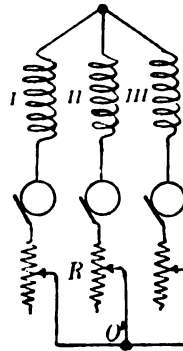


FIG. 196.

exemple, on peut enrouler un grand nombre de spires avant de passer à l'élément 13-16. Il en est de même pour ce qui concerne les autres groupes (Voir *fig.* 134).

Les trois extrémités finales 16-17-18 des circuits sont reliées ensemble en un point O sur le rotor ; les trois extrémités initiales 1-2-3 sont reliées respectivement à trois bagues métalliques fixées sur l'arbre, isolées entre elles et de l'arbre, et sur chacune desquelles appuie un balai (*fig.* 196). Les trois balais sont en communication avec un point O' à travers des résistances R que l'on peut faire varier simultanément par la manœuvre de contacts glissants.

Au moment du démarrage, on insère toutes les résistances, puis on les diminue graduellement à mesure que la vitesse angulaire augmente et enfin on les supprime complètement une fois la mise en route effectuée. Alors les trois extrémités initiales des circuits restent reliées entre elles par l'intermédiaire du point O' ; par suite, ces trois circuits se trouvent dans

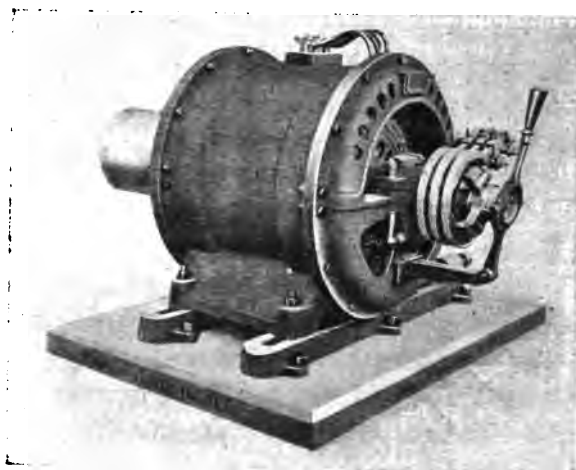


FIG. 197.



FIG. 198.

les mêmes conditions que les conducteurs d'un rotor du type en cage d'écureuil.

Les résistances employées, n'étant utilisées seulement que pendant quelques instants au moment du démarrage, peuvent être constituées par une dissolution de carbonate de sodium (résistance liquide).

Les deux figures 197 et 198 représentent un moteur des Ateliers d'Oerlikon et un moteur de la maison Brown-Boveri munis du dispositif permettant de mettre les enroulements directement en court circuit sur le rotor.

103. Démarrage des moteurs à champ tournant. — On a vu déjà que le rotor, dans ses conditions normales de fonctionnement, ne développe, lors du démarrage, qu'un couple moteur assez faible à cause d'un décalage de phase assez important; l'on a indiqué également comment on peut éviter cet inconvénient en intercalant des résistances dans le circuit du rotor au moment du démarrage, résistances que l'on supprime ensuite graduellement.

Mais l'insertion de résistances exige une certaine manœuvre et, dans beaucoup de cas, lorsque le fonctionnement du moteur est intermittent, cette manœuvre peut être incommode et onéreuse. En outre, elle entraîne une certaine complication, puisqu'il faut munir le rotor de bagues de contact et de balais. Il serait préférable évidemment de n'être pas obligé d'avoir recours à ces procédés et ce résultat peut être obtenu de diverses manières.

Le plus simple de ces moyens consiste à rendre les enroulements du rotor un peu résistants, en les fermant en court circuit à travers une résistance de nickeline ou en employant des connexions en nickeline pour établir les liaisons de conducteur à conducteur. Dans ces conditions, lors du démarrage, le couple moteur prend une valeur notablement plus élevée, mais reste en dessous du maximum que l'on pourrait atteindre; il s'ensuit que le rendement diminue légèrement, les pertes par effet Joule étant plus fortes et la différence de vitesse entre le

fonctionnement à vide et le fonctionnement à pleine charge devenant plus considérable (Voir § 110). Malgré cela, ce procédé est largement utilisé dans le cas où les moteurs doivent être mis en marche à distance et où l'on peut tolérer une brusque variation de l'intensité dans le réseau d'alimentation au moment où l'on procède au démarrage.

En exagérant beaucoup la valeur des résistances, on peut atteindre le cas limite pour lequel le couple moteur est maximum lors du démarrage, procédé que l'on utilise pour les moteurs actionnant des élévateurs, des grues, etc., appareils pour lesquels le couple résistant est toujours maximum au début du mouvement.

Dans tous les autres cas, qui sont du reste ceux qui se rencontrent le plus fréquemment dans la pratique, on peut procéder d'une manière différente.

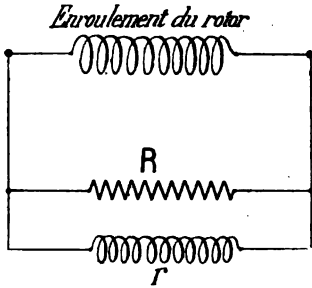


FIG. 199.

La maison Krizik de Prague emploie le procédé Fischer-Hinnen, qui consiste à mettre d'une façon permanente deux résistances en dérivation sur chacun des circuits du rotor; l'une de

ces résistances est très grande et est dépourvue de self-induction, tandis que l'autre est très faible et possède une grande self-induction (*fig. 199*).

Au démarrage, la fréquence des courants dans le rotor est la même que celle des courants qui alimentent le stator, parce que le moteur se comporte comme un transformateur dont le circuit secondaire serait fermé. A ce moment, l'impédance que présente la résistance inductive est très grande et agit comme le ferait une grande résistance ohmique, empêchant les courants de prendre une intensité exagérée; l'ensemble des deux résistances R et r se comporte comme le feraient deux fortes résistances ohmiques groupées en parallèle. Le fort décalage de phase qui tend à se produire lors du démar-

rage est partiellement empêché par la grande résistance R .

A mesure que la vitesse du rotor augmente, l'impédance de la bobine inductive diminue, parce que la fréquence des courants qui la parcourent baisse (§ 22), le glissement diminuant graduellement et la forte résistance ohmique se trouvant en dérivation avec une résistance apparente dont la valeur décroît progressivement.

Enfin, lorsque la vitesse de régime est atteinte, la résistance totale apparente du système est sensiblement égale à la résistance purement ohmique de la bobine inductive, parce que la fréquence des courants dans le rotor est proportionnelle au glissement et devient très faible, environ 2 à 3 périodes par seconde. Dans ces conditions, la résistance totale apparente est très petite et ses effets sont presque négligeables.

Les résistances R et r , occupant très peu de place, peuvent être disposées directement sur le rotor, puisqu'elles restent toujours dans le circuit et que l'on évite ainsi l'emploi de bagues de contact et de balais. Si on les installe en dehors du rotor, il faut nécessairement avoir recours à des balais et à des bagues de contact, mais il n'y a aucune manœuvre à faire et les moteurs peuvent facilement être mis en marche à distance.

Ce procédé entraîne, il est vrai, une légère augmentation du facteur de puissance et une petite augmentation du glissement, mais ces inconvénients sont suffisamment compensés par les avantages signalés.

La maison Siemens et Halske a supprimé les résistances de démarrage, mais son système nécessite la manœuvre d'un commutateur placé sur le rotor même.

Le rotor d'un moteur triphasé porte deux enroulements triphasés parfaitement distincts, l'un d'eux ayant un nombre de spires inférieur à celui de l'autre (*fig. 200*). Les deux enroulements sont montés en étoile et, lors du démarrage, ils sont réunis par le point neutre et les spires correspondantes

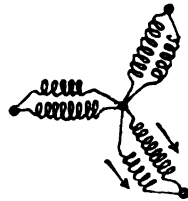


Fig. 200.

des deux enroulements sont, dans chaque phase, reliées par leurs extrémités libres. Les forces électromotrices dans les circuits parallèles étant opposées, la force électromotrice résultante fait circuler un courant dont l'intensité est celle que l'on aurait obtenue par une simple augmentation de résistance du circuit. Le démarrage effectué, les connexions sont modifiées de manière que les forces électromotrices des deux enroulements parallèles s'ajoutent en mettant en court circuit les extrémités de chaque paire d'enroulements. Cette manœuvre peut être rendue automatique, à l'aide d'un dispositif à force

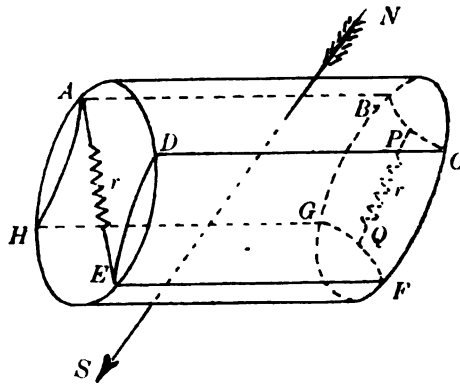


FIG. 201.

centrifuge qui actionne le commutateur dès que la vitesse a atteint une certaine valeur.

Dans les moteurs Déri, à grand couple de démarrage, construits par la maison Ganz, le nombre des pôles de l'inducteur peut être modifié et l'induit ou rotor est muni de résistances qui deviennent actives ou inactives suivant précisément le nombre de pôles de l'inducteur.

Le principe de ce type de moteur est le suivant : Soit une spire double A, B, C, D, E, F, G, H, mobile dans un champ magnétique NS (*fig.* 201). Si les résistances r, r n'existaient pas, il ne se produirait aucun courant dans la spire, parce que les forces électromotrices induites dans chacun des conducteurs qui la constituent se neutraliseraient mutuellement.

Réciproquement, si la spire se trouve dans un champ tournant, par le fait qu'il ne se développe point de courants induits, il n'y a pas de couple moteur et l'induit ne se met pas en mouvement.

Mais, si les points A, E et P, Q sont reliés entre eux par une résistance, les forces électromotrices produites ne s'annulent plus, des courants circulent dans les conducteurs, le couple moteur est développé et le rotor commence à tourner. Comme les forces électromotrices induites ont une valeur très grande à cause du grand glissement au départ, on peut obtenir un couple moteur extrêmement énergique en employant des résistances convenables.

Lorsque le moteur a atteint une certaine vitesse, on modifie les connexions de l'inducteur à l'aide d'un commutateur, de façon à produire deux champs tournants au lieu d'un ; dans ces conditions les résistances r sont rendues inertes, parce que les deux spires, constituant la spire double considérée, se comportent de la même manière par rapport aux deux champs tournants, les points A et E étant au même potentiel ainsi que les points P et Q. La spire fonctionne alors comme une spire quelconque en court circuit d'un moteur à champ tournant.

Ce système de démarrage permet de supprimer les bagues de contact et les balais, mais il exige une manœuvre à faire sur l'inducteur, manœuvre que l'on peut rendre automatique avec un dispositif à force centrifuge qui actionne le commutateur lorsque la vitesse angulaire a atteint une valeur presque égale à la valeur normale.

Un autre procédé pour obtenir un couple moteur énergique lors du démarrage est fondé sur la possibilité de compenser les importantes fuites magnétiques qui, au moment du démarrage, réduisent notablement l'intensité du champ utile pour la production du couple moteur. On compense ces fuites magnétiques par un nombre plus grand d'ampères-tours sur le stator et cela en groupant les trois circuits en triangle, tandis que, pour le fonctionnement normal, ces trois circuits

sont montés en étoile. Cela revient à augmenter dans le rapport de 1 à $\sqrt{3}$ la tension du courant qui alimente le moteur. En réalité, avec le montage en triangle, chacun des circuits est alimenté sous une différence de potentiel de $\sqrt{3} V$, si V est la valeur de la tension du circuit d'alimentation lorsque les circuits sont montés en étoile. Avec ce procédé, il est également indispensable d'effectuer une manœuvre, mais on peut la rendre automatique.

D'autres procédés ont été imaginés pour faciliter le démarrage des moteurs polyphasés à champ tournant, mais il suffit ici d'avoir indiqué les principaux, qui ont, du reste, reçu la sanction de la pratique.

On voit qu'avec les divers dispositifs qui viennent d'être décrits, il est possible de rendre un moteur à champ tournant aussi pratique qu'un moteur à courant continu. On peut, en effet, obtenir au démarrage un couple moteur égal et même supérieur au couple normal et faire démarrer sûrement le moteur, même avec sa pleine charge, sans qu'il soit nécessaire que le stator emprunte à la ligne d'alimentation des courants d'intensité exagérée. Toutefois, il y a certaines précautions particulières à prendre, lors du démarrage, pour les moteurs à champ tournant alimentés par un réseau d'éclairage.

104. Vitesse angulaire des moteurs à champ tournant.

— On a déjà dit que les moteurs polyphasés sont généralement multipolaires, c'est-à-dire qu'ils ont plusieurs champs tournants, chacun d'eux se déplaçant de l'arc correspondant au temps de la période des courants alternatifs.

Si le moteur présente trois champs tournants (*fig. 202*), la vitesse angulaire exprimée en tours par seconde est égale à $\frac{f}{3}$, f étant la fréquence des courants alternatifs qui l'alimentent.

D'une manière générale, le nombre de tours est inversement proportionnel au nombre de champs. En disposant d'une manière convenable les connexions des circuits du stator, il est possible de réduire le nombre de champs tournants et,

par conséquent, la vitesse angulaire du moteur. Mais, si ce procédé est utilisé pour obtenir plusieurs vitesses différentes, par exemple $1/2$, $1/3$, $1/4$, etc., de la vitesse normale, il en résulte une grande complication pour le moteur; c'est pourquoi, en pratique, on ne l'applique que pour réduire la vitesse de moitié. De plus, il est indispensable, pour pouvoir utiliser ce dispositif, que le stator soit enroulé en anneau.

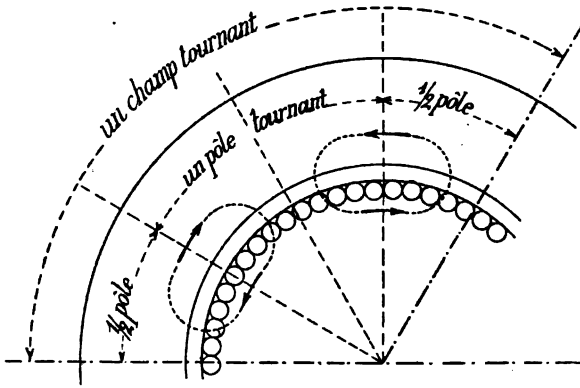


FIG. 202.

Indépendamment de la possibilité que l'on a de faire fonctionner ce genre de moteur à deux ou trois vitesses angulaires différentes, suivant le nombre de champs tournants inducteurs, on sait que le nombre de tours varie d'une manière plus ou moins sensible avec l'augmentation de la charge. Le rotor ne peut jamais tourner synchroniquement avec les champs inducteurs, puisque le glissement est une condition indispensable du fonctionnement de la machine comme moteur. On verra, dans le chapitre xiv du tome II, quels sont les phénomènes qui se produisent lorsque le glissement change de signe, c'est-à-dire lorsqu'on fournit de l'énergie mécanique au rotor pour le faire tourner à une vitesse angulaire supérieure à celle des champs tournants.

Le glissement, variant d'après la charge, est la cause que la vitesse angulaire d'un moteur à champ tournant ne peut être maintenue rigoureusement constante. Toutefois, comme dans

les moteurs de grande puissance, de 100 chevaux et plus, les variations de vitesse angulaire entre le fonctionnement à vide et le fonctionnement à pleine charge ne dépassent pas 1,5 0/0 et que, dans les petits moteurs, ces variations sont d'environ 3 0/0 seulement, on peut dire que, pratiquement, la vitesse de ces moteurs reste sensiblement constante.

Si l'on veut, intentionnellement, faire varier cette vitesse dans des limites plus étendues, on peut procéder de plusieurs manières.

On donne, par exemple, un peu plus de résistance au circuit du rotor; dans ces conditions, en consentant une légère perte dans le rendement, l'on arrive à obtenir des variations de vitesse de 10 0/0 et plus, la vitesse dépendant alors de la charge. Si on veut rendre la vitesse indépendante de la charge, il faut alors avoir recours à des rhéostats réglables installés en dehors du moteur. Il est intéressant de remarquer que le couple moteur maximum ne change pas pour cela (*fig.* 182), mais se maintient pour une vitesse décroissant graduellement, au fur et à mesure que la résistance insérée augmente de valeur. Il est presque superflu de faire remarquer que les rhéostats à employer dans ce cas, surtout si les moteurs sont assez puissants, sont très lourds, parce que les courants qui circulent dans le rotor ayant une grande intensité, à cause de la très faible résistance des enroulements, il faut que les résistances soient établies avec des fils de grosse section pour éviter qu'ils ne soient portés à la température du rouge ou du moins à un échauffement excessif.

En insérant un rhéostat dans le circuit du rotor, les variations graduelles de vitesse sont obtenues complètement, mais au prix d'une grande diminution de rendement, sans toutefois atteindre la valeur de celle qu'entraîne la modification du nombre de champs polaires. Lorsqu'on peut modifier la fréquence, la vitesse varie également sans qu'il soit nécessaire de rien changer dans les circuits; mais, en pratique, la fréquence est constante, c'est pourquoi, tout bien examiné, le meilleur procédé à employer et le seul réellement possible

consiste à utiliser un rhéostat dans le circuit du rotor, malgré la dépense que cela entraîne et les complications qui en résultent.

Dans le cas où l'on dispose de deux moteurs, une autre solution du problème est possible; elle est due à l'ingénieur Görges de la maison Siemens et Halske et est désignée sous le nom de *disposition en tandem* ou *en cascade*.

Avec ce dispositif, on peut réduire de moitié la vitesse normale du moteur, à la condition toutefois que les deux moteurs soient reliés mécaniquement. Dans ces conditions, on réalise celles des deux moteurs d'une voiture automotrice de tramway alimentée par une distribution d'énergie électrique à courants polyphasés.

Le principe sur lequel est fondé ce dispositif est le suivant : on a déjà expliqué (§ 103) que les courants développés dans le rotor d'un moteur à champ tournant avaient une fréquence très basse (2 à 3 environ). Ces courants, étant polyphasés, peuvent être utilisés pour alimenter le stator d'un second moteur dont le rotor peut être du type à court circuit ou du type avec résistances. Si les deux moteurs sont indépendants au point de vue mécanique, l'un d'eux tourne à une vitesse angulaire dont la valeur est presque égale à celle du synchronisme, tandis que l'autre a une vitesse très petite; mais, si ces moteurs sont reliés par un accouplement rigide, c'est-à-dire si tous deux agissent simultanément sur un même ensemble constituant le couple résistant, il doit se produire un équilibre entre les deux vitesses différentes et l'ensemble prend une vitesse résultante unique. Le moteur qui a la plus grande vitesse ralentit et l'autre tourne plus vite. On démontre, et l'expérience confirme, que la vitesse résultante a une valeur qui est la moitié de la vitesse normale, ce qu'il est, du reste, facile de comprendre pour peu que l'on y réfléchisse.

Ce dispositif a été proposé pour l'application des courants polyphasés à la traction électrique sur les chemins de fer, car on peut obtenir un couple moteur supérieur au couple normal avec une vitesse angulaire réduite de moitié. Toutefois, ce

procédé n'est pas exempt d'inconvénients, c'est pourquoi ses applications pratiques sont peu nombreuses (Voir tome II, chap. xiv).

105. Facteur de puissance et rendement des moteurs polyphasés à champ tournant. — On a fait remarquer, dans le paragraphe 98, qu'un moteur à champ tournant se comporte comme un véritable transformateur en ce qui concerne les réactions qui se produisent entre le stator et le rotor. Aussi retrouve-t-on, dans ce type de moteur, un champ magnétique résultant qui tourne, puisqu'il est produit par trois courants alternatifs; c'est pourquoi le courant qui alimente le moteur comporte une composante magnétisante, dont l'intensité reste constante quelle que soit la charge, et une composante active, dont l'intensité croît graduellement avec la charge en partant d'une valeur minimum qui correspond aux diverses pertes lors du fonctionnement à vide (frottements, effets d'hystérésis, courants de Foucault, effet Joule).

La même chose se produit dans un moteur à courant continu en dérivation, puisque la quantité de courant fournie par la ligne qui l'alimente peut être divisée en deux parties : l'une dont l'intensité reste constante et qui est le courant d'excitation, l'autre dont l'intensité varie suivant la charge et qui alimente l'induit. La seule différence consiste dans ce fait que, dans le moteur d'induction, les deux courants, décalés l'un par rapport à l'autre de $1/4$ de période, circulent tous deux dans le stator.

On voit que, comme dans un transformateur, le courant alimentant le moteur est décalé par rapport à la tension agissante. Mais, tandis que dans le transformateur, par suite de la forme du circuit magnétique avec entrefer très petit, il suffit d'un courant magnétisant d'intensité très faible (quelques pour cent) pour produire le champ, tellement faible qu'à partir du moment où le transformateur fonctionne à demi-charge, le retard de phase dû au courant magnétisant est pratiquement négligeable, dans le moteur asynchrone, où le flux

de chaque phase doit traverser un entrefer d'au moins 1 mm, soit au minimum 2 mm pour le parcours total du flux, le courant magnétisant nécessaire représente environ 30 0/0 du courant total à pleine charge et, par conséquent, ne peut pas être considéré comme négligeable, même à charge complète.

On sait que le facteur de puissance, très faible lors du fonctionnement à vide, 0,20 à 0,25, atteint avec la charge jusqu'à 0,8 à 0,9. Les moteurs de grande puissance, de 200 chevaux et plus, atteignent rarement 0,95 à pleine charge; pour les petits moteurs, on ne dépasse guère 0,70 à 0,75.

On ne saurait trop répéter que le décalage de l'intensité par rapport à la tension est nuisible, parce qu'il occasionne dans tous les conducteurs de l'installation, depuis le moteur, lui compris, jusqu'à l'alternateur, des pertes par effet Joule plus considérables que celles que produiraient les seuls courants actifs; en outre, la composante qui se produit réagit, aussi bien dans les transformateurs que dans les génératrices, pour affaiblir le champ utile ainsi que la tension agissante, de manière à produire une baisse notable de puissance. Des deux actions produites, effet Joule et composante réactive, c'est la dernière qui est la plus nuisible, car elle peut réduire de 1/3 et même plus la puissance d'une installation.

Les deux effets nuisibles qui viennent d'être signalés peuvent être évités en installant en des points déterminés des condensateurs ou des moteurs synchrones capables de fournir le courant magnétisant nécessaire aux moteurs asynchrones (Voir § 46 et 94). Il est à prévoir que la construction des condensateurs industriels sera l'objet de perfectionnements importants qui permettront de les utiliser largement pour cette application.

La figure 203 est un diagramme donnant les valeurs successives de la puissance efficace et de la puissance apparente, relevées par l'auteur, d'un moteur triphasé de la maison Brown, Boveri et C^{ie}, de 8 chevaux, à quatre pôles (2 champs tournants) et de fréquence 42. Il y a lieu de remarquer que la courbe du facteur de puissance, dont la valeur pour le fonc-

tionnement à vide n'est que 0,15, s'élève jusqu'à 0,90 pour le fonctionnement avec la charge maximum.

Une autre constatation importante est que la courbe de la puissance effective est presque une droite, au moins jusqu'à la pleine charge; le segment qu'elle intercepte sur l'axe vertical

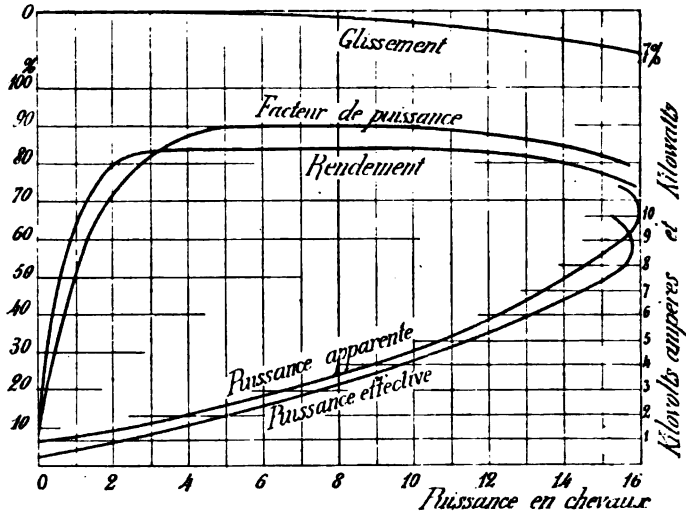


FIG. 203.

donne la valeur de la puissance absorbée à vide. L'influence de la composante magnétisante est clairement mise en évidence par les deux courbes de la puissance, qui, un peu éloignées l'une de l'autre au début, vont graduellement en se rapprochant jusqu'à la charge normale pour ensuite s'écarter de nouveau l'une de l'autre. La courbe du rendement monte d'abord rapidement, puis lentement, atteignant le maximum 0,86 pour la puissance de 8 chevaux (moitié environ de la puissance maximum du moteur). En surchargeant le moteur, lorsque cela est possible, le rendement diminue.

Généralement, un moteur asynchrone peut supporter une surcharge de 40 à 50 0/0 et même plus, c'est-à-dire jusqu'au moment où le couple moteur atteint son maximum; ce point dépassé, comme on l'a déjà exposé, le moteur n'est plus dans

les conditions de stabilité voulues et il s'arrête. Le rendement baisse notablement lorsque le moteur fonctionne au maximum de charge.

La courbe de rendement des moteurs à champ tournant a toujours une allure analogue à celle que donne le moteur dont il vient d'être question. Cela prouve que le rendement de ce genre de moteurs est déjà bon pour une charge dont la valeur est très éloignée du maximum pour lequel le moteur a été calculé. Un rendement de 0,9 pour une charge normale (un peu inférieure au maximum) est obtenu facilement pour des moteurs de puissance moyenne bien construits. Dans les moteurs puissants, un rendement de 0,93 à 0,94 est quelquefois atteint.

Le fait que ces moteurs ont un bon rendement, même en fonctionnant à charge partielle, les rend aptes, comme les moteurs à courant continu excités en dérivation, à être utilisés dans tous les cas où le travail qu'on leur demande est essentiellement variable et reste en moyenne inférieur au maximum qu'ils peuvent parfois supporter.

CHAPITRE XV

MOTEURS ASYNCHRONES A COURANT ALTERNATIF SIMPLE

106. Moteurs asynchrones à collecteur. — On sait que, dans un moteur à courant continu excité en série, si l'on inverse le sens du courant aussi bien dans l'inducteur que dans l'induit, la direction du couple moteur ne change pas et le moteur continue à tourner dans le même sens. On peut donc alimenter un moteur à courant continu excité en série avec un courant alternatif, à la condition toutefois que le noyau de l'inducteur soit feuilleté.

Ce genre de moteur présente l'avantage, que n'ont pas les autres moteurs à courant alternatif simple, de démarrer spontanément en développant un couple moteur énergétique. Mais, par contre, par suite de sa grande self-induction, il a un facteur de charge très faible qui diminue considérablement la puissance qu'il pourrait développer s'il était alimenté par du courant continu. De plus, les variations périodiques du courant produisent de fortes réactions de self-induction qui donnent lieu à une considérable production d'étincelles au collecteur, lors du démarrage.

Comme ce moteur peut fonctionner à n'importe quelle vitesse, il rentre dans la catégorie des moteurs asynchrones.

D'après ce qui précède, on voit que les moteurs de ce type ne peuvent être considérés comme des moteurs industriels, parce qu'ils manquent, entre autres parmi les qualités requises,

de celle d'avoir un bon rendement. Toutefois, il est certains cas dans lesquels ils peuvent être utilisés : par exemple, lorsqu'il s'agit d'obtenir un travail intermittent, tel que le fonctionnement d'un ascenseur, d'un monte-charge ou le démarrage de grands moteurs synchrones ou autres. La question de rendement est alors absolument secondaire et l'emploi de ces moteurs se trouve parfaitement justifié, puisqu'il permet d'éviter toute complication dans l'installation.

Tout ce qui précède concerne le fonctionnement d'un moteur à courant continu, excité en série et alimenté par un courant alternatif simple de fréquence ordinaire (40 à 50 périodes par seconde). De récentes expériences systématiques, effectuées par le Dr Finzi de Milan, ont permis de constater qu'en diminuant convenablement la fréquence jusqu'à 15 à 20 périodes et en construisant le moteur de manière que la réluctance du circuit magnétique correspondant au flux de l'induit soit très grande, la production d'étincelles au collecteur est réduite dans des proportions qui la rendent pratiquement acceptable, et le facteur de puissance, pour une charge normale, atteint presque celui du moteur d'induction polyphasé.

Dans ces conditions, il est à prévoir que le moteur à collecteur, excité en série et alimenté par du courant alternatif simple à basse fréquence, est susceptible de se prêter à des applications importantes, d'autant plus qu'il réaliserait le type de moteur idéal pour la traction électrique. En effet, ce moteur réunit tous les avantages que présente le moteur à courant continu et cela sans aucune exception ; de plus, il peut être alimenté directement par une canalisation à haute tension, sans qu'il soit nécessaire d'abaisser la tension du courant, avant son arrivée au moteur, à l'aide d'un transformateur installé sur la voiture. Enfin, lors du démarrage, il y aurait très peu d'énergie perdue en employant une bobine de réactance ayant un nombre de spires que l'on peut faire varier à volonté pour réduire la tension au lieu d'utiliser la résistance ohmique ordinairement employée avec les moteurs à courant continu.

Les moteurs asynchrones à courant alternatif simple peuvent fonctionner également lorsqu'ils sont excités en dérivation; ils nécessitent alors certaines dispositions spéciales afin d'éviter que le retard de phase produit par l'inducteur, qui diffère de celui dû à l'induit, ne nuise au développement du couple moteur.

107. Moteurs asynchrones d'induction à courant alternatif simple. — C'est Charles Brown qui, le premier, a pu construire pratiquement des moteurs à courant alternatif

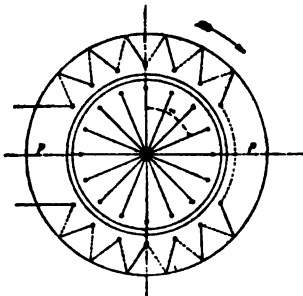


Fig. 204.

simple, en appliquant les mêmes procédés que ceux qui sont suivis dans la construction des moteurs polyphasés. Le stator est identique à ceux des moteurs à champ tournant, mais ne comporte qu'un seul enroulement (*fig. 204*) qui produit un champ alternatif; le rotor, également identique à ceux des moteurs à champ tournant, marche à

une vitesse angulaire se rapprochant de très près de celle du synchronisme et développe un couple moteur toujours de même sens.

Plusieurs électriciens, et principalement Galileo Ferraris, ont donné une explication du fonctionnement de ce type de moteur qui, comme on va le voir, doit se comporter exactement comme un moteur à champ tournant, sauf en ce qui concerne le démarrage.

On a déjà exposé (§ 95) qu'un champ magnétique alternatif peut être considéré comme formé par la superposition de deux champs magnétiques, tournant en sens contraire et avec la même vitesse angulaire, chacun d'eux ayant une intensité maximum égale à la moitié de l'intensité maximum du champ alternatif. Soient A et B ces deux champs magnétiques.

Si un rotor en court circuit est disposé dans un champ alternatif, de manière qu'il soit soumis à l'action des flux pro-

duits par les deux champs composants tournant en sens contraire, animés de la même vitesse angulaire et ayant même intensité, les courants induits dans le rotor se neutralisent réciproquement et il ne se développe pas de couple moteur. Ce fait peut, du reste, s'expliquer sans qu'il soit nécessaire d'avoir recours à l'hypothèse de la décomposition du flux alternatif. Le rotor en court circuit, par suite de sa faible résistance, se comporte vis-à-vis du flux comme un véritable écran magnétique; par suite, les courants induits ayant même fréquence que le courant inducteur (le rotor étant encore immobile) donnent naissance à un flux alternatif qui paralyse complètement le premier en ce qui concerne le couple moteur.

Mais, si l'on vient à mettre le rotor en marche par un dispositif quelconque, les deux champs magnétiques tournants, A et B, se comportent alors de tout autre manière. Les courants induits ne se neutralisent plus, parce que les déplacements du rotor, par rapport aux deux champs, ne sont pas les mêmes. Il s'ensuit qu'il se développe deux couples moteurs, l'un dans le sens du mouvement initial imprimé au rotor, l'autre en sens inverse. Le premier, qui correspond au décalage le plus faible, par rapport au champ A qui tourne dans le même sens, reste plus grand que le second, parce que le moteur augmente graduellement sa vitesse jusqu'au moment où il atteint presque celle du champ A qui tourne dans le même sens, mais cette vitesse reste toujours au-dessous de la vitesse de ce dernier.

Il est facile de voir que, dans ces conditions, le second couple moteur reste nul ou presque nul. C'est pourquoi, une fois la vitesse normale atteinte, le rotor tourne, par rapport au champ B, avec une vitesse angulaire qui est presque le double de celle qui correspond au synchronisme. Ce champ B induit dans le rotor des courants de fréquence environ deux fois plus grande que celle des courants alimentant le moteur; ces courants produisent un champ qui, pratiquement, paralyse le champ inducteur B au point de vue du couple moteur, c'est-à-dire que le rotor se comporte vis-à-vis du champ B

presque comme un écran magnétique, une fois la vitesse normale atteinte.

Il ne reste donc, comme champ inducteur véritablement utile, que le champ tournant A ; l'on peut dire qu'un moteur à courant alternatif simple, une fois démarré, fonctionne presque comme un moteur à champ tournant. L'intensité du champ A est la moitié de l'intensité maximum du champ alternatif produit par le stator. Comme conséquence immédiate, on peut déduire de ce fait qu'un moteur à courant alternatif simple, à égalité de puissance et pour une même vitesse angulaire, doit

avoir des dimensions plus grandes qu'un moteur polyphasé, puisqu'il faut fournir à son stator un nombre d'ampères-tours beaucoup plus grand que celui qui serait nécessaire pour produire un champ tournant véritablement actif.

On peut démontrer aussi d'une autre manière qu'un champ alternatif se compose de deux champs égaux tournant en sens inverse

ou, réciproquement, que deux champs d'intensité égale, tournant en sens opposé, produisent un champ alternatif de fréquence identique.

On constitue l'enroulement d'un stator ordinaire avec quatre spires ou quatre bobines 1 1', 2 2', 3 3', 4 4' (fig. 205). On fait passer dans les deux premières un courant alternatif de manière que les flux aient la même direction et produisent, par suite, un flux alternatif d'une intensité maximum égale à 2Φ . Sur les deux autres, on fait passer un second courant alternatif, décalé de $1/4$ de période par rapport au premier, mais de même intensité et on relie les bobines de manière que le courant les traverse en sens opposé ; on arrive ainsi à obtenir que le champ produit par ces bobines soit $\Phi - \Phi = 0$. Le champ résultant produit par les quatre bobines se réduit donc à celui que développent les deux pre-

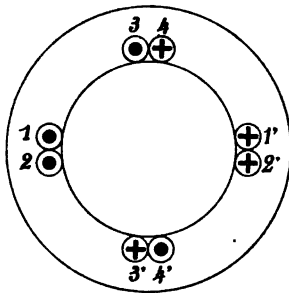


Fig. 205.

mières, c'est-à-dire à un champ alternatif d'intensité maximum égale à 2Φ .

Mais si, sans rien modifier, on compare l'action des courants qui passent dans la bobine 1, 1' avec celle des courants qui passent dans les bobines 3, 3', on voit que l'action combinée des deux champs alternatifs produits par ces bobines développe un champ tournant dans un sens, par exemple à droite, et ayant une intensité constante Φ . De même, l'action produite par les champs alternatifs dus aux bobines 2, 2' et 4, 4' développe également un champ tournant, mais en sens inverse, par conséquent à gauche, dont l'intensité constante a aussi pour valeur Φ .

En résumé, on peut dire que, dans un stator où se produisent deux champs tournants ayant même intensité, animés d'une vitesse angulaire égale, mais de sens contraire, il se développe un champ alternatif unique ayant une intensité maximum 2Φ . Réciproquement, un champ alternatif développé dans un stator et ayant une intensité maximum 2Φ est équivalent à deux champs tournant en sens inverse avec la même vitesse angulaire absolue et ayant chacun une intensité constante de valeur Φ .

108. Construction des moteurs à courant alternatif simple. — Ce qui a été dit dans le chapitre précédent, à propos des moteurs polyphasés, dispense de donner de grands détails sur la construction des moteurs à courant alternatif simple. Il suffit de faire remarquer que, pour obtenir un couple moteur constant, il faut que le flux tournant utile, dans son mouvement, rencontre une réluctance également constante; c'est pourquoi, de même que dans les moteurs polyphasés, la superficie interne du stator doit être presque continue et ne pas présenter de pôles saillants comme le sont ceux des moteurs à courant continu. De plus, il faut éviter, autant que possible, les fuites magnétiques et se placer toujours dans les conditions où l'on opère pour les transformateurs, en logeant les conducteurs dans des trous ou rainures, de manière à réduire

l'entrefer jusqu'à la limite admissible par les exigences de la construction.

Pour l'enroulement du stator, chaque section ne doit pas seulement occuper deux trous placés à l'extrémité d'un même

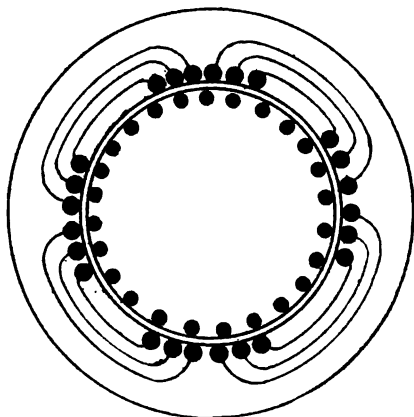


FIG. 206.

diamètre, mais bien être répartie dans un certain nombre de trous, toujours pour arriver à diminuer les fuites magnétiques. Les fils constituant les conducteurs actifs de cet enroulement doivent être repliés sur les bords de l'anneau formant le noyau du stator, afin que le rotor puisse être mis en place de l'extérieur avec la plus grande facilité.

Rarement un moteur de ce genre est bipolaire, c'est-à-dire ne comporte qu'un seul champ alternatif; il est généralement multipolaire (*fig. 206*), présentant ainsi plusieurs champs alternatifs, ce qui permet de réduire proportionnellement la vitesse normale du rotor. La figure 206 représente le stator d'un moteur tétrapolaire.

A cause du démarrage, l'enroulement du stator est plus ou moins compliqué; de même l'enroulement du rotor, pour le même motif, peut être muni d'un enroulement spécial; pour les petits moteurs, l'enroulement du rotor peut être du type à cage d'écurie (*fig. 194*).

L'insertion de résistances, lors du démarrage, dans le circuit du rotor est indispensable pour les moteurs de puissance supérieure à 5 chevaux.

109. Dispositions particulières pour le démarrage des moteurs d'induction à courant alternatif simple. — Les

dispositifs imaginés pour faciliter le démarrage de ce type de moteur peuvent être rangés en deux catégories : l'un dans lequel le moteur est transformé en moteur du type à collecteur, l'autre dans lequel il est transformé en moteur à champ tournant.

Dans le premier cas, le rotor comporte un enroulement en anneau ou en tambour avec collecteur ; c'est, en somme, un véritable induit de dynamo à courant continu (moteurs Walker et Ganz, *fig.* 207). Pendant le démarrage, deux balais appuient sur le collecteur



FIG. 207.

et le courant qui traverse le stator passe également dans le rotor ; le moteur fonctionne ainsi comme un moteur excité en série (Voir § 106). Dès que la vitesse du rotor a pris une certaine valeur, les balais sont soulevés à la main ou automatiquement à l'aide d'un dispositif à force centrifuge ; le courant ne passe plus alors que dans l'inducteur et le moteur fonctionne comme un moteur d'induction.

D'autres constructeurs ajoutent sur le rotor un enroulement supplémentaire dont les extrémités sont reliées au collecteur ; cet enroulement, aussitôt les balais soulevés, ajoute son action à celle de l'enroulement principal. Le rotor, dans ce cas, peut être du type à cage d'écurcuil ou du type à enroulement comme celui des véritables moteurs à champ tournant.

Ces dispositifs sont utilisés lorsque le démarrage doit s'effectuer sous une certaine charge et ne s'appliquent qu'aux moteurs dont la puissance ne dépasse pas 10 à 15 chevaux.

Lorsqu'il est possible de faire démarrer le moteur à vide,

on n'emploie plus les dispositifs qui viennent d'être décrits et qui compliquent notablement la construction du rotor ; l'on obtient alors le démarrage en produisant un véritable champ tournant et, à cet effet, on fait passer dans l'enroulement du stator deux courants alternatifs décalés de phase.

