

COURANTS
POLYPHASÉS
ET
ALTERNO-MOTEURS

COURANTS POLYPHASÉS

ET

ALTERNO-MOTEURS

PAR

SILVANUS P. THOMPSON

Directeur du Collège technique de Finsbury, à Londres.

TRADUCTION

PAR

E. BOISTEL

Ingénieur-Expert près le Tribunal de la Seine.

PARIS

LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE, BAUDRY ET C^{ie}, ÉDITEURS

15, RUE DES SAINTS-PÈRES, 15

MAISON A LIÈGE, 21, RUE DE LA RÉGENCE

1896

Tous droits réservés,

PRÉFACE

Il fut un temps, encore peu éloigné de nous, où, à la suite de mémorables expériences, on ne croyait qu'aux courants continus pour le transport électrique de l'énergie à grande distance. Parodiant un mot célèbre, quelqu'un a même écrit, si nous ne nous trompons : « Le transport électrique de l'énergie se fera par courants continus, ou il ne se fera pas ». Pour nous, alternatiste de la veille, adepte convaincu des courants alternatifs, nous nous souvenons d'avoir alors, dans l'intimité, souvent rompu des lances en leur faveur, sans autre guide, nous l'avouons, que ce sentiment intuitif : la nature nous présentant sous cette forme l'énergie électrique dans les machines dynamos, les courants alternatifs doivent être immédiatement utilisables, sans qu'il soit besoin de passer par l'intermédiaire compliqué, délicat et restrictif du commutateur. Nous étions loin de nous douter à cette époque de toute l'importance qu'ils prendraient et de la solution pratique, à peu près exclusive quant à présent, qu'ils donneraient au grand problème posé. Ils

n'avaient pas encore, il est vrai, revêtu le caractère polyphasé auquel ils doivent leur récent essor et nul ne pensait avoir sous la main dans l'alternateur Gramme l'instrument inconscient de cette renaissance. Sans doute le dernier mot n'est pas dit, s'il doit l'être jamais; sans doute les appareils que nous possédons aujourd'hui, si perfectionnés qu'ils soient, ou, pour mieux dire, les systèmes polyphasés eux-mêmes ne sont pas encore la perfection qui en ferait la panacée universelle; mais ils sont arrivés à un point où il n'est plus permis d'en ignorer le principe et le mode de fonctionnement, dans l'intérêt même des progrès à venir. C'est ce qui nous a décidé à publier cette traduction qui, malgré les antériorités, a sa place bien marquée parmi nos livres d'étude.

Les ouvrages ne manquent cependant pas sur ce sujet. Il a été, dans ces dernières années, beaucoup écrit sur les courants alternatifs en général et les courants polyphasés en particulier. Nous n'en voulons pour preuve que l'Appendice bibliographique qui termine ce volume et qui n'en constitue pas un des moindres intérêts. Mais ces savants et remarquables travaux sur ce point autrement ardu et compliqué que l'étude des courants continus sont d'un accès difficile pour la plupart des lecteurs désireux de se tenir au courant des nouveautés, et, après s'en être péniblement pénétré, on n'en arrive souvent qu'au grand point d'interrogation « et après ? ».

N'en déplaise à certains amateurs de science pure dont nous apprécions tout le mérite et envions les jouissances élevées, l'*x* ne suffit pas, et, si l'Auteur de cet ouvrage est tout aussi à même que personne de manier l'intégrale, sa caractéristique est plutôt de concrétiser les abstractions.

mathématiques sous une forme tangible, physique, et de les mettre en valeur pratique.

Y a-t-il là, au point de vue scientifique, une infériorité relative? Nous ne le voyons pas; et, bien que nous n'ayons à défendre ici qui que ce soit, encore moins à faire le procès de quiconque, nous estimons au contraire qu'en pareille matière et pour une œuvre de ce genre il faut être deux fois fort : une fois pour soi et une fois pour les autres. C'est là une des causes de la préférence que nous avons vouée aux ouvrages du professeur S. P. Thompson.

Au lecteur d'apprécier si elle est justifiée.

E. B.



TABLE DES MATIÈRES

PRÉFACE	v
-------------------	---

CHAPITRE PREMIER

GÉNÉRATEURS POLYPHASÉS	1
----------------------------------	---

Observations préliminaires	1
Courants alternatifs	2
Générateurs polyphasés	19
Alternateurs polyphasés modernes	30
Brown-Oerlikon (Lauffen-Francfort)	30
Oerlikon	38
Westinghouse	38
Stanley	39
Brush-Mordey	39
Brown, Boveri et C ^{ie}	39
du Niagara	44
de Strasbourg	47
Générateurs asynchrones	47

CHAPITRE II

COMBINAISONS POLYPHASÉES	48
------------------------------------	----

Combinaison des forces électromotrices	52
Combinaison des courants	56
Groupement des lampes dans un système polyphasé	58
Economie de cuivre	61
Systèmes à haute tension	62
Systèmes à basse tension	65
Combinaison des champs magnétiques	66

*

CHAPITRE III

PROPRIÉTÉS DES CHAMPS MAGNÉTIQUES TOURNANTS 78

Rotations d'Arago. 78
 Expériences sur un champ magnétique tournant 86
 Illustrations mécaniques d'une transmission polyphasée. 93

CHAPITRE IV

GENÈSE DES MOTEURS A CHAMP TOURNANT 93

Premier moteur d'induction 93
 Recherches de Marcel Deprez 98
 — de Ferraris. 99
 Moteur Borel 102
 Premiers moteurs de la C^{ie} Hélios 103
 Moteurs Bradley 103
 Recherches de Tesla 104
 Moteurs Haselwander 112
 — Wilson 114
 — Wenström 114
 Recherches de Von Dolivo Dobrowolski 115
 Installations polyphasées à l'Exposition de Francfort 116
 Lahmeyer et C^{ie}. 117
 Schuckert et C^{ie}. 117
 Siemens et Halske. 118
 Allgemeine Gesellschaft et Oerlikon. 118
 Transport de Lauffen à Francfort 119

CHAPITRE V

STRUCTURE DES MOTEURS POLYPHASÉS 123

Organe mobile et fixe. 127
 Structure de l'organe mobile 132
 Enroulement — 139
 Structure et enroulement de l'organe fixe 145
 Progression du champ. 147
 Induction. 151

CHAPITRE VI

THÉORIE ÉLÉMENTAIRE DES MOTEURS POLYPHASÉS 152

Puissance et rendement 152
 Flux magnétique résultant dans un moteur 156

TABLE DES MATIÈRES		xi
Conditions de fonctionnement		158
Couple au démarrage		159
Relation entre le couple et le glissement		160
 CHAPITRE VII 		
THÉORIE ANALYTIQUE DES MOTEURS POLYPHASÉS		166
 CHAPITRE VIII 		
MOTEURS A COURANTS ALTERNATIFS SIMPLES		174
Théorie de l'alternomoteur simple		180
 CHAPITRE IX 		
MOTEURS DIVERS A COURANTS ALTERNATIFS		193
Moteurs synchrones polyphasés		193
Moteur Elihu Thomson		195
— Ferranti-Wright		196
— Shallenberger		197
— Atkinson		197
— Stanley-Kelly		197
— Duncan		198
— Mordey		199
— Ganz		199
— Langdon-Davies		199
 CHAPITRE X 		
TRANSFORMATEURS POLYPHASÉS		200
Transformation de phases		204
— de courants alternatifs simples en di- ou triphasés		206
— de courants continus en polyphasés ou inversement		207
Auto-transformateur		210
Bobines de réaction polyphasées		211
 CHAPITRE XI 		
MESURE DE LA PUISSANCE DES COURANTS POLYPHASÉS		212
Mesure de la puissance triphasée		213
 CHAPITRE XII 		
NOTES SUR L'ÉTUDE DE CONSTRUCTION DES MOTEURS POLYPHASÉS		215
 CHAPITRE XIII 		
QUALITÉS MÉCANIQUES DES MOTEURS POLYPHASÉS		223
Démarrage des moteurs polyphasés		223
— à courants alternatifs simples		226

Constance de la vitesse angulaire	229
Rendement	229

CHAPITRE XIV

TYPES DE MOTEURS POLYPHASÉS MODERNES 238

Moteurs d'Oerlikon	238
— Brown, Boveri et C ^{ie}	239
— de l'Allgemeine Gesellschaft	244
— de la C ^{ie} Westinghouse.	245

CHAPITRE XV

DISTRIBUTION DES COURANTS POLYPHASÉS PAR STATIONS CENTRALES 246

Heilbronn.	246
Chemnitz	248
Strasbourg	249
Bockenheim	249
Buda-Pesth	251
Pittsfield	251
Installations d'Oerlikon.	251
— privées	251
Système monocyclique.	251

APPENDICE

BIBLIOGRAPHIE RELATIVE AUX COURANTS POLYPHASÉS ET AUX MOTEURS A CHAMP TOURNANT	257
---	-----

INDEX ALPHABÉTIQUE	277
------------------------------	-----

COURANTS POLYPHASÉS

ET

ALTERNO-MOTEURS

CHAPITRE PREMIER

GÉNÉRATEURS POLYPHASÉS

OBSERVATIONS PRÉLIMINAIRES

En l'état actuel des applications de l'énergie électrique les courants polyphasés méritent une attention toute particulière. Il ne paraît pas douteux en effet que, dans la question de transport électrique de la puissance, les courants alternatifs combinés en systèmes à deux ou trois phases distinctes soient appelés à jouer dans l'avenir un rôle très important. Il en existe déjà un certain nombre d'exemples, et des installations considérables basées sur leur emploi sont aujourd'hui en cours d'exécution. Les avantages incontestables que présentent les systèmes polyphasés sur les autres, à courant continu ou à courants alternatifs simples, au point de vue spécial du transport de l'énergie, sont hors de pair; mais il reste à examiner dans quelle mesure les complications inévitables qui en résultent sont, en pratique, suffisantes pour faire écarter la distribution polyphasée des applications à l'éclairage électrique en général.

La nouveauté relative de ce mode de distribution et le fait
THOMPSON. — Courants polyphasés. 1

que la majeure partie de ce qui a été accompli jusqu'ici a été réalisé à l'étranger justifient pleinement son étude approfondie de la part des ingénieurs anglais aussi bien que français.

Avant d'aborder ce sujet nous en indiquerons les principales subdivisions : — Générateurs de courants polyphasés ; Propriétés du champ magnétique tournant, avec quelques notions historiques sur son origine et son développement ; Théorie, Construction, Mode de fonctionnement et Qualités des Moteurs polyphasés ; Théorie et Construction des Moteurs alimentés par courants alternatifs simples ou ordinaires ; enfin Étude sommaire des Transformateurs polyphasés et de la Mesure de la Puissance dans les systèmes polyphasés.

COURANTS ALTERNATIFS

Nous supposons dès le début le lecteur déjà familiarisé avec les principes fondamentaux des courants alternatifs et les

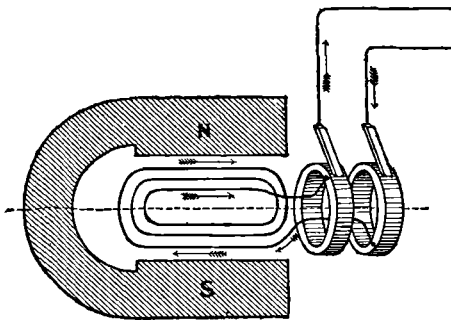


Fig. 1. — Simple générateur de courants alternatifs ordinaires.

caractères généraux¹ des alternateurs ou générateurs de courants alternatifs.

Nous résumerons néanmoins, comme entrée en matière, les points les plus importants dans l'application de ces courants.