C'est pourquoi, si le moteur est multipolaire, et c'est le cas le plus fréquent, le stator comporte plusieurs séries de bobines. Ainsi, dans un moteur tétrapolaire (*fig. 206*), il y a généralement deux séries de bobines décalées de 90° l'une par rapport à l'autre. Lorsqu'on peut disposer d'un second courant alternatif, décalé de $1/4$ de période par rapport au premier, en faisant passer chacun d'eux respectivement dans une des séries de bobines, on obtient un véritable champ tournant et le moteur devient un véritable moteur polyphasé possédant tous les avantages qui ont été déjà signalés. Le démarrage obtenu, on met l'enroulement dans les conditions normales en y faisant passer un seul courant. Le plus souvent, on préfère disposer sur le stator un circuit spécial, dit *circuit de démarrage*, dans lequel on fait circuler le second courant décalé, circuit que l'on supprime ensuite complètement ; le moteur fonctionne après avec son seul *circuit de travail*.

Pour obtenir un second courant alternatif décalé de phase, parce qu'en réalité les installations dans lesquelles se trouvent ces moteurs n'ont à leur disposition qu'un seul courant, plusieurs procédés ont été imaginés, mais tous consistent à donner aux deux circuits de travail et de démarrage des résistances inductives différentes, afin que les phases du courant qui les parcourent deviennent notablement différentes, tout en ayant la même tension. Quoi qu'il en soit, comme il n'est pas possible d'obtenir un décalage de l'intensité qui soit exactement de $1/4$ de période, le champ produit, quoique tournant, a une intensité variable. On peut toutefois obtenir un champ d'intensité pratiquement constante en décalant le circuit de démarrage, par rapport au circuit de travail, d'un angle convenablement choisi et dépendant de l'angle de décalage des courants.

Ainsi, par exemple, le moteur Langdon-Davies a ses enroulements disposés de telle manière que, lorsque le circuit de démarrage est supprimé, c'est-à-dire lorsque le moteur fonctionne normalement, grâce à une bonne répartition des spires dans les trous du stator, on obtient un couple moteur énergique, sans exagérer aucunement les dimensions de la machine.

La maison Brown, Boveri de Baden s'est fait une spécialité de la construction des moteurs à courant alternatif simple (ce qui n'empêche pas plusieurs autres constructeurs de

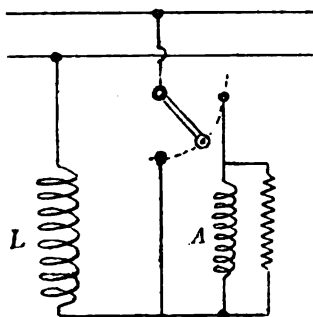


FIG. 208.

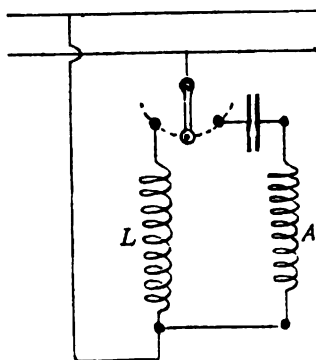


FIG. 209.

livrer d'excellents moteurs de ce genre) et c'est M. Charles Brown, à qui est due la réalisation du moteur d'induction à courant alternatif véritablement industriel, qui a fait breveter plusieurs dispositifs pour obtenir les deux courants alternatifs décalés nécessaires pour le démarrage. Les principaux de ces dispositifs vont être décrits.

Dans les petits moteurs, le démarrage est obtenu en reliant en série les deux enroulements de travail L et de démarrage A (fig. 208), mais sur ce dernier est mise en dérivation une résistance non inductive. Dans ces conditions, les courants alternatifs dans les circuits L et A sont suffisamment décalés pour pouvoir produire un champ tournant qui, quoique irrégulier, suffit pour mettre le rotor en marche. Dès que la vitesse angulaire a atteint une certaine valeur, on supprime

complètement le circuit A par la manœuvre d'un simple commutateur.

Le même dispositif est utilisé pour le démarrage des moteurs jusqu'à 5 chevaux de puissance, mais la résistance non inductive est remplacée par un condensateur à liquide (§ 47) qui permet d'obtenir un décalage plus considérable des intensités et, par suite, une moindre pulsation du champ.

Le dispositif que montre la figure 209 s'emploie pour les moteurs d'une puissance supérieure à 5 chevaux en même temps que l'adjonction de résistances au circuit du rotor, au moment de la mise en marche. Les deux enroulements L et A sont en dérivation sur la ligne et le circuit de démarrage comporte un condensateur. A mesure que la vitesse s'accroît, on supprime les résistances intercalées dans le circuit du rotor et, dès que la vitesse maximum est atteinte, on supprime le circuit de démarrage, celui de travail restant seul en dérivation sur la ligne.

Lorsque le circuit d'alimentation est à haute tension, si le moteur est de puissance assez élevée, on peut mettre directement le circuit de travail en dérivation sur la canalisation. Dans le circuit de démarrage, au contraire, il faut placer un petit transformateur, afin de pouvoir utiliser un condensateur de dimensions raisonnables; ce circuit est aussi supprimé dès que le rotor a pris une certaine vitesse.

Les condensateurs employés par la maison Brown, Boveri et C^o sont tous du type à liquide (capacité de polarisation), dont il a été question dans le paragraphe 47 et qui sont très faciles à construire. Le groupement des diverses lames de ces condensateurs ainsi que la densité de la dissolution sont réglés chaque fois pour le moteur auquel le condensateur est destiné et ce réglage se poursuit jusqu'à ce que l'on obtienne le meilleur résultat. Des différences souvent minimes dans l'épaisseur de l'entrefer, dans l'enroulement, dans la fréquence pour des moteurs du même modèle et de la même puissance peuvent donner lieu à des décalages de phase différents lorsque les condensateurs sont identiques; c'est pourquoi il est indispensable de régler

chaque condensateur pour le moteur auquel il est affecté.

La *General Electric Co* utilise également des condensateurs à liquide pour le démarrage des moteurs à courant alternatif simple qu'elle construit.

D'autres maisons de construction, telles que les Ateliers d'Oerlikon, Kolben, etc., emploient des bobines de réactance ou des auto-transformateurs (§ 86) avec des résistances inertes pour obtenir le décalage de l'intensité des courants qui circulent dans les deux enroulements de travail et de démarrage. Le but à atteindre étant le même, on peut consulter un manuel du monteur, tel que celui de Barni, pour y trouver le schéma des connexions à établir entre les divers circuits.

M. Heyland procède au démarrage avec un couple moteur énergique en disposant sur le stator, dans des trous rectangulaires, un enroulement convenablement décalé par rapport au circuit de travail, ce dernier restant fermé sur lui-même pendant toute la durée du démarrage. Les courants induits dans cet enroulement par le flux, dû au champ alternatif du stator, étant fortement décalés, produisent un champ transversal qui, s'ajoutant au champ principal, produit un champ tournant très intense. Le couple moteur au départ est plus grand que celui qui correspond à la pleine charge, mais l'intensité de courant nécessaire pour obtenir le démarrage dépasse d'environ 70 0/0 l'intensité normale, ce qui constitue un notable inconvénient. On peut éviter cet inconvénient en abaissant au début la tension du courant d'alimentation à l'aide d'un auto-transformateur (Voir *fig. 176*), réduisant ainsi également le couple moteur ; mais alors le dispositif perd de sa simplicité.

De tous les procédés de démarrage, le plus simple est, sans contredit, celui qu'a imaginé le professeur R. Arno. Il a été le premier à constater qu'au commencement du démarrage d'un moteur à courant alternatif simple, il y a toujours une valeur particulière de la résistance à insérer dans le circuit du rotor pour laquelle le couple moteur prend la valeur maximum de celles que l'on peut obtenir à cette vitesse. Pratiquement, on procède de la manière suivante : On introduit dans le cir-

cuit du rotor (identique à celui d'un moteur polyphasé), à l'aide de solides bagues de contact, la résistance que l'expérience a indiqué comme étant la plus convenable; on lance le courant dans le stator et l'on imprime à la main au rotor une certaine vitesse initiale dans le sens du mouvement du moteur, en agissant, par exemple, sur la courroie placée à ce moment sur la poulie folle de la transmission. Le couple moteur augmente alors progressivement avec la vitesse; l'on retire peu à peu les résistances intercalées dans le circuit du rotor et, lorsque la vitesse de régime est atteinte, on les supprime complètement. La charge peut alors être appliquée au moteur.

Le procédé imaginé par le professeur R. Arno s'applique aussi parfaitement aux moteurs à courant alternatif de grande puissance (100 à 200 chevaux) et permet d'obtenir un démarrage certain et rapide, sans qu'il soit nécessaire de prendre à la canalisation un courant d'intensité supérieure à celui qui correspond à la charge normale pour laquelle le moteur a été construit.

110. Régulation de la vitesse dans un moteur à courant alternatif simple. — On a déjà vu, dans les paragraphes 97 et 99, que l'insertion de résistances non inductives dans le rotor d'un moteur polyphasé ne modifie pas le couple moteur maximum qu'il est possible d'obtenir; aussi cette valeur maximum se vérifie pour des glissements graduellement de plus en plus grands à mesure que la résistance augmente.

On peut se demander si un moteur à courant alternatif simple, constitué ainsi qu'on l'a vu comme deux moteurs élémentaires polyphasés, se comporte de la même manière. Il n'en est pas ainsi, parce que les valeurs maxima des couples moteurs, produits par chacun des deux moteurs élémentaires, ne correspondent pas à la vitesse unique que prend le rotor et l'on doit s'attendre à ce que la valeur maximum du couple résultant change avec les modifications de résistance apportées au rotor lorsqu'on utilise, comme d'ordinaire, des résistances purement ohmiques. L'expérience confirme entièrement ces dé-

ductions et montre également que jusqu'à une certaine résistance, que l'on peut appeler *résistance critique*, la ligne qui limite la série des courbes représentant les divers couples moteurs est presque une droite passant par l'origine (commencement du démarrage).

La figure 210 met ce fait en évidence. Ce diagramme se rapporte à un moteur à courant alternatif dans lequel le rotor

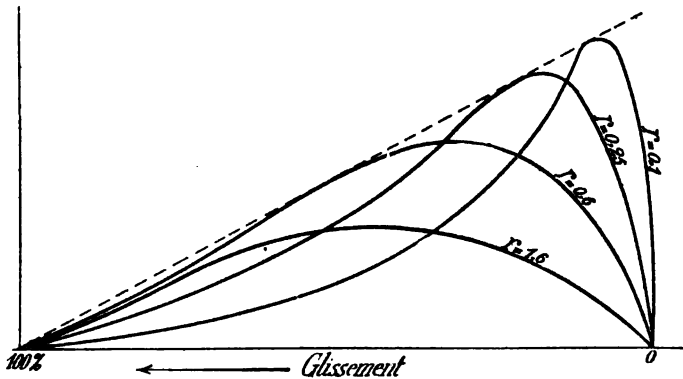


FIG. 210.

a un enroulement triphasé, chaque circuit ayant une résistance de 0,1 ohm ; l'on a négligé les petites valeurs des couples correspondant au synchronisme.

Dans les moteurs à courant alternatif simple, il n'est pourtant pas possible de régler la vitesse par l'insertion de résistances sans diminuer la valeur des couples moteurs que l'on peut obtenir ; mais il leur reste toujours cet avantage d'obtenir un démarrage facile par l'insertion de résistances. En réalité, le diagramme montre qu'en augmentant convenablement la résistance jusqu'à $r = 0,6$ ohm, on peut obtenir un couple moteur dont la valeur augmente très rapidement.

C'est sur ce fait qu'est fondé l'élégant procédé de démarrage du professeur R. Arno, dont il a été question dans le paragraphe précédent.

111. Facteur de puissance et rendement des moteurs à courant alternatif simple. — Il ne faut pas oublier que le

moteur à courant alternatif simple se comporte comme un moteur polyphasé, en ce qui concerne le couple moteur développé, lorsqu'il fonctionne à une vitesse voisine de celle du synchronisme, parce qu'alors le champ qui tourne en arrière est presque complètement paralysé par celui que développent les courants induits dans le rotor. Le champ qui tourne en arrière, que l'on peut appeler parasite, existe toujours et exige natu-

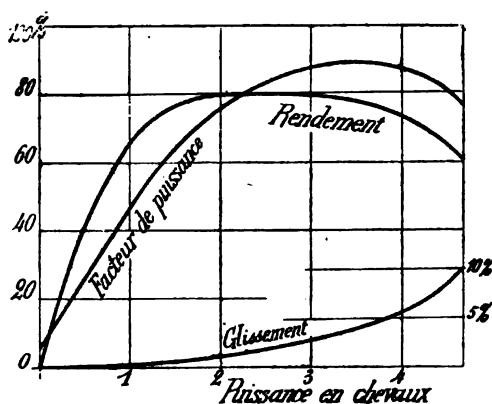


FIG. 211.

rellement un certain courant magnétisant qui vient s'ajouter à celui qui est nécessaire pour produire le champ utile tournant en avant. Il s'ensuit que le courant magnétisant total qu'exige un moteur à courant alternatif simple est, toutes choses égales d'ailleurs, supérieur à celui que consomme pour le même objet un moteur asynchrone polyphasé.

Dans ces conditions, le facteur de puissance est un peu faible; la valeur maximum que l'on peut obtenir pour ce facteur de puissance est d'environ 0,8, tandis que pour les moteurs polyphasés cette valeur maximum atteint 0,9.

Quant au rendement, les pertes par frottement sont les mêmes que dans un moteur polyphasé pour une même vitesse angulaire, mais les pertes dans le fer sont plus fortes (pratiquement ces pertes peuvent rester constantes pour n'importe quelle charge). En ce qui concerne les pertes par effet Joule,

elles sont plus considérables dans le rotor, à égalité de résistance, à cause de la présence simultanée de courants dus à deux champs magnétiques tournant en sens inverse.

Il s'ensuit que le rendement des moteurs de ce genre arrive rarement à 80 0/0 pour ceux de petite puissance et atteint au plus 85 0/0 pour les moteurs de 100 chevaux et plus.

Il y a lieu de constater que jusqu'à ce jour on n'a pas construit de moteurs à courant alternatif simple d'une puissance supérieure à 300 chevaux et l'on ne songera même pas à en construire, étant donné la tendance actuelle, qui va toujours en augmentant, de donner la préférence aux courants triphasés dans les installations importantes et aussi lorsqu'il s'agit de fournir seulement de l'énergie pour l'éclairage. La maison Brown, Boveri et C^{ie} a récemment construit (automne de 1902) un moteur à courant alternatif simple de 270 chevaux pour l'installation de la ville de Francfort et, d'après les constructeurs, ce moteur aurait, à charge normale, un facteur de puissance de 0,87 et un rendement de 91 0/0.

Le glissement dans les moteurs à courant alternatif simple est plus faible que dans les moteurs polyphasés. Cela s'explique facilement, car, dans le moteur à champ tournant, l'intensité des courants dans le rotor et par suite les pertes par effet Joule sont proportionnelles au glissement (§ 97). Dans le moteur à courant alternatif simple, le glissement est proportionnel seulement aux pertes dues aux courants induits par le champ utile, au moins dans les conditions normales de fonctionnement, c'est-à-dire quand le couple produit par l'autre champ peut être considéré comme négligeable. On voit que le champ parasite donnant lieu presque aux mêmes pertes, le glissement est celui qui donnerait seulement la moitié environ des pertes dans le rotor si le moteur était polyphasé. Si l'on a deux moteurs, l'un à courant alternatif simple, l'autre polyphasé, de même puissance, marchant à la même vitesse angulaire, construits de manière que les pertes dans le rotor soient égales, le glissement dans le second est environ le double du glissement dans le premier.

Le moteur à courant alternatif simple supporte moins bien une surcharge que le moteur polyphasé; tandis que ce dernier admet une surcharge de 100 0/0 sans atteindre son point critique de fonctionnement, il suffit d'une surcharge de 50 0/0 pour que le moteur à courant alternatif simple ne soit plus en phase.

Si l'on tient compte de toutes ces considérations et si l'on y ajoute les difficultés de démarrage, il est évident que le moteur à courant alternatif simple ne doit être utilisé pour fournir de l'énergie mécanique que dans les installations où l'on ne peut disposer d'une autre forme de courant. D'autre part, les mêmes causes ajoutées à celles de diverses natures qui ont été déjà signalées font que les distributions polyphasées et principalement les distributions triphasées tendent à se généraliser de plus en plus. Toutefois, dans les petites installations d'éclairage, le courant alternatif simple peut être préféré aux courants triphasés à cause de la simplicité de l'installation, qui ne comporte que deux conducteurs de ligne au lieu de trois, ce qui compense suffisamment, dans ce cas, les désavantages que présente ce système de distribution en ce qui concerne l'alimentation des moteurs.

CHAPITRE XVI

TRANSFORMATEURS TOURNANTS

112. Transformateurs tournants et convertisseurs. —

Dans le chapitre XII, paragraphe 79, on a fait remarquer que le transformateur statique ne pouvait être employé que dans le seul cas, du reste le plus fréquent, où l'énergie électrique sous forme de courant alternatif devait être transformée de nouveau en courant alternatif de même fréquence, mais sous une tension différente. On a également indiqué que, lorsqu'il était nécessaire de transformer du courant alternatif en courant continu ou réciproquement, il n'y avait qu'un dispositif électrique animé d'un mouvement de rotation qui pût effectuer cette transformation.

Le premier cas est le plus intéressant et le plus fréquent, car, si l'énergie électrique est produite à grande distance du lieu d'utilisation, il faut nécessairement avoir recours à un courant alternatif à haute tension pour obtenir le maximum d'économie dans l'installation de la ligne de transport d'énergie. D'autre part, si le travail que doit effectuer l'énergie électrique ne peut être obtenu que par un courant continu, des applications électrochimiques par exemple, ou encore si le courant continu est préférable au courant alternatif, ce qui est souvent le cas pour la traction électrique, alors une transformation s'impose.

Le procédé le plus simple, dans ce cas, consiste à alimenter par le courant alternatif un moteur synchrone ou asynchrone qui actionne une dynamo à courant continu. Mais, alors, le

rendement de transformation est forcément assez faible. Si on admet, par exemple, que chacune de ces machines ait un rendement de 92 0/0, le rendement total est de

$$0,92 \times 0,92 = 85 \text{ 0/0 environ}$$

et il n'est pas possible d'espérer obtenir un meilleur rendement, même en utilisant des unités de grande puissance.

Une première amélioration peut être obtenue lorsque le groupe constitué par un moteur synchrone et par une dynamo à courant continu ne comporte qu'un seul système inducteur pour les deux machines en disposant deux enroulements distincts sur le même noyau d'induit : l'un, parcouru par le courant alternatif, a ses extrémités reliées à deux anneaux ou bagues de contact dans le cas du courant alternatif simple ou à trois bagues pour les courants triphasés ; l'autre, où se développe le courant continu, est muni d'un collecteur ordinaire.

Ce dispositif, toutefois, a un rendement qui n'est guère supérieur à celui du groupe constitué par deux machines séparées ; il présente néanmoins l'avantage d'être moins encombrant et de nécessiter une quantité d'énergie plus petite pour produire l'excitation, puisqu'il n'y a qu'un seul système inducteur pour les deux enroulements. Mais l'obligation de parfaitement isoler l'un de l'autre les deux enroulements exige un plus grand développement de la surface de l'induit et on ne peut songer, en tout cas, de profiter de l'indépendance des deux circuits induits pour alimenter l'un avec du courant alternatif à haute tension et pour obtenir de l'autre du courant continu à basse tension.

Une diminution de la tension du courant d'alimentation avant de le faire passer dans la machine est nécessaire et cette tension doit être ramenée dans les limites de celle sous laquelle on veut obtenir le courant continu. Mais alors, dans ces conditions, on peut arriver à simplifier encore la machine en disposant sur l'induit un enroulement unique dont les extrémités sont reliées d'un côté à des bagues de contact et de l'autre à un collecteur ordinaire. Avec cette disposition, il est absolument

indispensable que l'enroulement induit, en anneau ou en tambour, soit fermé sur lui-même, comme dans toutes les dynamos à courant continu (à l'exception de certains types spéciaux de dynamos construites pour alimenter des lampes à arc), c'est-à-dire qu'il faut avoir un enroulement disposé pour produire ou recevoir du courant continu et également pour produire ou recevoir des courants alternatifs.

Ce double fonctionnement d'un enroulement unique placé dans un champ magnétique inducteur n'a rien de paradoxal.

Si on fait tourner un anneau ordinaire Pacinotti (*fig. 212*)

pourvu d'un collecteur (qui est représenté sur la figure à l'extérieur de l'induit) dans un champ produit par un inducteur bipolaire, on sait que la force électromotrice induite dans chaque spire, quoique étant alternative, produit aux balais une différence de potentiel prati-

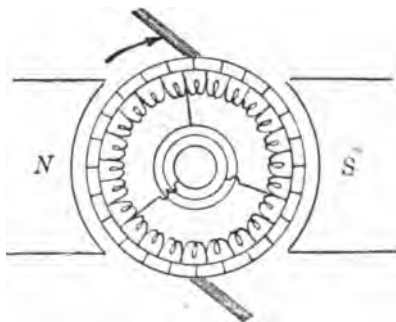


FIG. 212.

quement constante; c'est pourquoi, si l'on peut maintenir fixe dans l'espace la distribution des potentiels sur le collecteur, la somme des potentiels des diverses lames du collecteur comprises entre les balais doit être constante.

L'effet obtenu est bien différent si on établit les communications de manière à obtenir la différence de potentiel entre deux spires déterminées de l'enroulement, c'est-à-dire si deux points de cet enroulement sont mis en communication permanente avec le circuit extérieur par l'intermédiaire de deux bagues de contact et de deux balais. Dans ces nouvelles conditions, la différence de potentiel entre les deux balais est forcément alternative.

La même machine peut donc fournir aussi bien du courant continu que du courant alternatif. En établissant trois prises de courant, en trois points équidistants de l'enroulement (*fig. 212*), on obtient trois courants alternatifs décalés de $1/3$

de période l'un par rapport à l'autre, constituant ainsi un système triphasé.

Cette machine peut aussi être employée comme transformateur tournant. En l'alimentant avec du courant continu, le système fonctionne comme un moteur ordinaire et l'on peut utiliser la force électromotrice alternative produite dans chaque spire par le mouvement de rotation pour alimenter un circuit d'utilisation à courant alternatif.

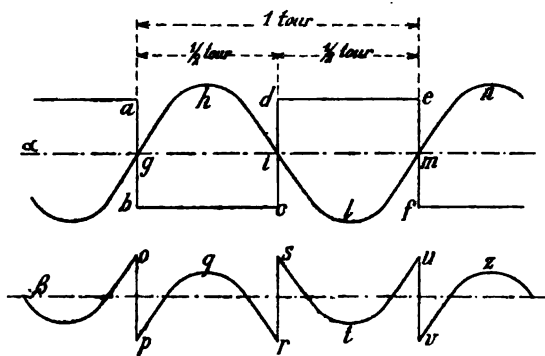


FIG. 213.

En supposant, pour rendre l'explication plus simple, que l'on veuille obtenir un seul courant alternatif, il n'y a qu'à établir deux prises de courant en des points diamétralement opposés. Alors, sous l'action de la tension constante qui existe entre les balais qui amènent le courant continu, le courant dans une spire prend l'allure indiquée ne a, b, c, d, e, f (fig. 213 α), si le circuit extérieur du courant alternatif est ouvert, et il change de sens dans la spire à chaque demi-tour en restant presque constant pendant le temps d'une demi-révolution.

Lorsque le circuit extérieur à courant alternatif est fermé, la spire considérée, faisant partie d'un groupe de spires (moitié de l'enroulement) à l'extrémité duquel existe une tension alternative, tend à être parcourue par un courant alternatif g, h, i, l, m , qui, en supposant le décalage de phase nul, a son zéro qui coïncide avec le zéro du courant continu.

Il est évident qu'en réalité la spire ne peut être parcourue

que par le courant $o, p, q, r, s, t, u, v, z$ (*fig. 213 β*), c'est-à-dire par la différence des deux courants dont il vient d'être question. Ce courant a une valeur efficace notablement plus faible que celle des courants composants et il s'ensuit, ce que la pratique confirme parfaitement, que l'induit d'un transformateur tournant s'échauffe moins qu'il ne s'échaufferait si la machine fonctionnait comme simple génératrice.

C'est pourquoi, si on fait fonctionner la machine comme génératrice double, c'est-à-dire en lui fournissant de l'énergie mécanique pour lui faire donner aussi bien du courant continu

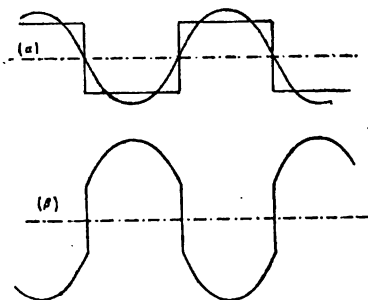


FIG. 214.

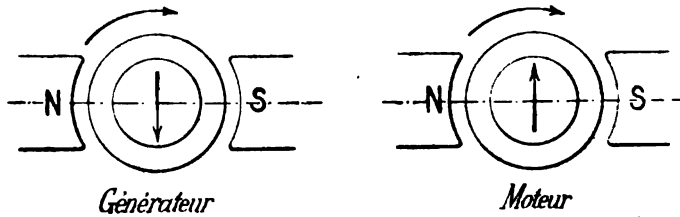
que du courant alternatif, alors, comparé à la figure précédente, le courant continu est inversé et le courant résultant est la somme (*fig. 214 β*) au lieu d'être la différence des deux courants composants. Dans ces conditions, l'induit s'échauffe plus fortement, ce qui est parfaitement logique.

Dans un cas comme dans l'autre, si le courant est décalé en retard par rapport à la tension agissante, le courant résultant est plus ou moins déformé.

113. Réaction d'induit dans un convertisseur. — Le transformateur tournant est, en réalité, un moteur-dynamo, mais où l'énergie électrique fournie du côté du moteur est immédiatement transformée encore en énergie électrique par le jeu des forces électromotrices agissant dans des circuits appropriés. Par suite, dans ce cas particulier, il ne se développe pas de couple moteur ou, plus exactement, il est réduit à la valeur qui est juste suffisante pour maintenir la vitesse de la machine.

Or on sait que le flux développé par les courants induits et qui produit la réaction d'induit (Voir § 72), lorsque l'induit

tourne toujours dans le même sens, a un certain sens lorsque la machine fonctionne comme génératrice et un sens opposé lorsqu'elle fonctionne comme moteur (*fig. 215*). Si l'induit, comme dans un convertisseur, remplit à la fois les deux fonctions, les deux flux produits étant égaux et opposés se font équilibre et pratiquement il n'y a pas de réaction d'induit. Par suite, la torsion du champ provoquée par le flux propre



215.

de l'induit ne se produit pas et il n'est pas nécessaire de décaler les balais sur le collecteur du côté continu. Il n'y a plus également à craindre la production d'étincelles.

On pourrait croire qu'il n'en est ainsi que dans le cas où l'induit est muni de deux enroulements identiques, à cause des ampères-tours produits, mais indépendants, et destinés tous deux au courant continu, par exemple, dans un convertisseur destiné à transformer du courant continu à haute tension en courant continu à basse tension. Mais on comprend facilement qu'il en est de même lorsqu'un des deux enroulements produit des courants alternatifs.

En supposant qu'il s'agisse de courants triphasés, ceux-ci donnent naissance à un champ, tournant à une vitesse angulaire égale à celle de l'induit, mais de sens contraire au champ produit par ce dernier, comme l'indique la loi de Lenz. Le champ résultant, soumis à deux vitesses égales et opposées, reste fixe dans l'espace et agit d'une manière identique au champ qui serait dû à un induit de génératrice ou de moteur à courant continu.

L'explication est plus complexe lorsqu'il s'agit d'un courant

alternatif simple, parce que, dans ce cas, le flux produit ne reste plus fixe dans l'espace et il n'y a compensation entre ce flux et celui qui est dû au courant continu que pour une certaine position de l'induit. Il s'établit alors un champ d'induit résultant dont l'intensité varie autour d'une valeur moyenne et il se produit alors forcément des étincelles aux balais; pourtant ce phénomène est peu accentué à cause des variations du champ résultant, dont les effets sont partiellement annulés par les courants de Foucault qui prennent naissance dans les masses polaires.

On a supposé jusqu'à présent, pour faciliter les explications, que l'induit portait deux enroulements distincts; lorsqu'il ne comporte qu'un seul enroulement remplissant cette double fonction, les effets produits sont les mêmes, le courant résultant qui se développe dans les spires donnant lieu aux mêmes actions magnétiques que ceux qui sont produits par chacune des composantes de ce courant.

Les convertisseurs sont généralement employés pour transformer des courants alternatifs polyphasés en courant continu et rarement pour effectuer la transformation inverse. Ils fonctionnent sans donner pratiquement de réaction d'induit, c'est-à-dire sans produire une distorsion du champ inducteur et, par conséquent, sans production d'étincelles aux balais.

114. Construction des convertisseurs. Limite de leurs applications. — Des explications qui précèdent, il résulte qu'un convertisseur est constitué par une dynamo à courant continu disposée pour recevoir ou pour fournir du courant alternatif suivant que la transformation doit s'effectuer dans un sens ou dans l'autre.

Pratiquement, les convertisseurs industriels sont de véritables dynamos à courant continu, toujours multipolaires afin de limiter leur vitesse angulaire en rapport avec la fréquence du courant alternatif qui les alimente ou, suivant le cas, qu'ils débitent.

L'inducteur, toujours disposé à l'extérieur, porte une série

de pôles, alternativement Nord et Sud, excités en dérivation ou partiellement en dérivation et en série (compound) par le courant continu pris aux balais, excitation réglable, comme d'ordinaire, par un rhéostat de champ. L'entrefer n'est pas uniforme, mais d'ordinaire variable, afin d'obtenir que les conducteurs de l'induit pénètrent graduellement dans le champ. Pour cela on donne aux pièces polaires une courbure plus petite que celle qui correspond au rayon. L'arc polaire est d'environ 80 0/0 de celui du pas.

L'induit est presque toujours du type en tambour. Pour éviter la production d'étincelles au collecteur, les balais sont toujours constitués par des blocs de charbon. On peut utiliser un porte-balais fixe; il est inutile qu'il soit mobile. Généralement l'arbre portant l'induit d'un convertisseur est monté de manière à pouvoir être légèrement déplacé longitudinalement dans ses supports, afin d'assurer un bon contact des balais sur le collecteur et éviter ainsi la production d'étincelles.

En des points convenablement choisis de l'enroulement, on établit des prises de courant que l'on relie aux bagues de contact correspondant au courant alternatif. Il est évident que, puisque la dynamo est multipolaire, toutes les prises de courant qui occupent la même position par rapport aux pôles doivent être reliées entre elles, leur extrémité commune aboutissant à une des bagues. Du côté du courant alternatif, les balais appuyant sur les bagues peuvent être indifféremment en charbon ou métalliques.

Les dynamos à courant continu se construisant pour n'importe quelle puissance et n'importe quelle tension, au moins dans certaines limites, il semblerait qu'il peut en être de même pour les convertisseurs. Mais il n'en est pas ainsi, car la fréquence du courant alternatif et la tension imposent une limite qu'il ne convient pas de dépasser si on veut construire une machine rationnelle.

Lorsque le convertisseur est alimenté par des courants alternatifs, il fonctionne naturellement comme moteur synchrone (chap. xiii). Sa vitesse angulaire dépend de la fréquence f des

courants alternatifs et du nombre p de champs polaires :

$$n = \frac{f}{p}.$$

Si, par exemple, la fréquence est de 42 périodes par seconde, que l'inducteur ait 6 pôles, c'est-à-dire 3 champs polaires, l'induit fait

$$\frac{42}{3} = 14 \text{ tours par seconde,}$$

soit une vitesse angulaire de 840 tours par minute. Si le convertisseur doit fournir un courant continu sous une différence de potentiel de 100 volts, il faut alors obtenir cette tension entre deux rangées de balais consécutives distantes de $\frac{360}{6} = 60^\circ$. En ce qui concerne l'intensité maximum du courant continu que peut fournir la machine, elle détermine la largeur des lames du collecteur et, comme on ne peut dépasser pratiquement une certaine tension entre les deux lames consécutives, 15 volts au maximum, afin d'obtenir un isolement suffisant, le nombre de lames et le diamètre du collecteur est, par suite, parfaitement déterminé.

Lorsqu'un convertisseur doit fournir un courant continu sous 600 volts, si on applique les indications qui précèdent, le nombre de lames du collecteur doit être six fois plus considérable ainsi que le diamètre du collecteur.

Indépendamment des inconvénients que présente un collecteur de grand diamètre au point de vue pratique, il y a d'autres éléments à considérer : la vitesse tangentielle de cet organe qui, lorsqu'elle dépasse une certaine limite, peut compromettre sa solidité à cause des effets de la force centrifuge agissant sur les lames pour les disjoindre et provoquer ainsi un contact imparfait entre elles et les balais ; en outre, les pertes dues au frottement des balais sur le collecteur sont plus considérables.

Il ne suffit pas de diminuer la vitesse angulaire de la machine en augmentant le nombre de pôles, parce que l'on diminue alors d'autant l'arc embrassé par deux rangées consécutives de balais, arc que l'on a le plus grand intérêt à rendre aussi grand que possible. Il est préférable d'alimenter le convertisseur avec des courants alternatifs de fréquence plus basse, 25 à 30 périodes par exemple, ce qu'il est facile de réaliser là où le réseau n'a pas à alimenter en même temps un service d'éclairage. Mais là où la fréquence ne peut être inférieure à 40 périodes, c'est-à-dire lorsque le convertisseur est destiné à une installation à fréquence normale de 40 à 50 périodes par seconde, une limite est vite imposée soit en ce qui concerne sa puissance, aussi bien que sa tension.

C'est pourquoi, dans beaucoup d'installations, l'emploi de convertisseurs n'est guère possible quand il s'agit, par exemple, d'obtenir du courant continu sous une tension de 500 à 600 volts pour un service de traction électrique. On a songé à surmonter cette difficulté en employant deux collecteurs en série, afin de fractionner la tension entre chaque lame du collecteur, ce qui aurait permis de diminuer le diamètre de cet organe; mais le remède est, en réalité, plus mauvais que le mal, c'est pourquoi cette idée n'a jamais été pratiquement réalisée.

115. Rapport de transformation. — Soit un induit pourvu, d'une part, d'un collecteur et, de l'autre, de bagues de contact et placé dans un champ magnétique bipolaire.

Si cet induit fournit du courant continu, la force électromotrice agissant dans le circuit extérieur est la somme de toutes les forces électromotrices développées dans les spires constituant la moitié de l'induit, soit, par exemple, une force électromotrice totale de 100 volts.

En admettant que cet induit fournisse du courant alternatif simple à l'aide de deux prises de courant à 180° dans les mêmes conditions, c'est-à-dire sans modifier la vitesse angulaire ni l'intensité du champ inducteur, la force électromotrice passe d'une valeur nulle, lorsque les deux points de prise de

courant se trouvent sur la ligne joignant les deux pôles inducteurs, à la valeur de 100 volts (lorsque les deux points de prise de courant se trouvent sur une ligne perpendiculaire à celle qui joint les pôles). Si cette force électromotrice alternative prend des valeurs successives variant suivant la loi sinusoïdale, sa valeur efficace est :

$$\frac{100}{\sqrt{2}} = 70,7 \text{ volts.}$$

Dans le cas où l'induit donne des courants triphasés (trois prises de courant à 120°), le nombre de spires compris entre deux prises de courant consécutives est plus petit que dans le cas précédent et, par conséquent, la force électromotrice a une valeur efficace plus faible, mais non en proportion directe. On peut, en effet, démontrer que, si l'allure de la force électromotrice est encore sinusoïdale, la valeur efficace de la force électromotrice dans chaque groupe de spires est :

$$\frac{\sqrt{3}}{(2 \cdot \sqrt{2})} 100 = 61,3 \text{ volts.}$$

Il résulte de cela que, si on alimente un convertisseur avec du courant continu à 100 volts, on ne peut obtenir que du courant alternatif simple sous 70,7 volts ou des courants triphasés sous 61,3 volts. Les effets contraires se produisent précisément de la même manière. C'est pourquoi, si on veut qu'un convertisseur fournisse de courant continu sous 500 volts, il faut fournir des courants triphasés à la tension de :

$$500 \cdot 0,613 = 306,6 \text{ volts.}$$

Au lieu de faire arriver les courants triphasés par trois bagues reliées aux trois prises de contact de l'enroulement, on peut employer six bagues et six prises de contact équidistantes, de manière que deux prises consécutives soient décalées de 1/6 de période.

Lorsque les connexions de l'induit sont établies suivant le

système à *double triangle*, chaque circuit secondaire du transformateur doit être divisé en deux sections indépendantes comme le montre la figure 216, dans laquelle les points A, B,

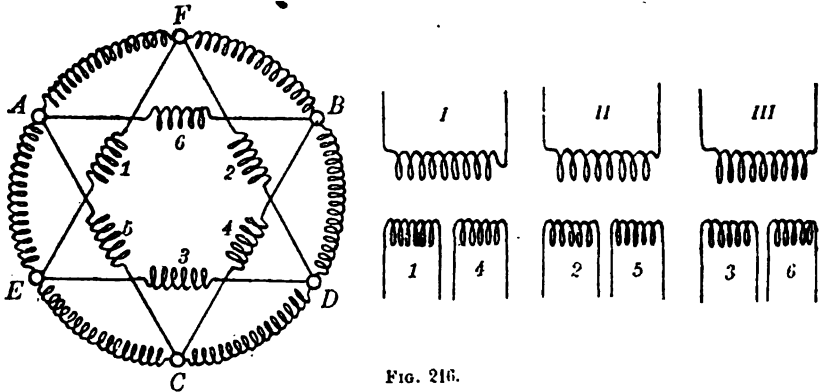


FIG. 216.

C, D, E, F sont les prises faites sur l'enroulement de l'induit, représenté par la ligne sinueuse circulaire, et correspondent

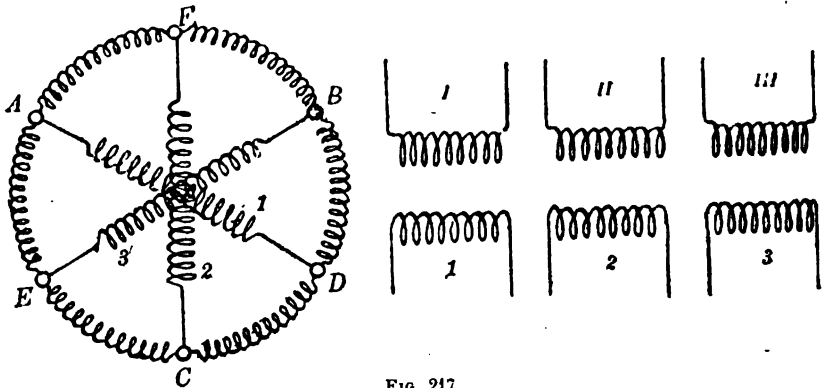


FIG. 217.

aux 6 bagues de contact auxquelles sont reliées, d'autre part, les extrémités des bobines secondaires 1, 2, 3, 4, 5, 6 des transformateurs, dans l'ordre indiqué sur la figure. Avec ce système de montage, le rapport de transformation est égal à 61,3 comme dans le cas du simple montage en courants triphasés.

Avec le montage *diamétral* (fig. 217), il n'est plus nécessaire

de subdiviser les bobines secondaires des transformateurs et le rapport de transformation est égal à 70,7 comme pour le courant alternatif simple.

Dans un convertisseur à six phases, la seconde disposition est préférable, à cause du rapport de transformation plus élevé et aussi parce que les connexions à établir sont moins compliquées. Dans les deux cas, le courant résultant dans les conducteurs de l'organe mobile a une intensité plus petite que lorsque le convertisseur est alimenté par des courants triphasés avec trois points de prise de courant seulement.

A égalité d'échauffement de l'induit, en prenant comme unité de puissance celle du convertisseur fonctionnant comme génératrice à courant continu, on obtient les rapports suivants :

Facteur de puissance du circuit d'alimentation.....	1	0,9	0,8
Puissance du convertisseur à 3 phases.	1,34	1,09	0,9
Puissance du convertisseur à 6 phases.	1,96	1,44	1,14

Quoique le convertisseur à six phases soit tout indiqué à cause de son meilleur rendement, on préfère généralement utiliser des convertisseurs à trois phases à cause de leur plus grande simplicité.

Les rapports qui viennent d'être donnés en ce qui concerne les tensions sont des rapports théoriques obtenus en admettant que les forces électromotrices ont une allure sinusoïdale et en négligeant les chutes de tension dans l'enroulement, qui varient de 1 et 2 0/0. En pratique, une distribution sinusoïdale du flux le long de la périphérie n'est pas réalisable et les rapports obtenus réellement sont un peu différents. Les rapports réels sont au maximum inférieurs de 6 à 7 0/0 aux rapports théoriques. En concentrant le champ magnétique, c'est-à-dire en donnant un plus faible développement aux épanouissements polaires, ce qui a pour effet de diminuer les fuites magnétiques, on augmente le rendement. Aussi, dans les convertisseurs pour courants triphasés que l'on construit

maintenant, le rapport de transformation atteint ordinairement 66,6 0/0, c'est-à-dire exactement les deux tiers. Dans un convertisseur alimenté par des courants triphasés sous 200 volts efficaces, on obtient pour le courant continu, à circuit ouvert, une tension de 300 volts.

Le convertisseur, ne différant pas essentiellement du transformateur statique, est autorégulateur pour maintenir la tension constante, c'est-à-dire que le rapport entre la tension du circuit d'alimentation et celle du circuit d'utilisation reste constant, abstraction faite des chutes de potentiel dues à la résistance ohmique de l'enroulement.

Lorsque le convertisseur est alimenté par du courant continu à tension constante, en modifiant l'intensité du champ on modifie en sens inverse la vitesse angulaire et le rapport entre les tensions reste invariable, on change seulement la fréquence du courant alternatif produit.

Par contre, si le convertisseur est alimenté par un courant alternatif à tension constante et à fréquence invariable, la vitesse angulaire reste constante et la machine fonctionne comme moteur synchrone. Les variations d'intensité du champ inducteur n'ont aucune action sur le circuit à courant continu, la tension devant rester constante, si celle du courant alternatif qui alimente le convertisseur l'est également; mais ces variations d'intensité du champ inducteur agissent sur le circuit d'alimentation en modifiant le décalage de phase entre l'intensité et la tension, précisément comme cela se produit dans un moteur synchrone (§ 94). Lorsqu'on vient à diminuer l'excitation, le décalage en retard de l'intensité par rapport à la tension augmente, mais la tension du courant continu débité reste constante. Cela s'explique en remarquant que, si l'intensité du courant d'alimentation est décalée en retard par rapport à sa tension, il existe une composante magnétisante qui, puisqu'il s'agit d'un moteur, renforce l'intensité du champ, compensant ainsi l'affaiblissement produit lorsque l'excitation diminue (dans une génératrice, au contraire, il y a démagnétisation lorsque l'intensité est décalée en retard sur la tension). En renforçant

l'intensité du champ, on peut arriver à décaler en avant l'intensité par rapport à la tension; il se produit alors un phénomène inverse : le courant magnétisant a, dans ce cas, une action affaiblissante; le champ résultant, qui est la différence existant entre le champ principal et celui que produit la composante magnétisante, ne change pas et, par suite, la tension dans le second circuit reste constante.

Cela explique pourquoi il n'est pas possible de modifier la tension du premier circuit lorsqu'on fait varier l'excitation, la tension de ce circuit restant constante. Mais, comme en pratique il est souvent nécessaire d'augmenter la tension avec la charge, il est indispensable d'avoir recours à une disposition qui permette d'obtenir ce résultat.

116. Régulation de la tension dans un convertisseur.

— Considérant toujours le cas de la transformation de courants alternatifs en courant continu, on comprend que, pour faire croître la tension du courant continu, il faut augmenter la tension des courants alternatifs alimentant le convertisseur.

Deux cas peuvent se présenter :

Le convertisseur est alimenté par une seule génératrice qui ne fonctionne que pour lui fournir le courant nécessaire, c'est-à-dire qu'elle n'a pas d'autres appareils à alimenter. Dans ce cas, du reste assez peu fréquent, il est possible d'arriver au résultat voulu en faisant augmenter graduellement la tension de l'alternateur à mesure que la charge augmente, tandis que l'excitation du convertisseur est réglée de manière à toujours avoir un facteur de puissance égal à l'unité ($k = 1$), ce que l'on vérifie à l'aide d'un phasemètre.

On peut aussi procéder d'une autre manière : on maintient constante l'excitation de l'alternateur et on élève la tension en utilisant l'action magnétisante d'un courant dont l'intensité est en avance de phase sur la tension (Voir § 94). Pour produire cette avance de phase, il faut surexciter le convertisseur jusqu'au degré voulu. Dans la pratique, on procède de la manière suivante : lorsque la charge est faible, on maintient

l'excitation du convertisseur assez basse, l'intensité est alors fortement décalée en retard ; son action démagnétisante sur le champ de l'alternateur est alors grande et la tension du courant d'alimentation est diminuée. Lorsque la charge augmente, on augmente l'excitation du convertisseur pour arriver à rendre le facteur de puissance égal à l'unité. En continuant à augmenter l'excitation, à mesure que la charge s'approche de la charge normale, il se produit une avance de phase, l'intensité du champ de l'alternateur est renforcée et la tension disponible devient plus grande.

On peut aussi rendre le système autorégulateur en ayant recours à l'excitation compound pour le convertisseur. Alors, à mesure que l'intensité du courant continu augmente progressivement avec la charge, l'intensité du champ inducteur augmente simultanément et il se produit les phénomènes qui ont déjà été exposés.

Si le système employé est insuffisant pour produire l'augmentation voulue de la tension, à cause, par exemple, de la faible réactance de l'alternateur, on peut intercaler dans le circuit, sur chacun des conducteurs, une bobine de réactance réglable. On sait que la force électromotrice produite par une bobine de réactance est en retard de $1/4$ de période sur l'intensité du courant qui y circule. Or, à l'aide des courbes sinusoïdales, on peut mettre en évidence que, lorsque l'intensité du courant est décalée en retard, la résultante de la force électromotrice principale et de la force électromotrice due à la self-induction est plus faible en valeur absolue que la force électromotrice principale. Si, au contraire, le courant est décalé en avance, la force électromotrice due à la self-induction agit pour donner une résultante plus grande.

On va maintenant examiner le second cas, qui est, du reste, le plus fréquent. C'est celui dans lequel le convertisseur est alimenté par un réseau de distribution à potentiel constant. Pour régler la tension, il n'y a qu'un procédé à employer, c'est de décaler l'intensité en avant ou en arrière de la tension en intercalant en série sur chaque conducteur une

bobine de réactance, dont l'action affaiblissante ou renforçante a été déjà expliquée. On peut aussi rendre le système autorégulateur en compensant le champ du convertisseur par un enroulement en série.

Les limites du réglage que l'on peut obtenir avec les bobines de réactance ne sont pas très grandes et, de plus, elles produisent toujours un décalage de phase supplémentaire. Pour atteindre le but cherché sans qu'il soit nécessaire de produire un décalage de phase de l'intensité au moyen de l'excitation et arriver en même temps à une régulation dans de plus larges limites, on peut obtenir une force électromotrice supplémentaire à l'aide d'un phénomène d'induction mutuelle.

En insérant en série dans les conducteurs d'alimentation les trois circuits d'un induit de moteur à champ tournant, le stator est alors excité en dérivation. Le rotor est immobilisé pour l'empêcher de tourner et, à l'aide d'une vis sans fin commandée par un petit volant, on peut lui donner un certain décalage par rapport au stator. Le champ tournant constant induit une force électromotrice alternative constante dans chacun des circuits du rotor, mais cette force électromotrice, suivant la position qu'occupe le rotor par rapport au stator, est plus ou moins décalée de phase par rapport à la tension principale. Il est possible de la mettre en opposition complète, ou bien en parfaite concordance de phase en plaçant le rotor dans les diverses positions intermédiaires.

Sur la figure 218, on a représenté ce dispositif placé entre le transformateur réducteur de tension relié à la ligne et le convertisseur. L'enroulement du stator n'est pas figuré; celui du rotor est représenté par trois circuits parallèles afin de ne pas croiser les communications; mais, en réalité, ces trois circuits sont placés à 120° l'un de l'autre et restent indépendants, car ils ne sont plus groupés en triangle ou en étoile comme dans un moteur asynchrone. Il n'est pas nécessaire d'utiliser des bagues de contact, de simples conducteurs flexibles suffisent, le rotor ne devant effectuer au maximum

qu'une demi-rotation dans un moteur bipolaire et un déplacement proportionnellement d'autant moindre que le nombre de champs du rotor est plus grand.

Le rotor sur lequel agit un couple moteur assez grand ne doit pas tourner, comme on l'a déjà dit, et il nécessite une force considérable pour le maintenir en repos s'il est de grandes dimensions, force qu'il est nécessaire de surmonter quand il faut le décaler. On peut tourner cette difficulté en disposant

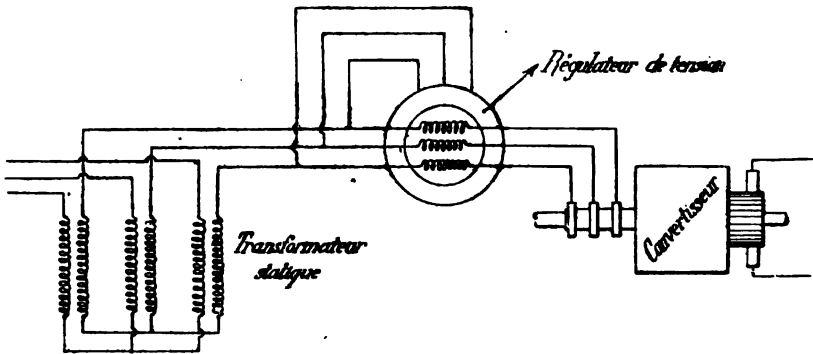


FIG. 218.

l'un à côté de l'autre deux moteurs à champ tournant dont les induits sont reliés mécaniquement. Si les champs produits tournent en sens contraire, les couples moteurs s'équilibrent et la force nécessaire pour maintenir l'induit fixe devient très petite.

Plusieurs de ces dispositifs, construits par la maison Siemens et Halske, sont en fonctionnement dans les réseaux de distribution de Paderno ; ils servent à maintenir constante la tension des circuits de distribution pour l'éclairage de plusieurs villes et villages. Ils fonctionnent comme régulateurs afin de compenser les variations inévitables de tension qui se produisent sur les lignes d'un grand réseau de distribution alimentant plusieurs sortes d'appareils d'utilisation. Le fonctionnement de ce dispositif de régulation peut être, dans ce cas, rendu automatique par l'addition d'un *relais* pour tension constante et d'un moteur électrique, tournant à droite ou à gauche sui-

vant que la tension augmente ou baisse, ce moteur étant relié par mécanisme à vis sans fin au rotor du moteur à champ Ferraris. La figure 219 représente cet appareil régulateur.

Certains constructeurs utilisent un transformateur pour effectuer le réglage de la tension. A cet effet, le transformateur est disposé pour pouvoir faire des prises de courant en divers points du circuit secondaire. La tension varie alors d'après le nombre de spires actives.



FIG. 219.

Il est préférable d'employer un transformateur auxiliaire, disposé comme le montre la figure 163, et de faire varier le nombre de spires actives à l'aide d'un appareil ordinaire à contacts et le sens de la force électromotrice en inversant les communications.

117. Démarrage des convertisseurs. — Lorsque le convertisseur est utilisé pour transformer des courants alternatifs en courant continu, il se comporte comme un moteur synchrone et il faut le faire démarrer à vide; les mêmes procédés qui ont été indiqués à ce sujet dans le paragraphe 92 peuvent être employés dans ce cas. Dès que le synchronisme est atteint, il faut d'abord fermer le circuit d'excitation et puis le circuit extérieur à courant continu.

On a déjà indiqué (§94) qu'en employant les courants alternatifs pour le démarrage et en fermant l'excitation au moment où le synchronisme est presque atteint, la polarité de l'inducteur peut ne pas être celle qu'il faut en ce qui concerne le sens de la force électromotrice dans l'induit au moment où le

champ s'établit. Ce fait, qui ne présente pas une grande importance au point de vue du fonctionnement du moteur synchrone, en a une très grande pour le convertisseur, parce qu'il détermine une inversion de polarité du côté du courant continu et il peut se produire si le courant d'excitation est fourni par le convertisseur même.

En effet, le courant recueilli sur le collecteur n'est continu que lorsque le synchronisme est parfait. Si le synchronisme n'est pas atteint, le courant est alternatif et a une fréquence correspondant au glissement.

Il peut donc arriver qu'au moment où l'on ferme le circuit d'excitation, le courant ait un sens tel que la polarité normale de l'inducteur soit inversée et si, au même instant, le convertisseur atteint le synchronisme, cette polarité inverse persiste et il n'y a plus possibilité de la modifier si l'on n'interrompt l'excitation pour recommencer l'opération.

Cette difficulté est évitée lorsqu'on peut disposer momentanément, pour produire l'excitation, d'une source d'énergie électrique indépendante qui est généralement une batterie d'accumulateurs. C'est aux accumulateurs que l'on a recours très fréquemment pour faire démarrer le convertisseur comme moteur à courant continu en procédant suivant les règles ordinaires et les précautions habituelles relatives au démarrage des moteurs de ce genre.

Ce procédé de démarrage est préférable, lorsqu'il est possible de l'appliquer, car, lorsqu'on procède au démarrage en utilisant les courants alternatifs, l'opération exige des courants très intenses qui, étant presque entièrement des courants magnétisants, peuvent causer de graves perturbations sur le réseau principal de distribution.

La figure 220 représente un des convertisseurs Westinghouse installés dans la station des tramways de Glasgow. Le démarrage est obtenu à l'aide d'un petit moteur à champ tournant que l'on voit sur la droite. La petite dynamo, visible sur la gauche, est un survolteur permettant d'augmenter la tension du courant continu quand il sert à la charge des accumulateurs.

Lorsque des convertisseurs ainsi établis fonctionnent en parallèle et que leur excitation est mixte, la mise en service de l'un d'eux sur le circuit à courant continu doit s'effectuer avec toutes les précautions que l'on prend pour la mise en

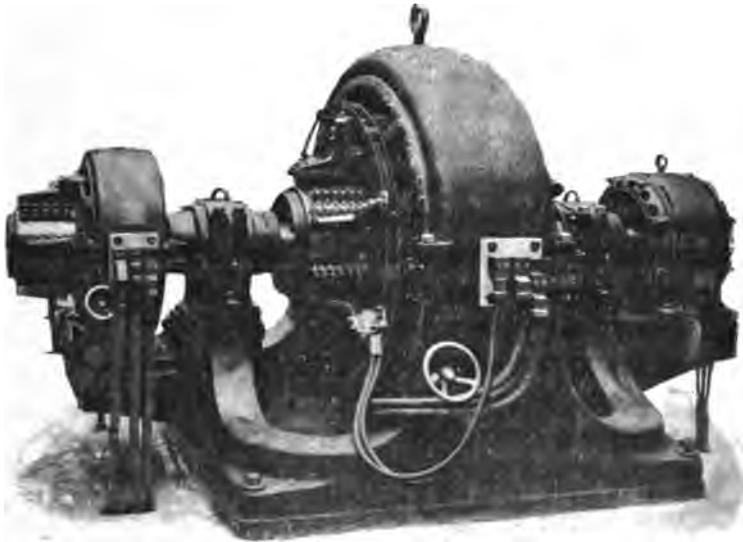


FIG. 220.

marche de dynamos compound, c'est-à-dire que l'on doit, avant tout, fermer le circuit sur le fil d'équilibre pour ne pas inverser la polarité des inducteurs.

118. Oscillations produites dans les convertisseurs. —

Dans le chapitre XIII, paragraphe 95, on a exposé longuement les causes qui produisent des oscillations dans les moteurs synchrones. Ce qui a été dit à ce sujet s'applique également aux convertisseurs lorsqu'ils servent à transformer des courants alternatifs en courant continu, mais il y a lieu de faire remarquer que, dans ce cas, le phénomène peut prendre une plus grande importance à cause des perturbations qu'il entraîne.

La cause de ces oscillations est presque toujours la varia-

tion de la fréquence des courants alternatifs alimentant le convertisseur, variations causées par le mauvais fonctionnement des régulateurs des moteurs qui actionnent les alternateurs ou encore par de brusques variations de charge. Comme le convertisseur est, en réalité, un moteur synchrone fonctionnant sans charge, son arbre n'ayant pas de couple résistant, on comprend que, libre comme il est, il se trouve dans les conditions les plus favorables pour suivre les variations de fréquence; par suite de l'inertie de l'organe mobile, les oscillations peuvent être amplifiées d'une façon excessive lorsqu'il y a résonance entre les périodes d'oscillation propres à l'organe mobile du convertisseur et les périodes d'oscillation dues aux perturbations. Le cas le plus à craindre est celui où ces périodes sont égales, mais les effets produits peuvent être encore considérables lorsque le rapport des périodes est un nombre entier. Dans les moteurs synchrones où il se produit des oscillations, elles sont fortement combattues par les variations conséquentes en sens inverse du couple résistant. Dans le convertisseur, au contraire, une variation soudaine de 10 0/0 dans la fréquence peut produire de très fortes oscillations qui ont pour effet non seulement de compromettre la stabilité du fonctionnement, mais encore de produire des oscillations de la tension du courant continu, causant une forte production d'étincelles au collecteur.

Dans les premiers convertisseurs où le phénomène fut observé, la tension du courant continu variait de 7 à 8 0/0 en plus ou moins de la tension moyenne; dans les convertisseurs actuellement construits, le phénomène ne se produit presque plus, grâce à l'emploi de *circuits amortisseurs* (§ 95).

Ces circuits peuvent être disposés aux extrémités des pièces polaires de l'inducteur (système Hutin et Leblanc, *fig. 138*). La compagnie Westinghouse entoure les extrémités polaires d'un gros anneau en cuivre. La *General Electric Co*, qui s'est fait une véritable spécialité de la construction des convertisseurs, arrive au même résultat en disposant entre les extrémités saillantes de deux pôles voisins une très grande spire

plate de cuivre (*fig. 221*). Lorsque le synchronisme est parfait, cette spire ne produit aucune action ; s'il survient une oscillation, le champ tournant de l'organe mobile, n'étant plus fixe dans l'espace, produit d'énergiques courants induits parasites qui ramènent promptement le système au synchronisme. Quelquefois, on installe un véritable pont de cuivre massif entre les épanouissements polaires.

Si l'emploi de circuits amortisseurs limite dans une large mesure le phénomène des oscillations, cela n'empêche pas qu'il soit nécessaire d'employer, pour la commande des alternateurs, des moteurs à très grand coefficient de régularité (Voir chap. xvii), parce qu'il suffit quelquefois d'une variation de l'ordre de 1 0/0 dans la fréquence pour que des oscillations se produisent dans le convertisseur. Avec des moteurs hydrauliques, les variations de vitesse angulaire ne se produisent pas, le couple moteur étant constant. Toutefois, pour ces moteurs, aussi bien que pour ceux à vapeur, de notables variations de vitesse peuvent survenir à la suite de brusques variations de charge, parce que les régulateurs de ces machines ne prennent pas immédiatement la position correspondant au nouveau régime et fréquemment effectuent quelques oscillations avant de prendre la position voulue. Ce fait est surtout à craindre avec les turbines à basse chute où des servomoteurs commandent les aubages, les vannes, les soupapes, etc., qui, quoique parfaitement équilibrés, nécessitent des efforts notables pour être mis en mouvement. A ce propos, il y a lieu de faire remarquer qu'en équilibrant ces organes il en résulte un certain avantage au point de vue de la diminution des efforts nécessaires pour les mettre en mouvement ; mais, d'un autre côté, par suite de l'augmentation d'inertie du système, on introduit de nouvelles causes de perturbation.

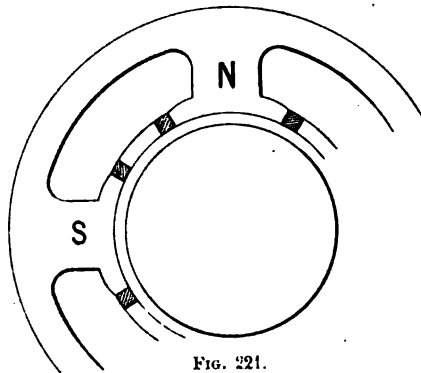


FIG. 221.

L'emploi de *modérateurs* bien étudiés est, dans ce cas, indispensable.

Indépendamment des oscillations qui sont plus ou moins imputables aux moteurs commandant les alternateurs, parce qu'elles dépendent de la fréquence, il peut s'en produire également par suite des variations de charge du convertisseur et aussi par suite des variations de tension. Ces oscillations ont une période qui, naturellement, dépend du moment d'inertie de l'induit, moment dont la valeur doit être aussi réduite que possible pour que les oscillations ne soient pas amplifiées quelle que soit la cause qui les produit.

De même ces oscillations peuvent être atténuées par l'emploi des circuits amortisseurs déjà décrits. Ces circuits amortisseurs servent aussi à éteindre les oscillations qui peuvent se produire dans des convertisseurs couplés en parallèle, lors des variations de charge inévitables, comme cela se passe dans les dynamos à courant continu. Ce phénomène, qui se produit aussi quelquefois dans les alternateurs, comme on le verra ultérieurement, peut rendre le service absolument impossible.

Pour évaluer la grandeur des oscillations dans un convertisseur, on peut appliquer parfaitement la méthode, décrite dans le chapitre xvii du tome II, pour la détermination des écarts de vitesse angulaire des moteurs commandant les alternateurs.

119. Rendement des convertisseurs. — On a déjà fait remarquer que le rendement d'une transformation effectuée par un convertisseur est toujours supérieur à celui de la même transformation faite par un moteur-générateur. Un convertisseur atteint facilement un rendement industriel de 90 0/0 et même, à puissance égale, présente un meilleur rendement que celui d'une génératrice à courant continu ; en effet, l'échauffement de l'induit étant moindre, cet induit peut être construit plus légèrement et, par suite, les pertes hystérétiques sont plus faibles. Il ne faut pas oublier que, dans presque la totalité

des cas, le convertisseur est alimenté par un transformateur destiné à abaisser la tension du réseau de distribution, transformateur qui peut être supprimé lorsqu'on utilise un moteur-générateur, à la condition toutefois que la tension de la ligne soit compatible avec la construction du moteur synchrone qu'elle doit alimenter.

En ce qui concerne les pertes par frottement, par hystérésis et courants de Foucault, ainsi que par effet Joule dans l'inducteur, le convertisseur fonctionne, à cet égard, dans les mêmes conditions qu'une génératrice à courant continu de construction identique. Il n'en est pas de même en ce qui concerne les pertes par effet Joule dans l'induit;

en effet, l'échauffement est d'autant moindre que le nombre de phases des courants alternatifs est plus grand, ce qui nécessairement entraîne une plus faible intensité de courant dans les conducteurs (Voir § 115). Ainsi, avec des courants triphasés, les pertes par effet Joule ne représentent que 60 0/0

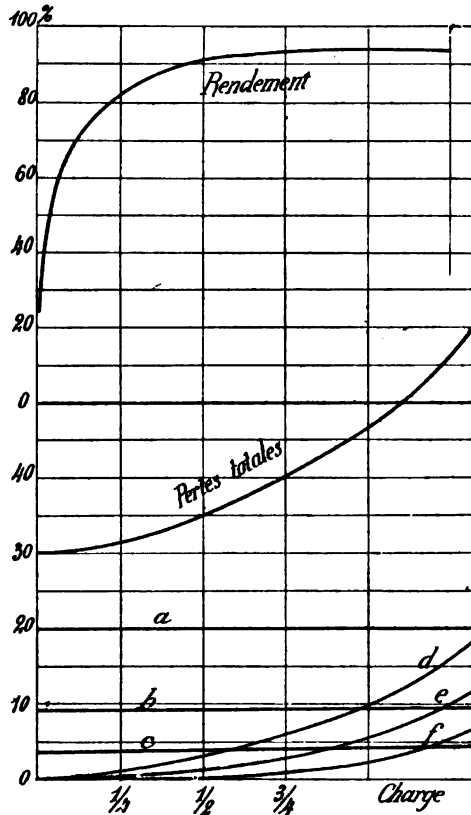


FIG. 222.

Légende :

- a, pertes dans le noyau de l'induit;
- b, pertes par frottements (paliers, balais, résistance de l'air);
- c, R_1^2 shunt, inducteur et rhéostat;
- d, R_2^2 induit;
- e, R_1^2 balais;
- f, R_1^2 inducteur en série et sa dérivation.

Fréquence : 25 périodes. — Tension du courant continu : 500 volts.

(Pour le côté du courant continu les balais sont en charbon et en cuivre du côté alternatif.)

environ des pertes qu'il y aurait dans la même machine fonctionnant, sous la même charge, comme génératrice à courant continu. Si, au contraire, on utilise des courants alternatifs à six phases, les pertes se réduisent à 25 0/0 au maximum.

En raison de ce qui vient d'être exposé et en tenant compte aussi, d'une part, des frottements des balais sur le collecteur et, d'autre part, sur les bagues, le rendement d'un convertisseur (le transformateur étant laissé de côté) est élevé; il atteint de 93 à 94 0/0 à pleine charge lorsque la puissance est supérieure à 100 kilowatts; il descend à 90 ou 92 0/0 à demi-charge.

La figure 222 donne les courbes de rendement d'un convertisseur de 900 kilowatts, construit par la *General Electric Co*, ainsi que la valeur des diverses pertes à des charges différentes.

Il faut pourtant tenir compte de ce fait que les valeurs qui viennent d'être indiquées peuvent, pratiquement, être sensiblement inférieures lorsque le convertisseur a des tendances à osciller par suite des causes précédemment indiquées. Les circuits amortisseurs rendent pratiquement nulles ces oscillations à cause de la production de courants de Foucault énergiques, courants qui produisent une dépense d'énergie et influent directement sur le rendement du convertisseur.

120. Du choix à faire entre un convertisseur et un moteur-générateur. — Toutes choses égales d'ailleurs, aussi bien pour le convertisseur que pour le moteur-générateur, il est indispensable d'utiliser un transformateur statique pour abaisser convenablement la tension du courant fourni par le réseau de distribution; le convertisseur est préférable, étant admis que la fréquence, la puissance et le rapport de transformation permettent une construction rationnelle de ce convertisseur.

Lorsque le moteur-générateur permet la suppression du transformateur, suppression qu'il n'est pas possible de faire avec un convertisseur, on ne voit pas les causes qui feraient préférer l'une de ces machines à l'autre. Car, si au point de vue du rendement le convertisseur est évidemment préférable, il peut arriver que l'obligation de refroidir artificiellement le

transformateur, lorsqu'il est d'une certaine puissance, implique des difficultés qu'il n'est pas toujours facile de surmonter dans une sous-station de transformation. Il faut ajouter que le groupe moteur-générateur présente de plus grandes limites de régulation de la tension du courant continu que celles que l'on peut convenablement obtenir avec un convertisseur.

Dans le cas du moteur-générateur, si le moteur est synchrone, il peut toujours fonctionner avec un facteur de puissance égal à l'unité, ce qu'il n'est pas toujours possible d'obtenir avec un convertisseur.

Etant admis que l'on n'utilise pas de convertisseur, il reste à déterminer si le moteur-générateur doit comporter un moteur synchrone ou asynchrone.

On a déjà exposé dans les chapitres xiii et xiv les considérations qui peuvent servir de guide pour le choix à faire. Il faut néanmoins rappeler ici que, dans le cas de brusques surcharges et de fortes variations de tension, le moteur synchrone peut perdre son synchronisme et s'arrêter, tandis que le moteur asynchrone supporte sans inconvénients et sans s'arrêter une surcharge brusque maximum de 100 0/0, de même qu'il supporte de grandes variations de tension. Ces variations de tension dépendent du type d'installation et du système de distribution; quelquefois aussi elles sont dues au fonctionnement des parafoudres lors des orages. En ce qui concerne les surcharges, si l'on installe en dérivation sur le circuit à courant continu une batterie d'accumulateurs, ce qui est quelquefois le cas lorsqu'on doit alimenter des tramways ou des chemins de fer électriques, ces surcharges n'ont alors qu'une faible influence sur le moteur et l'on peut donner la préférence au moteur synchrone.

Avec un convertisseur, si l'on craint que les brusques surcharges et les variations imprévues de tension n'altèrent le synchronisme, il n'y a qu'à atténuer les effets qui peuvent se produire en employant le même procédé, c'est-à-dire une batterie d'accumulateurs.

121. Variateur de courant Sacerdote. — Le variateur de courant imaginé par l'ingénieur Secondo Sacerdote appartient à la catégorie des convertisseurs. Cet appareil n'est pas nouveau comme principe, mais il a reçu, comparativement aux appareils de même genre qui l'ont précédé, de tels perfectionnements qu'il constitue un véritable appareil industriel tant au point de vue de la régularité de son fonctionnement qu'à celui du rendement, qui est élevé.

Si l'on considère un convertisseur ordinaire, on voit qu'il comporte un induit mobile pourvu d'un collecteur, un champ magnétique fixe et des porte-balais avec leurs balais. Si l'on rend l'induit fixe et que l'on fasse tourner le champ magnétique et les balais en sens inverse, il n'y a rien de changé dans le fonctionnement de la machine.

Dans ces conditions, le champ magnétique maintenu en rotation peut être remplacé par un inducteur fixe alimenté par des courants polyphasés, c'est-à-dire par un stator ordinaire. Comme, d'autre part, l'induit est fixe, l'entrefer peut être supprimé et l'on diminue ainsi notablement les fuites magnétiques. Le stator entoure alors simplement l'induit, qui peut être, à volonté, du type en anneau ou du type en tambour. Les balais doivent tourner synchroniquement avec le champ, résultat auquel on arrive en les actionnant par un petit moteur synchrone.

De nombreuses tentatives ont été faites pour réaliser industriellement une machine fondée sur ce principe, mais sans succès. De meilleurs résultats paraissent avoir été obtenus récemment par l'ingénieur Sacerdote.

Dans son *variateur*, c'est le nom qu'il a donné à son appareil, le collecteur affecte la forme d'un cylindre creux, à l'intérieur duquel sont disposés les balais, afin que la force centrifuge contribue à maintenir leur adhérence contre le collecteur. Les balais sont entourés de papier d'amiante afin que les étincelles qui tendent à se produire entre eux et les lames du collecteur soient mécaniquement interrompues. Le calage des balais en avant ou en arrière de la ligne neutre,

comme dans les dynamos à courant continu, est rendu possible par suite de la disposition donnée au petit moteur synchrone dont la carcasse portant l'inducteur, au lieu d'être fixe, peut se déplacer d'un certain angle autour de l'axe.

On a déjà indiqué dans le paragraphe 117 que le courant obtenu aux balais du collecteur n'est continu qu'autant que ces balais ont une vitesse angulaire identique à celle du champ. Si la vitesse angulaire n'est pas la même, le courant n'est plus continu, mais il est alternatif et a une fréquence proportionnelle à la différence qui existe entre la vitesse angulaire du champ et celle des balais.

Le variateur de courant Sacerdote peut être également utilisé pour transformer des courants alternatifs en d'autres courants alternatifs, mais de fréquence différente. Il suffit pour cela de modifier le système d'engrenages qui sert à transmettre le mouvement du moteur synchrone aux porte-balais.

Comme cet appareil est réversible, on conçoit qu'il présente des propriétés extrêmement intéressantes, d'autant plus que son stator peut être alimenté par des courants à haute tension.

Il y a lieu d'espérer que les bons résultats obtenus avec un de ces appareils de dimensions modestes seront entièrement confirmés par de nouvelles expériences faites avec une machine plus puissante et que l'on aura alors un nouveau système de transformateur dont le besoin se fait toujours sentir; il sera alors possible de réaliser avec simplicité et un bon rendement des installations qui entraînent actuellement de nombreuses complications.

CHAPITRE XVII

COUPLAGE DES ALTERNATEURS

122. Coefficient de régularité des moteurs commandant les alternateurs. — Avant d'aborder l'étude du couplage des alternateurs, il est indispensable de rappeler quelques notions relatives au fonctionnement des moteurs qui doivent actionner les alternateurs, qu'ils soient hydrauliques, à vapeur ou à gaz.

Dans certains cas, les moteurs sont munis d'un régulateur à force centrifuge qui a pour fonction d'agir sur les organes de distribution ou d'admission, soit directement, soit indirectement par l'intermédiaire d'un servo-moteur, afin de maintenir pratiquement constante la vitesse angulaire du moteur. Il ne faut pas oublier que ces régulateurs sont reliés cinématiquement aux organes qu'ils commandent et que la position de ces derniers est, par suite, étroitement liée à celle du régulateur; puisque la régulation se produit lorsque, par suite d'une variation de charge, la vitesse angulaire varie, il s'ensuit qu'entre le fonctionnement à vide et le fonctionnement à pleine charge, la vitesse angulaire du moteur doit forcément subir des variations.

Si la vitesse angulaire devait rester rigoureusement constante, on devrait effectuer la régulation d'une manière complètement différente, en partant d'autres principes.

Il est donc bien admis que la vitesse angulaire d'un moteur qui reste pratiquement constante est, en réalité, variable. On

désigne sous le nom de *coefficient de régularité* le rapport 0/0 qui existe entre l'écart du nombre de tours par minute dans les conditions extrêmes de fonctionnement (à vide et à pleine charge) et la vitesse moyenne, exprimée en tours par minute. Ainsi un moteur à vapeur qui, à vide, fait 101 tours par minute et, à pleine charge, sous l'action du régulateur, n'en fait que 99, a un coefficient de régularité de 2 0/0. Ce coefficient est le même pour une machine qui fait 202 t : m à vide et 198 t : m à pleine charge.

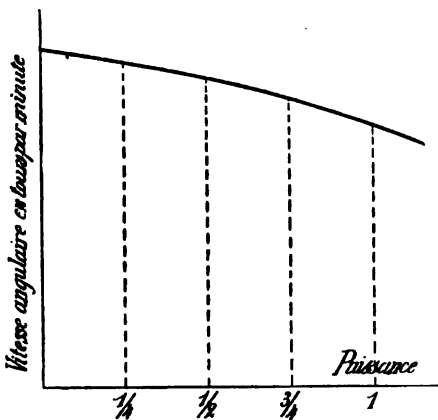


FIG. 223.

Il résulte de ce qui vient d'être exposé que, dans les moteurs actuels, *la vitesse angulaire est fonction de la charge* et on peut

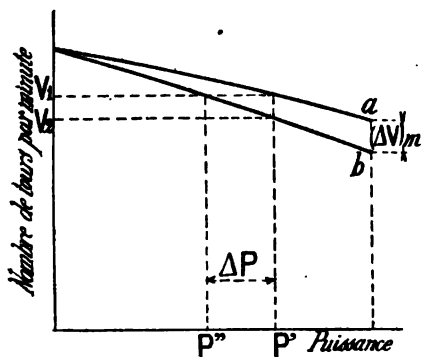


FIG. 224.

représenter ce fait à l'aide d'un diagramme, en portant en abscisses les puissances développées et en ordonnées la vitesse angulaire en tours par minute. On obtient ainsi une courbe plus ou moins inclinée (*fig. 223*) suivant le coefficient de régularité du moteur, courbe qui, généralement, n'a

pas la même allure lorsqu'on la trace en partant d'une charge nulle pour arriver à la charge maximum ou qu'on la trace en sens inverse. Pourtant la différence est très petite et on peut la négliger.

En prenant deux moteurs identiques, sortant des ateliers

du même constructeur, il arrive le plus souvent, même avec des régulateurs exactement contrôlés, que les courbes de diminution de vitesse obtenues pour chacun d'eux ne sont pas superposables et que, même en partant du même point (fonctionnement à vide), les deux courbes vont graduellement en s'écartant, parce que le fonctionnement des moteurs pour une charge déterminée ne se produit pas à une vitesse identique.

Soient *a* et *b* (fig. 224) la chute de vitesse angulaire de deux moteurs identiques. On voit, d'après le diagramme, qu'à la

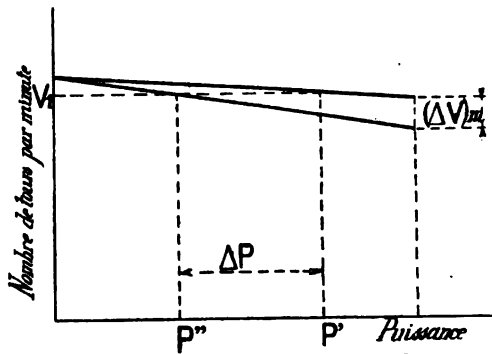


FIG. 225.

vitesse V_1 le premier moteur développe une puissance P' et le second une puissance P'' . Pour une même puissance développée P' , si le premier a une vitesse V_1 , le second a une vitesse V_2 .

La différence $V_1 - V_2 = \Delta V$ est pratiquement très petite, mais on verra, lorsqu'il sera question du couplage des alternateurs, que cette différence, quoique faible, ne doit pas absolument exister.

Si on rend solidaires les deux moteurs à l'aide d'un joint, ils prennent une vitesse angulaire unique V_1 , par exemple, pour une charge déterminée. Dans ce cas, les puissances développées par chacun d'eux ne sont pas égales : le premier développe une puissance P' et le second une puissance P'' .

Il y a un point très important à retenir, c'est que la différence

$P' - P'' = \Delta P$ entre les puissances développées, pour un même écart maximum $(\Delta V)_m$ entre les vitesses angulaires, est d'autant plus grande que les courbes représentatives de la chute de vitesse sont moins inclinées l'une par rapport à l'autre, c'est-à-dire que les coefficients de régularité sont plus élevés.

En comparant les courbes de la figure 225, relatives à deux moteurs ayant un coefficient de régularité élevé, avec celles de la figure 224, qui se rapportent à deux moteurs ayant un coefficient de régularité plus faible, on trouve, dans les deux cas, le même écart maximum $(\Delta V)_m$ à pleine charge et on voit que si les moteurs sont accouplés, pour une même vitesse angulaire V_1 , l'écart ΔP est plus grand dans le second cas que dans le premier.

On doit en conclure que, pour des moteurs couplés, *la répartition des charges se fait d'autant mieux que leur coefficient de régularité est plus faible*, résultat qui, au premier aspect, semble paradoxal.

123. Coefficient d'uniformité des moteurs et écart angulaire. — Lorsque le couple moteur agissant sur l'arbre d'un moteur n'est pas constant pendant la durée d'un tour, mais oscille entre des valeurs déterminées, la vitesse, pendant que s'effectue un tour, n'est pas uniforme, mais oscille elle aussi entre une valeur minimum et une valeur maximum. Afin de rendre moins sensibles les effets des variations du couple moteur, on utilise des couples correcteurs, dus à l'inertie, en munissant le moteur d'un volant approprié. On sait, en mécanique, que le moment d'inertie que doit présenter ce volant dépend de l'écart admissible de vitesse angulaire pendant un tour. En représentant par V_α la vitesse minimum pendant un tour, par V_β la vitesse maximum et par V_m la vitesse moyenne, on donne le nom de *coefficient d'uniformité* du moteur au rapport :

$$\frac{V_m}{(V_\beta - V_\alpha)}$$

Plus fréquemment, on se sert du rapport inverse :

$$\frac{(V_{\alpha} - V_{\omega})}{V_m}$$

que l'on désigne sous le nom de *coefficient d'irrégularité* ou de *disuniformité*.

C'est pourquoi, lorsqu'on dit que, dans un moteur, ce coefficient atteint un centième, cela veut dire que la vitesse angulaire peut osciller entre 99 et 100 t : m et entre 100 et 101 t : m, la vitesse moyenne étant de 100 t : m ; il est beaucoup plus exact d'appeler coefficient de disuniformité le rapport

$$\frac{(V_{\alpha} - V_{\omega})}{2 V_m},$$

comme M. Potier a eu récemment l'occasion de le faire remarquer à la *Société internationale des Électriciens*.

La vitesse pendant un tour peut rester uniforme dans une turbine, qu'elle soit hydraulique ou à vapeur ; elle est, au contraire, sujette à des variations dans toute machine comportant des pistons. Ces variations sont d'autant plus grandes que le nombre de cylindres est plus petit ; c'est pour cela que les variations atteignent le maximum dans les moteurs à explosion (à gaz ou à pétrole).

Comme on l'a déjà dit, le coefficient d'uniformité d'un moteur peut être amélioré en augmentant l'inertie des organes animés d'un mouvement de rotation, en ayant soin que leur masse soit uniformément distribuée et, si cela n'est pas possible, il faut au moins les équilibrer également, comme c'est le cas pour les manivelles, les arbres coudés, etc.

En employant deux ou plusieurs cylindres, dans lesquels se meuvent des pistons agissant sur autant de manivelles convenablement décalées entre elles, on peut améliorer beaucoup le coefficient d'uniformité d'un moteur, c'est-à-dire qu'avec un même coefficient d'uniformité on obtient un plus faible *écart angulaire* ; on désigne sous le nom d'*écart angulaire* l'angle maximum dont une manivelle de moteur se déplace compara-

tivement à une manivelle ayant théoriquement un mouvement rigoureusement uniforme.

En ce qui concerne le fonctionnement des alternateurs couplés en parallèle, ce n'est pas tant le coefficient d'uniformité que l'écart angulaire qu'il convient de considérer, car de ce dernier dépend l'avance ou le retard que la force électromotrice d'un alternateur peut présenter par rapport à la différence de potentiel existant entre les barres du tableau de distribution, c'est-à-dire par rapport à la force électromotrice d'un autre alternateur avec lequel il doit être couplé.