En découvrant l'induction de courants dans des fils par suite de leur mouvement à travers un champ magnétique, de manière à leur faire couper ou embrasser le flux qui le constitue, Faraday a ouvert la voie à la construction de machines magnéto-électriques destinées à produire des courants électriques sous

¹ Voir, pour plus amples détails, le grand *Traité des machines dynamo-électriques*, de l'Auteur, traduction française, Baudry et C^{ie}, éditeurs, 1894.

l'action d'une puissance mécanique. Si l'on dispose, en effet, entre les pôles d'un aimant, comme dans la figure 1, une bobine de forme convenable, enroulée de fils parallèlement à son axe longitudinal, on y développera, en la faisant tourner sur cet axe, des courants qui, à chaque demi-révolution, disparaîtront pour se renverser ensuite. La figure suppose la bobine tournant de telle sorte que la partie supérieure en vienne vers l'observateur. Dans ce cas, les flèches indiquent le sens des courants induits fournis au circuit extérieur par l'entremise de deux bagues de contact ou collecteurs, respectivement reliées aux deux extrémités du fil de la bobine. Dans la position représentée, le courant partira de la bague de gauche et reviendra du circuit extérieur par celle de droite ; mais, quand la bobine aura fait un demi-tour, il partira de la bague droite pour rentrer par la gauche. Cette figure 1 n'est, en réalité, qu'une forme primitive d'alternateur, engendrant un simple courant périodiquement renversé ou alternatif ; c'est l'ancien « inducteur » de Siemens, à courants alternatifs encore employé aujourd'hui comme appel dans les installations téléphoniques. Le fonctionnement en courants alternatifs consiste dans de rapides renversements du courant qui augmente et diminue en une série de pulsations ; les courants électriques se succèdent dans un sens puis dans l'autre à travers la ligne et dans tout le circuit avec une grande rapidité — vingt ou cent fois par seconde — sous l'action d'une force électromotrice qui se renverse elle-même rapidement.

Les propriétés de ces courants alternatifs sont, comme on sait, quelque peu différentes de celles des courants continus. Ils sont affectés non seulement par la résistance du circuit, mais aussi par son inertie magnétique ou self-induction (en d'autres termes, par le champ magnétique qu'ils développent eux-mêmes dans leur voisinage immédiat) ; et cette self-induction (l'*inductance* du circuit, suivant l'expression anglaise) a pour effet d'amoinrir les courants alternatifs en diminuant leur amplitude, retardant leur phase et adoucissant leurs ondulations.

Dans la figure 1, l'induit mobile n'est qu'une simple bobine,

et l'aimant un simple fer à cheval bipolaire ; mais, pour des raisons qui seront développées ultérieurement, dans la majorité des cas les alternateurs sont multipolaires. La figure 2 en

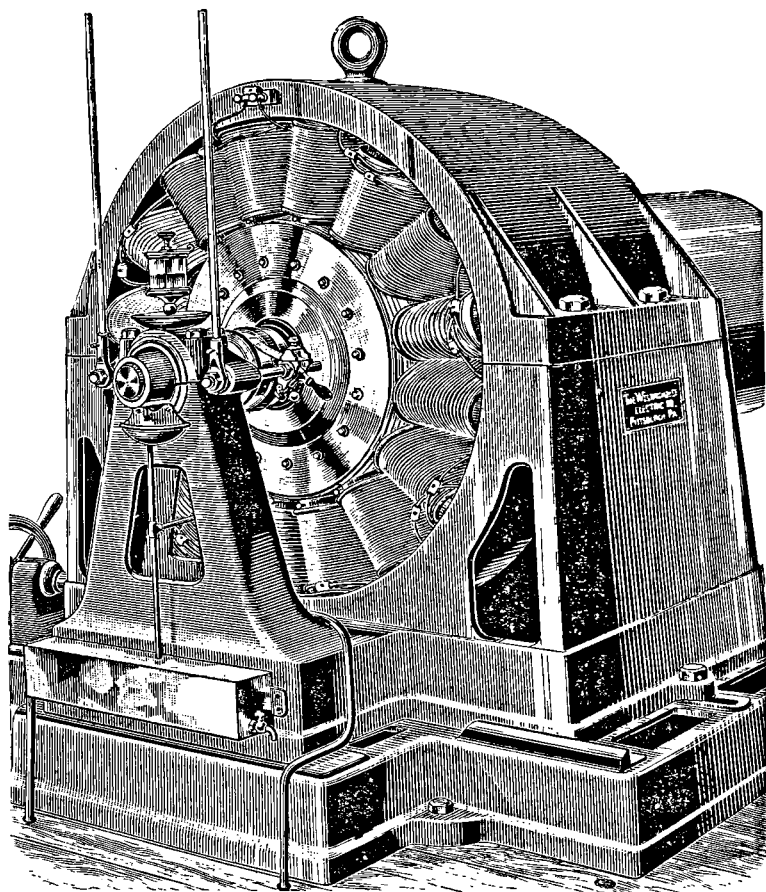


Fig. 2. — Alternateur simple de la Compagnie Westinghouse.

représente une forme assez répandue introduite par la Compagnie Westinghouse et qui rappelle celle de Lontin ; son système inducteur multipolaire est constitué par un certain nombre de pôles radiaux convergeant vers l'intérieur, tandis que les bobines mobiles sont montées à la périphérie d'un tambour ou cylindre composé de disques de fer formant noyau.

Pour étudier les combinaisons de fils qui y entrent, un instant d'attention sur les sens des courants dont ils sont le siège est indispensable.

Considérons tout d'abord la figure 3 qui donne un diagramme partiel d'une machine à quatre pôles mise sur plat. Le noyau, qui recevra tout à l'heure son enroulement, est placé entre quatre pôles de polarités alternées. Si l'on suppose une tige de cuivre ab parallèle à l'axe et qui représente l'un des fils de l'induit se mouvant dextrorsum dans l'entrefer en regard d'un pôle S, elle coupera le flux qui pénètre ce pôle. Conformément à la règle donnée ci-après, elle sera le siège d'une force électromotrice ascendante. Dans un autre conducteur cd passant devant un pôle N, il sera induit une force électromotrice descendante. Si l'on cherchait à dessiner de même vingt conducteurs, ou davantage, avec leurs

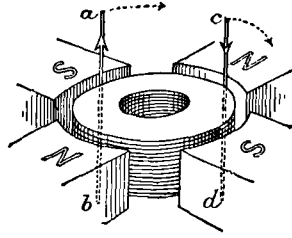


Fig. 3. — Schéma d'un champ magnétique à quatre pôles.

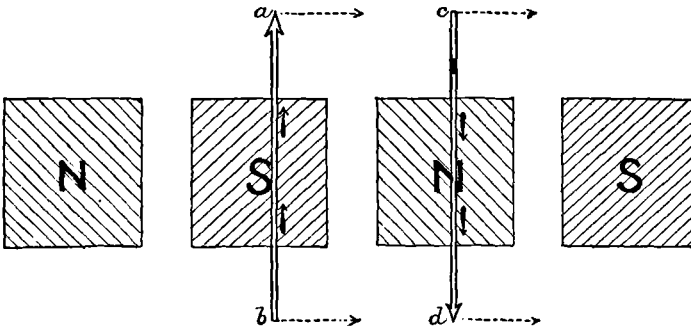


Fig. 4. — Développement d'un inducteur à quatre pôles.

connexions respectives, le dessin serait absolument confus et inintelligible. Mais, qu'on se transporte mentalement au centre du système et l'on aura autour de soi le panorama des quatre pôles qu'on pourra se représenter développés à plat, comme dans la figure 4.

On remarquera que dans cette figure les faces des pôles N

et S sont hachées obliquement et d'une façon différente. 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 papier repercée d'une fente étroite, et qu'on la déplace vers la droite suivant les flèches en pointillé, la fente, en passant devant les lignes obliques, donnera l'illusion d'un mouvement dans le sens où le courant tend réellement à s'écouler. — Il est d'ailleurs facile de se rappeler le sens de l'inclinaison des hachures : celles tracées sur une face polaire nord sont inclinées parallèlement à la barre oblique de la lettre N.

Mais une machine réelle comporte un grand nombre de conducteurs d'induit symétriquement espacés sur sa périphérie et qui doivent être reliés par des fils ou pièces de connexion. Dans l'enroulement en anneau, le fil de connexion passe à l'intérieur du noyau annulaire et constitue un *enroulement hélicoïdal*. Si l'on passe de là aux cas où l'enroulement est complètement extérieur au noyau, comme dans les induits en tambour et en disque, on reconnaît qu'il y a deux manières distinctes de procéder, que l'on peut respectivement dénommer *enroulement imbriqué* et *enroulement ondulé*. Voici comment s'établit cette distinction : comme les conducteurs qui passent devant un pôle nord deviennent le siège de forces électromotrices dans un sens, et ceux passant devant un pôle sud, le siège de forces électromotrices de sens contraire, il est évident qu'un conducteur faisant partie de l'un de ces groupes devra être relié à un conducteur situé dans une position à peu près correspondante dans l'autre groupe, de telle sorte que le courant puisse descendre dans l'un et monter dans l'autre, conformément aux sens des forces électromotrices. Ainsi, après avoir fait passer le conducteur en descendant devant une face polaire nord, on peut le relier à un autre passant en montant devant une face polaire sud, et l'on peut mener l'enroulement soit en le faisant revenir en arrière (imbrication), soit en le poursuivant en avant, sous forme de zigzag (ondulation).

Cette distinction entre l'enroulement imbriqué et l'enroule-

ment ondulé, en ce qui concerne les machines à courants alternatifs, résulte de l'examen des figure 5 et 6. La figure 5 représente un alternateur à 8 pôles à enroulement imbriqué, dans lequel chaque « élément » ou jeu complet de spires s'étend sur une largeur égale à celle du « pas » ou distance, de centre à centre, de deux pôles adjacents. Il n'y est indiqué que 24 conducteurs, et l'on remarquera que les spires successives sont alternativement dextrorsum et sinistrorsum. On voit dans la figure 6 le même alternateur à bobinage ondulé.

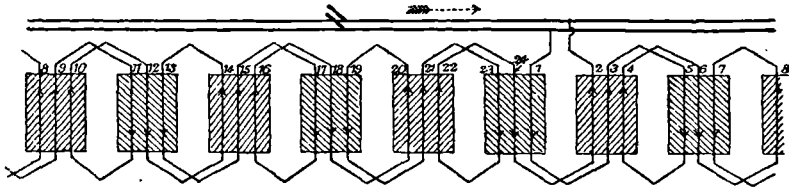


Fig. 5. — Machine à courants alternatifs : bobinage imbriqué.

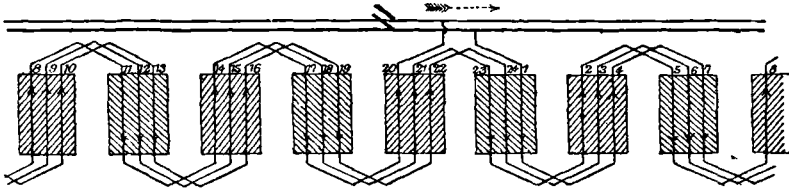


Fig. 6. — Machine à courants alternatifs : bobinage ondulé.

La force électromotrice des deux machines sera identique. Le choix entre les deux modes de connexion des fils est uniquement une question de commodité et de coût de construction. Dans les cas où c'est l'induit qui est mobile, le commencement et la fin de l'enroulement sont reliés à deux bagues collectrices représentées dans les développements ci-dessus par deux lignes parallèles.

Revenant à la simple bobine mobile de la figure 1, on a vu plus haut comment cette bobine, en coupant le flux magnétique, devient le siège de forces électromotrices périodiques qui changent de sens à chaque demi-révolution et donnent naissance à des courants alternatifs. A chaque tour correspond une

force électromotrice qui s'élève jusqu'à un maximum pour décroître ensuite, disparaître et être immédiatement suivie par une force électromotrice inverse qui atteint de même un maximum, décroît également et disparaît à son tour. Ce processus ondulatoire est indiqué dans la figure 7. Les ordonnées de la courbe

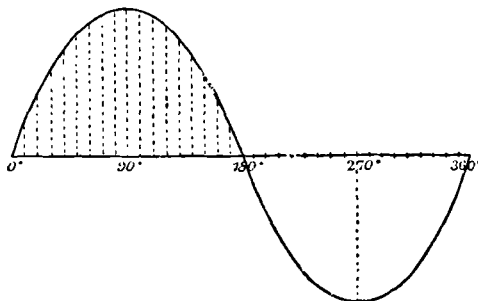


Fig. 7. — Courbe de force électromotrice induite dans un alternateur simple ou ordinaire.

au-dessus de l'axe horizontal représentent les valeurs instantanées de la force électromotrice dans un sens, et celles au-dessous, dans la seconde moitié de la courbe, les valeurs inverses qui succèdent aux précédentes. L'ensemble de chacune de ces séries complètes de valeurs a reçu le nom de *période*, et le nombre de périodes n correspondant à un temps t , celui de *fréquence* ou *périodicité* ; la fréquence $\frac{n}{t} = \frac{1}{T}$ s'exprime ordinairement en *périodes par seconde* ; le temps T s'appelle *temps périodique* ou simplement *période*.