Le coefficient d'uniformité et l'écart angulaire sont deux valeurs étroitement liées entre elles dans un moteur déterminé; toutefois, il ne faut pas perdre de vue que, si un moteur à vapeur monocylindrique et un à deux cylindres avec manivelles à 90° présentent le même coefficient d'uniformité, l'écart angulaire est plus grand dans le premier que dans le second. Il s'ensuit que le moteur à deux cylindres peut convenir pour actionner un alternateur destiné, par exemple, à alimenter un convertisseur, tandis que le premier ne saurait être utilisé dans ce cas.

124. Couplage en série et couplage en parallèle de deux alternateurs. — Chaque fois qu'il est nécessaire de répartir la charge d'une installation entre plusieurs alternateurs, il faut les coupler en parallèle, comme on le fait dans les installations avec dynamos à courant continu. Ces dernières peuvent être également couplées en tension et ce mode de couplage est appliqué dans les installations à courant continu fonctionnant à intensité constante. Dans les installations à courants alternatifs, au contraire, la facilité avec laquelle on peut obtenir de hautes tensions et la possibilité d'utiliser, avec d'excellents rendements, les transformateurs de tension, donnent au système de distribution à tension constante une grande supériorité, d'autant plus que ce système permet de rendre les appareils récepteurs d'utilisation complètement indépendants.

Du reste, le couplage en série de deux alternateurs com-

mandés par des moteurs indépendants et réglés pour fournir le courant sous la même tension, afin d'avoir une tension double sur le réseau de distribution, n'est pas réalisable pratiquement. Naturellement, il est indispensable que les deux alternateurs aient la même fréquence, mais cela ne suffit pas. Il faut aussi que les forces électromotrices restent toujours rigoureusement en concordance de phase pour qu'elles puissent s'ajouter purement et simplement et cela ne peut être obtenu

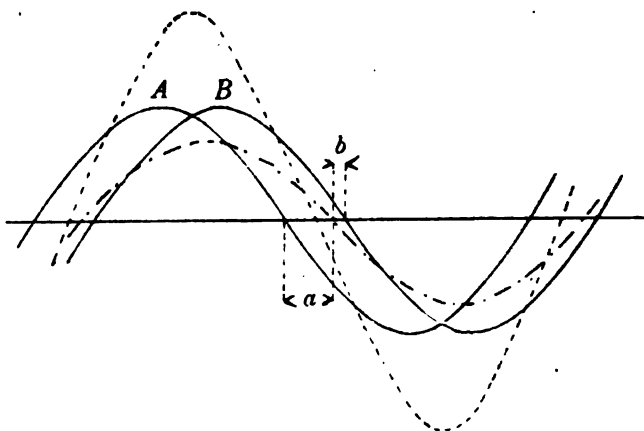


FIG. 226.

qu'en reliant mécaniquement les deux alternateurs par un joint rigide. En commandant chaque alternateur par un moteur indépendant, les écarts de vitesse angulaire sont inévitables, soit par suite des variations des couples moteurs, soit à cause du mode de fonctionnement différent des régulateurs. Si l'alternateur A accélère sa vitesse par rapport à l'alternateur B, la phase de la force électromotrice résultante reste intermédiaire entre celles des deux alternateurs considérés séparément (*fig. 226*). Si, comme c'est le cas le plus général, l'intensité dans le circuit est décalée en retard par rapport à la force électromotrice résultante, alors cette dernière est en retard de a sur la force électromotrice de A et en avance de b sur la force électromotrice de B. Puisque $a > b$, il s'ensuit que la charge de B s'accroît et diminue d'autant en A. C'est précisé-

ment le contraire qui devrait se produire parce que, pour un retour spontané aux conditions initiales, la charge de B devrait diminuer (puisque le moteur tend à accélérer sa vitesse) et celle de A augmenter (puisque le moteur tend à ralentir). Si enfin l'intensité, auparavant décalée en retard, reste constamment décalée en avance sur la force électromotrice, alors aussi le fonctionnement en série des deux alternateurs, actionnés chacun par un moteur indépendant, pourra devenir stable.

Les conditions de stabilité de marche se trouvent, au contraire, satisfaites dans le fonctionnement des alternateurs couplés en parallèle, c'est-à-dire lorsqu'ils

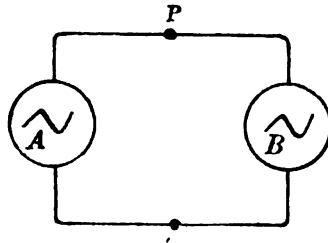


FIG. 227.

sont montés en opposition par rapport au circuit qu'ils constituent. C'est pourquoi, dans ces conditions, en supposant que le circuit extérieur n'existe pas et que les deux alternateurs soient reliés en P et en Q (*fig. 227*), lorsque les forces électromotrices sont égales, ont même fréquence et sont en concordance de phase, elles se neutralisent et le courant est nul dans le circuit; par suite, les deux alternateurs ne fournissent aucun travail.

Mais, si l'alternateur A accélère sa vitesse par rapport à celle de l'alternateur B, alors l'équilibre est rompu et il se développe dans le circuit une force électromotrice résultante e (*fig. 228*) et aussi un courant i , toujours décalé en retard par rapport à e , à cause de la self-induction des enroulements des alternateurs. Dans ces conditions, le travail fourni par les alternateurs n'est plus nul. Or ce courant est en avance sur la force électromotrice de l'alternateur A qui accélère sa vitesse et est en retard sur la force électromotrice de l'autre alternateur B. Par suite, pendant que le courant i , pour l'alternateur A, reste en avance d'une fraction de période comprise entre zéro et $1/4$, il est en retard de plus de $1/4$ de période pour l'alternateur B. Le premier fonctionne alors comme génératrice

et a tendance à ralentir sa vitesse, tandis que le second tend à accélérer sa vitesse parce que, comme on le sait, le fonctionnement en génératrice d'un alternateur n'est possible que lorsque le décalage de phase de l'intensité par rapport à la force électromotrice est compris entre zéro et $1/4$ de période, aussi bien dans le cas du retard que dans celui de l'avance (§ 37). Au delà de ces limites, l'alternateur fonctionne toujours comme un moteur en absorbant de l'énergie au lieu d'en produire.

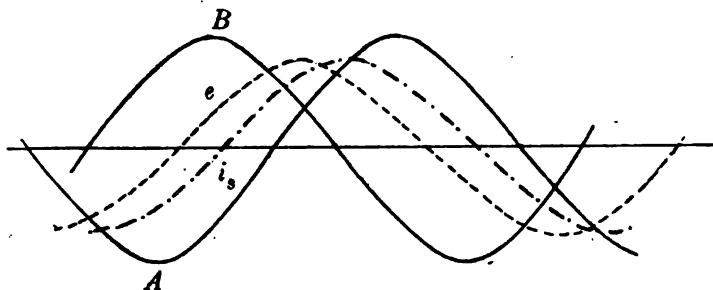


FIG. 228.

On voit donc que, lorsque l'équilibre est détruit, il tend à se rétablir promptement par suite de l'action du courant qui se produit. Il en résulte que l'alternateur dont la vitesse angulaire s'accroît doit fournir de l'énergie à l'autre; par conséquent, conformément à une loi naturelle, le premier doit ralentir et le second accélérer sa vitesse jusqu'au moment où les deux alternateurs se retrouvent de nouveau en concordance (identité de phase par rapport au circuit extérieur et même fréquence).

Ce courant local qui se développe dans le circuit des deux alternateurs est appelé *courant de circulation* ou, plus exactement, *courant de synchronisation*; il a pour effet de ramener rapidement au synchronisme les deux alternateurs, dès que l'un d'eux s'en écarte pour si peu que ce soit.

Ces actions réciproques entre les deux alternateurs sont encore rendues plus énergiques par ce fait que le courant i , décalé en avance par rapport à la force électromotrice de A vient renforcer l'intensité du champ de ce dernier et, par

suite, augmenter la valeur de sa force électromotrice. En ce qui concerne le second alternateur, on sait que, lorsque l'intensité est décalée en retard d'une quantité comprise entre zéro et $1/4$ de période, le champ de l'alternateur est renforcé puisqu'il fonctionne alors comme moteur; inversement, il affaiblit ce champ lorsque le décalage dépasse $1/4$ de période. Dans le cas considéré ici, la force électromotrice prend une valeur plus faible.

On peut donc dire que *le courant de synchronisation augmente la valeur de la force électromotrice de l'alternateur dont la vitesse angulaire s'accélère et diminue celle de l'alternateur qui ralentit*. Ce courant de synchronisation accentue la tendance du premier alternateur à fonctionner comme génératrice et celle du second à fonctionner comme moteur.

Naturellement, il y a une limite à cette tendance, parce que, si le décalage de phase entre les deux forces électromotrices augmente au point de renverser le rôle des deux alternateurs, c'est-à-dire si celui dont la vitesse va en augmentant absorbe de l'énergie au lieu d'en fournir, pendant que celui qui ralentit en produit au lieu d'en consommer, la discordance va toujours en s'accroissant et le synchronisme se perd. Il faut alors rétablir le synchronisme en arrêtant les alternateurs et en effectuant à nouveau le couplage.

En résumé, lorsque deux alternateurs se trouvent exactement en concordance de phase et sont couplés en parallèle, les petites et inévitables variations de vitesse sont automatiquement et rapidement corrigées par l'action correctrice des couples énergiques dus aux effets du courant de synchronisation. Les alternateurs se trouvent ainsi comme reliés par un joint élastique qui a pour effet de maintenir la concordance de phase, assurant ainsi leur fonctionnement régulier.

Il est évident que cette régulation spontanée ne peut s'effectuer qu'autant que certaines conditions sont remplies. Ainsi, pour que le courant de synchronisation s'établisse promptement, il est nécessaire que les deux alternateurs présentent une self-induction assez faible et, pour que ce courant soit suffi-

samment intense, il faut que ces alternateurs aient une faible résistance intérieure. Une certaine self-induction est nécessaire, autrement le courant de synchronisation aurait le même décalage par rapport aux deux forces électromotrices, ce qui donnerait lieu à une compensation exacte des effets produits et, dans ce cas, il n'y aurait pas de correction. De même, la résistance intérieure des alternateurs doit avoir une certaine valeur, car, si le courant de synchronisation avait une intensité trop grande, il produirait des équilibres inévitables dans la tension. En résumé, la résistance apparente des alternateurs doit être calculée en conséquence.

De plus, les écarts de vitesse ne doivent pas dépasser une certaine limite, autrement la marche en parallèle ne présenterait aucune stabilité. A ce propos, il y a lieu de remarquer qu'en prenant comme écart admissible entre les phases des forces électromotrices 20° , c'est-à-dire $\frac{20}{360} = \frac{1}{18}$ de période, pour un alternateur bipolaire l'écart de vitesse angulaire admissible pour son organe mobile, lors d'une variation de vitesse, est encore de 20° . Mais cet écart est réduit à 10° pour un alternateur à 4 pôles, à $6^\circ \frac{2}{3}$ pour un alternateur à 6 pôles et ainsi de suite. Il est évident, dans ces conditions, que le couplage d'alternateurs en parallèle s'effectue beaucoup mieux avec des machines comportant un petit nombre de pôles et ayant une grande vitesse angulaire qu'avec les alternateurs de grande puissance, qui, toutes choses égales d'ailleurs, ont une vitesse angulaire lente et des pôles nombreux. Ces grands alternateurs sont généralement accouplés directement à des moteurs à allure lente, lesquels, sauf en ce qui concerne les turbines, ont une vitesse angulaire variable.

Il serait trop long d'examiner ici les conditions spéciales que doivent remplir les moteurs destinés à la commande des alternateurs. La question sera examinée dans le tome II et il suffit actuellement de signaler les difficultés que l'on est exposé à rencontrer. Il convient d'ajouter que, dans les installations récentes, on a pu éviter complètement ces difficultés, à

tel point que certains moteurs à gaz convenablement construits se prêtent parfaitement à la commande des alternateurs.

125. Opération du couplage. — Jusqu'à présent, on a considéré le couplage en parallèle de deux alternateurs, abstraction faite du circuit extérieur d'utilisation.

Lorsque le circuit extérieur est fermé et que les deux alternateurs sont en concordance de phase et ont des forces électromotrices égales, on peut admettre que chaque alternateur, considéré séparément, fournit du courant à la canalisation. Donc, si l'intensité du courant dans le circuit extérieur est de 20 ampères, on admet que les deux alternateurs ont la même charge et qu'ils contribuent également à la fourniture du courant, c'est-à-dire qu'ils débitent chacun 10 ampères.

Si la vitesse angulaire de l'un des alternateurs augmente, on peut, pour plus de simplicité, sans toutefois

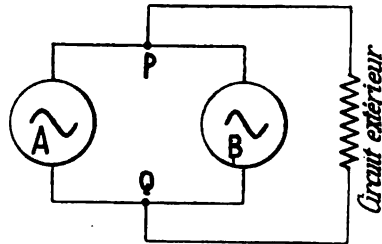


FIG. 229.

s'écarter beaucoup de la réalité, admettre qu'il se produit un courant local de synchronisation dans le seul circuit APBQA des deux alternateurs (*fig. 229*). Ce courant, sans modifier nullement celui qui passe dans le circuit extérieur, corrige les écarts de vitesse, ainsi qu'on l'a déjà expliqué, en augmentant la charge de l'alternateur dont la vitesse est la plus grande et en diminuant celle de l'alternateur qui ralentit.

Pendant la durée de la correction, les induits des deux alternateurs sont parcourus par les deux courants qui s'ajoutent : le courant utile alimentant la canalisation et le courant local de synchronisation. Lorsque les ampèremètres affectés aux alternateurs ont une grande sensibilité, les corrections de vitesse dues au courant de synchronisation sont indiquées par l'index de ces instruments.

Pour coupler en parallèle deux alternateurs ou plutôt pour

mettre en circuit un alternateur avec un autre déjà en fonctionnement, on procède de la manière suivante : on met l'alternateur à coupler en marche à sa vitesse normale et, en agissant sur l'excitation, on l'amène à la même tension que celui qui est en service ; la vitesse angulaire des alternateurs doit être rigoureusement la même, afin d'obtenir des fréquences égales, ce que l'on constate à l'aide d'un indicateur de phase. Au moment où la concordance se produit, on ferme rapidement l'interrupteur qui le met en circuit avec la canalisation extérieure. Les actions synchronisantes se produisent alors pour corriger les petits écarts de vitesse qui pourraient encore exister. Il n'y a plus qu'à régler l'excitation pour que la charge soit également répartie entre les deux alternateurs et l'opération du couplage est terminée.

On va examiner maintenant les particularités relatives à chacune de ces manœuvres.

126. Régulation de la vitesse angulaire. — Dans le paragraphe 122, en traitant du coefficient de régularité des moteurs, on a fait remarquer que la vitesse d'un moteur est intimement liée à la charge. Si, comme le cas se présente fréquemment, chaque alternateur de l'installation est commandé par un moteur qui lui est spécialement affecté, lorsqu'un des groupes fonctionne à charge normale, sa vitesse angulaire est de $99 \text{ t} : \text{m}$, par exemple, tandis qu'à vide elle est de $101 \text{ t} : \text{m}$, le coefficient de régularité étant alors de 20/0. Quand on met en service un deuxième groupe, si on ouvre complètement l'admission principale, le régulateur fonctionne pour régler cette admission et il agit sur la distribution pour porter le nombre de tours à celui qui correspond au fonctionnement à vide.

Dans le cas actuel on obtient une vitesse angulaire de $101 \text{ t} : \text{m}$ si les deux moteurs sont identiques.

Dans ces conditions, il est nécessaire d'employer un moyen quelconque pour ramener la vitesse angulaire à $99 \text{ t} : \text{m}$, puisqu'il n'est possible d'effectuer le couplage qu'à cette vitesse.

Autrefois, on se servait de groupes de lampes à incandescence sur lesquels on faisait débiter à l'alternateur à coupler un courant sensiblement égal à celui que débitait l'alternateur en service, afin que, sous l'action de la charge, la vitesse angulaire fût ramenée à $99 t : m$, conformément à l'exemple déjà cité. Cela fait, on s'assurait qu'il y avait concordance de phase entre les deux alternateurs et on couplait alors l'alternateur; on retirait ensuite lentement et graduellement les groupes de lampes.

Mais, actuellement, grâce aux meilleures conditions de fonctionnement électrique des alternateurs, en ce qui concerne la réaction d'induit, dès qu'il se produit la moindre différence de vitesse, les couples correcteurs énergiques qui se développent alors permettent d'effectuer le couplage de différentes manières et beaucoup plus simplement. Dès que le moteur est mis en marche, on agit sur le régulateur soit à la main, soit à l'aide d'un petit moteur électrique que l'on commande à partir du tableau de distribution, afin de ralentir la vitesse jusqu'au point voulu; puis, on procède au couplage et on agit ensuite rapidement sur l'excitation pour répartir convenablement la charge; en même temps, on remet le régulateur dans les conditions normales de fonctionnement. Pendant ce temps, d'énergiques courants de synchronisation se développent dans les alternateurs et la tension en est presque toujours influencée; au bout de quelques secondes, les aiguilles des instruments de mesure restent immobiles et montrent que les deux alternateurs fonctionnent régulièrement; la stabilité de marche se maintient alors si les alternateurs satisfont à certaines conditions électriques déterminées et si, d'autre part, les moteurs satisfont également à certaines conditions mécaniques.

Avec les moteurs à gaz, on peut procéder de la même manière. La maison Kœrting procède, toutefois, d'une façon différente. Un puissant électro-aimant (*fig.* 230) est fixé dans le sol et ses pôles sont disposés en regard de la périphérie extérieure du volant. En excitant convenablement cet électro-aimant à l'aide du courant fourni par l'excitatrice, d'éner-

giques courants de Foucault prennent naissance dans la couronne du volant et agissent comme le ferait un frein appliqué sur le moteur; dans ces conditions, on peut diminuer la vitesse angulaire à volonté.

Dans la station génératrice des Hauts Fourneaux de Julien-

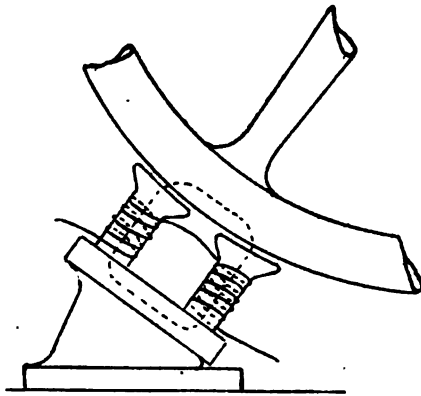


FIG. 230.

de chaque alternateur un dispositif analogue comprenant cinq pôles magnétiques d'un côté et cinq du côté opposé qui agissent sur la périphérie extérieure de l'inducteur-volant portant les bobines inductrices.

Avec les alternateurs à inducteur mobile, si le couplage s'effectue dans la soirée, au moment où la salle des machines est éclairée par des lampes

à arc, on peut apprécier la vitesse angulaire de l'alternateur à coupler avec les autres déjà en service en utilisant un procédé stroboscopique très nettement visible. Ainsi qu'on l'a expliqué dans le paragraphe 12, si on éclaire l'inducteur mobile d'un alternateur avec une lampe à arc alimentée par le courant que fournit cet alternateur, les pôles paraissent immobiles dans l'espace, parce que l'intervalle de temps correspondant au déplacement d'un pôle pour aller occuper la place de celui qui le précède immédiatement est le même que celui qui s'écoule entre deux maxima d'intensité lumineuse de la lampe, si l'alternateur comporte des pôles alternés; lorsque l'alternateur a des pôles de même nom, ces pôles paraissent doublés, parce que, dans le laps de temps qui s'écoule pour qu'un pôle prenne la place de celui qui le précède, il se produit deux maxima d'intensité lumineuse qui font que le même pôle est visible deux fois.

Lorsque la vitesse angulaire de l'alternateur à coupler atteint la valeur normale, ses pôles vus à la lumière de la lampe paraissent fixes; on a, au contraire, l'illusion d'un mouvement en avant lorsque la vitesse est trop grande et d'un mouvement en arrière lorsqu'elle est trop faible. Toutefois, ce procédé ne peut être utilisé seulement que comme indicateur de vitesse et non de phase, parce que les pôles apparaissent fixes dans le cas où les fréquences sont identiques; mais les forces électromotrices peuvent être en concordance de phase au lieu d'être en opposition comme cela est indispensable pour le couplage.

On peut aussi, toujours pour apprécier la vitesse angulaire de l'alternateur à coupler, regarder son inducteur à travers celui de l'inducteur en marche, à la condition toutefois que les deux alternateurs soient disposés parallèlement l'un à l'autre.

Le second inducteur remplit l'office d'écran masquant périodiquement le premier et produit alors une série d'éclipses consécutives à intervalles réguliers. Si l'inducteur est rendu visible au moment où ses pôles se trouvent dans une position identique par rapport à ceux de l'autre, ces derniers paraissent immobiles. Lorsque les deux alternateurs sont identiques, leurs vitesses angulaires respectives sont égales lorsque ce phénomène se produit. Dans ce dernier cas, il n'est pas indispensable que l'éclairage soit fourni par une lampe à arc, le phénomène pouvant être facilement observé à la lumière du jour, puisque les intermittences lumineuses sont produites à l'aide d'éclipses successives.

Ces effets stroboscopiques se manifestent toujours lorsque les alternateurs sont couplés. Lorsqu'ils ne sont pas encore couplés, le mouvement relatif des pôles fait connaître le rapport des vitesses avec une précision incomparablement plus grande que ne le ferait le compteur de tours le plus précis. Soit, par exemple, deux alternateurs à 30 pôles, dont on observe la marche comme il a été indiqué ci-dessus; si l'on constate le passage de 15 pôles en une minute devant un repère, cela

indique que l'écart de vitesse entre les deux alternateurs est d'un demi-tour par minute.

Les phénomènes stroboscopiques qui viennent d'être décrits permettent d'apprécier approximativement, pour les alternateurs à coupler, les variations de vitesse qu'ils peuvent présenter pendant qu'ils effectuent un tour. Si le coefficient d'uniformité des moteurs n'est pas très grand, au-dessous de 100 par exemple, les pôles, avant de paraître fixes, semblent osciller autour d'une position moyenne, exactement comme le ferait un volant ayant une grande inertie sous l'action d'un couple moteur élastique.

127. Synchronisation. — L'égalité des vitesses angulaires étant obtenue et, par conséquent, l'égalité des fréquences, il ne reste qu'à attendre le moment opportun (complète opposition de phase entre les forces électromotrices) pour effectuer le couplage. A la rigueur, si les vitesses une fois égales se maintenaient ainsi, on n'obtiendrait jamais le synchronisme parfait à moins qu'il n'ait été obtenu dès le départ. Mais, en l'absence de couples de synchronisation, il se produit inévitablement quelques légères variations de vitesse qui font que l'alternateur à coupler se trouve dans des conditions de synchronisme plus ou moins stables, suivant que sa vitesse est plus ou moins régulière.

Pour connaître le moment opportun où le couplage peut s'effectuer, il existe divers systèmes qui tous sont fondés sur le principe qui a été exposé dans le paragraphe 93 au sujet du moment où un moteur synchrone peut être relié au réseau.

En utilisant le dispositif des lampes de phase, avec ou sans interposition de transformateurs, on sait que les alternateurs sont en concordance de phase lorsque les lampes, montées comme l'indique la figure 177, sont éteintes. La fréquence des variations d'intensité lumineuse, c'est-à-dire des battements des lampes, permet d'apprécier les variations de vitesse qui existent entre les deux machines.

Soit A l'alternateur en service et B celui qui est à coupler et qui se trouve déjà en marche et excité. En disposant les lampes l comme l'indique la figure 231, on voit qu'à l'instant où les deux tensions v_a et v_b ont la même valeur et sont de même sens par rapport au circuit extérieur, les lampes l restent éteintes. Au contraire, à tout autre moment, cette condition n'étant pas réalisée, un courant circule entre les deux alternateurs et les lampes l'indiquent par leur éclat. L'éclaircissement est maximum lorsque les tensions, étant égales, sont de sens opposé par rapport au circuit extérieur.

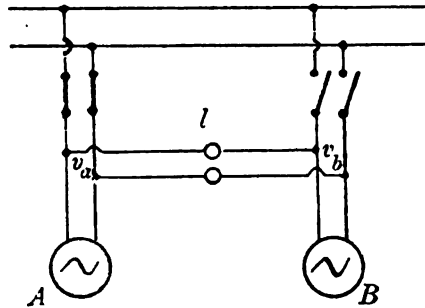


FIG. 231.

Lorsque la vitesse angulaire de l'alternateur B est un peu différente de celle de l'alternateur A,

alors entre la concordance des tensions, indiquée par le non-fonctionnement des lampes, et la discordance, indiquée par l'éclaircissement maximum, il s'écoule un certain laps de temps. Si, au contraire, les vitesses respectives des deux alternateurs sont très différentes, le phénomène se reproduit plus fréquemment, c'est-à-dire que les battements deviennent d'autant moins fréquents que les alternateurs se rapprochent du synchronisme parfait.

Quand les battements se produisent lentement, un battement chaque 3 à 4 secondes, le phénomène présente un caractère de stabilité et, alors, on saisit le moment où les lampes sont éteintes pour fermer rapidement l'interrupteur. Les alternateurs sont couplés et on peut supprimer les lampes de phase.

Toujours en employant les lampes comme indicateur de phase, il est préférable de les monter comme l'indique la figure 232, car, avec cette disposition, les lampes atteignent leur éclat maximum au moment où le synchronisme est

atteint. Dans ces conditions, le courant qui les parcourt et qui produit les battements étant alternatif, les lampes atteignent le maximum d'éclat lorsque l'intensité du courant passe par sa valeur maximum, tandis qu'elles s'éteignent bien avant que l'intensité n'arrive à sa valeur nulle. En d'autres termes, il est plus facile de saisir le moment où le synchronisme est établi lorsque les lampes ont tout leur éclat plutôt que lorsque les lampes sont éteintes.

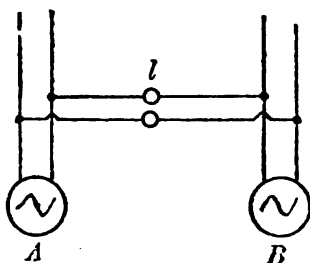


FIG. 232.

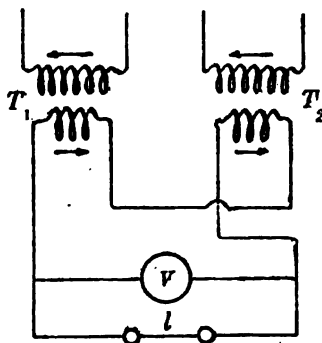


FIG. 233.

Indépendamment des lampes, il est utile d'installer un voltmètre, mais il faut alors avoir recours à l'intermédiaire de deux petits transformateurs (*fig. 233*).

Le transformateur T_1 est monté en dérivation sur les barres omnibus du tableau de distribution ou bien sur les bornes de l'alternateur en service ; le transformateur T_2 , est, au contraire, monté en dérivation sur les bornes de l'alternateur que l'on veut coupler. Les circuits secondaires des transformateurs sont reliés de manière que, lorsque la force électromotrice de l'alternateur à coupler est en concordance de phase avec la tension du circuit extérieur, c'est-à-dire en opposition de phase par rapport au circuit interpolaire des alternateurs, les lampes soient éteintes et que l'aiguille du voltmètre reste au zéro.

On peut reprocher à ce dernier dispositif de permettre l'établissement d'un courant de synchronisation d'intensité mini-

num pendant l'opération de mise en synchronisme qui précède le couplage. C'est pourquoi il est préférable de faire usage d'un ampèremètre *A* (*fig. 234*) mis en série avec une résistance *R* par l'intermédiaire d'un interrupteur *I* que l'on ferme seulement au moment où les lampes de phase indiquent que l'on est sur le point d'atteindre le synchronisme parfait. Les deux secondaires des transformateurs T_1 et T_2 sont montés en opposition, de sorte que, si les phases des forces électromotrices respectives des deux alternateurs sont en concordance exacte,

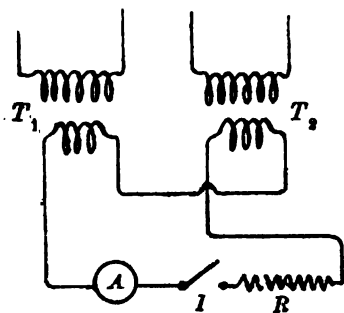


FIG. 234.

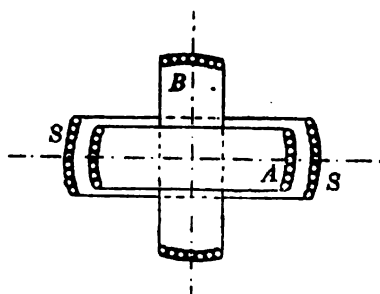


FIG. 235.

l'ampèremètre n'indique le passage d'aucun courant. Au contraire, s'il y a un léger écart entre les vitesses des deux machines, il se développe dans le circuit des secondaires un courant dont l'intensité dépend de la valeur donnée à *R*, courant dont l'intensité sera d'autant plus grande que l'écart des vitesses est plus considérable. Un courant d'intensité proportionnelle passe en même temps dans les circuits primaires des transformateurs ainsi que dans les induits des alternateurs. Ce courant contribue à réaliser la synchronisation des deux alternateurs en produisant deux couples qui concourent au même résultat. Lorsque l'équilibre est obtenu, on effectue le couplage. Avec ce procédé, l'opération du couplage se fait plus rapidement.

Tous les systèmes qui viennent d'être décrits et qui permettent d'apprécier le moment où le synchronisme est établi

sont suffisants lorsqu'il s'agit d'alternateurs de puissance moyenne, parce que si, au moment du couplage, la concordance de phase n'est pas exactement atteinte, les couples de synchronisation qui se produisent amènent rapidement les alternateurs en concordance de phase sans produire de dérangements notables. Mais il n'en est plus ainsi lorsque les alternateurs ont une puissance de plusieurs milliers de kilowatts, principalement lorsqu'ils sont de grandes dimensions et que leur vitesse angulaire normale est assez faible. Dans ce cas, la correction d'un petit écart de vitesse exige un couple de synchronisation puissant, agissant pendant un temps relativement long, ce qu'il faut éviter si l'on veut obtenir un excellent fonctionnement.

Il faut alors avoir recours à un indicateur de phase plus précis. On peut utiliser un phasemètre ordinaire (§ 39), mais on obtient des indications beaucoup plus précises avec l'indicateur de phase de l'ingénieur Lincoln, qui l'a imaginé dans le but spécial d'effectuer rapidement et sûrement le couplage des grands alternateurs de 5000 chevaux de la station centrale des chutes du Niagara.

Cet indicateur est constitué par une bobine fixe SS (*fig.* 235) à l'intérieur de laquelle peut se déplacer un équipage mobile formé de deux autres bobines disposées à angle droit l'une par rapport à l'autre et solidaires de l'axe de rotation qui est muni d'un index. La bobine SS est mise en dérivation, par l'intermédiaire d'un transformateur réducteur, sur les barres du tableau de distribution; les deux autres bobines sont mises en dérivation sur l'alternateur à coupler, toujours par l'intermédiaire d'un transformateur réducteur. Les phases de l'intensité des courants qui passent dans les bobines A et B sont artificiellement décalées d'environ $1/4$ de période en intercalant dans le circuit de A (*fig.* 236) une grande résistance ohmique et dans le circuit de B, au contraire, une grande résistance inductive. Les courants sont amenés à cet appareil par l'intermédiaire de trois bagues de contact *a*, *b*, *c* et de trois balais.

Lorsque la tension de l'alternateur à coupler est en concordance de phase avec la tension du réseau, l'intensité du courant passant dans la bobine S est en concordance de phase avec l'intensité du courant de la bobine A et en avance ou en retard de $1/4$ de période par rapport à l'intensité du courant de la bobine B. Le système mobile prend alors une position d'équilibre déterminée, dans laquelle les bobines A et S sont paral-

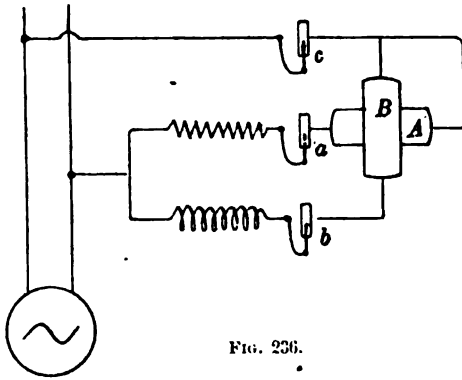


FIG. 236.

lèles, parce que les actions qui s'exercent entre les courants, en B et en S, s'annulent, étant décalés de $1/4$ de période; la valeur moyenne du couple moteur qui tend à déplacer la bobine mobile B par rapport à la spire fixe S ne produit alors aucune action.

Si, au contraire, on considère le cas limite, c'est-à-dire celui où la tension de l'alternateur est décalée de $1/4$ de période par rapport à la tension aux barres du tableau de distribution, c'est la bobine B qui vient se placer dans le plan de la bobine S, parce que le décalage est nul entre les intensités des courants qui traversent respectivement ces deux bobines; la bobine A se place perpendiculairement à la bobine S et, dans ces conditions, le couple moteur moyen qu'elle produit est annulé.

Il n'est pas difficile maintenant de comprendre pourquoi, dans tous les cas intermédiaires allant du synchronisme parfait à un décalage de $1/4$ de période entre les tensions, il y a une valeur moyenne, différente du zéro, pour les couples agis-

sant tantôt sur la bobine A, tantôt sur la bobine B et, par suite, pourquoi le système se met en mouvement; en se déplaçant dans un sens, il indique une avance de phase; en se déplaçant en sens contraire, un retard de phase et cela avec une vitesse d'autant plus grande que l'on se trouve plus éloigné du synchronisme. La vitesse maximum correspond à un décalage de $1/8$ de période.

Cet appareil indique donc aussi dans quel sens il faut modifier la vitesse de la machine à coupler. Lorsque l'index s'arrête dans la position correspondant au parallélisme des bobines A et S, le synchronisme est obtenu et c'est alors que l'on peut mettre l'alternateur en circuit; si l'index s'arrêtait dans une position perpendiculaire à celle qui vient d'être indiquée, cela prouverait que le décalage de phase entre les tensions est de $1/4$ de période.

Comme, en pratique, le décalage de phase entre les courants A et B n'atteint jamais exactement $1/4$ de période, l'appareil fonctionne d'une manière satisfaisante et donne des indications précises.

Il arrive parfois, quel que soit l'indicateur de synchronisme, que le couplage ne se maintient pas. Cela indique que l'on a procédé trop hâtivement et que le synchronisme était instable. Ce fait est indiqué par l'ampèremètre de l'alternateur qui accuse le passage de courants de synchronisation intenses et par un ronflement sourd et caractéristique de l'alternateur. Il faut alors retirer l'alternateur du circuit, procéder à un nouveau et précis réglage de la vitesse et effectuer ensuite la mise en circuit de l'alternateur.

Dans les installations à courants triphasés, il est possible de disposer les circuits de lampes de phase de manière qu'elles s'allument dans un ordre déterminé lorsque l'alternateur à coupler a une vitesse angulaire trop grande et qu'elles s'allument en ordre inverse lorsque la vitesse est trop faible. La vitesse avec laquelle l'éclairement maximum paraît se déplacer dans l'espace est en rapport direct avec la fréquence des battements.

Les trois lampes *a*, *b*, *c* (*fig. 237*), qui ordinairement sont disposées radialement dans une boîte cylindrique, sont reliées, comme l'indique le schéma, aux enroulements secondaires de deux petits transformateurs triphasés, dont les enroulements primaires ne figurent pas sur le dessin. La lampe *a* est intercalée entre 1 et 1', *b* entre 2 et 3' et *c* entre 3 et 2'.

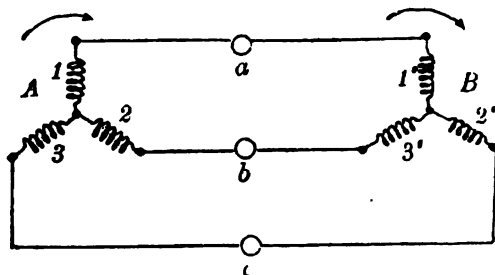


FIG. 237.

Lorsque les alternateurs sont en concordance de phase, la lampe *a* est éteinte et les deux lampes *b* et *c* ont le même éclat ne dépassant pas le rouge, parce qu'il y a un décalage de phase de $1/3$ de période entre les tensions en 2 et 3' et en 3 et 2'. Si, au contraire, l'alternateur B à coupler a une vitesse angulaire trop grande, les phases des forces électromotrices agissant respectivement sur chacune des lampes sont différentes, la force électromotrice résultante en *a* prend une certaine valeur et la lampe commence à s'allumer; en *b*, la force électromotrice résultante augmente de valeur et porte la lampe à l'incandescence; enfin, en *c*, la force électromotrice résultante diminue et la lampe a moins d'éclat. Si les lampes sont placées dans l'ordre *a*, *b*, *c*, on voit d'abord s'allumer la lampe *b*, puis *a* et enfin *c* et ainsi de suite successivement, tant que la vitesse de l'alternateur est trop grande. Si, au contraire, la vitesse angulaire de l'alternateur est trop faible, l'ordre d'allumage des lampes est inversé.

Cette intéressante et curieuse méthode a été brevetée par la maison Siemens et Halske.

128. Répartition de la charge. — Une fois le couplage effectué, on doit procéder à la répartition sur les deux alternateurs de la charge totale du circuit extérieur. C'est l'opération la plus difficile ou du moins c'est celle qui exige la plus grande habileté de la part de l'électricien chargé du tableau de distribution. On pourrait croire que, pour arriver à la répartition de la charge, il suffit de mettre le régulateur du moteur, commandant l'alternateur que l'on vient de coupler, dans les conditions normales de fonctionnement et puis de régler l'excitation des deux alternateurs pour que leurs ampèremètres respectifs indiquent la même intensité. Cette manœuvre, qui est inspirée de celle que l'on effectue avec les dynamos à courant continu, serait absolument défectueuse dans le cas

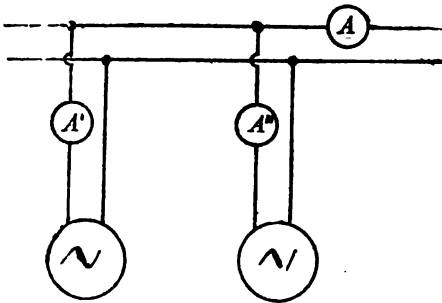


FIG. 238.

des alternateurs. Pour s'en convaincre, il suffit d'intercaler dans le circuit de ligne un ampèremètre général A (fig. 238) en plus des ampèremètres respectifs des deux alternateurs A' et A''.

Ordinairement, l'ampèremètre A indique une intensité plus faible que la somme des intensités de A' et A'', alors que rigoureusement, avec deux alternateurs parfaitement synchronisés, aucune différence ne devrait exister.

Cette différence est due, en ce qui concerne les alternateurs, à ce fait que la puissance développée n'est pas fonction de l'excitation. Au contraire, avec les dynamos à courant continu et dans les limites de la puissance des moteurs qui les commandent, la seule manœuvre du rhéostat d'excitation suffit pour faire augmenter la force électromotrice de la dynamo, l'obligeant ainsi à supporter une charge plus forte que les autres, indépendamment de sa vitesse angulaire propre, parce

qu'il n'y a pas d'autres conditions à remplir pour répartir la charge.

Il en est tout autrement pour les alternateurs parce que, lorsqu'ils sont couplés, la vitesse angulaire doit être la même pour tous et ne peut être modifiée.

Soit deux alternateurs commandés par le même moteur ou par la même transmission à l'aide de courroies. On sait comment un moteur synchrone peut recevoir du courant de la ligne, même si l'excitation est réglée au point que sa force électromotrice ait une valeur supérieure à celle de la tension agissant à ses bornes et cela parce que, si la vitesse angulaire, qui est fonction de la fréquence, ne se prête pas à ces conditions de fonctionnement, par contre le décalage entre l'intensité et la tension s'y prête parfaitement.

Le cas contraire se présente pour les alternateurs couplés. Un alternateur peut fournir du courant à la ligne, même si sa force électromotrice est plus faible que la tension du réseau, dans certaines limites bien entendu. L'équilibre n'est pas rompu, mais il se produit forcément un décalage de phase permanent entre les forces électromotrices des deux alternateurs, décalage qui a pour effet de renforcer l'excitation de l'alternateur qui est le moins excité et d'affaiblir celle de l'alternateur dont l'excitation est trop grande; dans ces conditions, l'égalité des tensions se rétablit (§ 94). Pour éviter la production de ces courants purement parasites, il suffit de rétablir la concordance de phase entre les forces électromotrices et, pour obtenir ce résultat, en admettant que les alternateurs soient de construction identique, *on manœuvre les rhéostats d'excitation non seulement jusqu'au point où les courants débités par chaque alternateur ont la même intensité, mais jusqu'à ce que la somme des intensités qu'ils indiquent soit égale à celle indiquée par l'ampèremètre général*. Il est facile de voir que, lorsque cette concordance existe, les courants débités par les alternateurs sont tous des courants utiles qui alimentent le circuit extérieur.

Lorsque les alternateurs sont commandés chacun par un

moteur indépendant, il se produit alors une autre difficulté. Les vitesses des moteurs devant être égales à cause du couplage, on ne peut pas, en général, leur faire supporter la même charge (Voir § 122) surtout si ces moteurs ont un coefficient de régularité assez élevé et alors les différences peuvent être très notables. Dans ce cas, il n'est presque jamais possible de réaliser l'égalité des intensités pour les deux alternateurs et, par suite, d'obtenir dans les ampèremètres la condition déjà indiquée $A' = A''$. On doit alors se contenter de réaliser l'égalité

$$A = A' + A''$$

correspondant à un courant de synchronisation nul ou encore, ce qui revient au même, de *rendre minimum la somme* $A' + A''$ des indications des deux ampèremètres des alternateurs, en laissant forcément subsister une différence entre les indications données par chacun d'eux.

Si l'on veut réaliser simultanément les deux conditions

$$\begin{aligned} A' &= A'' \\ A &= A' + A'' \end{aligned}$$

il faut agir sur la distribution des moteurs en modifiant leur régulateur.

Pour effectuer le contrôle qui vient d'être indiqué, il faut employer des ampèremètres parfaitement amortis. Les ampèremètres thermiques conviennent tout particulièrement. Lorsqu'on utilise des ampèremètres dont l'amortissement est insuffisant, l'inertie de l'équipage mobile donne lieu à des oscillations continues et un contrôle exact est impossible.

Pour arriver promptement à la meilleure répartition de la charge, il faut, avant tout, égaliser les forces électromotrices des deux alternateurs, puis, en se basant sur les indications des ampèremètres, augmenter l'excitation de l'alternateur qui débite le courant le plus intense et opérer en sens inverse pour l'autre. Cette manœuvre peut paraître paradoxale, puisqu'on serait plutôt porté à agir en sens opposé; mais il serait

trop long et trop difficile de donner ici une explication physique de ce mode d'opérer sur lequel on reviendra dans le tome II. On continue à agir graduellement sur les rhéostats d'excitation jusqu'à ce que l'on réalise la condition de la somme minimum $A' + A''$.

D'une manière approximative, lorsque les deux alternateurs sont de construction identique, les forces électromotrices qu'ils développent sont égales quand les manettes des deux rhéostats d'excitation occupent la même position, c'est-à-dire lorsque les résistances intercalées sont égales. Il est préférable d'établir, une fois pour toutes, la courbe de la force électromotrice de chaque alternateur fonctionnant à vide à une vitesse angulaire déterminée, en fonction du nombre de plots du rhéostat insérés, et d'utiliser ce tracé graphique pour établir la position des manettes des rhéostats correspondant à des forces électromotrices égales pour chaque alternateur. Après un peu de pratique et d'habitude, il n'est même plus nécessaire d'avoir recours au graphique et le contrôle de la charge s'effectue en quelques instants.

129. Couplage de plusieurs alternateurs. — Lorsque les alternateurs à coupler sont plus de deux, on opère comme il a été déjà indiqué et en prenant les mêmes précautions chaque fois qu'il faut en mettre un en circuit, afin que le couplage ne produise aucune variation de la tension sur le réseau alimenté. En particulier, on doit contrôler très exactement la tension et la vitesse angulaire afin que, lors de la mise en circuit du nouvel alternateur, la canalisation ne reçoive ni ne fournisse de courant, parce que, dans le premier cas, la tension du réseau prendrait une valeur plus grande et que, dans le second cas, sa valeur diminuerait.

Des précautions spéciales doivent être prises lorsque la puissance totale des alternateurs est telle qu'elle puisse faire fonctionner comme moteur synchrone l'alternateur à coupler, sans qu'il se produise une forte variation de la tension. On se trouverait alors dans le cas d'un alternateur recevant l'énergie de

deux côtés du réseau, ou plus exactement des autres alternateurs, d'une part, et de son moteur, d'autre part. La perte du synchronisme dans ce cas serait inévitable et présenterait même des dangers parce que, par suite de l'accélération de vitesse, l'admission de vapeur dans le moteur pourrait être interrompue subitement et la vapeur, se condensant dans les cylindres, pourrait donner lieu à de très sérieuses avaries.

Il est superflu de donner de plus grands détails en ce qui concerne les manœuvres à effectuer pour le couplage en parallèle des alternateurs, détails que le lecteur trouvera facilement dans tous les bons manuels pratiques; il suffit d'avoir indiqué ici les principes fondamentaux.

130. Mise hors circuit d'un alternateur. — Lorsqu'il est nécessaire de retirer un alternateur du circuit et de l'arrêter parce que la charge du réseau a diminué, on procède à cette manœuvre en effectuant les opérations du couplage en sens inverse. On diminue d'abord l'excitation et on agit, en même temps, sur la distribution du moteur de manière à diminuer la charge sans modifier la vitesse angulaire. Simultanément, on renforce l'excitation des autres alternateurs en service pour maintenir la tension constante.

Lorsque l'ampèremètre de l'alternateur à retirer du circuit indique que l'intensité du courant est presque nulle, on ouvre rapidement l'interrupteur.

131. Emploi de circuits amortisseurs. — Lorsque les moteurs destinés à la commande des alternateurs ont un couple moteur variable, comme c'est le cas pour les moteurs à gaz ou les moteurs à vapeur monocylindriques, on peut assurer le fonctionnement en parallèle des alternateurs en plaçant sur leurs inducteurs des circuits amortisseurs (Voir chap. xi, § 72).

Ces circuits amortisseurs agissent comme de véritables écrans magnétiques, lorsqu'une oscillation vient à se produire, et l'éteignent rapidement ou l'empêchent de prendre une

valeur exagérée. L'emploi des circuits amortisseurs est parfaitement justifié lorsqu'il faut réduire au minimum l'écart angulaire que les alternateurs subiraient inévitablement pendant un tour, lorsqu'ils sont commandés par des moteurs à couple moteur variable.

Ces circuits produisent des couples correcteurs, toujours favorables au maintien d'une vitesse angulaire constante ; ils agissent comme le fait l'inertie des organes tournants d'une machine. Il a été déjà question de cette action des circuits amortisseurs à propos des moteurs synchrones (§ 95).

Dans les très grandes stations génératrices, les alternateurs sont pourvus de circuits amortisseurs. Ils corrigent le flux et donnent à la force électromotrice une allure presque sinusoïdale (§ 72). Dans les alternateurs simples, ils réduisent dans une large mesure la réaction d'induit (Voir tome II, chap. XI) ; enfin, ils assurent dans tous les cas un meilleur fonctionnement des alternateurs couplés en parallèle.

On comprend parfaitement que ces avantages compensent, dans beaucoup de cas, la notable augmentation du prix d'achat des alternateurs, lorsque ces derniers doivent être munis de ces circuits.

CHAPITRE XVIII

MESURE DU RENDEMENT INDUSTRIEL

132. Du rendement et de sa détermination. — La description des diverses machines et appareils qui servent à produire ou à utiliser l'énergie électrique sous forme de courant alternatif a été toujours accompagnée d'un paragraphe dans lequel étaient indiqués les rendements théoriques et pratiques.

A moins d'indication contraire, les valeurs données se rapportent toujours au *rendement industriel*, c'est-à-dire au rapport entre l'énergie produite par une machine ou un appareil et l'énergie absorbée pour son fonctionnement.

Ces deux quantités diffèrent entre elles de la valeur des *pertes* qui entraînent une dissipation d'énergie, c'est-à-dire une transformation partielle d'énergie mécanique ou électrique en énergie thermique.

Ces pertes sont dues à différentes causes :

- a) Pertes par frottement des pivots, des coussinets, des balais et de l'air contre les organes mobiles ;
- b) Pertes par effet Joule ;
- c) Pertes par courants de Foucault dans le fer et dans le cuivre ;
- d) Pertes dues à l'hystérésis.

Il est évident que les pertes par frottement ne peuvent se

produire dans les transformateurs statiques, où tous les organes sont fixes.

La détermination du rendement industriel d'une machine ou d'un appareil électrique est une opération délicate et difficile, qui ne peut être effectuée que par un technicien, non pas seulement à cause des difficultés d'application des méthodes employées, mais surtout parce que ces méthodes exigent une minutieuse attention pour permettre d'obtenir des résultats précis. Il faut, en outre, ne négliger aucun petit détail, en apparence insignifiant, mais en réalité très important, car la mesure obtenue pourrait alors ne pas présenter la précision qu'elle doit avoir. De plus, il est indispensable que la personne qui procède aux essais connaisse parfaitement la méthode à employer, car seule une longue pratique permet de connaître, dans ses plus minutieux détails, les manœuvres à effectuer pour obtenir des résultats exacts.

Théoriquement, quelles que soient les méthodes employées, elles devraient toutes donner des résultats identiques lorsqu'on les applique à l'essai d'un appareil déterminé. Pourtant, il n'en est pas ainsi et l'on trouve presque toujours certaines différences. Ces écarts proviennent de beaucoup de causes; l'une des plus importantes réside dans la nature des instruments employés, que ce soient des étalons ou des instruments récemment étalonnés.

Il est indispensable de déterminer à l'avance la méthode à employer pour mesurer le rendement, car un constructeur peut garantir un certain rendement en effectuant les mesures d'après une méthode donnée, rendement qui n'est plus le même si on procède à l'essai avec une méthode différente donnant, par exemple, des résultats plus faibles. Cette précaution doit toujours être prise, pour éviter toute difficulté, lors de la réception d'une dynamo ou d'un transformateur, et l'on ne saurait trop recommander à ce sujet de se mettre préalablement d'accord avec le constructeur sur la méthode à employer pour déterminer le rendement, avant de conclure un marché.

Il est un autre point important sur lequel il convient d'attirer l'attention du constructeur, c'est la nature du service que l'appareil ou la machine doit effectuer. L'Association des ingénieurs électriciens allemands a proposé de diviser les machines et appareils en trois groupes :

- 1° Machines devant effectuer un service intermittent ;
- 2° Machines devant effectuer un service de courte durée ;
- 3° Machines devant effectuer un service continu.

On comprend, du reste, qu'une machine électrique peut développer une puissance d'autant plus grande que plus court est le temps pendant lequel elle reste en service. C'est ainsi qu'un transformateur maintenu en fonctionnement continu peut développer une puissance de 50 kilowatts, par exemple, son échauffement ne dépassant pas les limites admissibles ; en le faisant fonctionner une heure ou deux seulement, il pourra développer une puissance de 70 à 80 kilowatts, s'il est mis hors circuit pendant un temps suffisant pour qu'il se refroidisse et reprenne la température ambiante ; enfin, il pourra développer jusqu'à 100 kilowatts, s'il n'effectue qu'un service intermittent.

Les rendements varient naturellement suivant la nature des services que doivent assurer les machines. Ainsi, dans le cas d'un service intermittent, la détermination du rendement doit être faite à la température ordinaire ; au contraire, dans le cas d'un service continu, l'essai doit être effectué lorsque la machine a atteint la température normale correspondant à ce régime de fonctionnement.

Comme limites des températures admissibles, l'Association des ingénieurs électriciens allemands a proposé d'admettre les valeurs suivantes au-dessus de la température ambiante :

- 50° C., pour les conducteurs recouverts de coton ;
- 60° C., pour les conducteurs recouverts de papier ;
- 80° C., pour les conducteurs recouverts de mica ou d'amiante.

Lorsqu'on veut déterminer le rendement dans les conditions de surcharge de la machine, l'essai ne doit pas dépasser trois minutes.

En même temps que les essais de rendement, on doit effectuer des mesures de résistance d'isolement en soumettant les divers organes de la machine à une tension plus élevée que la tension normale, généralement une tension deux fois plus grande. Cette tension relativement élevée ne doit être appliquée que pendant quelques instants, afin de ne pas courir le risque d'endommager la machine.

- Dans certains cas, il faut aussi effectuer des essais pour s'assurer de la solidité des enroulements au point de vue mécanique, car les génératrices pouvant prendre parfois une vitesse exagérée, lorsque leur charge est brusquement supprimée, il pourrait se produire des avaries dans les enroulements, sous l'action de la force centrifuge. Cet accident peut se produire dans certaines installations hydraulico-électriques où l'action des régulateurs est forcément lente (à cause de la faible hauteur de chute) et où les masses des organes en mouvement ont une vitesse périphérique très grande, les frottements ne présentant qu'un couple résistant minimum. Dans tous les cas, l'essai de solidité mécanique des enroulements ne doit être effectué que lorsque cette condition a été stipulée avec le constructeur.

Les méthodes que l'on peut employer pour déterminer le rendement d'une machine ou d'un appareil électrique sont assez nombreuses, mais il y en a peu qui soient applicables dans la pratique industrielle. Des méthodes précises et délicates peuvent être employées, mais elles exigent beaucoup de temps pour les effectuer et un matériel très coûteux; en outre, elles peuvent gêner le service d'une station centrale. Dans ces conditions, il est beaucoup plus pratique d'employer des méthodes simples, n'exigeant pas de grandes dépenses, en stipulant une tolérance en ce qui concerne le rendement garanti, tolérance qui varie suivant la méthode appliquée.

Des diverses méthodes de mesure applicables, les méthodes indirectes sont les plus simples et les moins sujettes aux erreurs d'observation.

Avec les méthodes directes, on procède à la mesure de la

puissance absorbée par la machine et de la puissance que fournit cette dernière; on établit ensuite le rapport. Par les méthodes indirectes, on mesure l'une ou l'autre de ces valeurs, puis on détermine séparément les pertes.

Il est facile de voir qu'avec les méthodes directes, on court le risque de commettre d'assez fortes erreurs. Soit un transformateur de 100 kilowatts, ayant un rendement garanti de 96 0/0; si on fait une erreur de 1 0/0 en plus dans l'évaluation de la puissance absorbée et la même erreur, mais en moins, dans celle de la puissance fournie, on arrive à un rendement de :

$$\frac{95}{101} = 94 \text{ 0/0 environ}$$

et l'erreur commise est de 2 0/0 en moins. Lorsque les erreurs, dans l'évaluation des puissances absorbée et fournie, sont en sens inverse, le rendement devient

$$\frac{97}{99} = 98 \text{ 0/0}$$

et l'erreur commise est de 2 0/0 en plus.

Au contraire, en relevant la puissance absorbée avec une erreur de 1 0/0 et en déterminant ensuite les pertes, 4 kilowatts par exemple, en admettant même pour ces dernières une erreur de 10 0/0 en moins, pour se placer dans le cas le plus défavorable, le rendement est de

$$\frac{101 - 3,6}{101} = 96,43 \text{ 0/0.}$$

Dans ces conditions, l'erreur commise ne dépasse guère 1/2 0/0.

Dans le tome II, chapitre xviii, il sera donné des détails sur les diverses méthodes que l'on peut employer pour la détermination du rendement.

CHAPITRE XIX

LIGNES DE TRANSMISSION. — SYSTÈMES DE DISTRIBUTION

133. Transmission de l'énergie. — L'énergie électrique fournie par les alternateurs de la station centrale doit être amenée aux appareils de transformation et d'utilisation par une canalisation électrique.

Quelquefois une première transformation est effectuée dans la station centrale même, afin de pouvoir produire l'énergie électrique sous une tension modérée et de la transmettre ensuite sur la ligne sous une haute tension, ce qui est nécessaire dans le cas d'une transmission d'énergie à grande distance, lorsque la puissance à transmettre atteint plusieurs milliers de kilowatts.

La canalisation constitue une des parties essentielles d'une installation électrique et, de la manière dont elle a été étudiée et réalisée, dépend en grande partie le bon fonctionnement de l'ensemble. Il arrive souvent que l'établissement de la ligne est la partie de l'installation qui présente les plus grandes difficultés, difficultés d'autant plus grandes que le réseau est plus développé et que la tension est plus élevée. Mais il convient de dire qu'aujourd'hui le technicien, instruit par l'expérience des autres, peut établir, en toute sûreté, un projet de grande ligne de transmission électrique d'énergie. Il y a actuellement en service des lignes ayant plus de 100 kilo-

mètres de développement, à des tensions de 20 000, 30 000 et même 40 000 volts, transmettant des dizaines de milliers de chevaux et qui fonctionnent régulièrement depuis des années sans donner lieu à des inconvénients sérieux. Il se produit toujours quelques interruptions de service impossibles à éviter, car il y a évidemment des travaux d'entretien comme dans toute installation industrielle et, à plus forte raison, lorsque la canalisation est aérienne, puisqu'elle est exposée à de nombreuses causes de dérangements qui peuvent troubler son fonctionnement normal. C'est pour cette raison que les grandes installations hydraulico-électriques, dont l'énergie produite est utilisée pour des services publics (éclairage, traction électrique, etc.), disposent toujours, au point d'utilisation, soit d'une installation à vapeur de réserve, soit d'une batterie d'accumulateurs.

La canalisation d'une installation électrique peut être entièrement aérienne, entièrement souterraine ou en partie aérienne et en partie souterraine. Généralement, lorsque la canalisation traverse la rase campagne, on l'établit aériennement; au contraire, à l'intérieur des grandes villes, la canalisation principale reliant la station centrale aux centres de distribution, ainsi que les dérivations ou lignes secondaires, sont également des lignes souterraines. Dans les installations de moyenne importance, la distribution de l'énergie dans les rues peut se faire au moyen de lignes aériennes. On utilise des canalisations mixtes, c'est-à-dire en partie aériennes et en partie souterraines, lorsque l'énergie à distribuer dans une grande ville est fournie par une station centrale très éloignée.

Les progrès réalisés dans la construction des câbles pour transmission de courants à tension élevée permettent aujourd'hui de les employer même pour des tensions alternatives de 10 000 volts. Il est assez rare pourtant que l'on dépasse la tension de 6 000 volts, parce que cette différence de potentiel est suffisante pour permettre d'effectuer économiquement une distribution d'énergie d'une puissance de plusieurs milliers de kilowatts dans un rayon de 5 à 6 kilomètres que peut avoir

l'installation d'une grande ville. A Milan, par exemple, l'énergie, provenant de la station centrale hydraulico-électrique de Paderno, située à 32 kilomètres sur le fleuve Adda, est amenée à la Porte Volta par une canalisation aérienne sous la tension de 13 500 volts; la sous-station de la Porte Volta distribue le courant dans Milan, à la tension de 3 000 volts, par une canalisation souterraine. Des transformateurs réduisent ensuite cette tension à 150 volts dans les dérivations qui amènent le courant pour l'éclairage chez les abonnés, dérivations établies en câbles souterrains.

On peut donc dire d'une manière générale que les canalisations souterraines servent surtout à distribuer l'énergie aux points où elle est utilisée, tandis que les lignes aériennes sont surtout employées pour les transmissions d'énergie à grande distance. C'est pourquoi on se bornera à donner ici seulement quelques renseignements sur les canalisations souterraines en décrivant les systèmes de distributions; au contraire, on donnera de plus amples détails sur les canalisations aériennes qui constituent une partie importante de l'installation et qui, comme on l'a déjà dit, présentent, tant pour leur installation que pour leur entretien, de notables difficultés.

Suivant toujours le même programme adopté pour cet ouvrage, on renverra le lecteur au tome II pour tout ce qui concerne les calculs et on n'exposera actuellement que les principes généraux et les descriptions utiles.

134. Choix de la tension à adopter dans une transmission d'énergie. — Limites atteintes pratiquement. — La tension à adopter pour un transport d'énergie varie naturellement pour chaque cas particulier et il n'est guère possible de donner à ce sujet de règle générale, puisqu'il faut tenir compte chaque fois de la distance et de la valeur de la puissance à transmettre.

Il est évident que la tension à employer doit être d'autant plus grande que la distance à franchir et que la puissance à transmettre sont plus considérables; mais la section des

conducteurs, une fois la valeur de la tension choisie, dépend des pertes en ligne que l'on veut admettre sous charge normale, pertes qui, d'ordinaire, sont comprises dans les limites de 5 à 10 0/0, quoiqu'il y existe quelques cas où elles sont inférieures à 5 0/0 et d'autres où elles sont supérieures à 10 0/0. Le choix de la tension dépend également de la forme des courants employés : courant alternatif simple, courants diphasés ou courants triphasés. Comme on l'a déjà fait remarquer, on doit donner la préférence au courant alternatif simple pour les petites installations d'éclairage ; quant aux courants diphasés, ils ont été employés pendant un certain temps, mais aujourd'hui on ne les utilise plus, au moins en ce qui concerne les transmissions d'énergie, et on ne s'en sert, dans certains cas spéciaux, que pour distribuer le courant à partir des sous-stations. On peut donc dire qu'actuellement les transmissions d'énergie se font presque exclusivement avec des courants triphasés et, dans ce qui suit, les indications données se rapporteront toujours à ces courants.

Pour des distances jusqu'à 10 kilomètres, avec une puissance à transmettre de 250 kilowatts, une tension de 3 000 volts efficaces est généralement suffisante. Si la puissance à transmettre est de près de 500 kilowatts ou bien si la distance atteint 20 à 25 kilomètres, on peut aller jusqu'à 5 000 volts, que l'on peut dépasser encore s'il faut transmettre les 500 kilowatts à 25 kilomètres.

Pour déterminer la tension à employer, le mieux est de se référer à des cas analogues, ce qui est d'autant plus facile que toutes les grandes maisons de construction ont une collection de renseignements relatifs aux installations qu'elles ont faites, renseignements très précieux que l'on a tout avantage à consulter. En procédant par tâtonnements, on peut également arriver à trouver, par le calcul, la valeur de la tension la plus convenable. Si, par exemple, à la suite d'un premier projet, on trouve qu'il faut donner aux conducteurs une section trop grande, il faut refaire les calculs pour une tension plus élevée ; mais il ne faut pas perdre de vue qu'en

adoptant une tension plus élevée, on diminue proportionnellement, il est vrai, à égalité de pertes dans la ligne, le poids des conducteurs, mais, en même temps, augmentent les difficultés pour obtenir un isolement suffisant et il faut employer un matériel d'isolateurs, d'interrupteurs, de coupe-circuit, etc., beaucoup plus coûteux; de même les alternateurs et les transformateurs sont d'un prix plus élevé.

La tendance actuelle est d'augmenter la valeur de la tension plutôt que d'accroître la section des conducteurs ou leur nombre, à cause des phénomènes d'induction dont il sera question un peu plus loin, car aujourd'hui on peut avoir du matériel de ligne supportant très bien les hautes tensions et les alternateurs se construisent dans d'excellentes conditions pour des tensions allant jusqu'à 15 000 ou 20 000 volts, à la condition toutefois qu'ils soient de grande puissance.

Jusqu'aux tensions de 8 000 à 10 000 volts, il est préférable d'obtenir la tension qu'il doit y avoir sur la ligne directement de l'alternateur. Il serait bon de pouvoir dépasser cette limite afin d'éviter l'emploi de transformateurs élévateurs de tension, mais le fonctionnement continu d'alternateurs à haute tension a mis en évidence un fait très important.

La matière isolante qui, actuellement, convient le mieux pour isoler convenablement les conducteurs induits du noyau de fer, lorsque la tension dépasse 10 000 volts, est la micanite, produit obtenu en agglomérant, à l'aide d'un ciment spécial, de minces lames de mica et en donnant au produit obtenu la forme voulue; on obtient ainsi des lames, des tubes, des cylindres, etc. Or l'expérience a démontré que la micanite soumise aux vibrations, tant du fer qui l'entoure que des conducteurs qu'elle enveloppe, perd peu à peu sa compacité et s'effrite. Cela ne se produit qu'au bout de quelques années de fonctionnement et il est possible d'effectuer des réparations en temps utile; mais il suffit d'envisager les inconvénients qui peuvent résulter de ce fait pour voir qu'il est bien préférable, dans les grandes stations génératrices à haute tension, d'employer des alternateurs à tension modérée dont l'isolement

peut être obtenu avec d'autres matières et d'élever ensuite la tension à la valeur voulue à l'aide de groupes de transformateurs.

On a déjà dit dans le paragraphe 81 que l'emploi des transformateurs a permis d'utiliser des tensions très élevées : à Provo (Telluride), la tension est de 40 000 volts, et dans l'installation de Colgate, la tension peut être poussée jusqu'à 60 000 volts. Ces tensions sont des valeurs efficaces, en sorte que, si on admet que ces grandeurs varient suivant la loi sinusoïdale, les valeurs maxima (§ 35) sont respectivement :

$$40\,000 \cdot \sqrt{2} = 56\,000 \text{ volts}$$

et

$$60\,000 \cdot \sqrt{2} = 84\,900 \text{ volts.}$$

M. C. F. Scott, ingénieur en chef de la *Westinghouse Electric Manufacturing Co*, de Pittsburg, et ses collaborateurs ont procédé à Provo, à East-Pittsburg et au Niagara, à d'intéressantes expériences pour déterminer jusqu'à quelles limites on pouvait pousser pratiquement la tension d'une installation à courant alternatif. On ne donnera ici de ces expériences qu'un résumé succinct et on renverra le lecteur au mémoire original de M. Scott pour de plus amples détails¹.

On a constaté d'abord que les pertes d'énergie, dues à la présence des isolateurs, par suite des défauts qu'ils pouvaient présenter, étaient insignifiantes. Le passage des courants dans les conducteurs paraît améliorer la résistance d'isolement, probablement parce que la chaleur développée par leur passage chasse l'humidité. C'est ainsi que, par un temps très humide, dans une expérience, le wattmètre, qui avait une déviation de 116 divisions au moment où la ligne était mise en charge, n'avait plus qu'une déviation de 72 divisions au bout de quelques minutes. Dans un autre essai, la déviation du wattmètre est passée de 155 divisions à 138 après trois minutes.

1. Scott (F.), *Transactions American Institute of Electrical Engineers*, 1898.

A Telluride, une ligne de 3570 mètres de longueur fut établie sur 62 poteaux en bois avec traverses également en bois supportant les isolateurs. Une partie de ces isolateurs étaient en verre, les autres en porcelaine à double cloche et d'un diamètre variant de 11 à 15 centimètres. Cette ligne a parfaitement fonctionné pendant plusieurs jours à une tension efficace de 70 000 volts, sans que les pertes augmentassent sensiblement dans les journées humides et quoique la neige, accumulée sur les traverses, ait relié un jour tous les isolateurs par leur rebord inférieur. A la tension de 50 000 volts, on peut évaluer les pertes à 2 ou 3 watts par isolateur.

On a ensuite constaté qu'à partir de 20 000 volts, les fils tendent à devenir lumineux à cause des décharges qui se produisent sous forme d'aigrettes entre les divers conducteurs. Ces lueurs augmentent rapidement avec la tension; à 50 000 volts, les fils sont visibles à une grande distance pendant les nuits obscures et le ronflement qui accompagne ces lueurs s'entend jusqu'à 100 mètres de distance.

Suivant en cela une loi naturelle, ces phénomènes produisent une certaine perte d'énergie, pertes qui sont d'autant plus faibles que les conducteurs sont plus éloignés l'un de l'autre et que plus gros est leur diamètre. Naturellement ces pertes augmentent proportionnellement avec la longueur de la ligne et aussi, proportionnellement, mais en raison hyperbolique, avec l'augmentation de tension.

La fréquence paraît avoir peu d'influence sur la valeur de ces pertes; par contre, la forme des courbes de la tension en a une très grande, parce que les valeurs maxima de la tension peuvent atteindre une limite beaucoup plus élevée que celle qui correspond à la valeur maximum de la tension, si la forme de la courbe était harmonique, le facteur de forme (Voir § 43, tome II) pouvant varier de 1,1 à 1,4.

M. Scott en déduit que, pratiquement, il ne serait pas prudent de dépasser 50 000 à 60 000 volts, tension qui permet, du reste, de transmettre des milliers de chevaux à des distances même supérieures à 300 kilomètres. Toutefois, il est indispen-

sable que, dans le parcours de la ligne, l'air soit très pur pour qu'on puisse employer des tensions aussi élevées; dans les contrées où l'air est chargé de poussières, il ne serait pas prudent de dépasser 30 000 volts. M. Loppé, à ce propos, cite l'exemple de l'installation de Biberest, près Soleure en Suisse, où la tension est de 8 000 volts à courant continu (système Thury); la ligne a 25 kilomètres de longueur et la résistance totale d'isolement baisse parfois jusqu'à 2 400 ohms pour atteindre une résistance d'isolement pratiquement infinie après une abondante pluie qui a enlevé toutes les poussières.

135. Choix de la fréquence. — Suivant le cas, on adopte une fréquence élevée ou une basse fréquence. En effet, pour une valeur déterminée du flux maximum qui agit sur une spire, la valeur moyenne de la force électromotrice induite croît proportionnellement à la fréquence; il s'ensuit que, plus la fréquence est élevée, plus légers et par conséquent moins coûteux sont les alternateurs, les transformateurs et les moteurs, parce qu'on peut employer des noyaux magnétiques, à égalité de tension produite ou utilisée, de section d'autant plus petite que la fréquence est plus élevée, ou encore mettre un moins grand nombre de spires pour constituer les enroulements.

Mais, si les hautes fréquences sont faciles à obtenir avec des génératrices à grande vitesse angulaire, il n'en est pas de même pour celles qui ont une vitesse lente et qui alors devraient être pourvues d'un trop grand nombre de pôles; de plus, il serait difficile de maintenir le couplage en parallèle. La même observation s'applique également aux moteurs.

Les hautes fréquences ne peuvent s'appliquer qu'à des moteurs à grande vitesse; pour les moteurs à faible vitesse angulaire, il serait nécessaire d'augmenter le nombre de leurs pôles et il faudrait alors laisser un plus grand entrefer à cause du plus grand diamètre de l'organe mobile; on aurait donc, pour les moteurs asynchrones, une plus grande dépense de courant magnétisant et, par suite, diminution du facteur de

puissance. En outre, le démarrage présenterait plus de difficultés.

C'est pour les motifs qui viennent d'être exposés que, dans une installation à courants alternatifs devant assurer un service d'éclairage, il ne faut pas que la fréquence soit inférieure à 40 périodes par seconde, ni supérieure à 60. En ce qui concerne particulièrement le fonctionnement des lampes à arc, il serait désirable que la fréquence fût plus élevée; déjà avec 40 à 45 périodes les alternances du courant sont visibles à l'œil et ce phénomène est encore quelquefois plus accentué suivant la forme de la courbe : si elle présente une allure pointue, la lumière à arc devient souvent insupportable dans un endroit fermé.

Mais, si l'installation ne doit pas assurer un service d'éclairage ou que ce dernier ne soit que peu important (dans ce dernier cas, on a recours à une transformation en courant continu ou à une transformation de fréquence), surtout si l'installation doit alimenter de puissants convertisseurs (§ 114), il est préférable d'adopter une basse fréquence de 25 à 35 périodes, quoique les alternateurs, les transformateurs et les moteurs soient plus lourds et, par conséquent, d'un prix plus élevé. C'est ainsi que l'emploi d'une fréquence de 16 périodes dans l'installation de traction électrique de la Valteline a permis d'éviter l'emploi de réducteurs de vitesse pour les moteurs qui n'ont que peu de pôles et dont le rotor, calé sur l'essieu, actionne directement les roues par l'intermédiaire d'un joint double en parallélogramme.

136. Conducteurs utilisés pour l'établissement des lignes de transmission d'énergie. — Les conducteurs presque universellement employés pour l'établissement des lignes de transmission d'énergie sont en cuivre électrolytique recuit, qui possède une haute conductivité jointe à une malléabilité suffisante pour qu'il soit facile de bien tendre les conducteurs.

Les lignes aériennes, en pleine campagne, ne doivent pas

avoir une section inférieure à 7 mm^2 (environ 3 mm de diamètre), étant admis que les pertes dans la ligne permettent d'employer des fils de cette section, parce que, autrement, pour tenir compte de l'action du vent, il faut rapprocher les appuis et l'augmentation du nombre de ces derniers entraînerait une dépense supérieure à celle qui résulterait de l'augmentation de la section des conducteurs.

Un fil de diamètre supérieur à 8 millimètres se tend mal et il est préférable d'employer des câbles nus, qui, au point de vue mécanique, résistent beaucoup mieux aux effets combinés de la température, de leur poids, de la neige, du verglas et de la force du vent qui, dans certaines régions, souffle très violemment de temps en temps. On emploie rarement des fils ou des câbles d'une section supérieure à 100 mm^2 , non seulement parce qu'il est difficile de les tendre convenablement, mais aussi parce qu'il serait nécessaire d'employer des isolateurs de dimensions exagérées. Dans ces conditions, il vaut mieux dédoubler la ligne.

Chaque fois qu'il est nécessaire d'obtenir une plus grande résistance à la traction, on utilise des fils de cuivre électrolytique écroui qui, tout en ayant une conductivité presque égale à celle du cuivre recuit, présente une résistance mécanique à la rupture qui est environ deux fois plus considérable.

Lorsque la puissance à transmettre est faible, la section des conducteurs est assez petite, à cause de la haute tension; au lieu d'employer des fils de cuivre, qui ne doivent pas avoir une section inférieure à 7 millimètres, on a tout avantage à utiliser des fils de bronze silicieux. De la teneur en silicium dépend la résistance à la rupture, mais, par contre, la résistance électrique augmente. Avec les fils de bronze, les appuis peuvent être distants de 60 à 80 mètres, tandis qu'avec les fils de cuivre, il n'est pas prudent de dépasser 40 à 50 mètres.

Pour la traversée des fleuves, canaux, torrents ou bras de mer, il n'est guère possible d'installer des appuis intermédiaires ou encore, si l'on veut réduire leur nombre autant que

possible, il faut augmenter la portée ; pour cela il faut que les conducteurs soient constitués dans toute cette longueur par un fil ou un câble d'acier. La traversée du détroit de Carquinez par la ligne triphasée qui part de Colgate, dans la Nevada en Californie, pour alimenter Oakland, sur la baie de San Francisco, est une installation bien connue des électriciens. On sait que cette ligne a une longueur de 240 kilomètres et que la tension est de 60 000 volts. Pour la traversée du détroit, on a édifié deux énormes pylônes en treillis métallique ; ils sont placés à 1 328 mètres l'un de l'autre et supportent, par l'intermédiaire d'isolateurs appropriés, 4 câbles d'acier (dont 1 de réserve) formés chacun de 19 fils et ayant un diamètre de 12 millimètres. La flèche est de 30 mètres et les 4 câbles sont à une distance de 6 mètres l'un de l'autre.

On a beaucoup écrit sur l'emploi de l'aluminium pour constituer les conducteurs d'énergie. A égalité de résistance ohmique, par rapport à un conducteur de cuivre pris comme unité, la section du conducteur d'aluminium est de 1,64, le diamètre de 1,27, la résistance à la rupture de 0,63 et le poids de 0,50. Il y a deux ou trois ans, lorsque le prix du cuivre était très élevé, comme la différence existant entre les prix des deux métaux n'était pas considérable, l'aluminium présentait des avantages au point de vue économique, parce que, à résistance ohmique égale, les conducteurs avaient un poids moitié moindre, ce qui permettait d'utiliser des appuis et des ferrures d'isolateurs plus légers. Mais, même dans ces conditions, il convient de donner la préférence au cuivre. En effet, la résistance à la rupture est plus faible pour l'aluminium ; de plus, à cause du plus fort diamètre des fils, le vent a plus de prise sur les conducteurs et, à cause de la légèreté du métal, on ne peut empêcher les mouvements oscillatoires des conducteurs. La pose est plus difficile que lorsqu'il s'agit de conducteurs en cuivre, quoique, à cause de leur poids plus faible, elle devrait, au contraire, être plus facile. Cela est dû à ce que les fils d'aluminium présentent souvent des points défectueux qu'il faut rechercher avant la pose en les soumettant à des

tractions énergiques, très voisines de la limite d'élasticité du métal ; si on ne prend pas cette précaution, des ruptures peuvent se produire après un certain temps. Les joints des diverses sections doivent être faits avec des manchons en aluminium parce que, en employant des manchons d'autre métal, l'aluminium formerait avec ce dernier un couple électrique qui aurait pour effet d'amener rapidement la destruction du conducteur.

Enfin, il faut aussi faire remarquer que le coefficient de dilatation linéaire de l'aluminium est 1,4 fois celui du cuivre ; aussi, pendant l'hiver, la ligne est fortement tendue, tandis que, pendant l'été, elle ne l'est pas suffisamment. Cette propriété de l'aluminium a été la cause de nombreux inconvénients sur les quelques lignes en aluminium construites jusqu'à présent.

Pour toutes les raisons qui viennent d'être exposées, l'emploi de l'aluminium comme conducteur, qui, il y a quelques années, avait sa raison d'être au point de vue économique, n'est plus guère aujourd'hui adopté, le prix du cuivre étant devenu normal. Cela n'empêche pas que, dans certains cas spéciaux, l'aluminium ne puisse être employé avec avantage, mais, dans la plupart des cas, on doit lui préférer le cuivre.

Dans le calcul de la résistance mécanique des conducteurs, indépendamment de son poids et de l'action du vent, il faut aussi tenir compte du poids de la neige et du verglas qui, pendant l'hiver, peuvent recouvrir ces conducteurs. La plupart des traités pratiques, tels que celui d'Hospitalier, de Piazzoli ou de Grawinkel et Strecker, contiennent toutes les données nécessaires pour effectuer ces calculs ; on y trouve également les formules et renseignements nécessaires relatifs à la construction des lignes aériennes. C'est pourquoi on se bornera à donner ici quelques renseignements généraux sur les appuis, les isolateurs et le matériel de ligne, sans entrer dans des détails qui sortiraient du cadre de cet ouvrage.

137. Nature des appuis. — Les appuis destinés à la

construction des lignes aériennes peuvent être rangés en trois catégories :

- 1° Appuis entièrement métalliques ;
- 2° Appuis entièrement en bois ;
- 3° Appuis partie en bois, partie en métal.

Cette dernière catégorie d'appuis présente l'avantage d'être très solide au point de vue mécanique et de posséder une partie isolante ; mais, en pratique, ces appuis n'ont point donné de trop bons résultats parce que, avec le temps, le point de jonction des deux parties constituantes perd beaucoup de sa solidité.

Quant à employer des appuis entièrement métalliques ou des appuis entièrement en bois, les techniciens ont des avis partagés sur ce point. Les uns donnent la préférence aux appuis métalliques à cause de leur plus grande durée, parce qu'ils sont moins exposés aux diverses causes de détérioration qui abrègent la durée des appuis en bois. Les autres, au contraire, préconisent l'emploi du bois, parce qu'ils attachent une grande importance à ce fait que, lorsqu'un conducteur vient à se détacher de l'isolateur, le bois de l'appui assure partiellement un certain isolement¹, tandis qu'avec les appuis métalliques on n'a pas la même garantie ; de plus, il y a à considérer l'économie sensible dans les frais de premier établissement que les appuis en bois permettent de réaliser. Les raisons invoquées de part et d'autre sont excellentes, aussi le choix à faire doit-il être examiné dans chaque cas particulier en tenant compte de toutes les circonstances.

Lorsqu'on utilise des appuis métalliques, les pylônes en treillis sont à recommander, parce qu'ils sont relativement légers tout en présentant une résistance mécanique très grande. On les fixe dans le sol en entourant leur base d'un bloc de ciment. Les supports d'isolateur sont fixés à l'aide de vis ou mieux à l'aide de boulons sur la partie supérieure de l'appui ; on les fixe quelquefois sur des traverses en fer assujetties sur

1. Un poteau ordinaire de 8 à 10 mètres de hauteur présente, par temps humide, du sommet à sa base, une résistance ohmique de 2 000 à 3 000 ohms.

l'appui à l'aide de boulons. Ces dispositions varient d'après les dimensions de l'appui et suivant l'écartement des conducteurs.

On a également essayé des appuis en ciment armé, mais il ne semble pas qu'ils puissent répondre aux exigences voulues, étant donné la nature des efforts auxquels ils sont soumis.

Le plus souvent, c'est aux poteaux en bois que l'on a recours pour établir les lignes. Ces poteaux sont toujours en bois résineux (sapin rouge, pin laricia, cèdre, etc.) que l'on injecte avec des liquides antiseptiques afin d'accroître leur durée. Les poteaux sont plantés directement dans le sol, en faisant un trou et en entourant la base du poteau de pierres et de terre que l'on tasse le plus possible. Il est préférable d'entourer la base du poteau d'un bloc de ciment, car on prolonge ainsi la durée de l'appui.