Avec les machines bipolaires $\frac{n}{t}$ est égal au nombre de tours accomplis dans le même temps ; mais, avec les machines multipolaires, ce quotient est plus grand : il augmente proportionnellement au nombre de paires de pôles. Ainsi, dans un champ inducteur à 8 pôles, qui comporte 4 pôles nord et 4 pôles sud autour de l'axe, une révolution complète donnera lieu à 4 périodes complètes par seconde, ou 8 *alternativités*, l'*alternativité* étant égale à une *demi-période*. Si la machine fait 15 tours par seconde (ou 900 tours par minute), elle fournira 60 périodes

par seconde ; autrement dit, sa fréquence sera de 60 périodes par seconde.

Le mouvement dans un champ magnétique uniforme donne lieu à un développement de forces électromotrices proportionnelles, à chaque instant, au sinus de l'angle dont a tourné la bobine à partir de sa position transversale au champ magnétique. Si l'on désigne par Φ le flux qui la pénètre dans cette position, et par N le nombre des spires de la bobine qui embrassent le flux, on peut démontrer que la valeur instantanée, ou à un instant quelconque t , de la force électromotrice dans la bobine ayant tourné d'un angle $\theta = 2\pi \frac{t}{T}$ est

$$e = \frac{2\pi}{T} N\Phi \sin \frac{2\pi t}{T},$$

ou, si l'on désigne par ω le facteur $\frac{2\pi}{T}$,

$e = \omega N\Phi \sin \omega t$, en unités C. G. S., ou $e = \omega N\Phi \sin \omega t \cdot 10^{-8}$, en volts ;

ou encore, si l'on pose

$$\omega N\Phi = E_{\max}, \quad \text{ou} \quad \omega N\Phi \cdot 10^{-8} = E_{\max},$$

$$e = E_{\max} \sin \omega t.$$

Dans les machines réelles, les champs magnétiques ne sont pas uniformes et les bobines ne sont pas de simples spires, de sorte que l'accroissement et la décroissance des forces électromotrices ne suivent pas nécessairement la loi sinusoïdale simple. La forme de leurs ondulations dépend de la conformation des faces polaires, ainsi que de la forme et de la largeur des bobines ; mais, dans la plupart des cas, on est suffisamment autorisé à admettre que la force électromotrice obéit à cette loi, de sorte que sa valeur à un instant quelconque peut revêtir la forme ci-dessus, E_{\max} étant la valeur maxima atteinte par e ou son *amplitude*, et $\omega t = \theta$ un angle de *phase* ou une fraction de période par rapport à un cercle imaginaire de référence. — Considérons, par exemple, un point P se mouvant dans le sens de rotation des aiguilles d'une montre le long d'une circonférence de cercle

(fig. 8). Si l'on prend pour unité le rayon de ce cercle, PM sera le sinus de l'angle θ mesuré à partir de 0° . Supposons maintenant le cercle divisé en un nombre quelconque d'angles égaux, traçons pour chacun d'eux les sinus correspondants et reportons tous ces sinus à des distances égales prises le long de l'axe horizontal, comme dans la figure 8 ; nous obtiendrons la sinusoïde en question.

Dans cette figure 8 une révolution complète du point P sur

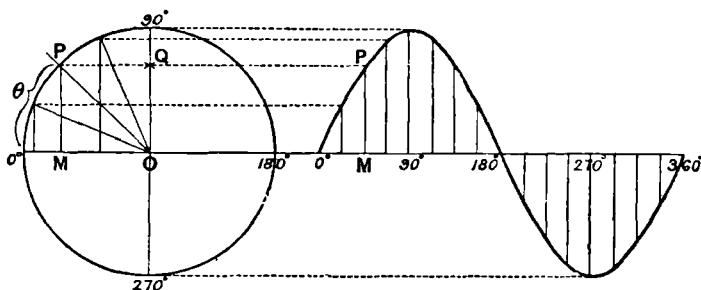


Fig. 8. — Tracé d'une sinusoïde.

la circonférence de référence correspond à une période complète ou cycle de variation complet. On peut, à un instant

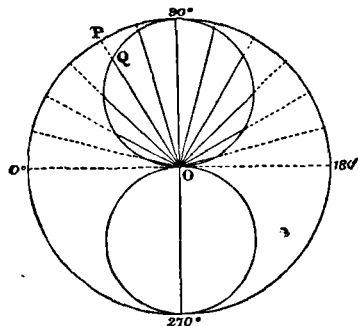


Fig. 9. — Diagramme de Zeuner.

quelconque, représenter la valeur de la force électromotrice (qui varie entre $+ E_{\max}$ et $- E_{\max}$) soit par le sinus PM , soit par sa projection OQ sur le diamètre vertical, et au mouvement circulaire du point P correspondra une oscillation permanente du point Q sur toute la longueur de ce diamètre.

Les courants résultant de ces forces électromotrices périodiques ou alternatives seront également périodiques et alternatifs ; ils augmenteront jusqu'à un maximum, puis iront en décroissant, s'annuleront, changeront de sens, augmenteront dans ce nouveau sens, pour décroître et s'annuler de nouveau

avant de s'inverser encore pour reprendre leurs sens et valeurs primitifs. Si la force électromotrice parcourt ainsi 100 cycles complets ou périodes par seconde, il en sera de même de l'intensité du courant.

Les variations périodiques de ce genre sont susceptibles d'un autre mode de représentation analogue à celui employé par Zeuner dans l'étude du fonctionnement des tiroirs des machines à vapeur. Soit, comme précédemment, le grand cercle extérieur (fig. 9), un cercle de référence à la circonférence duquel se meut le point P. Sur chacun de ses rayons verticaux comme diamètre décrivons un nouveau cercle. Les longueurs telles que OQ découpées par ces circonférences sur les rayons du premier cercle donneront les valeurs correspondantes du sinus de l'angle décrit par P. Si l'on fait tourner, concentriquement avec cette figure, une carte appliquée sur elle et dans laquelle on aura découpé une fente étroite suivant un rayon du cercle primitif, l'intersection de cette fente avec les deux cercles intérieurs donnera les variations de la force électromotrice dans les diverses positions.

Le lecteur qui voudrait approfondir cette étude graphique des phénomènes considérés pourrait utilement consulter l'excellent traité du professeur Fleming¹, ou celui de Blakesley², et divers travaux de Kapp³.

La figure 10 donne une application de cette construction à un système triphasé; les trois lignes angulairement espacées de 120° l'une de l'autre sont censées tourner derrière les deux fenêtres circulaires indiquées. Les longueurs de ces trois lignes visibles à un instant quelconque représentent

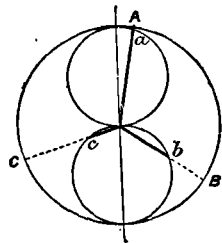


Fig. 10. — Application du diagramme de Zeuner au cas de courants triphasés.

¹ Fleming. *The Alternate Current Transformer* (Le transformateur à courant alternatif, Londres, 1889).

² Blakesley. *Alternating Currents of Electricity* (Courants électriques alternatifs), Londres, 1889 (traduction française par W. C. Rechniewski, 1893, Baudry et C^o, éditeurs).

³ Kapp, sur *Les machines à courants alternatifs*, Proc. Inst. Civil Engineers, 1889, pt. III.

respectivement les valeurs instantanées des trois forces électromotrices et des trois courants développés.

Les instruments ordinaires de mesures pour courants alternatifs, tels que les électrodynamomètres, les voltmètres Cardew et les voltmètres électrostatiques, ne donnent pas les valeurs arithmétiques moyennes des intensités et des forces électromotrices. Leurs indications, s'ils ont été originairement étalonnés sur des courants continus, sont les racines carrées des moyennes des carrés de ces valeurs. Ces quantités ont reçu les noms de *différences de potentiel efficaces* et de *forces électromotrices* ou d'*intensités efficaces*, d'où les noms d'ampères et de volts *efficaces*. La moyenne qu'ils indiquent (si l'on admet que les intensités et les forces électromotrices suivent, dans leurs variations, la loi sinusoïdale) est égale à 0,707 des valeurs maxima ; en effet la moyenne des carrés des sinus (pris soit pour un quadrant soit pour le cercle entier) est égale à $\frac{1}{2}$, ce qui donne pour la racine carrée de la moyenne de ces carrés $\frac{1}{\sqrt{2}}$ fois, ou 0,707 fois, leur valeur maxima. Si l'on met un voltmètre sur un circuit à courants alternatifs dans lequel la force électromotrice oscille entre les maxima + 100 et - 100 volts, il indiquera 70,7 volts, et il faudrait l'application d'un courant continu de 70,7 volts pour fournir sur le même appareil la même lecture. De même, si un ampèremètre à courants alternatifs marque 100 ampères, on devra en conclure que l'intensité passe réellement de + 141,4 ampères à - 141,4 ampères, mais que son effet est égal à celui de 100 ampères en courant continu et que, par suite, ledit courant doit être traité et présenté comme un courant de 100 ampères efficaces.

Les courants alternatifs ne restent pas toujours au pas ou en concordance avec la force électromotrice qui les lance dans le circuit. Si ce circuit présente de la self-induction, les courants *retardent* sur la force électromotrice ; s'il est doué de capacité, ils sont *en avance* sur elle. Dans les deux cas on dit qu'il y a *décalage* de l'intensité sur la force électromotrice. La figure 11 donne l'illustration de ce décalage en arrière ou retard de phase

dû à la self-induction. La courbe marquée E représente la force électromotrice alternative considérée ; celle marquée I , la courbe

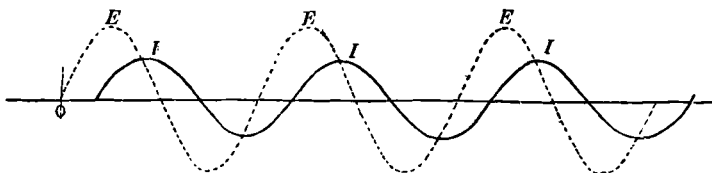


Fig. 11. — Courbe d'intensité en retard sur une courbe de force électromotrice.

d'intensité correspondante. Les longueurs mesurées à partir de O sur l'axe horizontal représentent les temps. Les ondes de courant indiquées par la courbe en trait plein sont sensiblement *en retard* sur celles de la force électromotrice tracées en pointillé.

Mais la self-induction a une autre action plus importante qu'un simple retard de phase ; elle détermine sur la force électromotrice des réactions qui réduisent l'intensité. Alors que le courant augmente, la réaction de la self-induction tend à l'empêcher de croître. Ainsi, pour produire un courant de 40 ampères dans une résistance de 1,5 ohm, il faudrait, en courant continu, une force électromotrice de 60 volts ; mais une force électromotrice alternative de 60 volts sera insuffisante à produire le même courant s'il existe dans le circuit de la self-induction qui réagit contre cette force électromotrice. La question se complique d'ailleurs encore de ce fait que les ondulations de cette force électromotrice de réaction sont également décalées : elles retardent en fait exactement d'un quart de période sur celles de l'intensité. Si un courant alternatif de I ampères efficaces circule avec une fréquence de $\frac{1}{T}$ périodes par seconde dans un circuit ayant un coefficient de *self-induction* égal à L , la force électromotrice de réaction ¹ qui en résulte sera de $\omega L I$ volts

¹ Voici comment on la calcule : — Par définition, le coefficient de self-induction ou inductance, L , représente le quotient de la variation du flux de force embrassé par le circuit par la variation de l'intensité du courant traversant ce circuit ; par suite, quand l'intensité a une valeur I , la self-induction réelle est égale à I fois L ;

efficaces. Si l'on a, par exemple, $L = 0,002$ henry, $\frac{1}{T} = 50$ périodes par seconde, et $I = 40$ ampères, la force électromotrice de self-induction qui réagit dans le circuit sera de 25,4 volts. Si donc on veut obtenir les 40 ampères efficaces non seulement dans la résistance de 1,5 ohm, mais contre cette réaction, il faudra plus de 60 volts. Il ne faudra pas cependant $60 + 25,4$ volts, attendu que la force électromotrice de réaction est décalée par rapport au courant. La loi d'Ohm ne s'applique plus ici. Pour trouver la force électromotrice nécessaire dans ce cas, nous recourrons à la géométrie.

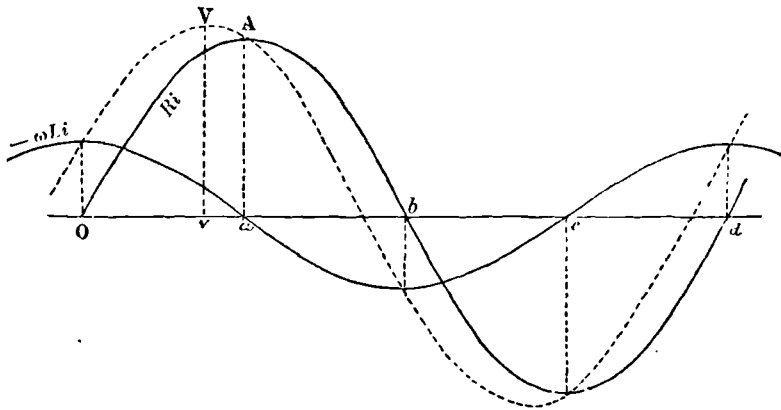


Fig. 12. — Tracé de la courbe de force électromotrice correspondant à une self-induction donnée.

On tracera la courbe ondulée $O A b d$ (Fig. 12) correspondant à la force électromotrice nécessaire à faire passer le courant à travers la résistance, dans le cas où elle ne présente pas de self-induction. On pourra prendre l'ordonnée $a A$ pour échelle comme numériquement égale à 60 et donner à cette courbe le nom de

et, comme la force électromotrice de self-induction est proportionnelle au taux de variation de cette quantité par rapport au temps, on peut écrire $E = L \frac{dI}{dt}$. Mais on admet que I est une fonction sinusoïdale du temps, dont les valeurs instantanées sont données par l'expression $I_{\max} \sin \omega t$, I_{\max} étant la valeur maxima de I . En différenciant par rapport au temps, on trouve $\frac{dI}{dt} = \omega I_{\max} \cos \omega t$, et, les valeurs « efficaces » des sinus et des cosinus étant égales, on a pour E la valeur ωLI ; mais elle diffère, en phase, d'un quart de période par rapport à l'intensité.

courbe d'intensité. On tracera ensuite la courbe marquée $-\omega LI$ pour représenter la force électromotrice nécessaire à équilibrer la réaction de self-induction, ω étant toujours égal à $\frac{2\pi}{T}$. Son ordonnée en O sera égale à 25,1 volts, et la courbe se trouvera en retard d'un quart de période sur la précédente, attendu que la réaction de self-induction atteint son maximum quand l'intensité croît le plus rapidement. La combinaison de ces deux courbes par addition de leurs ordonnées fournira la courbe en pointillé dont le maximum est en V. Cette courbe est celle de la force électromotrice nécessaire pour produire dans le circuit l'intensité cherchée. On voit que la courbe d'intensité atteint son maximum quelques instants après la courbe de force électromotrice. Si Od est le temps périodique, la longueur $v a$ représente le temps écoulé entre les maxima de force électromotrice et d'intensité.

La figure 13 donne une représentation des mêmes phénomènes sous forme d'un diagramme tournant analogue à celui de la figure 9. La ligne OA est équivalente à la force électromotrice efficace RI_{eff} , tandis que la ligne AD, à angle droit avec OA, représente la force électromotrice de self-induction ωLI . Leur composition suivant le parallélogramme des forces donne la ligne OD comme représentation de la force électromotrice.

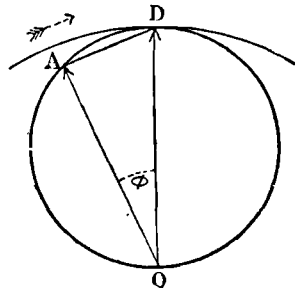


Fig. 13. — Autre tracé géométrique.

Les projections de ces trois lignes sur une verticale pendant que le diagramme tourne autour du point O comme centre fournit les valeurs instantanées des trois quantités auxquelles elles correspondent. L'angle AOD, ou φ , dont le courant retarde sur la force électromotrice, s'appelle *angle de retard*. Quelle que soit la self-induction ou la fréquence, cet angle ne peut jamais dépasser 90° ou un quart de période. Si OA est à une échelle telle qu'elle représente 60 et AD 25,1, OD sera numériquement égale à 65 volts.

Le phénomène aura pour expression analytique $E^2 = (RI)^2 + (\omega LI)^2$, ce qui donne l'équation.

$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$$

Le dénominateur qui intervient ici prend ordinairement le nom d'*impédance*.

Dans les figures 14 et 15, l'angle φ est tel que

$$\text{tang } \varphi = \frac{\omega LI}{RI} = \frac{\omega L}{R},$$

et l'on voit que la self-induction a pour effet d'augmenter *en apparence* la résistance du circuit, comme si elle passait de R à $\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$. En réalité le courant alternatif est régi, non par la résistance du circuit, mais par son impédance. En même temps, l'intensité se trouve retardée comme si l'angle de référence était, non plus ωt , mais $\omega t - \varphi$, de sorte que l'équation donnant les valeurs instantanées de I , pour $E = E_{\max} \sin \omega t$, est

$$i = \frac{E_{\max} \sin (\omega t - \varphi)}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}.$$

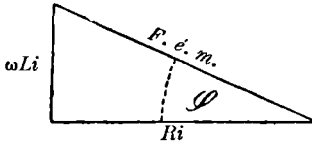


Fig. 14.

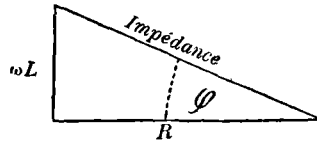


Fig. 15.

Représentation géométrique des éléments d'un courant alternatif dans un circuit présentant de la self-induction.

Telle est la loi de Maxwell pour les courants périodiques décalés par self-induction. Les instruments de mesures ne tenant pas compte de la différence de phase dans leurs indications et ne donnant que les valeurs efficaces, on se contente ordinairement de la forme précédente qui est plus simple.

L'introduction d'une capacité, telle qu'un condensateur, dans un circuit à courant alternatif a, au contraire, pour résultat de déterminer une *avance* de phase du courant par rapport à la force électromotrice qui lui donne naissance. C'est en effet au

moment où la force électromotrice varie le plus rapidement (comme en O, Fig. 11), en changeant de signe, que le courant pénétrant le condensateur est maximum ; ce maximum est ainsi, sur la courbe d'intensité, sensiblement en avance d'un quart de

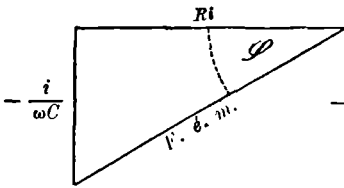


Fig. 16.

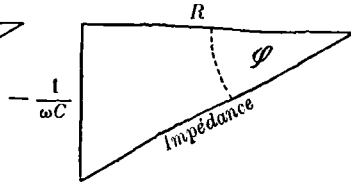


Fig. 17.

Représentation géométrique des éléments d'un courant alternatif dans un circuit présentant de la capacité.

période sur celui de la courbe de force électromotrice. La réaction d'un condensateur tend donc à retenir le courant, au lieu de le prolonger, et l'amène à changer de sens avant que la force électromotrice se soit inversée. La *capacité* ou *permittance* prend dès lors la forme $-\frac{1}{\omega C}$, et l'angle φ est tel que $\text{tang } \varphi = -\frac{1}{\omega CR}$. L'impédance est dans ce cas $\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}$.

S'il existe à la fois, dans le circuit, de la self-induction et de la capacité,

$$\text{tang } \varphi = \frac{L\omega - \frac{1}{\omega C}}{R},$$

et la réactance a pour expression

$$\omega L - \frac{1}{\omega C},$$

et l'impédance,

$$\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

La capacité et l'inductance ayant des effets contraires, on peut les employer à neutraliser l'une par l'autre. Elles s'équilibrent exactement si $L = \frac{1}{\omega^2 C}$ ou $\omega^2 LC = 1$. Dans ce cas $\varphi = 0$, et la réactance du circuit devient nulle ; on dit qu'il est sans réactance. L'ensemble se comporte comme s'il n'y

avait ni self-induction ni capacité, mais seulement la résistance R dans le circuit, et le courant obéit simplement à la loi d'Ohm.

On voit que, s'il y a peu de résistance en circuit et beaucoup d'inductance, le courant dépend presque uniquement de cette inductance. Si, par exemple, ω ($= \frac{2\pi}{T}$) est égal à 1 000 radians par seconde et $L = 10$ henrys, tandis que R est de 1 ohm seulement, le terme résistance est négligeable dans l'impédance, et l'intensité a pour expression

$$i = \frac{E}{\omega L}.$$

On emploie parfois des bobines de self-induction de grande inductance et de faible résistance pour réagir contre des courants alternatifs ; on les appelle *bobines de réaction*.

Si, au contraire, on fait passer le courant par un condensateur de faible capacité (soit $C = 0,1$ microfarad, auquel cas $\frac{1}{\omega C} = 10\,000$), le courant qui entre dans le condensateur et qui en sort est uniquement régi par la capacité et la fréquence, et non pas par la résistance du circuit, et il a pour valeur

$$i = E\omega C.$$

La mesure de la puissance, avec les courants alternatifs, demande une attention particulière. Si, pour mesurer la puissance en watts fournie à un moteur ou à toute autre partie d'un circuit à courants alternatifs, on relève simplement les ampères et les volts à l'ampèremètre et au voltmètre, et qu'on multiplie l'un par l'autre les nombres relevés, on obtient comme *puissance apparente* une valeur qui excède souvent notablement la *puissance vraie*. Cet écart est dû à la différence de phase dont les instruments ne tiennent pas compte. La puissance vraie a en réalité pour expression, en watts, $P = E_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \cos \varphi$, E_{eff} et I_{eff} étant les valeurs efficaces de la force électromotrice et de l'intensité, et φ l'angle de décalage ; mais ce dernier est généralement inconnu ; aussi faut-il recourir à un wattmètre spécial. Cet appareil n'est autre, en sa forme habituelle, qu'un

électrodynamomètre de construction particulière telle que le circuit de haute résistance qu'il contient soit sans réactance.

Toutes les fois que la différence de phase (retard ou avance) est très considérable, le courant, décalé par rapport à la force électromotrice, est presque *sans watts*, suivant l'expression anglaise, c'est-à-dire que sa puissance est nulle. Tel est le cas avec des courants passant à travers une bobine de réaction ou un condensateur, si les résistances en circuit sont faibles.

GÉNÉRATEURS POLYPHASÉS

On est maintenant à même de passer à la question des générateurs polyphasés. En quelques mots le principe du fonctionnement polyphasé repose sur la construction d'un induit d'alternateur formé de bobines en groupes de deux, trois, ou davantage, entrant successivement en jeu dans chaque période.

Nous avons supposé jusqu'ici les inducteurs d'un alternateur fixes et l'induit mobile ; mais il n'en est pas nécessairement ainsi, et, en fait, dans la majorité des alternateurs modernes, simples ou polyphasés, c'est la disposition inverse qui est adoptée : les inducteurs tournent, tandis que l'induit est immobile. La préférence donnée à ce mode de construction a sa raison d'être dans la plus grande sécurité d'isolement du bobinage avec un induit fixe, et ce point acquiert une grande importance dans le transport de l'énergie à grande distance où l'on emploie des tensions élevées.

Considérons le cas hypothétique très simple d'un induit fixe — anneau à deux bobines seulement roulées sur deux de ses quadrants opposés — et d'un inducteur mobile formé d'un simple barreau aimanté bipolaire. On voit dans la figure 18 deux machines élémentaires de ce genre reliées par une double ligne pour transmission d'énergie ; l'une des machines, actionnée par une machine à vapeur ou une turbine, fonctionnera comme générateur, et l'autre comme moteur synchrone. On sait qu'un moteur de ce genre ne démarrera pas seul ; il faudra le faire

démarrer à la main ou d'une manière quelconque, et le lancer à sa vitesse avant de le mettre dans le circuit ; il tournera alors en synchronisme absolu avec le générateur, sa force électromotrice étant presque exactement en opposition de phase avec celle du générateur.

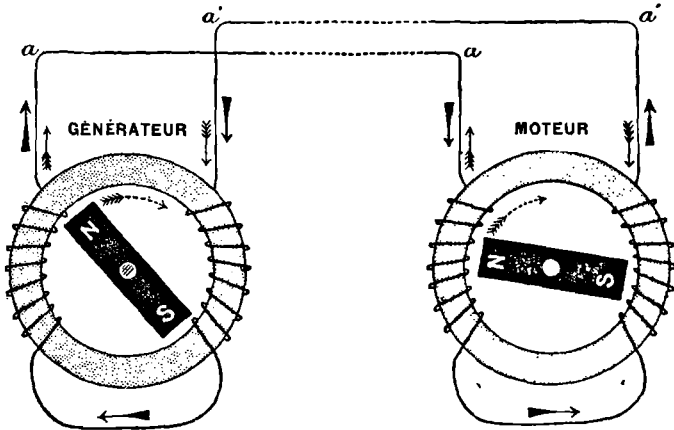


Fig. 18. — Transmission d'un alternateur simple à un moteur synchrone simple.