Les dimensions des poteaux en bois ainsi que celles des appuis métalliques varient naturellement, suivant les cas, d'après le nombre et la section des conducteurs et d'après les conditions atmosphériques locales aux diverses époques de l'année.

Quand la ligne comporte plusieurs fils, ce qui est le cas le plus fréquent, l'appui porte à la partie supérieure des traverses en bois dur que l'on fixe avec des boulons rivés à chaud de préférence à des boulons à écrou, parce qu'il n'est pas rare que ces derniers ne se desserrent peu à peu sous l'action des vibrations auxquelles est soumis l'appui et aussi par suite du retrait que subit le bois pendant l'été. Ces traverses sont consolidées avec des jambes de force fixées à l'appui, autant que possible, avec des boulons rivés à chaud ; les supports d'isolateurs sont alors placés sur les traverses. Ces supports sont généralement en fer ; toutefois, en Amérique, on fait usage de supports en bois très durs tels que le chêne rouge, l'eucalyptus, le caroubier.

Les appuis, quels qu'ils soient, doivent avoir une hauteur suffisante pour que le conducteur le plus bas, à haute tension, se trouve au moins à 6 mètres au-dessus du sol. Dans les traversées de routes, cette hauteur minimum doit être fortement augmentée ; en outre, sur tout le parcours au-dessus des

routes, on doit placer sous les conducteurs un filet à larges mailles en fil métallique relié soigneusement à la terre pour éviter tout accident en cas de rupture d'un des conducteurs.

Lorsque les appuis sont munis de traverses et que la ligne comporte une double canalisation, les conducteurs de l'une doivent être placés à droite de l'appui et les conducteurs de l'autre à gauche. Dans ces conditions, lorsqu'on a des réparations à effectuer, on peut mettre un seul circuit en charge, tandis que l'on met l'autre hors circuit pour pouvoir effectuer les réparations sans danger. Ces réparations peuvent encore être rendues moins dangereuses si, dans l'axe de l'appui, les deux circuits sont séparés par un écran en toile métallique parallèle aux conducteurs et s'étendant jusqu'à 1 mètre de chaque côté de l'appui. Toutefois, avant de commencer son travail, le monteur doit s'assurer que le circuit sur lequel il doit opérer est mis en communication avec la terre et il n'est pas superflu qu'il établisse lui-même une bonne communication avec le sol à l'endroit même où doit se faire la réparation. Cette précaution est indispensable parce que, même en admettant que des contacts accidentels entre le circuit en charge et celui à réparer ne puissent se produire, les phénomènes d'induction du premier sur le second suffisent pour donner naissance à de fortes tensions.

Dans les transmissions d'énergie très importantes, on établit généralement deux lignes distinctes, chacune d'elles formant une canalisation complète. Les réparations sont alors toujours possibles, principalement aux heures de la journée où l'installation fonctionne à faible charge, car il suffit alors de transmettre l'énergie par une des lignes, tandis que l'autre, sur laquelle on veut effectuer des réparations, est mise hors circuit. Mais, dans ces conditions, la chute de tension en ligne est plus considérable et il est nécessaire que les alternateurs puissent fournir le courant sous une tension plus élevée afin de compenser cette perte dans la ligne unique.

Toutes les fois que la chose est possible, il faut toujours placer les appuis en ligne droite ; leur écartement doit être

normalement de 40 à 60 mètres. Lorsqu'une ligne est installée dans la campagne, il faudrait souvent, pour conserver la ligne droite, placer les appuis sur des terrains dont on n'est pas propriétaire; dans ce cas, il est préférable de suivre les routes, parce que l'installation est plus économique et que, d'un autre côté, la ligne est plus facile à surveiller et, en cas de réparation, elle est également plus accessible.

Quelquefois un tracé s'éloignant un peu de la ligne droite permet d'éviter des points difficiles où l'installation serait relativement beaucoup plus coûteuse qu'en adoptant un tracé polygonal.

Si l'on veut éviter les brusques changements de niveau, les traversées de rivières et de gorges ou autres accidents de terrain et s'il n'en doit pas résulter une dépense trop élevée, il est préférable, lorsque le cas se présente, d'allonger le parcours de la ligne pour éviter ces obstacles et obtenir ainsi une certaine uniformité dans les zones traversées; c'est qu'en effet une ligne traversant une zone où se produisent de fortes perturbations atmosphériques se trouve plus exposée qu'une autre aux coups de foudre. On reviendra plus loin sur ce sujet.

Dans tout projet d'établissement de ligne de transmission électrique d'énergie, on doit rechercher principalement à lui donner une grande solidité et une grande durée. De plus, elle doit être facilement accessible par n'importe quel temps; une ligne dont tous les points ne sont pas facilement accessibles se trouve dans d'assez mauvaises conditions au point de vue de la régularité de son fonctionnement.

138. Isolateurs. — En général, les isolateurs doivent satisfaire à deux conditions essentielles: présenter une grande résistance d'isolement superficiel et une grande résistance d'isolement de masse.

La première de ces deux conditions est imposée par ce fait que le courant a tendance à passer du conducteur en charge, fixé sur la tête de l'isolateur, au support métallique de ce der-

nier que l'on peut admettre être au potentiel de la terre.

La seconde condition se justifie parce que, à cause de la différence de potentiel existant entre le conducteur et l'extrémité de la tige supportant l'isolateur, il peut se produire un point de moindre résistance par où peut passer le courant.

Pour qu'un isolateur ait une résistance d'isolement superficiel suffisante, il suffit de donner à sa surface un développement assez grand pour que le courant, provenant du conducteur et tendant à aller vers le support métallique de l'isolateur, ait à parcourir un trajet le plus long possible; c'est pourquoi on utilise des isolateurs à plusieurs cloches qui présentent l'avantage de protéger en partie de l'humidité l'extrémité supérieure du support et d'éloigner cette dernière des bords de la cloche extérieure que la présence de poussières ou d'humidité peut rendre conductrice.

Un bon isolement de masse est facile à obtenir avec les isolateurs en verre, à la condition qu'ils ne présentent pas de fentes, ce dont il est du reste facile de s'assurer avant de les utiliser. Toutefois, l'isolateur en verre, qui est d'un prix peu élevé, a l'inconvénient d'être moins résistant, au point de vue mécanique, que l'isolateur en porcelaine de même forme et de mêmes dimensions. Pour des lignes à tension moyenne, lorsqu'il n'est pas nécessaire d'employer des isolateurs de grandes dimensions, l'isolateur en verre peut être avantageusement employé; mais, au delà de 15 000 à 20 000 volts, il est indispensable d'avoir des isolateurs en porcelaine et cela à cause des motifs qui vont être exposés.

La surface extérieure d'un isolateur doit être parfaitement lisse afin que la poussière ne puisse s'y attacher que difficilement et que le peu qui y adhère soit facilement enlevé par la pluie. Un bon isolateur en porcelaine a une surface qui résiste parfaitement à l'action des agents atmosphériques; il n'en est pas de même pour les isolateurs en verre, surtout si leur composition chimique ne satisfait pas à certaines conditions, par exemple si le verre est fortement acide au lieu d'être basique comme l'est le verre à bouteilles. Sur une surface rugueuse, la

poussière adhère fortement et la résistance d'isolement superficiel peut baisser considérablement.

Pour qu'un isolateur en porcelaine ait une bonne résistance d'isolement de masse, il est indispensable que la cuisson soit effectuée à très haute température et que la porcelaine soit d'un grain très fin; la cassure doit être nette et brillante et la matière ne doit pas absorber d'humidité, ce que l'on peut facilement constater en laissant tomber une goutte d'encre sur cette cassure et en observant si elle s'étend plus ou moins. En outre, l'émail qui recouvre la porcelaine ne doit pas présenter la moindre gerçure.

Les isolateurs pour très hautes tensions doivent présenter un très grand isolement au point de vue des décharges statiques, de manière à empêcher la formation d'un arc entre la cloche extérieure et le support métallique de l'isolateur.

Pour s'assurer de la bonne qualité d'un isolateur, il faut le soumettre à des essais avec une tension au moins deux fois plus grande que celle qu'il doit supporter normalement. Ces essais, qu'il n'est pas indispensable d'effectuer lorsque la tension ne dépasse pas 5 000 à 6 000 volts, sont utiles pour des tensions plus élevées et indispensables lorsque la tension normale de la ligne dépasse 15 000 à 20 000 volts.

On procède à l'essai des isolateurs en les plaçant dans une cuve métallique, la tête en bas et l'ouverture de la cloche en haut. On met de l'eau dans la cuve jusqu'à ce que le niveau arrive au moins à la moitié de la hauteur des isolateurs; cela fait, on établit entre la cuve et la partie intérieure de la cloche de l'isolateur une différence de potentiel égale au moins au double de la tension normale à laquelle ils seront soumis. Généralement, on fait usage pour ces essais d'un transformateur dont une des bornes est reliée à la cuve métallique, tandis que l'autre est en communication avec un châssis métallique placé au-dessus de la cuve, d'où partent des conducteurs que l'on met en communication avec les ferrures des isolateurs, lorsqu'elles sont déjà scellées; dans le cas où les isolateurs ne sont pas munis de leur support, on établit une bonne commu-

nication entre le châssis et les isolateurs à l'aide de conducteurs plongeant dans la cloche que l'on a préalablement remplie d'eau, rendue conductrice avec un peu d'acide sulfurique ou de carbonate de sodium. Lorsque l'essai est fait à une tension supérieure à 20 000 volts, dès le commencement on perçoit une forte odeur d'ozone et l'on entend un son caractéristique. Si un des isolateurs est défectueux, le son diminue de hauteur et devient plus grave et l'on entend ensuite un coup sec qui indique que l'isolateur a cédé. Aussitôt on voit l'isolateur défectueux rougir et, en même temps, le plomb du circuit à basse tension du transformateur fond. On retire l'isolateur défectueux de la cuve et l'on poursuit l'essai des autres au moins pendant une demi-heure. On ne doit conserver, pour être placés sur les appuis, que des isolateurs qui, après avoir subi cet essai, sont à la température ordinaire au moment où l'on interrompt le courant; on doit mettre de côté ceux qui, tout en ayant résisté à l'essai, présentent trace d'échauffement, ce qui est dû à des poussières métalliques emprisonnées dans l'émail.

Il peut arriver que des isolateurs ayant résisté aux essais soient néanmoins défectueux et qu'on les ait utilisés. Dans ce cas, il peut arriver qu'ils se brisent dès que la ligne est mise en charge ou bien il peut se produire aussi une dérivation à la terre par l'isolateur, la traverse et l'appui. Si ce dernier est en bois, il peut se carboniser lentement.

Avec des tensions supérieures à 20 000 volts, l'essai fait reconnaître immédiatement les isolateurs défectueux, qui sont entourés d'une sorte de lueur, tandis que ceux qui sont bons ne présentent pas trace de ce phénomène.

Pour les lignes où la tension ne dépasse pas 10 000 volts, on utilise des isolateurs à cloche plus ou moins cylindrique, ce qui facilite l'enlèvement des poussières par la pluie. Pour les hautes tensions, la forme en parapluie (*fig. 239*) convient mieux parce que la distance qui sépare l'extrémité supérieure du support des bords de la cloche extérieure est plus grande et que l'isolateur protège partiellement la tige qui le supporte de l'humidité et de l'accumulation de la neige. Pour assurer une

meilleure protection de la tige, on l'entoure parfois d'une gaine en porcelaine (*fig. 240*) que l'on enfle sur le support en fer ou en bois avant de fixer l'isolateur.



FIG. 239.



FIG. 240.

Les isolateurs à cloches multiples ayant un grand développement dans le sens de la hauteur ne sont plus guère employés actuellement, parce que des pièces aussi grosses ne peuvent

être que très difficilement cuites d'une façon uniforme, ce qui est indispensable pour obtenir une bonne résistance d'isolement de masse. A ce sujet, il convient de mentionner l'idée émise par M. Locke, de New-York, idée bien accueillie par les techniciens et qui a été aussitôt appliquée, de constituer l'isolateur en plusieurs pièces d'épaisseur presque uniforme, cuites séparément et puis réunies à chaud à l'aide d'un émail spécial. La figure 241 donne la coupe d'un de ces isolateurs, sur laquelle on voit également le manchon de porcelaine servant à protéger la tige.

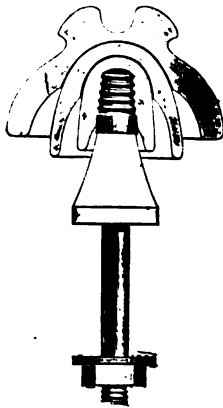


FIG. 241.

Grâce à ce procédé de fabrication, un isolateur du poids de 2 kg environ, de 175 mm de diamètre, d'une hauteur ne dépassant pas 110 mm, peut être employé avec des tensions allant jusqu'à 40 000 volts. Dans l'installation de Paderno, les isola-

teurs que l'on vient d'employer sont à cloches multiples (fig. 242) et en deux pièces, cuites séparément et réunies ensuite à l'aide d'un mastic composé de glycérine et de minium.

La ligne établie entre Colgate et Oakland par la *Standart Electric C°* en Californie, la plus hardie de toutes celles qui existent actuellement, tant par sa longueur (240 kilomètres) que par la tension adoptée (de 40 000 à 60 000 volts), est

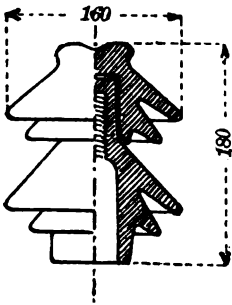


Fig. 242.



Fig. 243.

montée sur des isolateurs du type que représente la figure 243; ces isolateurs ont été fabriqués par la maison Locke.

La tête, en porcelaine, a un grand diamètre (environ 27 cm) et porte sur les bords de sa circonférence une sorte de gouttière dans laquelle est recueillie l'eau de pluie; deux becs disposés dans le plan du conducteur permettent à l'eau de s'écouler, en dehors de la traverse sur laquelle est fixé l'isolateur. La partie inférieure de l'isolateur, très allongée, est en verre ou en porcelaine et est soudée à chaud à la partie supérieure à l'aide d'un émail. La tige en acier a sa partie inférieure entourée d'un manchon en porcelaine de forme conique et porte à sa partie supérieure une pièce filetée, en bois paraffiné, qui pénètre dans l'isolateur.

Il résulte d'expériences qui ont été faites que les isolateurs de ce type présentent, au point de vue statique, une résistance d'isolement bien supérieure à celle des isolateurs à cloches multiples. Cet isolateur « Victor » (*fig. 243*), indépendamment de cette qualité, a aussi une très grande résistance d'isolement superficiel parce que sa partie centrale, de diamètre relativement faible par rapport au développement de la partie supérieure, a une forme géométrique très oblongue.

Pour les très hautes tensions, il est préférable d'employer des tiges d'isolateur dont la partie supérieure est en bois dur, comme dans les isolateurs utilisés sur la ligne de Colgate. Le bois, pourvu qu'il soit résistant et élastique, fatigue moins l'isolateur et, de plus, fait baisser la capacité de la ligne, tous les corps bons conducteurs voisins des fils de ligne constituant la seconde armature d'une sorte de condensateur.

139. Effets dus à l'inductance et à la capacité des lignes. — On sait qu'un conducteur quelconque parcouru par un courant électrique donne lieu à la production d'un champ magnétique; lorsque ce conducteur est rectiligne et de section circulaire, les lignes de force sont circulaires et concentriques au conducteur.

Dans le cas d'un courant constant et en admettant qu'il se distribue uniformément dans le conducteur, on démontre que l'intensité du champ magnétique à l'intérieur du conducteur est nulle en son centre, qu'elle croît graduellement jusqu'à la surface où elle atteint son maximum, pour diminuer ensuite progressivement à mesure que l'on s'éloigne du conducteur. On peut représenter les variations d'intensité du champ magnétique à l'intérieur et à l'extérieur du conducteur par la densité plus ou moins grande des lignes de force et l'on a alors la distribution que montre la figure 244.

Si le courant vient à cesser, le champ magnétique disparaît et l'on peut supposer, pour expliquer clairement le phénomène, que les lignes de force sont comme absorbées par le conducteur et que, en se resserrant, elles viennent toutes dispa-

raître en son centre. Par suite de ces variations du champ magnétique, il doit se produire un phénomène d'induction. Si, dans le voisinage du conducteur considéré, il s'en trouve un

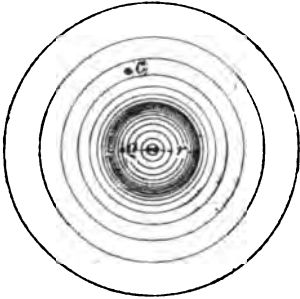


FIG. 244.

second placé parallèlement et dont l'axe soit, par exemple, en c , ce dernier coupe toutes les lignes de force qui sont au delà de lui lorsque le courant cesse de circuler dans le premier conducteur, puisqu'on a admis que ces lignes de force se dirigent alors vers le centre de ce dernier; par conséquent, il doit se produire dans le second conducteur

une force électromotrice induite dont la valeur est proportionnelle au nombre de lignes de force qu'il coupe.

Ce qui se produit pour un conducteur c se produit également pour tous les éléments filiformes en lesquels on peut décomposer mentalement le conducteur principal et une force électromotrice de même valeur est induite dans tous les éléments qui se trouvent à égale distance du centre. Ainsi une force électromotrice de valeur déterminée est induite dans tous les éléments filiformes qui se trouvent à la surface du conducteur, chacun d'eux coupant toutes les lignes de force venant de l'extérieur au moment où elles sont absorbées. Pour tous les éléments filiformes se trouvant sur la circonférence de rayon ρ , la valeur de la force électromotrice est plus grande encore, parce que, lors de l'absorption des lignes de force, ces éléments coupent toutes celles qui viennent de l'extérieur plus les lignes de force intérieures qui sont comprises entre les rayons r et ρ . En considérant les éléments qui sont encore plus près du centre du conducteur, on voit que la force électromotrice induite doit avoir une valeur toujours plus grande; c'est pourquoi l'élément filiforme qui est au centre est le siège d'une force électromotrice induite maximum.

Après avoir examiné ce qui se produit dans un conducteur

dans lequel circule un courant continu au moment où ce courant vient à être interrompu, il faut considérer maintenant le cas de ce conducteur parcouru par un courant alternatif. Alors, sous l'action du champ magnétique alternatif qui se produit, il se développe dans le conducteur une force électromotrice de self-induction alternative, mais d'amplitude variable, maximum au centre, minimum à la périphérie. Pratiquement, on prend comme valeur de la force électromotrice de self-induction dans le conducteur la moyenne de ces deux valeurs.

Par le même raisonnement, on doit admettre qu'il se développe une force électromotrice d'induction mutuelle dans le conducteur c que l'on suppose pour le moment n'être parcouru par aucun courant.

Il résulte de ces considérations que le courant alternatif ne peut plus se distribuer uniformément dans le conducteur, parce que, les forces électromotrices de self-induction n'étant pas égales dans les divers points de sa section, le courant se porte de préférence vers la zone du conducteur où ces forces électromotrices de self-induction sont plus faibles, c'est-à-dire vers les couches superficielles. Ce phénomène est connu sous le nom d'effet Kelvin.

Il s'ensuit que dans un conducteur de forte section, parcouru par un courant alternatif, la densité du courant n'est pas uniforme; dans la partie centrale, moins intéressée dans la transmission, la densité du courant est presque nulle, tandis que vers la périphérie passe la presque totalité du courant.

C'est pourquoi l'on dit que la résistance ohmique que présente un conducteur à la circulation d'un courant alternatif est plus grande que celle qu'il présente à la circulation d'un courant continu et, comme on le sait (§ 32), ce phénomène est d'autant plus accentué que la fréquence du courant est plus grande.

Si le conducteur est en métal magnétique, en fer par exemple, le champ magnétique produit par le courant est bien plus intense, car la perméabilité du fer accroît le flux et les réactions produites sont alors plus accentuées.

Dans le cas où les conducteurs sont en cuivre, qui est le métal le plus généralement employé, on n'a pas à tenir compte ordinairement de cette augmentation de résistance parce que, avec un fil de 16 mm de diamètre et une fréquence égale à 50 périodes par seconde, l'augmentation de résistance n'est que de 1 0/0; mais il faut en tenir compte dans les cas où les conducteurs sont parcourus par des courants dont l'intensité atteint des centaines ou des milliers d'ampères, comme c'est le cas dans les applications électrothermiques. On doit alors employer de préférence des conducteurs ayant, pour une section donnée, la surface maximum; c'est pourquoi on utilise des lames de cuivre minces de section rectangulaire plutôt que des conducteurs massifs cylindriques.

Si les effets dus à cette augmentation apparente de résistance sont négligeables dans les conducteurs d'une ligne de transmission d'énergie, on ne peut en dire autant des effets dus aux forces électromotrices de self-induction dans un conducteur et d'induction mutuelle dans les conducteurs voisins, en ce qui concerne la tension qui doit être de valeur suffisante pour compenser ces effets, tension qui doit être produite au départ.

En ce qui concerne l'induction mutuelle, les effets produits sont évidemment d'autant moins sensibles que les conducteurs sont plus éloignés les uns des autres, mais il n'en est pas de même des effets dus à la self-induction. Soit, par exemple, une longue ligne de transmission à courant alternatif simple (*fig. 245*). A tout moment, les courants dans les deux conducteurs sont d'égale intensité et de sens opposé; dans l'espace compris entre les deux conducteurs, les lignes de force produites par le passage des courants ont la même direction et tout le circuit est entouré par un flux de valeur déterminée. Puisque les courants sont alternatifs, les variations de flux induisent dans le circuit une force électromotrice de self-induction décalée en retard de $1/4$ de période par rapport à l'inten-



Fig. 245.

sité du courant. Cette force contre-électromotrice a une valeur d'autant plus grande que la valeur efficace de l'intensité est plus élevée, que la ligne a une plus grande longueur et que les conducteurs sont plus éloignés les uns des autres. Cette dernière condition s'explique par ce fait que, si les conducteurs étaient plus rapprochés, le flux embrassé serait négligeable, tandis que, s'ils sont suffisamment éloignés, le flux embrassé est presque le double de celui agissant sur un seul fil et, par suite, atteint sa valeur maximum. Donc, pour avoir un circuit présentant le moins d'inductance possible, toutes autres choses égales d'ailleurs, il suffit de placer les conducteurs aussi près que possible les uns des autres. En pratique, il est nécessaire et même indispensable de les écarter suffisamment pour éviter que, sous l'action du vent, les conducteurs, dans leurs mouvements, ne viennent à se toucher, produisant alors des courts circuits.

Toutefois, à partir d'un certain écartement, on peut dire que l'inductance reste à peu près constante; c'est pourquoi, quelle que soit la valeur de cet écartement, une partie seulement des lignes de force vient se fermer dans la surface limitée par les axes des conducteurs; en écartant les conducteurs, on augmente toujours le flux compris dans l'espace qui les sépare. Mais comme, d'autre part, la densité des lignes de force autour de chaque conducteur décroît très rapidement à mesure qu'ils s'éloignent l'un de l'autre, il en résulte que l'augmentation de flux ainsi obtenue par l'éloignement des conducteurs diminue progressivement jusqu'à devenir pratiquement négligeable quand cet écartement a atteint une certaine valeur.

Lorsqu'il s'agit de très hautes tensions, l'écartement des fils doit être grand, à cause des pertes se produisant entre les conducteurs. Dans la pratique, l'écartement minimum est de 50 centimètres et l'écartement maximum de 1 mètre.

Lorsque les courants à transmettre ont une grande intensité, au lieu d'employer des câbles ou des fils d'un diamètre supérieur à 8 ou 9 millimètres, il est préférable d'employer plusieurs conducteurs de moindre section. En plaçant ces conduc-

teurs sur les appuis, il faut les disposer pour que les effets d'induction soient presque égaux sur chacun d'eux, afin d'éviter la production de courants parasites entre les fils constituant un même conducteur et qui sont tous parallèles entre eux. Ainsi, par exemple, dans l'installation que montre la figure 246, les conducteurs *a* et *b* ou les conducteurs *c* et *d* sont soumis à des phénomènes d'induction de diverses grandeurs; dans les circuits fermés que forment ces conducteurs, des courants parasites prennent naissance, courants dus à la résultante des forces électromotrices agissant sur eux; ces courants donnent lieu à des pertes supplémentaires par effet Joule.

Pour une ligne de transmission à courants triphasés, on obtient le meilleur résultat, c'est-à-dire que chaque conducteur se trouve, au point de vue de l'induction, dans des conditions identiques par rapport aux autres, en plaçant tous les fils à égale distance sur le tracé d'une circonférence afin que les conducteurs soient disposés aux sommets d'un polygone régulier.

Lorsque la ligne comporte beaucoup de fils, cette disposition n'est pas pratiquement réalisable. Dans ce cas, la disposition qui, après celle du polygone régulier, donne la moindre différence entre les fils constituant une même branche, est celle dans laquelle ces fils sont voisins. La figure 247 montre comment sont disposés les conducteurs sur la ligne de Paderno à Milan; les fils appartenant à la même branche du système triphasé portent le même numéro.

La ligne de Paderno comporte une double rangée d'appuis, ce qui permet d'effectuer facilement les réparations sur l'une des lignes en transmettant la totalité de la charge par l'autre. Dans les installations ne comportant qu'une seule rangée d'appuis avec deux séries de conducteurs, si l'on veut rendre les réparations faciles sur l'une d'elles pendant que l'autre est en charge, il faut placer une des séries à droite de l'appui et l'autre à gauche (*fig. 248*).

Dans ce cas, si la production de courants parasites dans les conducteurs correspondant à une même phase est peu sen-

sible, il se produit toutefois, dans chacun des conducteurs d'une série, des réactions d'induction mutuelle dues aux trois conducteurs de l'autre série, réactions qui détruisent à l'arrivée l'équilibre des tensions.

Afin d'éviter cet inconvénient, on a pensé qu'en modifiant la position des conducteurs sur chaque appui, les effets produits



Fig. 246.

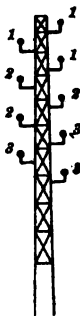


Fig. 247.

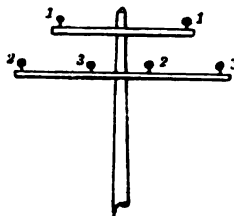


Fig. 248.

par l'induction mutuelle seraient égaux et symétriques pour tous les conducteurs du système, dans le cas d'une charge éga-

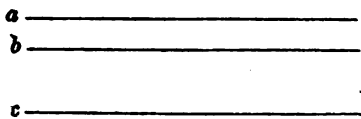


Fig. 249.

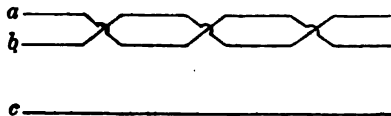


Fig. 250.

lement distribuée sur les trois phases. Pour donner une explication de ce mode de procéder, on peut considérer un circuit à courant alternatif simple ab soumis à l'action de l'induction mutuelle d'un courant c . Dans le cas représenté par la figure 249, les phénomènes d'induction mutuelle produits par c sur b diffèrent de ceux que c exerce sur a ; mais, si, à intervalles réguliers par exemple, on inverse la position des conducteurs a et b (fig. 250), les effets d'induction

mutuelle produits par le courant c sur a et sur b sont alors égaux.

Il est évident que, le circuit ab étant parcouru par un courant alternatif simple, le sens des courants est de direction opposée dans chaque conducteur et que les effets d'induction mutuelle produits sur c sont pratiquement nuls lorsqu'on adopte la disposition que montre la figure 250; il n'en est pas de même avec la disposition indiquée sur la figure 249, à

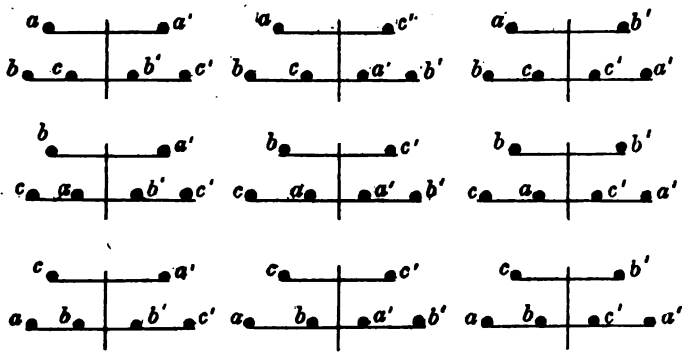


FIG. 251.

moins que c ne soit placé à égale distance entre les conducteurs a et b .

Dans une ligne double à courants triphasés (fig. 248), on peut rendre symétriques les effets de l'induction mutuelle sur chacune des séries de conducteurs en adoptant la disposition suivante. On divise la ligne en trois sections et, dans chacune de ces sections, on change la position des conducteurs; on peut encore diviser la ligne en plusieurs parties et dans chacune d'elles, divisée en trois sections, on opère de même. Si l'on veut complètement éviter les effets de l'induction mutuelle d'une série de conducteurs sur l'autre, il faut diviser la ligne en neuf sections et, sur chacune de ces sections, disposer les conducteurs comme le montre la figure 251. Les lignes ainsi établies sont appelées *lignes en spirale*. Aux points où les conducteurs sont transposés, il faut établir deux appuis assez rap-

prochés l'un de l'autre, afin que, dans le parcours sur lequel s'effectue le changement, les conducteurs soient parfaitement tendus. Cette précaution est indispensable, parce que, dans le milieu de la portée, les conducteurs se trouvant moins éloignés l'un de l'autre, il faut éviter qu'il se produise des courts circuits sous l'action du vent.

Pour obtenir une compensation parfaite, il serait nécessaire de transposer les conducteurs sur chaque appui; on éviterait ainsi les petites différences d'équilibre qui peuvent se produire par suite des variations inévitables d'écartement entre les conducteurs sur toute la longueur de la ligne. Mais alors, par raison d'économie et pour ne pas augmenter le nombre des appuis, on devrait les placer à la distance normale et, dans ces conditions, les risques de courts circuits seraient plus grands.

Heureusement ces effets d'induction mutuelle ne sont pas importants et ils n'entraînent pas de grandes variations de tension; aussi, il est assez rare que l'on établisse des lignes avec le système en spirale.

Pratiquement, les phénomènes produits par la self-induction et par l'induction mutuelle, qui n'impliquent, du reste, aucune augmentation des pertes d'énergie, sont la cause qui nécessite un accroissement de quelques centièmes de la tension au départ de la ligne. La valeur absolue de la force contre-électromotrice due à ces effets, dans les conducteurs d'une ligne de 40 à 50 kilomètres de longueur, atteint rarement 15 0/0 de la valeur de la tension au départ de la ligne. Il y a lieu de remarquer que cette force contre-électromotrice est décalée en retard de $1/4$ de période sur l'intensité du courant et aussi sur la tension si les récepteurs ne présentent pas d'induction; c'est pourquoi, par suite de ce décalage, l'augmentation de tension qu'il est nécessaire de produire sur les génératrices pour compenser la force contre-électromotrice ne dépasse pas quelques centièmes, 2 à 3 0/0 au plus. Pour comprendre facilement cela, il suffit de se reporter à ce qui a été dit dans le paragraphe 25 et à examiner la figure 27, dans laquelle on voit que la force électromotrice due à la self-induction produit un

décalage en retard de l'intensité par rapport à la force électromotrice principale, décalage qui, tout en étant important, ne nécessite pas une grande augmentation de cette dernière pour être compensé.

L'inductance que présente une longue ligne de transmission d'énergie est plus ou moins diminuée par la capacité de la ligne. En effet, les conducteurs considérés deux à deux lorsqu'ils sont à des potentiels différents se comportent comme les armatures d'un véritable condensateur. En outre, chaque conducteur constitue aussi un condensateur avec la terre qui a un potentiel égal à zéro et avec les supports d'isolateurs et les traverses en fer et aussi avec les appuis eux-mêmes lorsque ces derniers sont métalliques. Les effets d'inductance se manifestent d'autant plus que la charge sur la ligne est plus considérable. En ce qui concerne la capacité de la ligne, elle se manifeste toujours lorsque la ligne est en charge; même à vide, il faut toujours une certaine intensité de courant de charge pour maintenir une différence de potentiel entre les armatures de cette sorte de condensateur. Mais, comme on va en donner l'explication, la capacité de la ligne ne peut produire des effets sensibles que lorsqu'il n'y a pas de charge.

En effet, soit une longue ligne de transmission d'énergie d'une centaine de kilomètres de longueur, par exemple. Cette ligne présente une inductance considérable et une capacité qui n'est pas négligeable. Par suite de sa capacité, la ligne exige un courant de charge de valeur déterminée pour maintenir la tension; c'est pour cela que, si la ligne est reliée d'une part à la génératrice et que, d'autre part, on supprime toute communication avec les récepteurs, l'ampèremètre indique toujours le passage d'une certaine intensité de courant. Ce courant se compose de deux parties: une composante énergétique, en concordance de phase avec la force électromotrice, qui compense les diverses pertes de la ligne (effet Joule, pertes dans le diélectrique, etc.), et une composante inénergétique, due à la capacité et qui, comme on l'a vu (§ 44), est décalée de $1/4$ de période en avance par rapport à la force électromotrice de

l'alternateur. Cette composante inénergétique a pour effet de renforcer son champ magnétique inducteur (§ 72) au lieu de l'affaiblir comme le ferait un courant décalé en retard. Une conséquence pratique de ce phénomène est qu'à vide l'alternateur exige un courant d'excitation d'intensité plus petit pour obtenir la tension normale. C'est ainsi que dans la station centrale de Saint-Georges (département de l'Aude), qui, par l'intermédiaire de transformateurs élévateurs de tension, alimente une ligne de 100 kilomètres de longueur, les alternateurs atteignent la tension normale de 2500 volts avec un courant d'excitation de 12 ampères lorsqu'ils ne sont pas reliés à la ligne, tandis que le courant d'excitation n'est que de 6 ampères lorsqu'ils sont en communication avec la ligne. C'est donc le courant de charge de la ligne qui, dans ce dernier cas, fournit le supplément de courant nécessaire pour l'excitation.

La ligne étant en charge normale, si on suppose qu'à un moment donné cette charge soit brusquement supprimée, soit par suite de la fusion des coupe-circuit au point d'utilisation, soit par suite du fonctionnement d'un interrupteur automatique, la tension des alternateurs peut prendre alors une valeur dangereuse, parce que le courant de charge, toujours existant, agit pour renforcer l'excitation des génératrices. C'est pour ce motif que l'on dit que les effets de la capacité ne se manifestent que lorsque l'installation fonctionne à vide. Au contraire, lorsque la ligne est en charge, l'inductance produit une action opposée à celle de la capacité et ces actions réciproques se neutralisent plus ou moins. Il convient de ne pas oublier que, lorsque la ligne est en charge, sa capacité s'augmente de celle due aux câbles souterrains de distribution, aux moteurs synchrones surexcités (§ 94) et aux puissants transformateurs à haute tension.

Il semblerait que le courant de charge, mesuré au départ, doit augmenter proportionnellement à la longueur de la ligne, mais il n'en est pas ainsi. Il s'agit, dans le cas actuel, d'une capacité uniformément distribuée et la loi qui régit l'établissement du courant dans ce condensateur de nature spéciale est

très complexe : aussitôt que le courant de charge commence à prendre une certaine valeur, l'effet de l'inductance se manifeste aussitôt, même à circuit ouvert. La différence de potentiel ainsi que l'intensité du courant prennent aussitôt une allure oscillante. A tout instant, les valeurs de l'intensité et de la différence de potentiel et, par suite, le décalage, varient de point en point le long de la ligne.

A un moment donné, s'il n'y avait pas de capacité, l'intensité serait constante sur toute la longueur de la ligne s'il n'y avait pas de dérivations à la terre par les isolateurs et des pertes entre les conducteurs à travers l'air et aussi par les isolateurs et les traverses qui les supportent. Par suite de ces pertes, l'intensité baisse d'une manière uniforme et aussi la tension. Successivement, la tension au départ varie ainsi que l'intensité ; mais l'affaiblissement de leur valeur reste toujours constante, car elle est due seulement aux pertes. Ce qui vient d'être dit s'applique à tous les moments successifs de la période.

Lorsqu'il y a de la capacité, le phénomène se complique. A un moment donné, l'intensité a une certaine valeur au départ, cette valeur devient nulle à une certaine distance, puis est de sens contraire et atteint son maximum en un certain point de la ligne, pour redevenir nulle au point d'arrivée s'il n'y a pas de récepteurs en fonctionnement, c'est-à-dire si la charge est nulle. Un instant après, l'onde de l'intensité change : sa valeur au départ, le point où elle devient nulle ainsi que celui où elle atteint sa valeur maximum sont décalés en avance ou en retard le long de la ligne et cela s'applique à tous les moments de la période. On comprend que, pendant la durée d'une période, on constate, en chaque point de la ligne, des valeurs efficaces différentes pour l'intensité.

Ce qui se produit pour l'intensité se produit également pour la différence de potentiel et, comme les points où les valeurs sont nulles ne sont pas à égale distance du point de départ, le décalage varie aussi comme une onde. La figure 252 représente les valeurs efficaces des trois quantités pour un cas pratique déterminé en supposant la ligne fonctionnant à vide. La courbe de

la puissance indique sa valeur moyenne en différents points de la ligne; cette valeur décroît progressivement en compensant les pertes en ligne dont il a été déjà question.

Les relevés d'essais faits sur l'installation de Saint-Georges sont très instructifs. A circuit ouvert, tandis qu'au départ la tension est de 17 600 volts, à l'extrémité de la ligne, c'est-à-

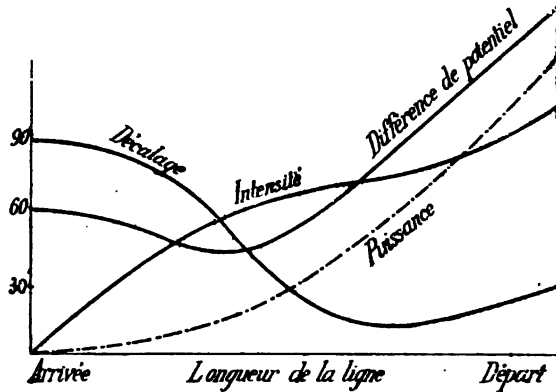


FIG. 252.

dire à 70 kilomètres, cette tension atteint 18300 volts, soit 700 volts en plus. En sectionnant la ligne et en reliant successivement les diverses sections, la tension des alternateurs ayant sa valeur normale, on constate que l'intensité du courant de charge, mesurée à la station génératrice, a les valeurs suivantes :

Longueur de la ligne en kilomètres .	12	62	72	83	100
Courant de charge en ampères	0	68	72	52	38

Il faut dire que les intensités ainsi mesurées comprennent celles du courant absorbé par les pertes entre conducteurs et par les isolateurs; mais ces pertes sont d'autant plus faibles que la ligne est depuis peu en service.

Dans l'installation de Paderno (ligne de 32 kilomètres), qui fonctionne à 12000 volts, le courant de charge est de 1 ampère et le courant absorbé par les pertes de 0,24 ampère, en temps ordinaire.

140. Surélévation de tension dans les installations à courant alternatif. — Les longues lignes de transmission d'énergie sont exposées à des surélévations de tension indépendantes de celles qui ont été exposées dans le paragraphe précédent et aussi de celles qui sont dues aux décharges atmosphériques. Ces augmentations subites de tension, qui peuvent atteindre quelquefois, ne serait-ce que pendant quelques instants, le décuple de la tension normale, entraînent l'obligation de protéger les génératrices, les transformateurs, les appareils, les instruments, etc., contre les dommages très sérieux qu'elles peuvent produire.

Ces surélévations subites de tension peuvent avoir pour cause les phénomènes de résonance qui peuvent se produire dans le circuit. On a déjà dit, dans le paragraphe 45, que, lorsque ces phénomènes de résonance se produisent dans un circuit comprenant une capacité et présentant de la self-induction, la tension à chacune des extrémités du circuit pouvait atteindre une valeur de beaucoup supérieure à celle que produit la génératrice. Lorsque le courant a une allure sinusoidale et que la fréquence ne dépasse pas 50 périodes par seconde, ce qui est la fréquence maximum généralement admise, ces phénomènes de résonance ne se produisent jamais. Seulement, ils peuvent se produire lorsque l'allure de la courbe de tension ou d'intensité est déformée et présente des harmoniques (§ 41) de grande fréquence, cinq ou six fois plus grande que la fréquence fondamentale ; mais, avec les alternateurs actuels, on peut dire que ce cas ne se présente plus.