Quelques-uns des tout premiers alternateurs, tels que ceux de Lontin et de Gramme, comportaient des inducteurs multipolaires mobiles avec induits extérieurs fixes. Ceux de Gramme ont été construits vers 1877 en vue de l'alimentation des bougies Jablochkoff. Le diagramme de cette machine (Fig. 19) montre qu'elle avait huit pôles mobiles, alternativement nord et sud. Le noyau annulaire, en fer divisé, recevait les bobines de fil dans lesquelles devaient être induits les courants alternatifs. On avait reconnu (comme on le verra ici) qu'il était inutile de donner une très grande largeur aux bobines individuelles. Au contraire, plus les bobines appartenant à un même groupe peuvent être rapprochées les unes des autres, mieux elles agissent. Si donc cette machine n'avait comporté que huit bobines étroites, — une en regard de chaque pôle —, il y eût eu beaucoup d'espace perdu sur l'anneau. Aussi Gramme remplit-il cet espace avec d'autres bobines. Les sections de son enroulement étaient, par le fait, quatre fois aussi nombreuses que les pôles

et il avait pu les grouper de manière à alimenter quatre circuits distincts. Or il est évident que les pôles, en passant successivement devant les quatre sections adjacentes, devaient engendrer quatre courants alternatifs différant en phase l'un par rapport à l'autre. Qu'il le sût ou le découvrit, Gramme vit seulement qu'il n'aboutirait à rien en reliant toutes les bobines les unes aux autres, et il se borna à connecter entre elles celles qui, à

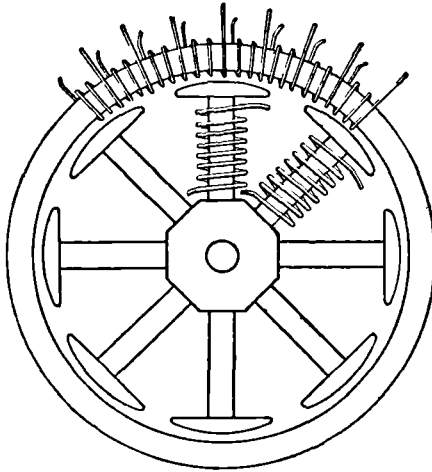


Fig. 19. — Alternateur Gramme.

un instant quelconque, se trouvaient simultanément en regard des pôles. Il obtint ainsi quatre circuits distincts formés chacun de huit bobines en série, et il connecta ces quatre circuits individuels à quatre circuits extérieurs complètement séparés, alimentant chacun un certain nombre de bougies Jablochkoff. Cet alternateur n'était autre qu'un générateur polyphasé ; mais on ne trouve nulle part trace d'un essai fait par l'inventeur en vue d'appliquer utilement, par une combinaison quelconque, les courants de phases distinctes ; cette idée paraît lui avoir complètement échappé, et il maintint toujours, au contraire, les circuits séparés, en raison de la différence de phase qui existait entre eux.

Les grands alternateurs diphasés de Paddington, étudiés par Gordon, ont été mis en fonctionnement vers 1883.

En 1886, F. Wynne proposa un système de distribution dans lequel « les courants alternatifs circulaient dans un ordre tel que, le taux des alternances étant le même pour tous, l'instant où elles se produisaient différât de l'un à l'autre ».

On remarquera en passant que tous les types d'alternateurs présentent un intervalle inutile entre les divers groupes de bobines si leur enroulement est fait en vue d'un fonctionnement

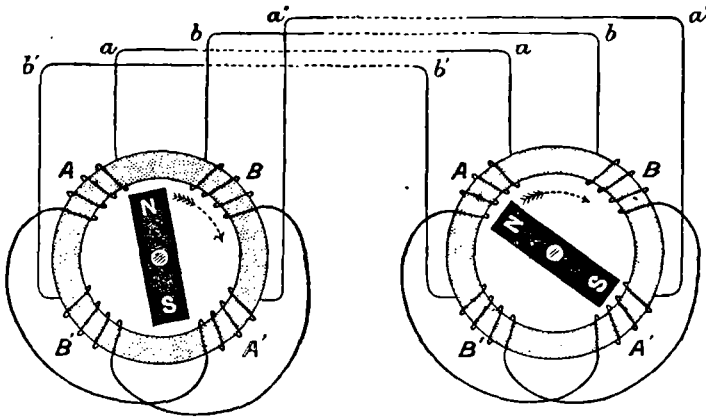


Fig. 20. — Illustration d'une transmission diphasée.

à courants alternatifs simples. Si l'on se reporte, par exemple, à la figure 18, on voit qu'il existe entre les deux bobines montées sur l'anneau un espace vide qui pourrait être avantageusement rempli de fil. Supposons donc que, en plus des deux bobines A, A' sur chaque machine, on en place deux autres B, B' entre la première paire et qu'on relie ces nouvelles bobines par une autre double ligne bb et $b'b'$ (Fig. 20).

Il est clair qu'il se développera dans BB' une nouvelle série de courants alternatifs qui seront décalés exactement d'un quart de période en arrière de ceux qui circulent en AA'. Ces deux courants seront représentés par les deux courbes ondulées de la figure 21. La force électromotrice en A sera maxima juste au moment du passage du pôle de l'aimant en face de son milieu, car à cet instant le taux de variation de l'aimantation de son noyau est maximum. Les maxima pour les bobines B

correspondront d'ailleurs aux valeurs nulles dans les bobines A, et *vice versa*. On dit de deux courants alternatifs dont la phase diffère ainsi d'un quart de période qu'ils sont « en quadrature ». Mais les courants dans les bobines A du moteur, qui tendent à attirer en avant le pôle de l'inducteur en regard, ne se seront pas annulés avant que les courants dans les bobines B aient déjà commencé à agir ; il n'y aura donc pas ici de point

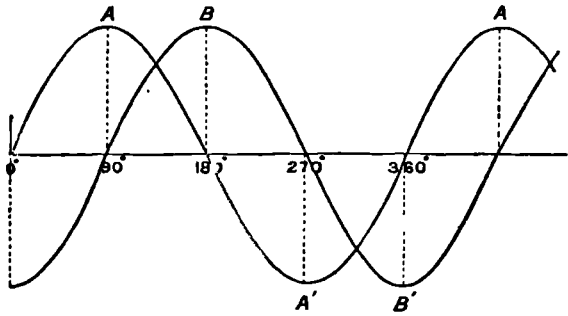


Fig. 21. — Deux courants alternatifs décalés d'un quart de période.

mort. On voit aisément que les pôles résultants se déplaceront régulièrement le long de l'anneau du moteur. A l'instant où le courant en AA' est maximum, celui de BB' est nul, et l'action magnétisante de AA' a pour effet de déterminer dans l'anneau deux doubles pôles aux extrémités opposées du diamètre exactement situé sous le milieu des bobines BB'. Quand le courant en AA' s'annule, celui en BB' surgit, croît et entraîne par suite le pôle en avant. Lorsque les courants en AA' et en BB' arrivent à être égaux, A et B' agissent ensemble comme une seule bobine tandis que A' et B agissent ensemble comme une autre bobine, avec des pôles résultants situés entre B et A' à droite et entre B' et A à gauche. Quand le courant est maximum en B, les pôles se trouvent exactement sous le milieu des bobines A. Il se produit, en conséquence, dans l'anneau du moteur et sous l'action des courants issus du générateur, une paire de pôles qui se déplacent constamment, et l'aimant du moteur cherche sans cesse à les atteindre ; il n'y a pas de points morts. Le moteur démarrera donc de lui-même si son aimant n'est pas trop puis-

sant, et sa vitesse angulaire s'accélérera jusqu'à ce qu'il y ait synchronisme avec le générateur.

Tel est en réalité le grand avantage des courants polyphasés :

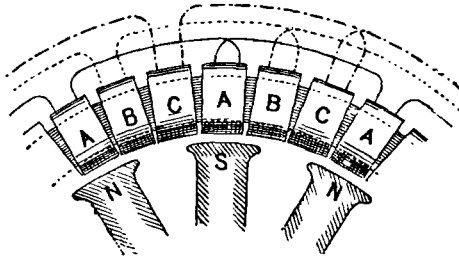


Fig. 22. — Générateur triphasé.

ils permettent le démarrage automatique des moteurs. Mais la supériorité des générateurs polyphasés ne se borne pas là. On voit qu'avec eux on peut doubler la puissance d'une machine en doublant simplement la quantité de cuivre dans son induit¹. Son entraînement exigera une puissance double, et elle fournira elle-même une puissance double ; mais son prix de revient ne sera pas doublé et elle ne sera pas plus encombrante. Il est également digne de remarque que *les réactions d'induit dans un générateur diphasé ne sont pas supérieures à celles de la même machine employée comme alternateur simple.*

Supposons maintenant que, au lieu de coupler les bobines en deux groupes distincts, on les ait montées en trois groupes, comme l'a fait Gramme dans quelques-uns de ses petits types de machines ; on aura alors trois courants successivement décalés les uns par rapport aux autres. Ces bobines étant groupées comme dans la figure 22, on pourra relier ensemble les bobines A en un même circuit (elles sont censées enroulées ou connectées alternativement dextrorsum et sinistrorsum), relier de même les bobines B en un second circuit, et les

¹ H. Goerges : « Puissance comparative des induits à courants continus, alternatifs et à champ tournant », *Elektrotechnische Zeitschrift*, t. XIII, p. 236. M. von Dobrowolski a cité, dans la discussion qui a suivi cette communication, une machine multipolaire à courant continu donnant 11 kw et qui, avec le même système inducteur et un induit triphasé, en fournissait 30.

bobines C en un troisième. Il est clair dès lors que, dans chacun des groupes ainsi constitués, la force électromotrice s'élèvera et s'abaissera en une succession d'ondulations régulières, et que celle développée en B, par exemple, n'atteindra son maximum que quand A aura déjà dépassé le sien et sera en décroissance. La différence de phase entre ces trois grandeurs pourra en somme être représentée par les trois courbes en traits pleins de la figure 23. La distance angulaire entre un pôle nord et un sud, sur les deux machines, correspondant à une « période » complète (p. 8), ou à une révolution complète de 360° sur

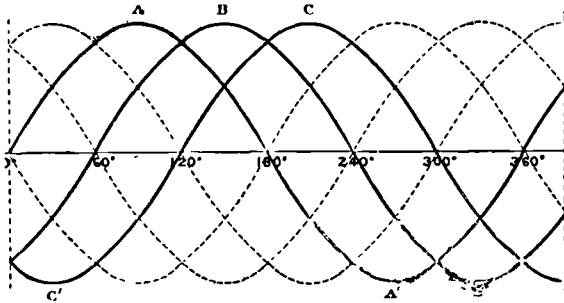


Fig. 23. — Courants triphasés décalés d'un sixième de période l'un par rapport à l'autre.

le cercle imaginaire de référence de la figure 8, on voit que les trois courants seront décalés d'un sixième de période l'un par rapport à l'autre. Avec un fil d'aller et un fil de retour séparés pour chacun des trois circuits ainsi susceptibles d'être alimentés, il ne faudrait pas moins de 6 lignes entre le générateur (triphase) et le moteur qu'il actionnerait. Mais on verra que l'adoption de certains modes spéciaux de groupement rend cette complication inutile : le nombre des fils peut, dans ce cas, être réduit à quatre ou à trois ; avec un retour par la terre ce nombre réel de lignes pourrait même tomber à deux.

Avant de passer à l'étude de quelques générateurs polyphasés modernes, il est nécessaire de considérer un instant l'effet de

la largeur des bobines d'induit. Soit un inducteur multipolaire mobile, tel que celui de la figure 24, dans lequel nous supposons les pièces polaires conformées de telle sorte que le champ magnétique dans l'entrefer (espace compris entre les noyaux inducteurs et induit) soit réparti de manière à donner à la courbe de force électromotrice induite dans un conducteur quelconque situé dans cet entrefer une forme ondulée et adoucie.

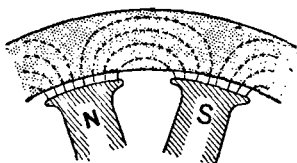


Fig. 24.

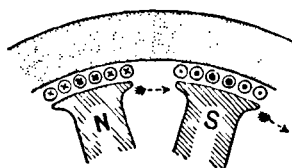


Fig. 25.

Nous représenterons par un point au milieu de la section du conducteur les forces électromotrices qui se dirigent au-dessus du plan du papier, ou vers le lecteur, et par une croix placée de même celles qui se dirigent en sens contraire, au-dessous du plan du papier, en s'éloignant du lecteur. Il est dès lors évident qu'il sera induit des forces électromotrices dirigées vers l'avant dans les conducteurs en regard desquels le pôle sud se meut vers la droite, et des forces électromotrices de sens contraire dans ceux soumis à un pôle nord (Fig. 25). Mais ces forces électromotrices ne seront pas égales entre elles au même instant ; elles seront plus considérables dans les conducteurs les plus actifs, c'est-à-dire dans ceux qui traversent les parties où le champ magnétique est le plus intense. Chaque conducteur sera soumis à un cycle égal d'action inductive, mais ils ne subiront évidemment que l'un après l'autre le maximum de cette action. Pour plus de commodité nous supposons cette action maxima coïncider, dans chaque conducteur, avec le passage de la ligne médiane du pôle sous le fil.

Admettons maintenant (ainsi que le réalise la construction courante) un certain nombre de conducteurs reliés entre eux, comme dans la figure 26, de manière à former une bobine ; les

forces électromotrices dont ils seront le siège s'ajouteront les unes aux autres. Dans la figure les pôles sont censés en arrière des fils et se mouvant de droite à gauche ; dès lors, un instant après le moment représenté dans la figure 26, le pôle nord se trouvera exactement derrière la bobine (Fig. 27). On voit qu'il peut n'y avoir aucun avantage à ce que les spires intérieures de

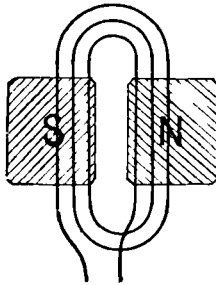


Fig. 26.

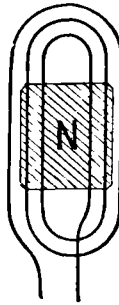


Fig. 27.

la bobine soient à une distance l'une de l'autre beaucoup plus rapprochée que la largeur de la face polaire, puisque à cet instant leurs forces électromotrices sont en opposition. Il est toutefois plus avantageux de donner à la bobine un peu moins de largeur qu'à la face polaire en raison de la disposition du champ magnétique. Mais la force électromotrice réelle engendrée par une bobine d'un nombre donné de spires serait plus élevée si ces spires pouvaient avoir toutes la même dimension de manière à subir toutes au même instant l'action inductrice maxima.

On se rendra mieux compte du phénomène au moyen du diagramme suivant. Supposons la force électromotrice maxima engendrée dans un conducteur représentée par le rayon OA (Fig. 28).

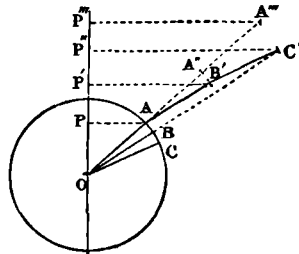


Fig. 28.

La projection de OA en OP sur le diamètre vertical donnera la valeur de la force électromotrice à l'instant où l'angle AOP correspond à la fraction de période considérée. Soient deux

autres conducteurs situés un peu plus loin et dont les forces électromotrices maxima individuelles seront représentées en OB et OC . Il s'agit de trouver le résultat de la connexion en série de ces trois fils. D'après les règles de composition des vecteurs, il suffira à cet effet de tracer à partir de A la ligne AB' égale et parallèle à OB , et, à partir de B' , la ligne $B'C'$ égale et parallèle à OC . La ligne OC' sera la résultante, et sa projection OP'' sur le diamètre vertical prolongé donnera la valeur instantanée de la force électromotrice combinée des trois conducteurs. S'ils avaient été tous groupés en A sans différence de phase entre eux, on aurait eu pour résultante totale OA''' , dont la projection OP''' sur la verticale eût donné la valeur instantanée.

Un exemple numérique ne nuira pas à l'élucidation de ce point. Supposons que chaque conducteur soit le siège d'une force électromotrice efficace de 1 volt ; si trois conducteurs semblables étaient montés en série, leur force électromotrice totale ne pourrait atteindre 3 volts que s'ils se trouvaient assez confondus les uns avec les autres pour subir en même temps l'induction maxima. Le moindre écartement entre les spires ou les bobines diminue *nécessairement* la force électromotrice résultante.

Il est, par suite, indispensable de faire intervenir un coefficient de largeur pour une bobine de largeur angulaire particulière quelconque. Soit ψ la différence de phase entre le milieu d'une bobine quelconque et ses conducteurs extrêmes de part et d'autre. Si l'inducteur de la machine est bipolaire, la valeur de ψ est simplement égale à la largeur angulaire (en radians) sous-tendue par la bobine. Si la machine est multipolaire, N_p étant le nombre de ses paires de pôles, l'angle de différence de phase sera égal à la moitié de la largeur angulaire (mesurée sur la machine) multipliée par N_p . Ou bien, si l'on désigne par b la largeur linéaire de la bobine mesurée sur la circonférence, et par d le diamètre de la machine, l'angle de différence de phase correspondant à la demi-largeur sera $\frac{bN_p}{d}$. Mais la valeur moyenne de la force électromotrice efficace dans tous les con-

ducteurs compris dans sa largeur est donnée par la formule :

$$\frac{1}{\psi} \int_0^{\psi} e_{\text{eff}} \cos \gamma. d\gamma,$$

dans laquelle e_{eff} est la valeur de la force électromotrice efficace dans un conducteur quelconque et γ l'angle de différence de phase entre la force électromotrice dans un conducteur quelconque de la bobine et la force électromotrice dans le conducteur médian de cette bobine. Si l'on appelle coefficient de largeur la partie de cette expression qui est fonction de ψ et qu'on le désigne par k , on a, en effectuant l'intégration :

$$k = \frac{\sin \psi}{\psi}.$$

Pour donner quelques valeurs numériques, nous anticiperons un peu sur certaines conditions de construction ci-après exposées. Par exemple, dans un anneau garni de quatre bobines qui en occupent chacune un quadrant (comme dans certains moteurs diphasés, voir figure 49),

$$\psi = 45^\circ = 0,785 \text{ radian}; \quad k = 0,90.$$

Dans le cas d'un anneau garni de trois bobines en recouvrant chacune 120° (Fig. 54),

$$\psi = 60^\circ = 1,05 \text{ radian}; \quad k = 0,82.$$

Dans le cas d'un anneau à six bobines en occupant chacune 60° (Fig. 57),

$$\psi = 30^\circ = 0,523 \text{ radian}; \quad k = 0,95.$$

Considérons, à titre d'exemple, un générateur multipolaire diphasé dont les conducteurs d'induit traversent des trous pratiqués dans les disques du noyau, ces trous étant au nombre de 12 également espacés et répétés d'un pôle nord au pôle nord voisin. Dans ce cas six conducteurs appartiennent à une phase et six à l'autre, et dans chacun de ces groupes trois fils sont le siège de

courants dans un sens, et les trois autres, de courants inverses. Les trois fils d'un groupe occupent un quart de la largeur totale ou correspondent à 90° sur le cercle de référence ; mais, comme les conducteurs sont séparément confinés dans des trous, la distance angulaire effective entre les deux conducteurs extérieurs dans un groupe de trois est de 60° , dont la moitié est 30° ; d'où $k = 0,95$.

Avant de quitter cette question de composition de deux forces

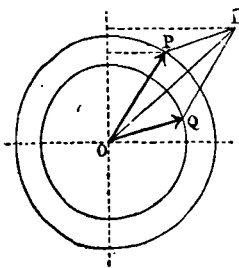


Fig. 29.

électromotrices en différence de phase l'une par rapport à l'autre, il n'est pas inutile de faire observer que le principe de la sommation des vecteurs ci-dessus appliqué conduit à un résultat très simple quand il ne s'agit que de deux forces électromotrices. Soient OP et OQ ces deux forces électromotrices ; leur différence angulaire de phase est POQ ou φ . En les

composant de la manière ordinaire en menant PR égale et parallèle à OQ , on obtient la résultante OR qui représente en grandeur et en relation de phase la force électromotrice résultante, et ici, conformément à la géométrie ordinaire, $OR = \sqrt{OP^2 + OQ^2 + 2OP \cdot OQ \cos \varphi}$, expression évidemment maxima quand la différence de phase est nulle.

ALTERNATEURS POLYPHASÉS MODERNES

Ces notions préliminaires une fois acquises, on est à même d'étudier quelques types modernes de machines polyphasées.

Alternateurs Brown-Oerlikon (Lauffen-Francfort). — Nous commencerons par les générateurs triphasés de Lauffen. Actionnés par des turbines installées dans la Neckar, ils ont été montés en 1891 pour fournir de l'énergie électrique à la ville d'Heilbronn, à 10 kilomètres environ de distance. Ils ont cependant été tout d'abord appliqués au fameux transport d'énergie,

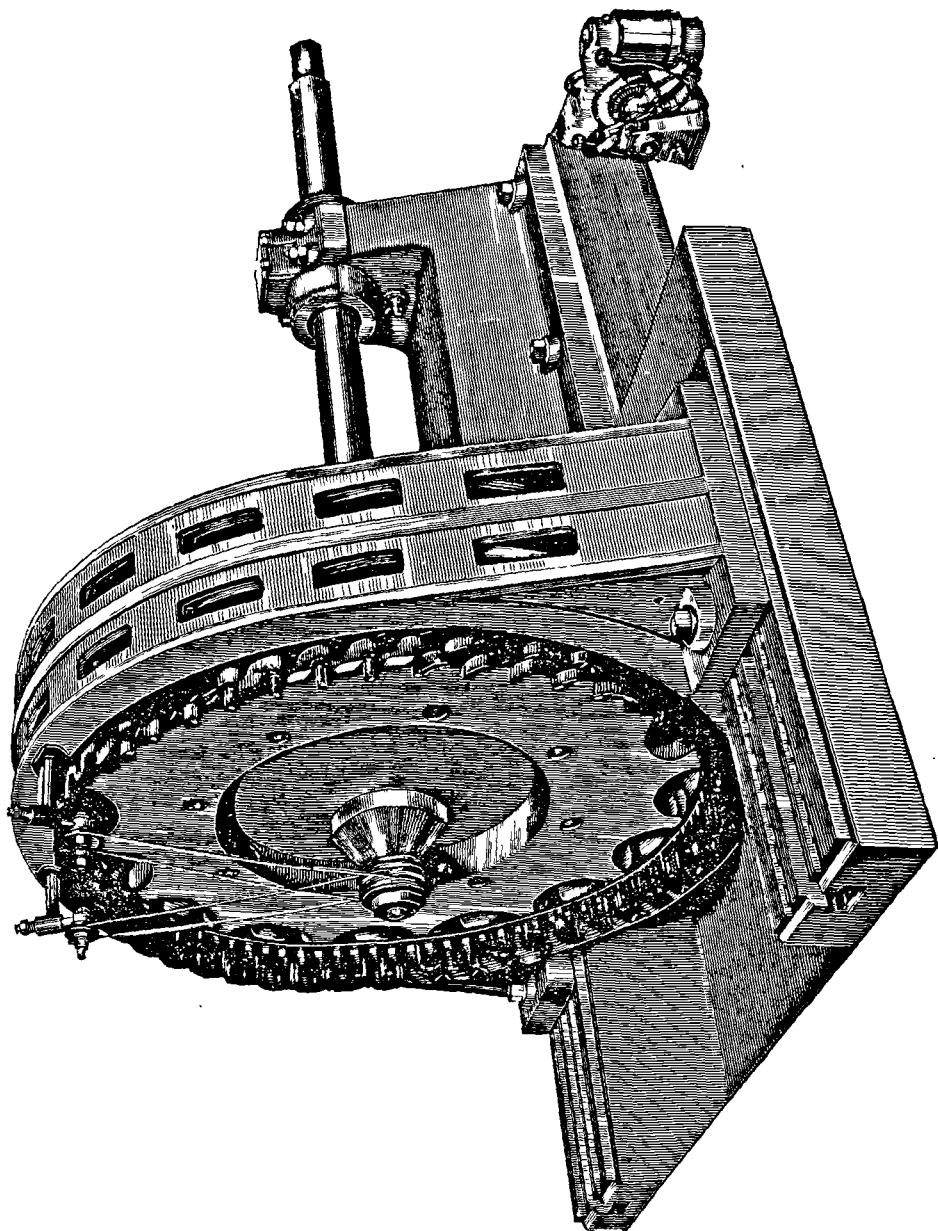


Fig. 30. — Alternateur triphasé de Brown employé à Lauffen.

devenu historique, entre Lauffen et Francfort, distants de 177 kilomètres, à l'occasion de l'Exposition de cette dernière ville. Etablis par les ateliers d'Oerlikon, à Zurich, sur les dessins de M. C. E. L. Brown, ils comportent un inducteur interne mobile, tournant à l'intérieur d'un induit formé de conducteurs passant