Toutefois, les surélévations de tension peuvent être dues à une autre cause. On sait (§ 23) qu'un champ magnétique constitue un réservoir d'énergie et que, lorsque ce champ disparaît, il restitue intégralement cette énergie sous forme de courants induits. Soit une longue ligne de transmission ayant une certaine capacité ; si on suppose qu'au moment où le courant alternatif atteint sa valeur maximum, la ligne vienne à être brusquement interrompue, l'énergie accumulée dans le champ magnétique produit par la ligne (champ qui, dans ces

conditions, à l'intensité maximum) est alors restituée. Si la ligne n'avait pas de capacité, cette énergie disponible se manifesterait au point de rupture sous forme d'un arc très puissant; si la ligne a une certaine capacité, l'arc se produit néanmoins, mais il est moins puissant, parce que le courant variable qui se produit au moment de la disparition du champ magnétique est en partie utilisé pour produire la charge du condensateur constitué par la ligne; mais ce condensateur, étant déjà chargé par suite de la tension existant aux extrémités de la ligne, ne peut recevoir une augmentation de charge s'il ne se produit pas simultanément une différence de potentiel plus élevée entre les armatures et, dans ces conditions, la tension peut prendre des valeurs très élevées. L'énergie électromagnétique disponible se transforme alors en énergie électrostatique. La tension maximum étant atteinte, c'est le condensateur qui se décharge à son tour et ce courant variable de décharge tend à reformer le champ magnétique. Ce phénomène se reproduit de nouveau et, si ce n'était les pertes par effet Joule, par hystérésis, par courants de Foucault et autres, il se continuerait indéfiniment, l'énergie passant successivement d'une forme à une autre avec de continues oscillations, chacune de ces oscillations s'accomplissant en un temps donné que l'on appelle *période d'oscillation du circuit*.

On peut expliquer ce phénomène en se servant d'une comparaison empruntée à la mécanique. Soit un volant ayant une masse considérable monté sur pointes et sur l'axe duquel est fixée l'extrémité d'un ressort en spirale, l'extrémité opposée étant fixée en un point placé hors du système. On imprime au volant, à l'aide de la main, un mouvement de va-et-vient régulier, par exemple de 10 centimètres de part et d'autre de sa position initiale et avec une fréquence quelconque. Puis, saisissant le moment où le volant repasse par sa position initiale (vitesse maximum et énergie cinétique de masse maximum ou force vive), on l'abandonne à lui-même. On peut alors constater deux faits : l'amplitude des oscillations varie et la fréquence du mouvement change. La fréquence du mouvement devient

égale à la période propre d'oscillation du système, autrement dit à la période d'oscillation libre du système. Ce mouvement d'oscillation ainsi obtenu pourrait durer indéfiniment par suite de transformations successives et régulières d'énergie cinétique de masse en énergie de déformation élastique du ressort et *vice versa*, si les frottements ne venaient au bout d'un temps p'us ou moins long, ramener le système au repos.

L'inertie du système est comparable à la self-induction du circuit électrique et l'élasticité du ressort, à la capacité (Voir chap. vi, § 43 et suivants). De même, l'amplitude des oscillations peut être comparée à la tension maximum qui existe entre les armatures du condensateur constitué, dans le cas actuel, par les conducteurs de la ligne.

Il est facile de comprendre maintenant que, lorsqu'une ligne vient à être brusquement coupée, soit par un interrupteur, soit par la fusion d'un coupe-circuit, si la rupture se produit au moment où l'intensité a une valeur notable, le phénomène dont il vient d'être question se produise et que la tension atteigne une valeur très élevée. Le phénomène est encore plus accentué lorsque l'interruption se produit au moment où l'intensité atteint sa valeur maximum. En admettant que la rupture du circuit ait lieu au moment où l'intensité a une valeur nulle, l'oscillation se produirait également, parce qu'il y a toujours une certaine réserve d'énergie. En réalité, l'intensité peut être décalée par rapport à la tension et cette dernière peut encore avoir une certaine valeur au moment où celle de l'intensité est nulle. Le condensateur constitué par les conducteurs est alors chargé proportionnellement à cette tension, l'énergie électrostatique se transforme en énergie électromagnétique et réciproquement ; il s'ensuit, par conséquent, des oscillations. En outre, indépendamment de ce phénomène, en admettant qu'il n'existe aucune différence de potentiel entre les conducteurs, la canalisation peut ne pas avoir un potentiel nul par rapport à la terre, si la ligne est bien isolée et qu'il n'y ait aucun point à la terre. Dans ces

conditions, les conducteurs et la terre constituent les armatures d'un véritable condensateur et, s'il se produit des oscillations, ces dernières ne peuvent causer une élévation de tension supérieure à la normale parce que, d'une part, la capacité d'une ligne aérienne est faible et que, d'autre part, l'énergie électrostatique correspondant aux conditions normales est également faible.

Les surélévations de tension produites par la disparition du champ magnétique d'un circuit sont d'autant plus à craindre que la capacité du condensateur constitué par la ligne est plus faible. Cela, parce que, pour une certaine quantité d'énergie à absorber et, par conséquent, pour une quantité donnée d'électricité à accumuler, la différence de potentiel des armatures du condensateur doit être d'autant plus élevée que sa capacité est plus faible. C'est le cas d'un sac élastique qui devrait contenir une quantité donnée de liquide : la résistance des parois doit être d'autant plus grande que le volume du sac est plus petit.

Ces surélévations de tension sont donc beaucoup plus à craindre avec les lignes aériennes qu'avec les lignes en câbles souterrains dans lesquelles la capacité est relativement grande. On démontrera, dans le tome II, que la tension maximum peut être représentée par la valeur d'une résistance particulière, dite *résistance d'oscillation libre*, multipliée par la valeur maximum que l'intensité peut prendre dans le circuit. Cette résistance particulière varie ordinairement de 400 à 900 ohms pour les lignes aériennes, tandis qu'elle n'est que de 40 ohms pour les câbles souterrains.

De fortes surélévations de tension peuvent également se produire sans qu'il y ait interruption du circuit, par suite d'une subite variation de charge et surtout par la production d'un court circuit. Chaque brusque augmentation ou diminution du courant, modifiant momentanément les conditions de fonctionnement, produit une perturbation dans l'énergie électromagnétique du système et, à cette perturbation, vient s'ajouter, pour les causes déjà données précédemment, une oscillation. Dans ces

conditions, le phénomène est accompagné d'une forte surélévation de tension.

Dans le cas d'un court circuit sur la ligne, dû à un contact accidentel de deux fils ou au fonctionnement simultané de deux ou de plusieurs parafoudres pendant un orage, l'augmentation de tension peut se produire aussi bien à la station génératrice qu'à la sous-station réceptrice, parce que, d'un côté du point où le court circuit s'est produit, le courant augmente d'intensité et diminue de l'autre côté. Le cas le plus dangereux pour la station génératrice est celui dans lequel le court circuit se produit vers l'extrémité de la ligne, parce qu'alors cette dernière intervient dans toute sa longueur, quoique l'importance du court circuit soit diminuée à cause de la résistance de la ligne même.

Il importe donc de prendre des précautions pour éviter que ces surélévations de tension se produisent ou du moins pour éviter les dégâts qu'elles peuvent occasionner. En ce qui concerne les surélévations de tension produites par l'ouverture du circuit, il faut choisir des interrupteurs de construction appropriée (Voir § 144). Dans tous les cas, il est nécessaire de placer des parafoudres aux extrémités de la ligne.

La mise en circuit de puissants transformateurs ou de moteurs d'induction et, en général, d'appareils quelconques ayant une grande inductance, devrait être effectuée en mettant un condensateur en dérivation aux bornes de l'appareil, afin de limiter le risque d'une surélévation de tension. Lorsque le fonctionnement des appareils est devenu régulier, on peut supprimer le condensateur, mais il est nécessaire de le remettre en circuit avant d'interrompre le courant dans l'appareil.

141. Protection des lignes contre les décharges atmosphériques.— Les lignes aériennes sont exposées aux décharges atmosphériques, aussi est-il indispensable de les protéger efficacement contre les coups de foudre ou, plus exactement, il est nécessaire de prendre des dispositions pour éviter qu'une décharge atmosphérique, suivant les conducteurs de la ligne,

n'arrive dans la station génératrice ou dans les sous-stations où elle pourrait détruire ou du moins gravement endommager tous les objets qui se trouvent sur son passage.

Au sujet des formes diverses que peut présenter une décharge atmosphérique, de ses effets et des mesures propres à rendre ces effets les moins nuisibles possibles pour l'installation, on ne saurait mieux faire que de reproduire, presque textuellement, les renseignements donnés, dans une conférence faite à Milan, par M. G. Semenza, ingénieur en chef de la société Edison, en faisant remarquer, comme du reste il l'a fait lui-même, que les explications données sont plutôt empiriques que scientifiques.

Les décharges atmosphériques qui frappent les lignes électriques peuvent se manifester sous trois formes principales :

1° Un coup de foudre éclatant entre un nuage et la terre parcourt un des conducteurs sur une distance plus ou moins longue ;

2° Un coup de foudre éclatant entre deux nuages ou entre un nuage et la terre produit une perturbation dans les conducteurs de la ligne ;

3° Un nuage fortement chargé se trouvant au-dessus de la ligne induit dans les conducteurs une charge électrostatique qui élève considérablement son potentiel.

Dans le premier cas, la décharge peut être oscillante ou non ; dans les deuxième et troisième cas, l'opinion la plus générale est que la décharge est toujours oscillante. Ce fait présente une grande importance, parce que la nature des effets produits diffère complètement suivant que la décharge est ou non oscillante.

Que la décharge soit ou non oscillante, elle rencontre dans les conducteurs une impédance de valeur supérieure à leur résistance ohmique ; mais, si la décharge se produit sous forme d'un seul flux d'énergie, les conducteurs ne présentent qu'une impédance qui diminue graduellement et, au bout de quelques instants, ce flux circule dans les conducteurs comme une onde

de courant ordinaire; au contraire, lorsque la décharge est oscillante, c'est-à-dire lorsqu'elle oscille avec une fréquence de plusieurs centaines et de plusieurs milliers de vibrations par seconde, la résistance ohmique devient absolument négligeable comparée à l'inductance énorme que présente le circuit.

C'est pour cela qu'une décharge oscillante, au lieu de suivre une spire de cuivre, franchit dans l'air plusieurs centimètres, l'impédance présentée par la spire constituant une sorte d'obstacle que la décharge ne peut franchir. C'est pourquoi il arrive parfois qu'une décharge ayant suivi les conducteurs de la ligne arrive aux bornes de la génératrice et de là passe sur la carcasse, qui est généralement en bonne communication avec la terre, et même aussi sur l'inducteur, plutôt que de suivre les conducteurs de l'induit.

On comprend que les effets produits par ces deux catégories de décharge soient très différents. En réalité, un coup de foudre qui frappe un conducteur et qui ne présente pas un caractère oscillant tend à suivre la ligne jusqu'à ce qu'il trouve un point où l'isolement soit faible par rapport à la terre; si, en ce point, il y a une couche d'air, il y a production d'une étincelle et, si c'est un isolant, il est perforé.

Une décharge oscillante, au contraire, cherche à se diriger vers la terre par le trajet qui présente la plus faible inductance; c'est pourquoi cette décharge franchit des intervalles d'air plutôt que de suivre un fil ou de traverser une bobine. Cela explique pourquoi, pendant un orage, il arrive parfois que la décharge passe directement à la terre à travers une couche d'air de 4 à 5 mètres au lieu de suivre un conducteur à l'extrémité duquel elle trouverait un passage à travers une couche d'air de quelques centimètres seulement.

D'une manière générale et principalement si la décharge est oscillante, il ne paraît pas difficile d'empêcher qu'elle atteigne les machines et les transformateurs; mais l'effet le plus dangereux et difficile à éviter est le suivant : presque tou-

jours les divers conducteurs d'une ligne se déchargent simultanément; alors les deux étincelles, les conducteurs de terre et la terre constituent une dérivation dont la résistance peut être très faible. Il en résulte dans toute l'installation un court circuit qui, pour peu qu'il ait une certaine durée, peut causer des avaries graves aux appareils et même arrêter le fonctionnement de toute l'installation ou d'une partie seulement. La plupart des avaries que subissent les machines à la suite des coups de foudre s'expliquent beaucoup mieux ainsi que par l'hypothèse admettant que la décharge se rend à la terre par la machine même; il en est de même en ce qui concerne l'explication de la fusion fréquente des coupe-circuit sous l'action d'une décharge atmosphérique.

Il est évident que le phénomène de mise à terre et de court circuit à travers les parafoudres se produit d'autant plus facilement que la tension de l'installation est plus élevée; de même les dégâts causés sont d'autant plus considérables que la puissance en jeu est plus grande. Ainsi un simple parafoudre à peigne suffit pour protéger les lignes télégraphiques et téléphoniques, parce que la différence de potentiel de 100 à 200 volts qui peut exister entre les peignes n'est pas suffisante pour qu'un arc permanent s'établisse à travers la couche d'air de quelques millimètres qui les sépare.

Il résulte de ce qui vient d'être exposé que la protection d'une ligne à haute tension est un problème complexe et cela explique pourquoi certaines dispositions de sûreté, appliquées avec succès dans certains cas, n'ont plus donné de résultats satisfaisants dans d'autres conditions.

Un système complet de protection contre les décharges atmosphériques doit satisfaire aux conditions suivantes :

1° Protéger la ligne des décharges directes ou coups de foudre frappant la ligne ;

2° Empêcher que les décharges oscillantes passent directement du conducteur à l'appui ou à la terre ;

3° Empêcher que les décharges atteignent les appareils du tableau, les génératrices et les transformateurs ;

4° Empêcher que les parafoudres ne produisent des courts circuits.

La ligne peut être protégée des coups de foudre qui la frappent directement à l'aide de pointes ou mieux avec des groupes de pointes placés au sommet des appuis et bien reliés à la terre. On a proposé souvent et on a même réalisé dans certains cas un dispositif consistant à placer au-dessus des conducteurs et tout le long de la ligne un fil métallique garni de pointes (fil de ronce) que l'on relie à la terre de distance en distance. Les résultats obtenus ne sont pas concluants et aujourd'hui ce dispositif n'est presque plus employé. On peut dire que, tout en protégeant la ligne des décharges directes en fonctionnant comme un véritable paratonnerre, il ne peut, en réalité, éviter que les effets secondaires n'agissent sur la ligne et, par suite, l'inutilité de ce mode de protection a paru évidente.

Il est assez difficile d'empêcher les décharges oscillantes de se rendre directement à la terre et de les obliger à passer par les parafoudres. Les oscillations électriques, comme les vibrations sonores d'une corde, en acoustique, ont des ventres et des nœuds, c'est-à-dire qu'en certains points des conducteurs l'augmentation de potentiel due à la décharge est très considérable (ventre), tandis qu'en d'autres points cette augmentation est nulle (nœuds). Pour qu'un parafoudre installé sur une ligne puisse fonctionner, il est nécessaire qu'il soit placé dans le voisinage du ventre d'une onde. Or il est impossible de connaître les points où se forment les ventres, chaque décharge pouvant avoir des longueurs d'onde différentes. Il faut donc, dans ces conditions, installer un grand nombre de parafoudres le long de la ligne et c'est l'expérience seule qui peut faire connaître le nombre nécessaire.

La troisième condition n'est pas trop difficile à réaliser. Il suffit, en effet, de placer un parafoudre en avant des appareils à protéger et de rendre très différents, au point de vue de l'inductance, les deux chemins que peut suivre la décharge. A cet effet, on donne une inductance très élevée aux conducteurs

que peut suivre la décharge pour arriver aux génératrices ou aux transformateurs, tandis que le conducteur de terre doit présenter la plus faible inductance possible. Dans ces conditions, il est probable que la décharge se rendra à la terre par la seconde voie qui lui est offerte, même dans le cas où elle devrait franchir une couche d'air notable.

Pour se placer dans les conditions qui viennent d'être exposées, il faut installer d'une manière convenable les parafoudres placés aux extrémités de la ligne. On augmente l'inductance de la portion de ligne comprise entre le parafoudre et les machines, en intercalant dans cette partie du circuit une bobine de self-induction comprenant une douzaine de spires de grand diamètre et ne contenant pas de fer. Cette bobine présente une impédance très élevée par rapport aux décharges oscillantes, tandis que, pour les courants ordinaires de l'installation, cette impédance est presque négligeable.

Quant au circuit qui relie le parafoudre à la terre, il doit, pour présenter la plus faible impédance possible, être en ligne droite, les décharges oscillantes ne se prêtant pas à de brusques changements de direction et tout coude du conducteur présentant une grande impédance. Donc le conducteur de terre doit être aussi droit et aussi court que possible et surtout avoir une connexion à la terre parfaitement établie. Un sol humide constitue une très bonne terre, tandis que l'eau seule constitue une mauvaise terre; la superficie de la plaque de terre doit être aussi grande que possible.

En ce qui concerne la quatrième condition à réaliser, c'est-à-dire d'empêcher que deux conducteurs, se déchargeant simultanément, ne produisent un court circuit dans l'installation à cause de la faible résistance que présente le parafoudre au moment où il fonctionne, on la réalise plus ou moins bien suivant le type de parafoudre employé. Il faut que le parafoudre présente une disposition telle qu'il puisse empêcher la formation d'un arc permanent entre ses deux pôles, arc qui tend à se produire au moment où éclate l'étincelle de décharge, ou bien qu'il coupe très rapidement cet arc,

s'il vient à se produire, parce qu'il serait maintenu par le courant de la génératrice qui, par l'intermédiaire des conducteurs, serait alors mise directement à la terre.

D'une manière générale, une bonne disposition à adopter consiste à intercaler sur le fil de terre une assez forte résistance ohmique présentant très peu de self-induction, par exemple un cylindre de charbon ; cette résistance limite l'intensité du courant et diminue les dangers que présente un court circuit. Une autre disposition, absolument indispensable, consiste à donner à chaque parafoudre une terre séparée ; en utilisant une terre unique pour tous les parafoudres, on rendrait l'installation dangereuse, parce qu'en cas de court circuit éventuel la résistance du fil de terre serait rendue absolument négligeable.

Il convient d'examiner maintenant les principes sur lesquels sont fondés les divers dispositifs imaginés pour réaliser la quatrième condition, c'est-à-dire pour éviter les courts circuits. Il faut remarquer que, dans tous les parafoudres utilisés jusqu'à présent, la décharge atmosphérique doit traverser un certain espace d'air calculé pour que la tension normale de l'installation ne puisse produire une dérivation à la terre. Toutefois, comme on l'a déjà expliqué précédemment, la résistance opposée par cette couche d'air peut devenir très faible, au moment où le parafoudre fonctionne, pour donner lieu à une dérivation à la terre du courant normal de l'installation. Il faut donc que la couche d'air que le coup de foudre doit franchir soit proportionnée à la tension de la ligne ; d'autre part, il ne faut pas que la distance qui sépare les deux pôles du parafoudre soit trop grande, sinon l'on risquerait d'empêcher son fonctionnement au moment opportun.

Les principes sur lesquels est fondée la construction des divers parafoudres pour les installations à haute tension à courants alternatifs sont les suivants :

1° Un arc permanent s'établit beaucoup moins facilement lorsque le courant est obligé de franchir successivement plusieurs intervalles d'air disposés en cascade, plutôt que de fran-

chir une seule couche d'air dont la longueur serait égale à la totalité des divers intervalles ;

2° Certains métaux et certains alliages possèdent la propriété d'empêcher la formation d'un arc ou, si l'arc se forme, de l'éteindre rapidement ;

3° L'arc qui se forme par suite du fonctionnement du parafoudre peut être interrompu mécaniquement en éloignant momentanément les deux organes entre lesquels l'arc s'est formé ;

4° L'arc peut être interrompu spontanément par soufflage électromagnétique lorsqu'il se forme dans un champ magnétique et dans une direction perpendiculaire aux lignes de force ; il peut être aussi interrompu sous l'action du courant d'air chaud qu'il produit si ce n'est pas par action électromagnétique.

Parmi les parafoudres fondés sur le principe des intervalles d'air à franchir par la décharge, le plus simple est celui que construit la *General Electric Co* ; il est constitué par trois ou cinq cylindres creux en bronze (*fig. 253*) de 40 mm de diamètre et d'une hauteur à peu près égale, fixés sur une plaque d'ardoise et séparés l'un de l'autre par une distance de 1 à 2 mm. Sur les deux cylindres extrêmes et également à petite distance sont fixés deux grosses baguettes de charbon dont l'une est reliée à la ligne à protéger et l'autre



FIG. 253.

est mise en communication avec la terre. Dans un parafoudre à cinq cylindres, la décharge doit franchir six intervalles d'air. Les baguettes de charbon servent de résistance ohmique pour limiter l'intensité du courant pendant la durée de la décharge et de l'arc qui en est la conséquence. Ce type de parafoudre peut être utilisé sur des lignes où la tension arrive jusqu'à 2000 ou 3000 volts ; il faut naturellement placer un parafoudre sur chacun des conducteurs. Lorsque la tension dépasse 2000 à 3000 volts, on installe plusieurs parafoudres

montés en série. Ces parafoudres ne peuvent être employés que dans les installations à courants alternatifs, le courant continu produisant facilement un arc permanent.

Le nouveau type de parafoudre Schuckert appartient à la même classe; il convient spécialement pour les très hautes tensions et il a été appliqué avec succès aux extrémités de la ligne de traction électrique du chemin de fer de Lecco à Colico. Ce parafoudre est constitué par un mince jet d'eau, fourni par la conduite principale d'alimentation des turbines; ce jet va frapper une lame de cuivre reliée métalliquement avec le conducteur de la ligne que l'on veut protéger. Il est à remarquer que ce jet d'eau ne peut se produire sous forme d'un cylindre liquide, mais se divise en une quantité de gouttes, ce qui fait qu'entre la lame de cuivre et l'orifice d'où vient l'eau, il y a un très grand nombre de petits intervalles d'air. Dans les conditions normales, par suite des petites gouttes d'eau qui entourent celles qui sont plus grosses, le jet d'eau constitue pour le courant une petite dérivation à la terre, mais la quantité d'énergie ainsi perdue est négligeable. Ce parafoudre fonctionne très bien même avec de l'eau qui n'est pas parfaitement limpide.

A la seconde catégorie de parafoudres appartient celui de Würts, formé de petits cylindres de métal anti-arc, et dans lequel on a également appliqué le principe des parafoudres de la première catégorie. Il se compose de sept petits cylindres d'un alliage de zinc et d'antimoine (*fig. 254*) dont la surface est rendue rugueuse et qui sont disposés verticalement; ces cylindres parallèles sont écartés l'un de l'autre de 0,5 mm environ et sont placés dans une boîte en porcelaine munie de fentes. Le premier de ces cylindres est relié à la ligne et le dernier est mis en communication avec la terre. Dans les con-

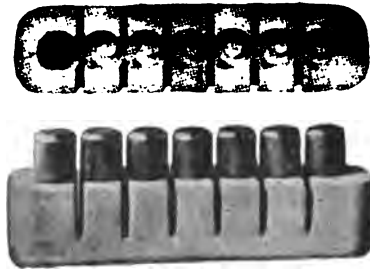


FIG. 254.

ditions normales, les six intervalles d'air sont facilement franchis par une décharge atmosphérique, mais le passage de la décharge donne lieu à la production de vapeurs d'oxydes de zinc et d'antimoine qui, étant mauvaises conductrices, empêchent le courant de ligne de se rendre à la terre et l'on évite ainsi la production d'un arc permanent, toujours parce que le courant est alternatif. Avec une installation à courant continu, ce parafoudre ne donne pas de bons résultats; c'est ainsi qu'avec un courant continu à 5 000 volts, on peut maintenir un arc permanent dans un parafoudre construit pour supporter une tension alternative de 20 000 volts efficaces.

La manière différente dont se comporte ce type de parafoudre avec le courant continu et avec le courant alternatif est probablement due à ce que, en admettant toujours que la distance qui sépare les cylindres soit très petite, les vapeurs d'oxydes métalliques qui se forment au moment où la décharge se produit sont condensées dans un très petit espace et, à cause de leur très grande résistance, elles permettent à un arc très court et tranquille de se former, si le courant est continu; au contraire, avec un courant alternatif, l'arc est promptement et facilement éteint, parce que le courant passe par une valeur nulle un très grand nombre de fois par seconde et, dans ces conditions, les vapeurs d'oxydes métalliques peuvent plus facilement s'opposer au passage du courant. Cela explique aussi pourquoi, lorsqu'on laisse entre les cylindres des intervalles plus grands, l'arc s'éteint difficilement à cause de la plus facile circulation de l'air qui réduit notablement l'action des vapeurs.

Les parafoudres Würts, comme ceux de la *General Electric Co.*, doivent être montés en série en nombre plus ou moins grand suivant la tension de l'installation.

Un autre type de parafoudre, fondé sur le même principe que celui de Würts, est constitué par une pile de disques de zinc séparés entre eux par des disques de mica de même diamètre. Le premier des disques de zinc est relié avec la ligne à protéger et le dernier est mis en communication avec la terre.

Le parafoudre Thury et celui d'Alioth appartiennent à la troisième classe, c'est-à-dire qu'ils servent à protéger les machines et les appareils des décharges atmosphériques; mais ils ne sont pas souvent utilisés, surtout parce qu'ils comportent un électro-aimant; or on a déjà vu que la communication à la terre devait présenter le moins d'inductance possible. En outre, ces parafoudres ont des organes mobiles qui nécessitent une surveillance attentive.

La quatrième classe de parafoudres comprend ceux dans lesquels l'arc est interrompu par action électromagnétique ou électrodynamique ou encore par soufflage magnétique.

Le parafoudre Thomson appartient à cette classe. Dans ce type d'appareil le courant de ligne traverse une bobine qui produit un champ magnétique. L'arc qui tend à se former entre deux segments en forme d'arc, à la suite d'une décharge atmosphérique, est brusquement repoussé par l'action du champ magnétique. Mais ce parafoudre ne fonctionne qu'avec du courant continu, le champ magnétique devant avoir une direction invariable pour qu'il puisse souffler l'arc.

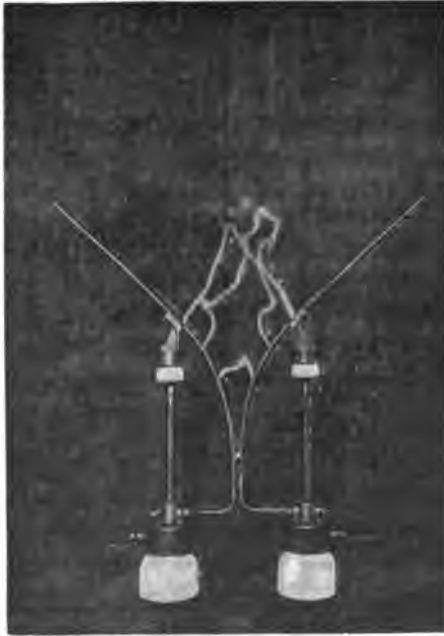


FIG. 255.

A cette classe appartient également le parafoudre à cornes de Siemens et Halske, appareil des plus simples et facile à réaliser pour les tensions les plus diverses. Il se compose de deux fils de cuivre (*fig. 255*)

fixés convenablement sur des isolateurs et recourbés de manière que la distance qui les sépare soit presque uniforme sur une certaine partie de leur longueur pour aller ensuite en augmentant de plus en plus comme on le voit sur la figure. La distance qui sépare les deux branches verticales se règle à volonté parce que leur partie inférieure horizontale est filetée et fixée dans la pièce que porte l'isolateur à l'aide d'un écrou et d'un contre-écrou. Une des branches est reliée au conducteur de ligne et l'autre à la terre.

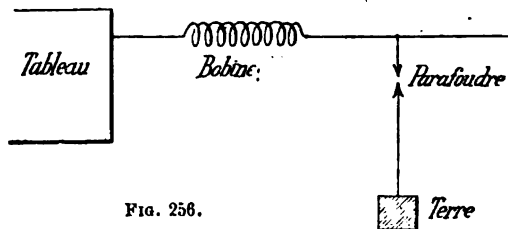


FIG. 256.

Lorsque le potentiel de la ligne s'élève par suite d'une décharge atmosphérique, l'intervalle d'air qui sépare les deux branches est facilement franchi par la décharge qui se rend à la terre; mais par ce chemin le courant de la ligne tend à former un arc. Il y a lieu à ce sujet de faire remarquer que, si le courant est alternatif, à tout instant, par suite d'une action électrodynamique, les deux courants verticaux, l'un montant, l'autre descendant, agissent sur le courant mobile de l'arc pour le faire monter entre les branches, parce que deux courants angulaires tendent à s'éloigner quand leur direction est opposée. L'arc est ainsi forcé de s'infléchir et de monter vers l'extrémité du parafoudre où l'écartement des branches est plus grand. Indépendamment de cette action, une autre cause plus énergique agit pour repousser l'arc vers le haut : c'est le courant d'air chaud ascendant produit par l'arc lui-même. Il arrive donc un moment où la longueur de l'arc est telle, par suite de l'écartement des branches, qu'il ne peut plus se maintenir et il s'interrompt.

La figure 255 montre les variations successives de l'arc; elle

a été obtenue en photographiant un parafoudre en fonctionnement et en interposant un disque mobile percé d'un trou près de sa périphérie.

Ce modèle de parafoudre peut être utilisé aussi bien avec le courant continu qu'avec le courant alternatif pour des tensions de 1 000 volts et au delà.

Après avoir ainsi décrit sommairement les divers types de parafoudres, il reste à donner quelques renseignements sur la manière de les installer et sur le nombre qu'il convient de placer sur une ligne donnée.

On a déjà dit que, pour protéger les appareils et les machines, il convenait toujours de placer une bobine d'induction en série sur les conducteurs de ligne avant leur arrivée au tableau de distribution. Le parafoudre est monté en dérivation sur le conducteur avant la bobine, ainsi que le montre la figure 256. C'est ainsi que l'on doit installer les parafoudres à chaque extrémité de la ligne et naturellement il faut en monter un sur chaque conducteur. Les parafoudres doivent être installés dans un local approprié, très bien aéré et facilement accessible pour que l'on puisse s'assurer fréquemment de leur état.

Certains électriciens sont d'avis qu'il est préférable de prolonger la ligne d'une dizaine de mètres au delà de la station et d'installer les parafoudres à l'extrémité de ce prolongement.

Le long de la ligne, lorsque c'est le cas, les parafoudres sont placés en dérivation sur les conducteurs et on les fixe directement sur les appuis:

Les canalisations souterraines doivent également être protégées par des parafoudres à leurs deux extrémités parce que, quoiqu'elles ne soient pas exposées aux coups de foudre, elles peuvent, comme on le verra, donner naissance à des surélévations de tension considérables.

La *Société Westinghouse*, qui, comme la *General Electric Co*, a établi aux États-Unis les installations les plus considérables au point de vue des très hautes tensions, a proposé, pour les installations à 25 000 volts et au delà, de placer avant les parafoudres une sorte d'excitateur *s* (*fig. 257*); un nombre con-

venable de parafoudres Würts sont ensuite montés en série. Afin de donner une plus grande efficacité à ce système, on peut shunter la moitié des parafoudres avec une résistance purement ohmique (poudre de charbon comprimée et renfermée

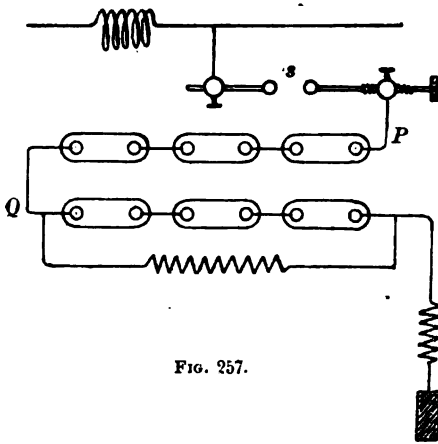


FIG. 257.

dans un tube de verre) et placer encore une autre résistance non inductive sur le trajet du fil de terre.

L'efficacité plus grande que présente ce dispositif par rapport à celui qui ne comporte pas de résistance est probablement due à ce que les deux séries de para-

foudres fonctionnent successivement l'une après l'autre.

En effet, le point Q est normalement au potentiel de la terre; lorsque le potentiel du point P s'élève, à la suite d'une décharge en s, une étincelle éclate dans les parafoudres compris entre P et Q et l'élévation du potentiel du point P est ainsi brusquement reportée sur le point Q. Alors la charge subite reçue en Q suit de préférence les intervalles d'air de la seconde série de parafoudres plutôt que le shunt et le courant de la ligne trouve ainsi une dérivation à la terre; mais, comme le courant de la ligne passe également par le shunt, il en résulte que l'intensité du courant qui passe dans la seconde série de parafoudres est affaiblie, l'arc ne peut se maintenir et il s'éteint. Les deux résistances ohmiques étant montées en série réduisent également la valeur de l'intensité du courant, de sorte que l'arc ne peut plus se maintenir dans la première série de parafoudres et il disparaît également en ces points.

Si les parafoudres sont convenablement proportionnés par rapport à la tension de l'installation, leur fonctionnement est excellent, d'autant plus qu'en réglant la distance explosive de

l'excitateur s'il est possible de rendre le système assez sensible pour qu'il fonctionne pour une assez faible augmentation de la tension normale sur les conducteurs de la ligne.

Il ne faut pas croire néanmoins qu'après avoir pris toutes les précautions pour protéger efficacement les machines et les appareils, ceux-ci soient toujours complètement à l'abri des détériorations résultant d'une décharge atmosphérique. Dans la plupart des cas, la protection sera complète, mais elle ne peut pas toujours l'être, car la foudre se manifeste dans des conditions si diverses et si capricieuses qu'il peut arriver qu'elle produise des effets bien différents de ceux que l'on a pu prévoir.

Il convient de ne pas oublier qu'une décharge atmosphérique est souvent une décharge oscillante et que le courant de décharge possède, comme une onde électrique, des nœuds et des ventres. Or, pour qu'un parafoudre fonctionne, il faut qu'il soit installé en un point correspondant à un ventre ou du moins en un point qui en soit très voisin. La position de ces ventres est absolument impossible à déterminer à l'avance, car elle dépend d'une foule de circonstances les plus diverses; c'est pour cela qu'il peut arriver, et le cas s'est déjà produit, que bien des fois un parafoudre ne fonctionne pas et qu'une dynamo ou un transformateur soit foudroyé. La décharge suit bien les deux chemins qui lui sont offerts, mais, comme paraissent l'indiquer les études théoriques, les machines et les transformateurs intercalés sur le circuit modifient l'allure de l'onde de manière à ce qu'il se produise toujours un ventre au point où ils se trouvent.

A l'appui de cette opinion on peut citer les deux faits suivants : le foudroiement d'une machine se produit le plus souvent, ainsi qu'on a pu le constater par de nombreuses observations, lorsque l'orage ne se manifeste pas dans l'endroit où l'on se trouve, la décharge étant due, dans ce cas, à des coups de foudre éclatant au loin ou lorsque la ligne se trouve établie dans des conditions spéciales. Ainsi, lorsque la ligne traverse des régions présentant des différences d'altitude notables, il se

produit des décharges même par temps clair avec un ciel sans nuages, principalement au moment du coucher du soleil, la ligne pouvant provoquer des décharges atmosphériques entre les couches d'air froides qui se trouvent au fond des vallées et qui ont un certain potentiel et les couches d'air supérieures, encore chauffées par les rayons du soleil et possédant une charge à potentiel différent. Ces décharges sont complètement silencieuses, mais ont une intensité suffisante pour produire des avaries assez graves dans les stations génératrices et dans la ligne.

Le second fait venant confirmer l'opinion émise est que le champ magnétique d'un alternateur paraît exercer une certaine influence sur la manière dont une machine peut être foudroyée, car on a constaté plusieurs fois que la décharge se produisait entre l'induit, lorsqu'il est fixe, et un ou plusieurs pôles de l'inducteur au lieu de passer par un des conducteurs de l'induit et la carcasse en franchissant un intervalle d'air beaucoup plus petit. C'est la constatation de ce fait qui a amené M. G. Gola, ingénieur¹, à constituer un parafoudre destiné à être monté en série sur les conducteurs, mais pourvu d'un dispositif de dérivation de la ligne à la terre. D'après l'inventeur, la présence de ce parafoudre ne troublerait nullement le régime normal du courant et constituerait, pour les décharges atmosphériques, une barrière infranchissable en les obligeant à suivre la dérivation pour se rendre à la terre. M. Gola dit que ce parafoudre a donné des résultats très satisfaisants dans les conditions les plus difficiles et qu'il a parfaitement protégé des installations où d'autres parafoudres n'avaient pas donné de bons résultats. Cela ne doit pas surprendre, parce que ce parafoudre, à cause de sa disposition particulière, produit une modification caractéristique dans la disposition des conducteurs de la ligne ; il est probable que sa présence agit sur l'onde pour qu'il se produise toujours un ventre au point où il est intercalé et, dans ces conditions, il fonctionne lors de chaque décharge.

1. *Atti dell' Associazione Elettrotecnica Italiana*, vol. VI, fasc. I.

En ce qui concerne le nombre de parafoudres à installer sur une ligne pour qu'elle soit protégée efficacement, il n'est pas possible de donner des indications précises, parce que le nombre des appareils à installer varie suivant les diverses conditions atmosphériques des régions traversées par la ligne. Si la ligne, sur tout son parcours, est en plaine, il suffit d'un petit nombre de parafoudres pour la protéger; bien entendu, indépendamment des parafoudres installés aux deux extrémités, qui sont toujours absolument nécessaires. Si, au contraire, la ligne traverse des cours d'eau, suit des vallées, franchit des collines, en un mot si son tracé est très accidenté, il faut multiplier les moyens de protection contre les décharges atmosphériques et des groupes de parafoudres, un par conducteur, doivent alors être installés au moins en chaque point où la ligne subit une modification, par exemple ceux où la ligne commence à monter sur une hauteur ou termine sa descente dans une vallée, ainsi que ceux où l'air ambiant a une température ordinairement plus basse, tels que gorges de montagne, traversées de cours d'eau, etc.

Quelles que soient les précautions que l'on prenne pour protéger une ligne, une machine peut toujours être atteinte par un coup de foudre, soit par suite des causes qui ont été déjà énumérées, soit par suite de la surélévation de tension qui précède le fonctionnement des parafoudres et qui peut atteindre la génératrice, augmentation de tension plus que suffisante pour causer de graves avaries. Aussi ne saurait-on trop recommander de n'employer que des alternateurs dont les enroulements soient constitués en vue de cette éventualité.

142. Systèmes de distribution. — Ce sujet est complètement traité dans tous les bons manuels consacrés à l'électrotechnique et il est parfaitement inutile de répéter ici les renseignements que l'on trouve dans ces ouvrages. On se bornera à exposer, dans ce qui suit, des principes généraux et certaines particularités relatives aux distributions par courants alternatifs.

La possibilité de rendre tous les appareils absolument indépendants et le fait que les transformateurs sont pratiquement autorégulateurs pour maintenir une tension constante, donnent au *système de distribution en dérivation* une suprématie incontestable. Dans ce système de distribution, tous les transformateurs sont montés en dérivation sur la canalisation principale et tous les appareils d'utilisation sont également placés en dérivation sur les circuits secondaires des transformateurs, ce qui n'empêche pas qu'un certain nombre de récepteurs puissent être montés en tension sur un circuit secondaire de transformateur. C'est ce qui se produit, par exemple, pour l'éclairage électrique public à arc ou à incandescence, parce que, pour un circuit donné, le nombre de lampes reste toujours le même et qu'il est plus économique, au point de vue des frais d'installation, de monter les lampes en tension. Toutefois, avec ce mode d'installation, il est nécessaire de prendre certaines précautions (§ 49) pour le cas où le nombre de lampes viendrait à varier par suite de dérangements, par exemple, dans une ou plusieurs des lampes installées.

Un point très important à calculer dans toute installation est le nombre de transformateurs nécessaires ainsi que la puissance qu'ils doivent avoir pour alimenter tous les appareils récepteurs d'une zone déterminée. Généralement, les moteurs de grande puissance sont alimentés par un transformateur spécial et la question à résoudre se borne à déterminer si, pour les lampes et les petits moteurs à alimenter dans la zone à desservir, il convient d'avoir une sous-station unique dans laquelle sont installés un certain nombre de petits transformateurs que l'on met successivement en charge suivant les besoins, ou d'installer un certain nombre de transformateurs, chacun d'eux desservant un petit groupe de consommateurs, ou, enfin, d'affecter un transformateur à chaque abonné.

On ne peut, à première vue, indiquer quelle est la solution qu'il convient d'adopter, parce qu'il faut tenir compte des circonstances particulières à chaque installation qui interviennent pour modifier la solution du problème : extension de la zone

à desservir, importance de la consommation de chaque abonné, coût de l'énergie électrique, nature de la canalisation (aérienne ou souterraine).

On va examiner successivement les diverses solutions qui viennent d'être indiquées, en supposant toujours qu'il s'agit d'alimenter des lampes et des petits moteurs et en faisant ressortir chaque fois les avantages et les inconvénients de la solution examinée, afin de pouvoir adopter, en connaissance de cause, celle qui paraît la plus convenable.