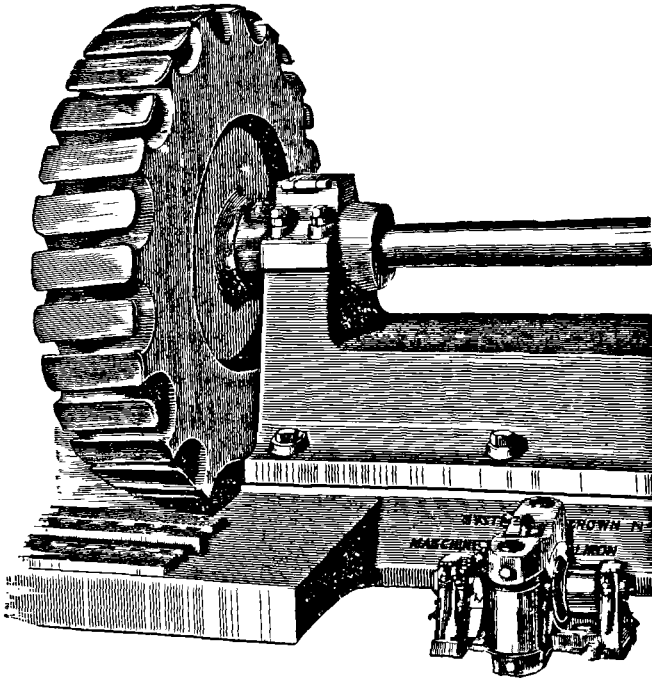


Fig. 31. — Système inducteur de l'alternateur triphasé de Lauffen.

en zigzag à travers des trous pratiqués dans un noyau annulaire. La figure 30 en donne une vue générale, tandis que la figure 31 en montre le système inducteur retiré de l'induit par glissement, ce qui en permet l'inspection. La machine développe trois courants de 1 400 ampères chacun sous une tension de 50 volts environ, en absorbant 300 chevaux, à la vitesse angulaire de 150 tours par minute. Le diamètre extérieur de l'induit est de 1,894 m et son diamètre intérieur de 1,764 m. L'épaisseur totale du noyau annulaire, parallèlement à l'arbre, est de

38 centimètres. Sur tout le pourtour de la périphérie interne dudit noyau sont percés 96 trous circulaires de 33 millimètres de diamètre, écartés l'un de l'autre de 60 millimètres. Chacun de ces trous est garni d'un tube d'amiante à l'intérieur duquel passe une tige massive en cuivre de 29 millimètres de diamètre. Le noyau annulaire, formé de segments de tôle estampés, est monté sur un robuste bâti en fonte. L'enroulement, si on peut ainsi l'appeler, est composé de trois zigzags indépendants, de 32 conducteurs chacun, connectés dans l'ordre ternaire suivant :

Groupe A,	1, 4, 7, 10.	91,94
Groupe B,	93, 92, 89, 86.	5,2
Groupe C,	93, 90, 87, 84.	3,96.

Les extrémités des numéros 94, 2, 96, sont reliées à une jonction commune J (Fig. 32), tandis que les numéros 1, 95 et 93 aboutissent respectivement à trois bornes extérieures. On a ainsi

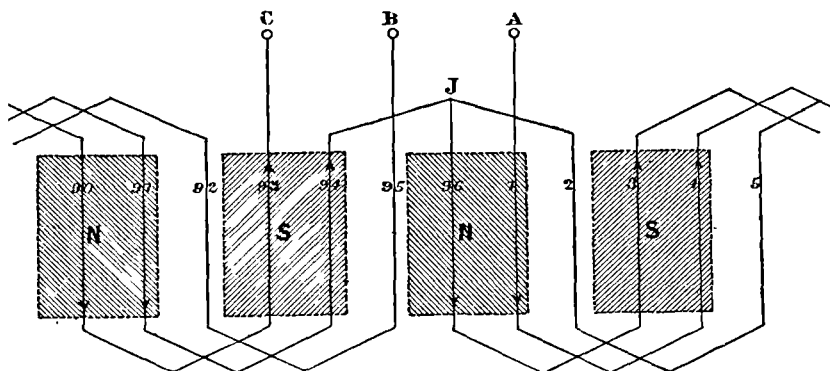


Fig. 32. — Diagramme développé de l'enroulement d'un alternateur triphasé.

un bobinage étoilé (p. 49) ; ces connexions sont indiquées sur la figure 32, et le mode général de couplage sur la figure 33.

L'entrefer qui sépare le noyau d'induit des faces polaires de l'inducteur a 6 millimètres. Celui-ci comporte 32 pôles ; il est d'une grande solidité, en même temps que très simple en ce qu'il ne présente qu'un seul circuit magnétique. La bobine excitatrice en est logée dans une rainure pratiquée à la périphérie

d'une sorte de poulie en fonte, sur laquelle sont boulonnés deux bandages en acier munis chacun de 16 expansions polaires renversées horizontalement qui viennent chevaucher les unes entre les autres. La surface de chacune de ces pièces polaires est de 36 sur 16 centimètres, soit 576 centimètres carrés. La

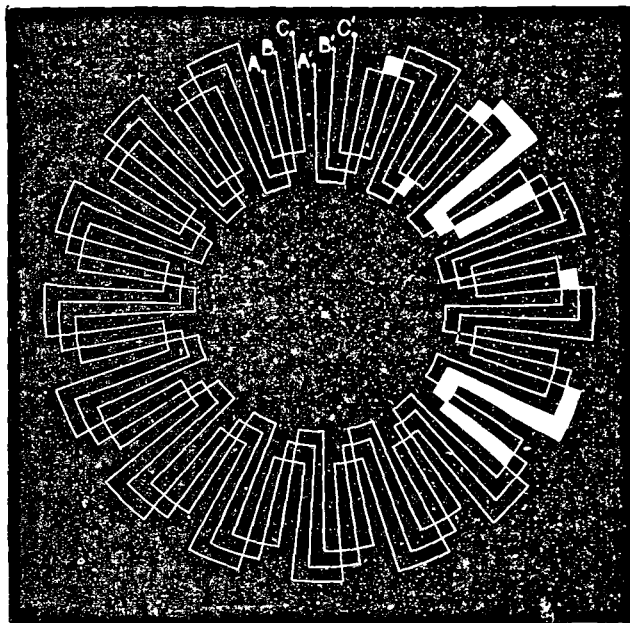


Fig. 33. — Disposition des bobines d'un alternateur triphasé.

rainure a 18 centimètres de large sur 9 centimètres de profondeur ; elle est garnie intérieurement de 496 spires de fil de cuivre de 5 millimètres de diamètre. On voit sur la figure 34 une coupe de cette rainure, et dans la figure 33, les expansions polaires renversées horizontalement vers l'intérieur et constituant des pôles alternativement nord et sud par-dessus la bobine excitatrice. Cette disposition réduit à un minimum le coût de construction et d'excitation. Celle-ci n'absorbe en réalité que 100 watts à vide, ou 0,0005 de la puissance totale de la machine ; et, à pleine charge, quand la réaction d'induit est maxima, cette excitation est

encore bien inférieure à 1 p. 100. Elle est d'ailleurs fournie par une petite dynamo distincte. Le courant d'excitation est amené à l'organe mobile par des cordes métalliques flexibles qui se meuvent sur des poulies isolées et remplacent les bagues ordinaires et les balais de contact. A pleine vitesse et à tension normale, la perte par frottements et par hystérésis est de 3 600 watts, soit moins de 1,7 p. 100 de la puissance maxima ; celle due à la résistance de l'enroulement d'induit est, à pleine

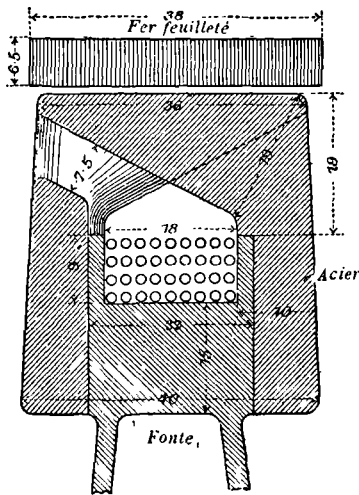


Fig. 34. — Section de l'inducteur de Brown.

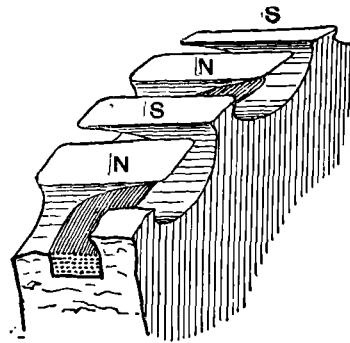


Fig. 35. — Vue partielle en perspective.

charge, de 3 500 watts, ce qui porte à 4 p. 100 environ la perte totale, et le rendement industriel à plus de 95 p. 100. Par suite de l'absence complète de courants parasites, l'échauffement est absolument négligeable. Le poids de la machine est de 4,5 tonnes. Le nombre de paires de pôles étant de 16 et la vitesse angulaire de 150 tours par minute, la fréquence est de 40 périodes par seconde. On peut porter jusqu'à 55 volts la force électromotrice développée dans chacun des trois enroulements et mesurée entre la jonction commune J et la borne extérieure correspondante.

Nous donnons ci-dessous, d'après le professeur H. F. Weber,

quelques-unes des mesures prises sur cette machine par le Jury officiel de l'Exposition de 1891.

PUISSANCE à la turbine, en chevaux.	PUISSANCE électrique fournie par la dynamo, en chevaux.	PUISSANCE perdue, en chevaux.	RENDEMENT, p. 100.	INTENSITÉ dans un seul circuit, en ampères.	TENSION entre jonction commune et bornes, en volts.	VITESSE angulaire, en tours par minute.
87,4	75,1	12,3	88	336	54,7	150
120,1	107,5	12,6	90	470	56,1	150
154,7	142,2	12,5	92	644	54,2	149,7
167,2	154,4	12,8	92,6	677	55,9	149,5

Les épreuves n'ont pas été poussées jusqu'à pleine charge ; mais le Jury a consigné cette observation que, si l'on admet une augmentation des pertes proportionnelle aux chiffres ci-dessus, le rendement, à la charge complète de 300 chevaux, serait de 95,4 p. 100.

Le mode de construction adopté pour l'induit de cette machine est digne d'attention. C'est à M. C. E. L. Brown que revient l'idée de noyer les conducteurs dans des trous pratiqués dans les disques du noyau. Dans presque toutes les machines polyphasées, génératrices ou réceptrices, on trouve aujourd'hui les con-

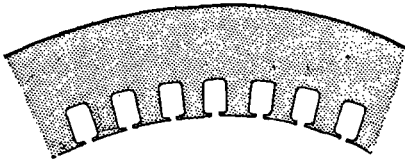


Fig. 36. — Noyau denté.

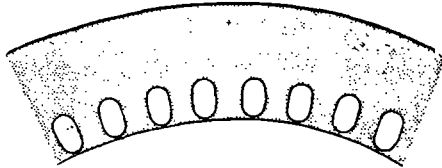


Fig. 37. — Noyau repercé.

ducteurs soit ainsi enfilés dans des trous, soit logés au moins dans des rainures profondes qui dentèlent la périphérie interne du noyau. Les noyaux dentés représentés par la figure 36 sont d'une application presque générale en Amérique pour les dynamos aussi bien que pour les moteurs ; les noyaux reperçés (Fig. 37) sont caractéristiques des machines suisses. Aux ateliers

d'Oerlikon on pratique beaucoup les trous circulaires ; MM. Brown, Boveri et C^{ie}, de Bade (canton d'Aargau), emploient parfois des perforations circulaires ; mais leur véritable type est celui de la figure 37, à trous oblongs de 50 millimètres de long environ sur 20 millimètres de large, avec isolement au moyen d'un tube solide, de section appropriée, fait en papier spécialement préparé.