En n'installant qu'une sous-station unique pour la transformation du courant à haute tension de la ligne en courant à basse tension, le nombre et la puissance des transformateurs sont réduits au minimum. En effet, dans toute installation d'une certaine importance, le nombre de lampes et de petits moteurs qui se trouvent simultanément en fonction ne dépasse jamais 60 à 65 0/0 de la totalité des appareils installés. Il suffit donc, dans ces conditions, que le ou les transformateurs aient une puissance suffisante pour alimenter ce nombre d'appareils; mais il convient aussi de ne pas oublier que, la charge subissant de très grandes variations aux différentes heures de la journée, il est possible de surcharger le ou les transformateurs pendant le petit nombre d'heures où la charge est maximum.

Lorsqu'il y a plusieurs sous-stations pour alimenter les diverses zones et que la nature et les variations de charge sont presque identiques pour chacune d'elles, en réglant convenablement la tension à la station génératrice, il est possible de maintenir une tension presque constante dans le réseau secondaire de distribution.

Tels sont les avantages que présente l'installation de sous-stations uniques pour chaque zone à desservir. Il faut aussi remarquer que, dans ce cas, les transformateurs ont leur rendement maximum, parce qu'il est alors possible d'utiliser un ou plusieurs transformateurs de grande puissance dont le rendement est toujours plus élevé et que, d'autre part, les pertes sont réduites au minimum, puisque le nombre de trans-

formateurs est également réduit au minimum. Ce mode de procéder n'empêche pas, du reste, d'utiliser un transformateur de faible puissance aux heures de la journée où la charge est la plus petite.

En installant plusieurs transformateurs dans les sous-stations pour pouvoir faire varier le nombre de ces appareils mis en service d'après les variations de charge, il est indispensable, au moins à certaines heures, de surveiller l'installation. En effet, lorsqu'on met en service un transformateur en reliant son primaire au réseau à haute tension, l'opération ne peut se faire qu'à la condition que le circuit secondaire soit ouvert, parce que, au moment où s'établit la communication entre le primaire et la ligne, la tension aux bornes du secondaire peut atteindre une valeur très élevée, deux à trois fois la tension normale, et les lampes alimentées seraient brûlées si le circuit secondaire était fermé. Ce phénomène est trop complexe pour être discuté ici, mais il convient de signaler que le cas le plus défavorable est celui où, au moment de la mise en circuit du primaire, la tension atteint sa valeur maximum. Le régime de la tension aux bornes du secondaire est atteint très vite, après 10 à 15 périodes au plus. C'est ce qui explique la nécessité de surveiller l'installation lorsque les transformateurs doivent être mis successivement en charge suivant les besoins. Toutefois, il est plus économique de laisser hors circuit plusieurs transformateurs lorsqu'ils deviennent inutiles par suite de la diminution de la charge, car cette économie compense largement les frais de surveillance.

Lorsque l'installation ne comporte qu'une seule sous-station pour alimenter une zone déterminée, l'importance de la ligne à haute tension est réduite au minimum, tandis que le réseau de distribution à basse tension prend une importance très grande. La quantité de cuivre à employer pour établir ce dernier atteint son maximum et l'on ne peut, *a priori*, déterminer d'une façon définitive l'influence exercée par le développement de ce réseau de distribution sur les frais de premier

établissement de toute l'installation ainsi que sur les dépenses d'exploitation, la canalisation pouvant être établie aussi bien avec des conducteurs aériens qu'avec des conducteurs souterrains; toutefois, une canalisation souterraine est toujours plus coûteuse qu'une canalisation aérienne.

Lorsque chaque consommateur est desservi par un transformateur spécial, ce qui est le cas limite opposé au précédent, l'importance du réseau secondaire est alors réduite au minimum, mais celle du réseau primaire augmente proportionnellement. La quantité de cuivre à employer dans les canalisations est, par suite, la plus faible possible. Mais, par contre, le nombre de transformateurs à installer est très grand et leur puissance ne peut plus être réduite à 60 0/0 de la puissance des lampes ou petits moteurs installés, car chaque consommateur doit être desservi par un transformateur de puissance suffisante pour alimenter toute son installation. Dans ces conditions, l'installation est constituée par un très grand nombre de transformateurs, généralement de faible puissance, et, par suite, ayant un faible rendement et consommant une quantité relativement élevée de courant magnétisant. Comme ces transformateurs restent constamment en circuit, on comprend que le facteur de puissance de toute l'installation doit être toujours faible et que le rendement des machines de la station génératrice soit extraordinairement abaissé. Ce système de distribution n'est donc pas à recommander, à cause des dépenses de premier établissement et des dépenses d'entretien plus considérables qu'il entraîne, aussi n'est-il guère plus employé actuellement.

Le système consistant à installer de petits centres de distribution, munis chacun d'un transformateur pouvant alimenter un certain nombre d'abonnés, constitue une solution intermédiaire excellente dans la plupart des cas et principalement lorsque le réseau de distribution est établi avec des câbles souterrains comme dans la plupart des villes d'une certaine importance. Toutefois, on ne peut prévoir à l'avance le développement que pourra prendre l'installation et, par suite, on

ne peut calculer exactement le réseau secondaire de distribution. Lorsqu'il devient nécessaire de modifier ce dernier, l'opération est des plus faciles si la canalisation est aérienne, mais elle est difficile et très coûteuse si elle est souterraine.

Ce système de distribution présente, il est vrai, l'inconvénient de laisser continuellement en circuit le primaire des transformateurs, mais il n'exige pas de grandes dépenses de premier établissement, car l'installation du réseau de distribution peut être développée peu à peu, à mesure des besoins, et l'on peut aussi remplacer un transformateur dont la puissance est devenue insuffisante par un autre plus puissant, en utili-

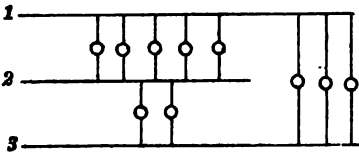


Fig. 258.

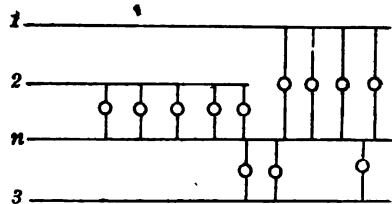


Fig. 259.

sant dans un autre centre de distribution celui que l'on a remplacé.

La régulation de la tension avec ce mode de distribution s'effectue moins bien qu'avec le précédent; mais, en établissant un point central ou centre de distribution, d'où rayonnent les dérivations reliant la ligne primaire aux divers transformateurs et en maintenant constante la tension en ce point, les variations de tension qui peuvent affecter les lampes oscillent entre 2 et 3 0/0 et sont, par conséquent, très acceptables. Il convient d'ajouter que ces limites de variation de tension dépendent aussi du type de transformateur choisi, car, si la dispersion est notable (§ 80), la chute de tension peut l'être également.

Lorsque l'installation est à courants triphasés, on peut se demander si la distribution doit être établie avec trois conducteurs seulement, en montant les lampes en triangle (*fig. 258*), ou avec quatre conducteurs (*fig. 259*), en reliant les lampes, d'une

part, à un fil neutre et, d'autre part, à l'un des trois conducteurs aboutissant aux divers enroulements secondaires de transformateurs montés en étoile, le centre de l'étoile des transformateurs étant relié aux lampes par l'intermédiaire du fil neutre, afin d'assurer leur indépendance.

La régulation s'effectue un peu mieux avec le montage en étoile qu'avec le montage en triangle; mais, en pratique, on peut dire qu'à ce point de vue les deux systèmes sont équivalents, surtout si les transformateurs sont du type triphasé, parce qu'alors il se produit, dans certaines limites, une compensation entre les tensions, lorsque les charges ne sont pas réparties uniformément (Voir § 80). Toutefois, avec le montage en étoile, on peut réaliser une économie notable du poids de cuivre nécessaire pour constituer la canalisation.

En effet, avec trois conducteurs (montage en triangle), la différence de potentiel entre deux conducteurs quelconques doit être la même que celle qu'exigent les lampes pour leur fonctionnement; soit, par exemple, 100 volts. Avec le système à quatre conducteurs (montage en étoile), la différence de potentiel entre un des conducteurs et le fil neutre doit être également de 100 volts, mais la tension entre deux des conducteurs du système triphasé est égale à

$$100 \sqrt{3} = 173 \text{ volts.}$$

Donc, la distribution s'effectue sous une tension de 73 0/0 supérieure à celle que l'on obtient avec le montage en triangle; l'intensité du courant dans la ligne est réduite dans le rapport

$$\frac{1}{\sqrt{3}} = 0,58$$

et il s'ensuit qu'à égalité de pertes dans la canalisation, le poids de cuivre des conducteurs est fortement diminué, quoiqu'il y ait un quatrième conducteur. Comme ce quatrième conducteur ne donne passage qu'aux courants provenant des différences de charge entre les trois phases, l'intensité de ces

courants est, en réalité, peu considérable lorsque l'installation a été bien étudiée et l'on peut utiliser un fil de section assez faible.

Un calcul très simple permet de constater que si, pour alimenter un groupe de récepteurs, sous une tension déterminée, avec un courant alternatif simple, il faut pour les conducteurs un poids de cuivre égal à 100, avec des courants triphasés et le montage en triangle avec trois conducteurs, le poids de cuivre nécessaire pour transmettre la même quantité d'énergie, les pertes en ligne étant les mêmes, n'est plus que de 72,9; enfin, avec 4 conducteurs et le montage en étoile, toutes choses égales d'ailleurs, le poids de cuivre nécessaire est respectivement de 33,3 et de 29,17 suivant que le fil neutre a une section égale à celle des autres conducteurs ou une section moitié plus petite.

On conçoit que les avantages que présente ce dernier système ne sont pas négligeables, mais il convient de signaler que ces avantages peuvent parfois être illusoire. Un quatrième fil entraîne pour sa pose des dépenses plus considérables que lorsqu'il n'y a que trois fils et, du fait que la tension est aussi plus grande, il y a encore une augmentation de dépenses pour obtenir un bon isolement. C'est pourquoi, ce système est très souvent adopté pour les distributions avec canalisation aérienne, mais beaucoup plus rarement lorsqu'il s'agit de canalisations souterraines.

Pour terminer ce qui a trait aux systèmes de distribution, il faut faire remarquer que l'installation de moteurs sur un réseau d'éclairage exige des précautions spéciales afin d'éviter de notables variations de tension au moment du démarrage ou de l'arrêt des moteurs, surtout lorsque ces moteurs sont alimentés par les mêmes transformateurs que les lampes.

Un moyen efficace d'éviter cet inconvénient consiste à utiliser un rhéostat de démarrage dont la manœuvre exige un certain temps, par exemple en le commandant par l'intermédiaire d'une vis sans fin; de même, au moment de l'arrêt du moteur, on manœuvre le rhéostat de la même manière avant de couper

le circuit. Ce dispositif ne peut pas toujours être employé, par exemple pour les moteurs qui commandent les ascenseurs, car il entraîne des complications qu'il faut, dans ce cas, éviter absolument.

Lorsqu'on veut établir un réseau de distribution d'éclairage absolument à l'abri de toutes variations de tension, il est indispensable d'alimenter les moteurs par une canalisation distincte.

143. Modèles de câbles pour courants alternatifs. —

Les câbles utilisés pour les installations à courants alternatifs sont à un ou plusieurs conducteurs; dans ce dernier cas, les conducteurs sont concentriques ou câblés.

Lorsque les câbles sont à un seul conducteur, il en faut au moins deux pour transmettre un courant et l'on peut réduire les phénomènes d'inductance en les plaçant aussi près que possible l'un de l'autre. Si les câbles sont armés, c'est-à-dire entourés de rubans d'acier, les phénomènes d'inductance peuvent alors être assez considérables, parce que la grande perméabilité du fer rend la densité des lignes de force beaucoup plus grande dans l'espace compris entre les axes des deux conducteurs.

Pratiquement, on arrive à annuler les phénomènes d'inductance en disposant concentriquement les deux conducteurs dans un même câble, parce que, dans ces conditions, les flux développés par les courants alternatifs sont égaux et de directions opposées dans tout l'espace qui entoure les conducteurs. Mais la capacité électrostatique de ces câbles est loin d'être négligeable et peut donner lieu à des phénomènes de résonance (§ 45).

Les câbles à deux conducteurs câblés autour d'une âme en matière isolante ne sont pas entièrement dépourvus d'inductance, mais ont la propriété de réduire considérablement la capacité, parce que les conducteurs, se trouvant ainsi en regard l'un de l'autre, ne s'y trouvent seulement que suivant deux génératrices. Ces câbles sont d'un prix moins élevé que les câbles concentriques et la différence de prix est encore plus considérable lorsqu'il s'agit de câbles pour courants triphasés.

La soudure des conducteurs dans les boîtes de jonction ou de dérivation est beaucoup plus facile avec ce type de câbles, aussi sont-ils généralement employés aujourd'hui.

Dans les grandes distributions d'énergie électrique à courants alternatifs comportant des câbles concentriques souterrains ayant plusieurs dizaines de kilomètres de développement, comme à Londres et à Francfort-sur-le-Mein, on a constaté, à plusieurs reprises, que des câbles avaient été foudroyés. Ces accidents sont causés par des surélévations subites de tension dues à des phénomènes de résonance : l'isolant du câble compris entre le conducteur extérieur et l'armature métallique est percé par une étincelle disruptive et, par suite, une certaine longueur de conducteur est mise hors de service.

L'expérience a prouvé que, quelle que soit la valeur de la résistance d'isolement du conducteur extérieur par rapport à la terre, la différence de potentiel entre ce conducteur et la terre est sensiblement nulle. Des deux conducteurs d'un câble concentrique, seul le conducteur central a donc un potentiel élevé par rapport à la terre. On a profité de cette particularité, dans les installations de distribution faites avec des câbles concentriques, pour relier tous les instruments de mesure (ampèremètres, wattmètres, compteurs) au conducteur extérieur. On a aussi utilisé cette propriété pour prendre sur ce conducteur les contacts nécessaires pour effectuer, pendant que la ligne est en charge, les mesures de résistance d'isolement de l'ensemble de l'installation, alternateurs et transformateurs compris.

On pourrait aussi mettre à profit cette propriété pour donner à l'isolant extérieur une épaisseur plus faible, si la différence de potentiel entre le conducteur extérieur et l'enveloppe en plomb du câble, presque nulle dans les conditions normales, ne devenait parfois très considérable lorsque des phénomènes de résonance viennent à se produire; c'est pourquoi ce conducteur extérieur doit être toujours parfaitement isolé.

Ces surélévations de tension peuvent également se produire lorsque, en un point du conducteur central qui aboutit au pri-

maire du transformateur, il se forme une perle à la terre et que, malgré la fusion des coupe-circuit de sûreté, le transformateur reste sous tension, son secondaire étant en communication avec les secondaires des autres transformateurs, dont les primaires sont alimentés par d'autres câbles que celui sur lequel s'est produit le dérangement. Ce cas se présente rarement, surtout si le réseau est très développé.

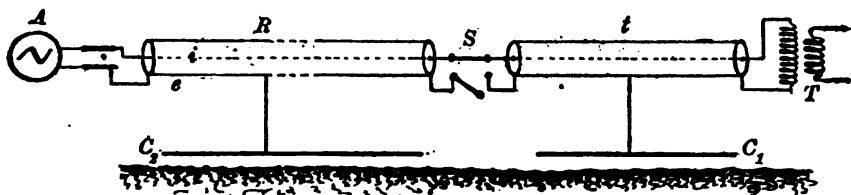


FIG. 260.

Plus fréquemment peuvent se produire des phénomènes de résonance par suite de la rupture, voulue ou accidentelle, du conducteur extérieur d'un câble concentrique relié à la borne d'un transformateur, lorsque, au moment où se produit l'interruption, il y a une longueur considérable de câble entre le point de rupture et la borne du transformateur. Soient par exemple un câble principal à haute tension, *R* (*fig.* 260), et une longueur de câble, *t*, amenant le courant à un transformateur *T*. En *S* se trouve une boîte de jonction pourvue d'un interrupteur ou, plus simplement, de coupe-circuit fusibles. L'armature des câbles, en contact avec la terre, constitue avec le conducteur extérieur *e* un condensateur dont la capacité augmente avec la longueur des câbles. Soient C_2 la capacité (§ 42) de la ligne principale *R* et C_1 celle du câble de dérivation *t*.

Si on suppose maintenant qu'il se produise en *S* une interruption du conducteur extérieur, le courant, partant de l'alternateur, arrive au primaire du transformateur par le conducteur central *i*, traverse l'enroulement du circuit primaire et revient par le conducteur extérieur du câble *t*; mais, par suite de l'interruption existant en *S*, le courant, pour arriver dans le

câble R, est obligé de passer par le condensateur C_1 , la terre et le condensateur C_2 pour retrouver le conducteur extérieur de R. Dans ces conditions, les deux capacités sont en série avec le transformateur et avec la génératrice et comme ceux-ci, le transformateur principalement, présentent une self-induction considérable, l'on se trouve dans les conditions signalées dans le paragraphe 42 qui, comme on l'a vu, peuvent donner lieu à une considérable surélévation de la tension. L'isolement du condensateur C_1 , dont la capacité est relativement faible par rapport à celle du condensateur C_2 , peut alors être fortement compromis, parce que, pour charger le condensateur avec une quantité déterminée d'électricité q , la différence de potentiel U entre les deux armatures devra être d'autant plus grande que la capacité C est plus petite :

$$q = CU \text{ (Voir § 42).}$$

Il est probable que, dans ces conditions, l'isolant interposé entre le conducteur extérieur et la terre soit rompu et que le câble t soit, comme on dit, *foudroyé*.

On peut éviter la production d'un pareil accident en ne plaçant aucun interrupteur ou coupe-circuit fusible sur le conducteur extérieur, en ayant soin de couper d'abord le circuit du conducteur central. Pour la même raison, lorsqu'on veut relier une certaine longueur de câble pour établir une dérivation, il faut toujours relier d'abord le conducteur extérieur. Toutefois, on ne peut éviter qu'il se manifeste des phénomènes de résonance s'il se produit une perte accidentelle à la terre sur le conducteur central, comme on l'a déjà dit.

144. Interrupteurs et fusibles de sûreté pour installations à haute tension. — Dans toute installation électrique, on place un tableau de distribution entre les génératrices et la ligne et souvent aussi entre cette dernière et le réseau de distribution, ces tableaux portant les divers appareils de marche, de régulation et de contrôle, ainsi que les instruments de mesure.

L'importance de cet organe accessoire de toute installation augmente évidemment avec l'importance de l'installation elle-même. L'installation de ces tableaux doit être faite avec des soins minutieux et être l'objet de précautions spéciales, parce que, avec l'emploi de très hautes tensions, certains accidents, qui présentent peu d'importance dans une installation à basse tension, peuvent prendre une importance considérable, donner lieu à de graves accidents et parfois même causer aussi une destruction partielle du tableau.

La construction des tableaux de distribution a été l'objet, de la part de certaines maisons, d'études très consciencieuses; leur installation a reçu en ces dernières années de grands perfectionnements. Il aurait fallu consacrer ici un chapitre spécial à cet important sujet, mais une description, pour si bien faite qu'elle fût, ne pourrait donner tous les détails nécessaires que le lecteur peut trouver dans toutes les revues d'électricité où se trouvent décrites les installations les plus récentes. C'est pour cela que, dans ce paragraphe, il ne sera question que des interrupteurs et des coupe-circuit de sûreté en ce qui concerne les conditions qu'ils doivent remplir pour être utilisés dans une installation à haute tension.

Les coupe-circuit de sûreté servent à interrompre un circuit lorsque l'intensité du courant prend des valeurs anormales. Les interrupteurs permettent de couper un circuit lorsque cela est nécessaire, même lorsque ce dernier se trouve à pleine charge. Lorsque l'intensité du courant est très grande et principalement lorsque la tension est très élevée, l'étincelle de rupture qui se produit au moment de l'interruption peut donner lieu à la formation d'un arc permanent. La longueur et la grosseur de cet arc dépendent de la tension, de l'intensité efficace du courant, de sa fréquence, de la nature des métaux entre lesquels l'arc s'établit, les vapeurs métalliques qui se produisent pouvant être bonnes conductrices, comme c'est le cas pour le cuivre, ou mauvaises conductrices, comme c'est le cas pour le zinc; la longueur et la grosseur de cet arc dépendent aussi de la position dans laquelle il s'est formé, un arc hori-

zontal se maintenant plus difficilement qu'un arc vertical à cause du courant d'air chaud ascendant qui se produit et qui tend à l'interrompre.

Pour donner une idée de la longueur des arcs qui peuvent se produire à la rupture d'un circuit, il suffit de dire qu'avec une tension de 3 000 volts et un courant de 150 ampères d'intensité, l'arc permanent a 1 mètre de longueur; un courant de 80 ampères sous 7 000 volts donne naissance à un arc de 1,60 m de longueur; enfin, un courant d'intensité modérée sous 20 000 volts produit sans difficulté un arc de 2 mètres de longueur.

Ces arcs sont très mobiles et se déplacent sous l'effet du moindre courant d'air; c'est pourquoi ils détruisent tout ce qui se trouve autour d'eux et, ce qui est beaucoup plus grave, ils peuvent provoquer la formation de nouveaux arcs s'ils viennent à rencontrer d'autres conducteurs sous tension. Dans ces conditions, il n'est pas étonnant qu'un seul arc, produit par la fusion d'un coupe-circuit, ait causé la destruction complète d'un tableau de distribution.

En règle générale, il faut avant tout n'utiliser que des matériaux incombustibles, marbre et fer, dans la construction des tableaux et avoir soin d'installer les interrupteurs et les fusibles de sûreté aussi loin que possible des rhéostats, instruments de mesure, etc. C'est pour cela que, dans les grandes installations, les interrupteurs sont placés dans un local convenable, assez spacieux, où on peut facilement les surveiller et les éloigner les uns des autres; on les manœuvre à distance, à partir du tableau, à l'aide d'une transmission à levier ou à air comprimé ou encore à l'aide de moteurs électriques; dans ce dernier cas, il est nécessaire que les interrupteurs soient pourvus de ressorts très énergiques afin d'obtenir une interruption très brusque. Dans tous les cas, les interrupteurs doivent être disposés de manière que l'arc se forme horizontalement plutôt que verticalement. Pour éviter la formation d'arcs dangereux, on peut produire l'interruption simultanément en plusieurs points ou bien encore produire l'interrup-

tion dans l'huile, qui a de grandes propriétés isolantes et qui, par suite, empêche l'arc de se maintenir, parce que l'interruption une fois produite, les deux points qui se trouvaient primitivement en contact sont alors séparés l'un de l'autre par une distance supérieure à celle qui, dans l'huile, correspond à la distance explosive.

En utilisant les interrupteurs à huile, on peut, sans aucun danger, couper un circuit en charge; tout ce qui peut arriver, c'est que l'huile soit violemment projetée. Pour couper un circuit qui n'est pas en charge, un interrupteur ordinaire proportionné à la tension est largement suffisant; on peut aussi, dans ce cas, utiliser un simple coupe-circuit.

L'emploi de l'huile présente non seulement l'avantage d'empêcher la formation d'arcs dangereux, mais aussi celui de réduire l'importance des surélévations de tension (§ 140) qui peuvent se produire lorsqu'on emploie des appareils où l'interruption s'effectue dans l'air, fait qui s'explique par la plus grande durée de l'arc. Dans l'huile, l'arc correspondant à chaque conducteur est brusquement rompu dès que les deux pièces en contact se trouvent à très faible distance l'une de l'autre et, dans ces conditions, les génératrices sont complètement isolées de la ligne. Au contraire, avec les interrupteurs ordinaires, l'arc subsiste pendant un temps plus ou moins long et pendant sa durée les génératrices restent reliées à la ligne à travers l'arc; c'est pourquoi l'inductance de la ligne s'augmente de celle des génératrices et, par suite, l'énergie électromagnétique se transforme en énergie électrostatique, à cause des perturbations qu'entraîne le fonctionnement d'un interrupteur lorsqu'il est parcouru par un courant d'une certaine intensité. Lorsque les lignes de transmission ont une grande longueur, que la tension est très élevée et que la puissance transmise est considérable, l'emploi des interrupteurs à huile est indispensable.

Il y a lieu de remarquer qu'en voulant brusquement supprimer la tension sur une ligne, on peut mettre en court circuit simultanément le circuit d'excitation de toutes les

génératrices; on court ainsi le risque de produire l'emballement de toutes les machines, comme si l'on interrompait brusquement le courant avec l'interrupteur général de ligne.

Dans les installations qui comportent des transformateurs élévateurs de tension, installés dans l'usine génératrice, on emploie souvent un seul transformateur pour chaque alternateur et alors tous les interrupteurs, les coupe-circuit et les instruments de mesure sont installés sur le circuit à basse tension; dans ce cas, sur le circuit à haute tension du transformateur, directement relié à la ligne, on intercale seulement deux coupe-circuit ou deux interrupteurs ordinaires. Lorsqu'on veut retirer le transformateur du circuit, on ouvre d'abord le circuit à basse tension et puis celui à haute tension; puisque ce dernier reçoit encore de la ligne le courant magnétisant, une interruption brusque pourrait donner lieu à une surélévation de tension considérable à cause de l'inductance très élevée de l'enroulement; la manœuvre doit donc s'effectuer lentement afin que l'arc qui se forme alors constitue en quelque sorte une résistance.

Les coupe-circuit sont des interrupteurs automatiques ou des coupe-circuit fusibles; quelquefois aussi on utilise des interrupteurs du type dit *à temps*.

Les interrupteurs automatiques sont de véritables interrupteurs qui doivent être construits de manière à empêcher la formation d'arcs permanents. Généralement l'interruption se produit en deux points: dans le premier, la rupture se produit entre des contacts à large surface pour que la totalité du courant puisse passer dans des conditions normales sans échauffement sensible; dans le second point, se produit l'interruption définitive entre deux blocs de charbon que l'on peut facilement remplacer. Ce dispositif est également utilisé dans la construction des interrupteurs principaux.

Les coupe-circuit fusibles sont de modèles très variés, chaque constructeur ayant un type spécial. Pour les très hautes tensions, le fil fusible est généralement un fil d'argent immergé dans l'huile. Ces coupe-circuit sont munis de poi-

gnées en matière isolante afin qu'on puisse les enlever ou les mettre en place, même lorsque le circuit est en charge. Quelquefois, par suite de dispositions spéciales à l'installation, la fusion d'un coupe-circuit donnant lieu à la production d'un arc permanent et de grande longueur, il pourrait se produire des dégâts ; dans ces conditions les coupe-circuit doivent être placés dans des compartiments ménagés dans un mur et ouverts sur le devant. Les coupe-circuit sont installés sur une seule rangée. Dans ces conditions, si un arc vient à se produire, il ne peut causer de dégâts dans l'installation.

Afin d'éviter que les coupe-circuit automatiques fonctionnent lorsque l'intensité du courant dépasse momentanément sa valeur maximum, on a construit des coupe-circuit à temps dans lesquels l'interruption ne se produit que dans le cas où l'augmentation anormale de l'intensité a une certaine durée, quelques secondes par exemple, alors que cette augmentation anormale n'est pas due à une cause momentanée, mais bien persistante. On a réalisé plusieurs types d'appareils de ce genre, mais leur description ne saurait trouver place ici.

En terminant, il convient de faire remarquer que les perfectionnements apportés jusqu'à présent à l'installation et à la construction des tableaux de distribution à haute tension sont le résultat d'études entreprises à la suite des nombreuses imperfections et des inconvénients que présentaient et que présentent encore les anciennes installations réalisées. Comme on le voit, les progrès accomplis chaque jour contribuent d'une façon très efficace à permettre de transmettre à des distances de plus en plus grandes des quantités considérables d'énergie électrique, énergie dont les applications deviennent chaque jour plus nombreuses.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION

	Pages.
1. Fonction d'un générateur d'énergie électrique	1
2. Courant électrique	3
3. Établissement d'une transmission d'énergie	4
4. Mouvement alternatif	7
5. Transformation d'énergie mécanique en énergie électrique	9
6. Courant alternatif	10
7. Effets chimiques produits par le courant alternatif	11
8. Effets thermiques produits par le courant alternatif	13
9. Effets lumineux produits par le courant alternatif.	14
10. Effets électromagnétiques produits par le courant alternatif	16
11. Applications du courant alternatif.	18
12. Phénomènes stroboscopiques	16

CHAPITRE PREMIER

PHÉNOMÈNES PÉRIODIQUES ET MANIÈRE DE LES REPRÉSENTER

13. Phénomènes périodiques et mouvement harmonique.	21
14. Variation instantanée de la vitesse d'un mobile animé d'un mouvement harmonique	24
15. Phase d'un phénomène périodique	26
16. Autre manière de représenter un phénomène périodique	27

CHAPITRE II

PHÉNOMÈNES D'INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

17. Phénomènes d'induction électromagnétique et principe des alternateurs	30
18. La loi de Lenz et son interprétation.	37
19. Sens des courants induits	41
20. Courants de Foucault	42
21. Phénomènes d'induction dans les conducteurs protégés par une masse de fer et courants de Foucault qui s'y produisent	44

CHAPITRE III

PHÉNOMÈNES D'INDUCTION MUTUELLE ET DE SELF-INDUCTION

	Pages.
22. Induction mutuelle et self-induction.	46
23. Energie dépensée et récupérée par les phénomènes d'induction.	54
24. Hystérésis	57

CHAPITRE IV

COURANT ALTERNATIF ET IMPÉDANCE D'UN CIRCUIT

25. Valeur de la force électromotrice nécessaire pour qu'un courant se produise dans un circuit.	59
26. Influence de la self-induction sur un circuit parcouru par un courant alternatif.	63
27. Résistance apparente ou impédance.	64
28. Analogie mécanique.	64
29. Autre mode de représentation graphique	67
30. Résumé	69

CHAPITRE V

VALEURS PARTICULIÈRES DES QUANTITÉS ÉLECTRIQUES PÉRIODIQUES
INSTRUMENTS DE MESURE

31. Valeurs efficaces des quantités électriques alternatives.	70
32. Effets thermiques d'un courant alternatif.	72
33. Effets électrodynamiques d'un courant alternatif.	73
34. Valeur efficace d'une force électromotrice alternative.	74
35. Valeurs moyennes des quantités électriques alternatives.	75
36. Ampèremètres et voltmètres pour courant alternatif.	75
37. Puissance d'un courant alternatif	80
38. Composantes du courant.	85
39. Mesure de la puissance d'un courant alternatif. Wattmètre.	88

CHAPITRE VI

FORME DES COURBES REPRÉSENTATIVES DES QUANTITÉS ALTERNATIVES

40. Forme des courbes représentatives des quantités alternatives.	92
41. Courbes des phénomènes harmoniques simples	94

CHAPITRE VII

EFFETS PRODUITS PAR UN CONDENSATEUR INTERCALÉ DANS UN CIRCUIT
PARCOURU PAR UN COURANT ALTERNATIF

42. Action d'un condensateur intercalé dans un circuit parcouru par un courant alternatif.	97
43. Analogie avec les phénomènes hydrauliques et mécaniques	99
44. Représentation graphique du phénomène.	101

TABLE DES MATIÈRES

469

	Pages.
45. Circuit comprenant une capacité et ayant de la self-induction.	104
46. Capacité et self-induction en dérivation sur le circuit.	107
47. Condensateurs industriels.	110

CHAPITRE VIII

BOBINES DE RÉACTANCE

48. Circuit comportant du fer	114
49. Emploi de la bobine de réactance.	118
50. Construction des bobines de réactance.	120

CHAPITRE IX

COURANTS POLYPHASÉS

51. Systèmes de courants alternatifs.	123
52. Système triphasé.	126
53. Montage en étoile	128
54. Montage en triangle.	130
55. Intensité et différence de potentiel dans un système triphasé monté en étoile	132
56. Intensité et différence de potentiel dans un système triphasé monté en triangle	133
57. Choix du mode de montage.	134
58. Système triphasé non équilibré	136
59. Mesure de l'énergie électrique fournie ou utilisée.	139

CHAPITRE X

CHAMPS MAGNÉTIQUES PRODUITS PAR LES COURANTS ALTERNATIFS

60. Phénomènes produits par un flux alternatif.	143
61. Combinaison de flux magnétiques alternatifs. Champs tournants	148
62. Champs tournants utilisés industriellement.	153

CHAPITRE XI

ALTERNATEURS

63. Généralités sur les alternateurs	156
64. Divers types d'alternateurs.	158
65. Classification des alternateurs.	159
66. Pôles et épanouissements polaires des alternateurs	166
67. Effets produits par la réaction d'induit.	166
68. Forme des noyaux polaires.	168
69. Epanouissements polaires.	169
70. Induits des alternateurs.	172
71. Enroulement de l'induit.	178
72. Réaction d'induit dans les alternateurs.	188
73. Régulation de la tension d'un alternateur.	193
74. Applications des alternateurs triphasés.	196
75. Rendement des alternateurs.	197

CHAPITRE XII

TRANSFORMATEURS

	Pages.
76. Principe des transformateurs statiques à courant alternatif	199
77. Rapport de transformation.	203
78. Analogie mécanique.	204
79. Autorégulation du transformateur.	205
80. Types industriels de transformateurs statiques.	214
81. Transformateurs pour hautes tensions.	225
82. Chute de tension dans les transformateurs.	228
83. Choix des transformateurs.	229
84. Refroidissement des transformateurs	232
85. Rendement des transformateurs	236
86. Applications des transformateurs.	237

CHAPITRE XIII

MOTEURS SYNCHRONES

87. Principe des moteurs synchrones.	247
88. Moteur synchrone à courant alternatif simple.	247
89. Moteur synchrone à courants polyphasés.	251
90. Excitation des moteurs synchrones	252
91. Types industriels de moteurs synchrones.	254
92. Démarrage des moteurs synchrones.	255
93. Indicateurs de synchronisme	258
94. Influence de l'excitation. Emploi des moteurs synchrones.	262
95. Mouvements oscillants dans un moteur synchrone. Emploi de circuits amortisseurs	270
96. Rendement des moteurs synchrones et choix du type à employer	274

CHAPITRE XIV

MOTEURS ASYNCHRONES POLYPHASÉS

97. Principe fondamental des moteurs à champ tournant.	276
98. Moteurs polyphasés à champ tournant ou de Ferraris	283
99. Insertion de résistances dans le rotor	287
100. Constitution des moteurs polyphasés à champ tournant	289
101. Stator.	291
102. Rotor.	295
103. Démarrage des moteurs à champ tournant	301
104. Vitesse angulaire des moteurs à champ tournant.	306
105. Facteur de puissance et rendement des moteurs polyphasés à champ tournant	310

CHAPITRE XV

MOTEURS ASYNCHRONES A COURANT ALTERNATIF SIMPLE

106. Moteurs asynchrones à collecteur.	314
107. Moteurs asynchrones d'induction à courant alternatif simple.	316

	Pages.
108. Construction des moteurs à courant alternatif simple.	319
109. Dispositions particulières pour le démarrage des moteurs d'induction à courant alternatif simple	320
110. Régulation de la vitesse dans un moteur à courant alternatif simple . .	326
111. Facteur de puissance et rendement des moteurs à courant alternatif simple.	327

CHAPITRE XVI

TRANSFORMATEURS TOURNANTS

112. Transformateurs tournants et convertisseurs	331
113. Réaction d'induit dans un convertisseur	335
114. Construction des convertisseurs. Limite de leurs applications	337
115. Rapport de transformation	340
116. Régulation de la tension dans un convertisseur.	345
117. Démarrage des convertisseurs.	349
118. Oscillations produites dans les convertisseurs	351
119. Rendement des convertisseurs.	354
120. Du choix à faire entre un convertisseur et un moteur-générateur . . .	356
121. Variateur de courant Sacerdote	358

CHAPITRE XVII

COUPLAGE DES ALTERNATEURS

122. Coefficient de régularité des moteurs commandant les alternateurs. . .	360
123. Coefficient d'uniformité des moteurs et écart angulaire	363
124. Couplage en série et couplage en parallèle de deux alternateurs. . . .	365
125. Opération du couplage.	371
126. Régulation de la vitesse angulaire	372
127. Synchronisation	376
128. Répartition de la charge	384
129. Couplage de plusieurs alternateurs	387
130. Mise hors circuit d'un alternateur.	388
131. Emploi de circuits amortisseurs	388

CHAPITRE XVIII

MESURE DU RENDEMENT INDUSTRIEL

132. Du rendement et de sa détermination	390
--	-----

CHAPITRE XIX

LIGNES DE TRANSMISSION. — SYSTÈMES DE DISTRIBUTION

133. Transmission de l'énergie	395
134. Choix de la tension à adopter dans une transmission d'énergie. — Limites atteintes pratiquement.	397

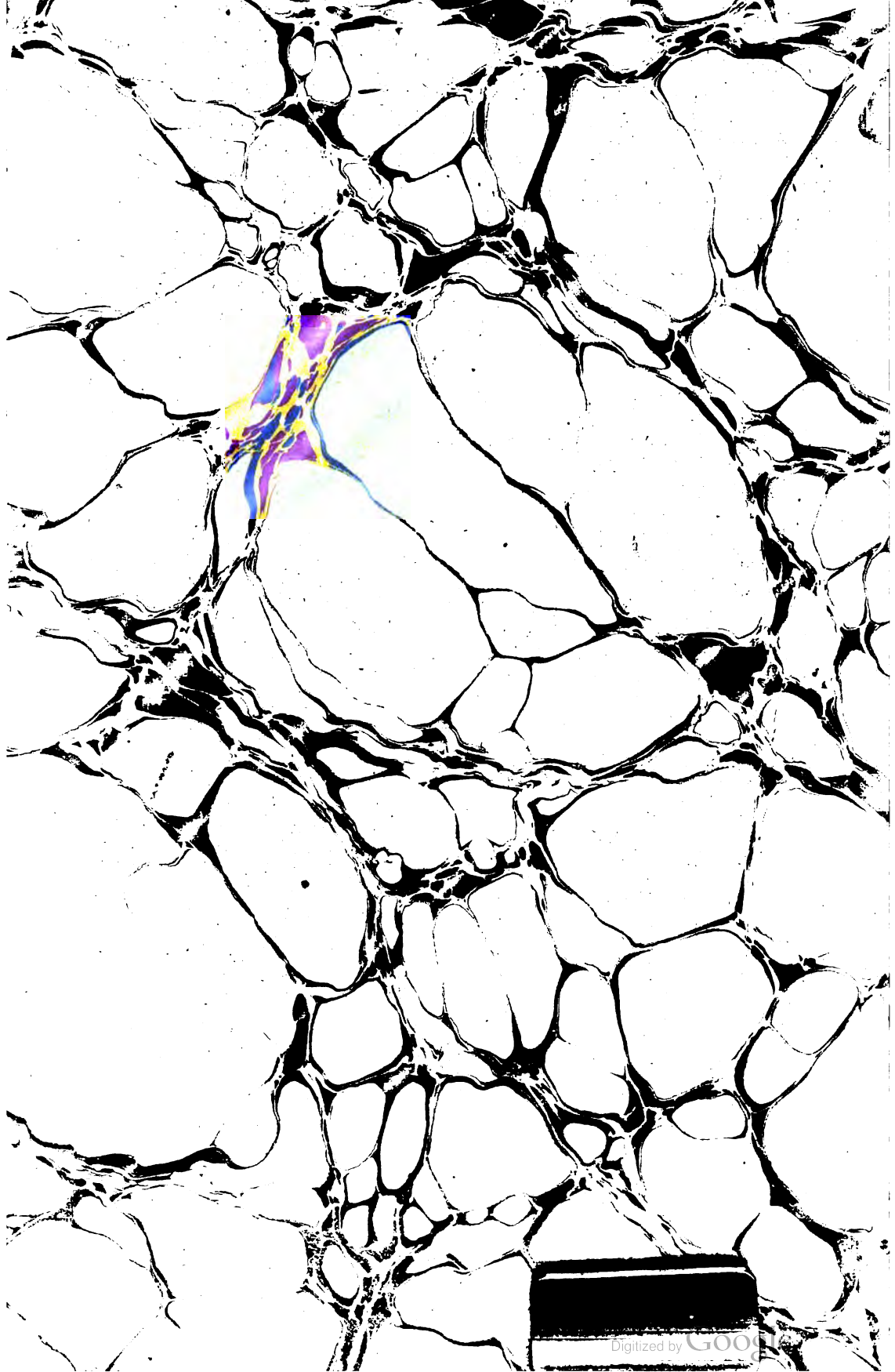
	Pages.
135. Choix de la fréquence	402
136. Conducteurs utilisés pour l'établissement des lignes de transmission d'énergie.	403
137. Nature des appuis	406
138. Isolateurs	410
139. Effets dus à l'inductance et à la capacité des lignes	416
140. Surélévation de tension dans les installations à courant alternatif	429
141. Protection des lignes contre les décharges atmosphériques.	433
142. Systèmes de distribution.	449
143. Modèles de câbles pour courants alternatifs	457
144. Interrupteurs et fusibles de sûreté pour installations à haute tension.	460

[Handwritten scribble]

89089713739



B89089713739A





b89089713739a