Le fait de noyer les conducteurs dans le fer offre plusieurs avantages. D'abord la construction mécanique en est améliorée

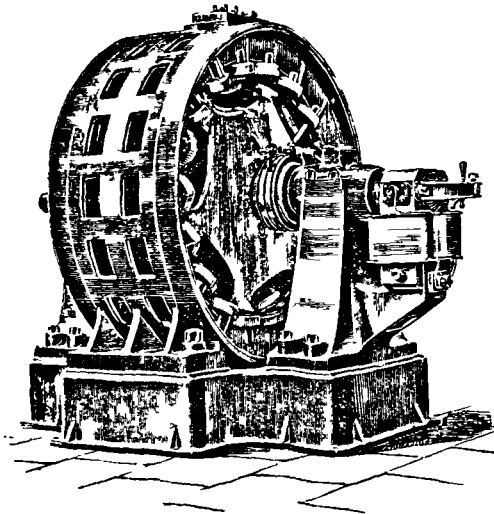


Fig. 38. — Générateur polyphasé des ateliers d'Oerlikon (1894).

en ce que ces conducteurs sont maintenus et entraînés sans aucun frottement. Ils ne sont pas exposés à se déplacer sous l'action de la force centrifuge, et le jeu entre les organes mobile et fixe peut être notablement réduit, ce qui diminue l'excitation nécessaire. Mais ces avantages sont encore peu de chose comparativement aux deux suivants : il ne se développe pas de courants parasites dans des conducteurs ainsi noyés, de sorte qu'ils n'ont pas besoin d'être divisés ni toronnés ; des tiges de cuivre massives suffisent ; il ne s'exerce en outre aucun effort tangentiel, dû au champ magnétique, sur les conducteurs ainsi encastés ; cet effort s'exerce sur le fer et non sur le cuivre.

Alternateurs d'Oerlikon. — La figure 38 donne la vue perspective d'un générateur triphasé plus récent (1894), également construit par les ateliers d'Oerlikon et présentant les mêmes caractères généraux d'inducteur et d'induit, mais avec différentes modifications de détails.

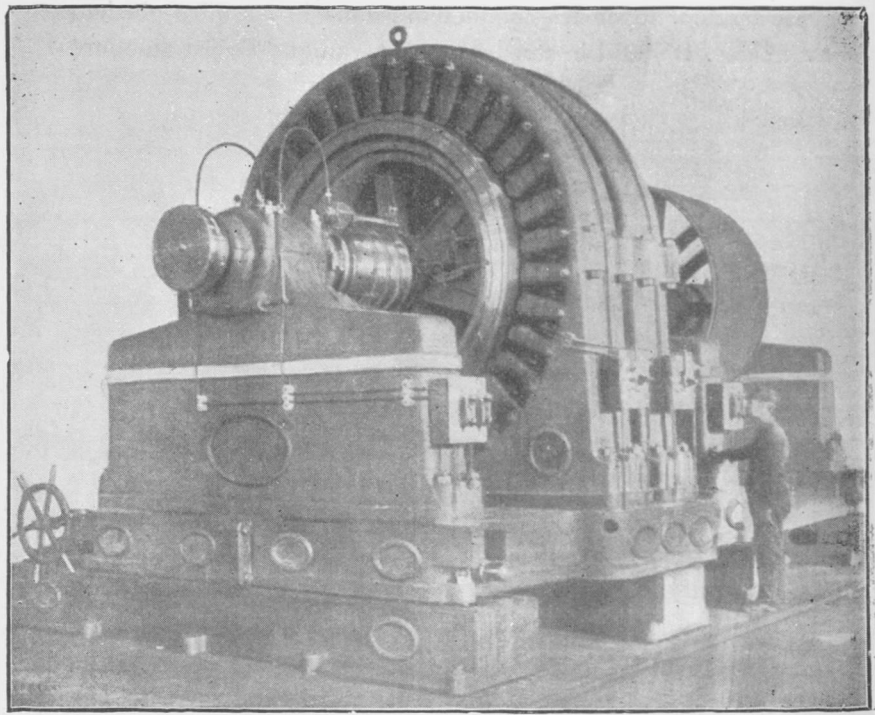


Fig. 39. — Générateur diphasé Westinghouse.

Alternateurs Westinghouse. — Comme second type de générateur polyphasé nous prendrons les grandes machines de 1 000 chevaux exposées à Chicago, en 1893, par la Compagnie Westinghouse, de Pittsburgh. La figure 39 en représente une qu'on pourra utilement comparer à celle de la figure 2. C'est en fait une machine double, dans laquelle sont juxtaposés deux inducteurs identiques entre lesquels sont fixés sur le même arbre deux induits semblables ; mais ces induits sont « décalés », c'est-à-

dire montés de telle sorte que l'un a sur l'autre une avance angulaire égale à la moitié de la largeur angulaire séparant un pôle nord d'un pôle sud. En tordant sur lui-même un des induits, c'est-à-dire en faisant concorder leurs calages sur l'arbre, on pourrait employer la même machine comme alternateur simple. Dans ce cas l'adoption du système diphasé ne correspond à aucune économie d'encombrement ou de matériaux. Ces alternateurs ont une puissance de 750 kw à la vitesse angulaire de 200 tours par minute et une fréquence de 60 périodes par seconde. L'inducteur comprend 36 pôles divisés, en acier doux fondu, solidement encastés dans la culasse extérieure. Chaque induit comporte 36 dents entre lesquelles on introduit et on assujettit fermement les bobines d'induit préalablement enroulées.

Alternateurs Stanley. — Il y a quelques années, M. William Stanley, de Pittsfield (Massachusetts), introduisit sur le marché un alternateur diphasé « à réluctance variable », dans lequel tous les organes enroulés de cuivre, inducteur et induit, sont fixes, le seul élément mobile étant une masse de fer.

Alternateurs Brush-Mordey. — La « Brush Electrical Engineering Company », de Londres, a construit des alternateurs diphasés sur le type bien connu de M. Mordey, sauf les modifications suivantes dans l'induit. Pour produire le décalage de la moitié des bobines sur une largeur égale à celle d'une demi-bobine, on a supprimé deux bobines aux extrémités d'un même diamètre. — Une modification analogue permet de faire fonctionner la machine en triphasé. — Des alternateurs récents de M. Kapp sont susceptibles d'une adaptation identique.

Alternateurs Brown, Boveri et C^{ie}. — Dans ces dernières années, MM. Brown, Boveri et C^{ie}, de Bade, Suisse, ont établi diverses formes d'alternateurs polyphasés sur les dessins de M. C. E. L. Brown, autrefois directeur des Ateliers d'Oerlikon. La plupart de ces machines ne présentent aucun caractère par-

ticulier qui les distingue des alternateurs ordinaires, sauf en ce que leurs bobines d'induit sont groupées en deux ou trois jeux, de manière à correspondre à leur fonctionnement di- ou triphasé.

Récemment M. Brown a adopté une forme de système inducteur mobile à pôles radiaux convergeant vers le centre, avec

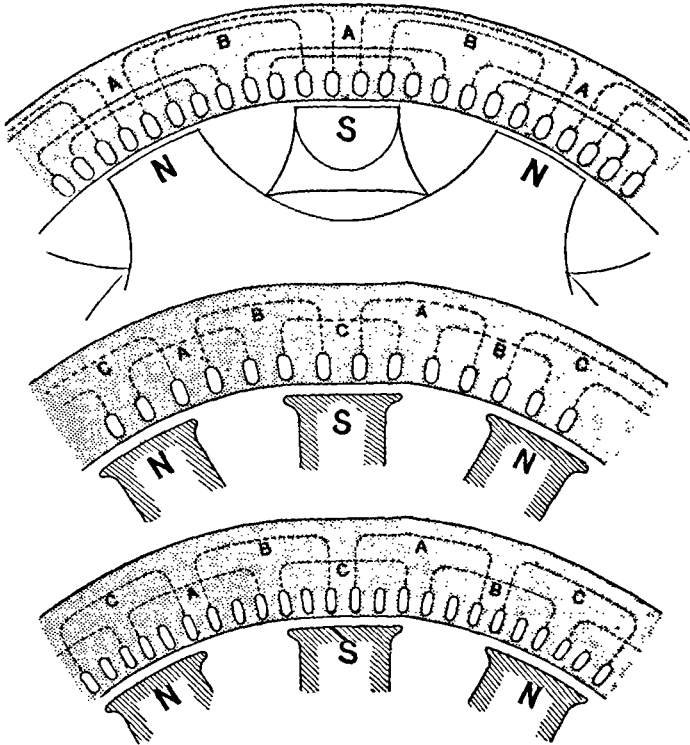


Fig. 40, 41, 42. — Induits d'alternateurs Brown.

cette particularité que les pôles ne sont garnis que de deux en deux de bobines excitatrices ; les pôles intermédiaires sont de simples projections en fonte dont la section droite est plus grande que celle des noyaux cylindriques garnis de bobines.

Dans un autre mode d'enroulement des alternateurs, simples, di- ou triphasés, également dû à M. Brown et applicable aussi bien aux moteurs qu'aux générateurs, les fils de connexion, à leur émergence des noyaux, sont disposés en deux séries situées

dans des plans différents. On en peut voir le montage sur les figures 108 et 173. Bien que ce ne soit là qu'un détail, il a une grande importance au point de vue des risques possibles de courts-circuits. Le développement schématique de ce mode de construction est donné par la figure 40 qui montre comment on peut grouper les deux séries d'enroulements A et B dans un générateur diphasé de manière à utiliser pour chaque imbrication deux jeux de trous percés côte à côte. Il présente certains avantages sur l'emploi de trous uniques de très grandes dimensions qui auraient plus d'influence sur le circuit magnétique et tendraient à échauffer davantage les parties polaires de l'inducteur. En raison de leur profondeur radiale plus grande, ces trous uniques donneraient lieu d'ailleurs à des dérivations magnétiques plus considérables.

La figure 41 indique une adaptation de ce procédé à l'enroulement des générateurs triphasés ; les spires de bobine y sont encore situées dans deux plans différents. Les bobines A y doivent naturellement être reliées en série, bien qu'elles occupent alternativement des positions internes et externes. Il en est de même des bobines B et C (voir Fig. 108).

On voit dans la figure 42 comment on peut utiliser les noyaux pour un générateur (ou un moteur) triphasé avec un enroulement qui n'emploie pas tous les trous. Ce mode de bobinage a été appliqué en vue d'éviter des poinçonnages différents de disques de noyaux. Les réactions magnétiques sont d'ailleurs moindres quand les trous non occupés sont maintenus dans les intervalles que s'ils n'existaient pas.

On doit encore à M. Brown la conception du type de générateur à arbre vertical si merveilleusement approprié à l'attelage direct sur turbine. Un grand nombre de ces machines fonctionne actuellement. L'une d'elles, un générateur triphasé, a fourni pendant des années un excellent travail à Schönenwerd près Aarau, en Suisse, où elle alimentait des moteurs dans une grande fabrique de chaussures. Depuis, on a installé à Aarau une station centrale qui emprunte son énergie primaire aux eaux de l'Aar par l'entremise de turbines.

Ce type de générateur, dit « en parapluie » ou « en cloche », est représenté en perspective par la figure 43. Son organe mobile — ici le système inducteur à nombreux pôles radiaux divergents — est supporté par un manchon à six bras qui tourne avec l'arbre. L'induit extérieur, à noyau repercé, est fixe ; le couplage de son enroulement est formé par des connexions angulaires terminales.

La Compagnie d'Oerlikon a également construit de grands alternateurs du même type pour les stations centrales de Belle-

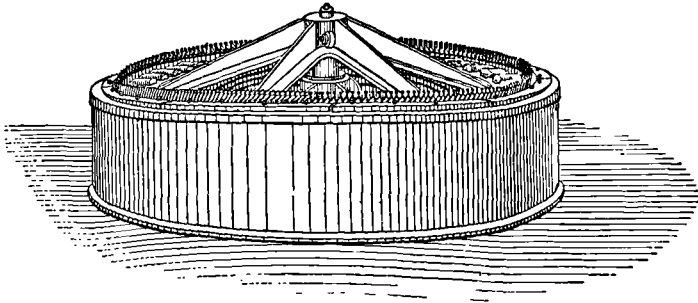


Fig. 43.

garde, de Bremgarten et de Hochfelden. La figure 44 donne une vue perspective de cette dernière station ; on y voit les trois générateurs établis par M. Brown en 1890. Ce sont trois machines triphasées, de 200 chevaux chacune, tournant à 180 tours par minute. Sauf en ce que leurs arbres verticaux sont directement couplés sur les arbres des turbines auxquelles elles sont attelées, elles ressemblent tout à fait à celles de Laufen. Elles donnent 86 volts de différence de potentiel entre leurs bornes. La tension en est relevée sur la ligne par des transformateurs triphasés immergés dans l'huile, dont chacune d'elles est munie et dont l'un est visible à droite de la figure. Sous cette nouvelle tension de 13 000 volts, les courants sont transmis par trois fils de 4 millimètres de diamètre chacun aux ateliers d'Oerlikon distants de 24 kilomètres, où des transformateurs réducteurs de potentiel, de construction identique, ramènent cette

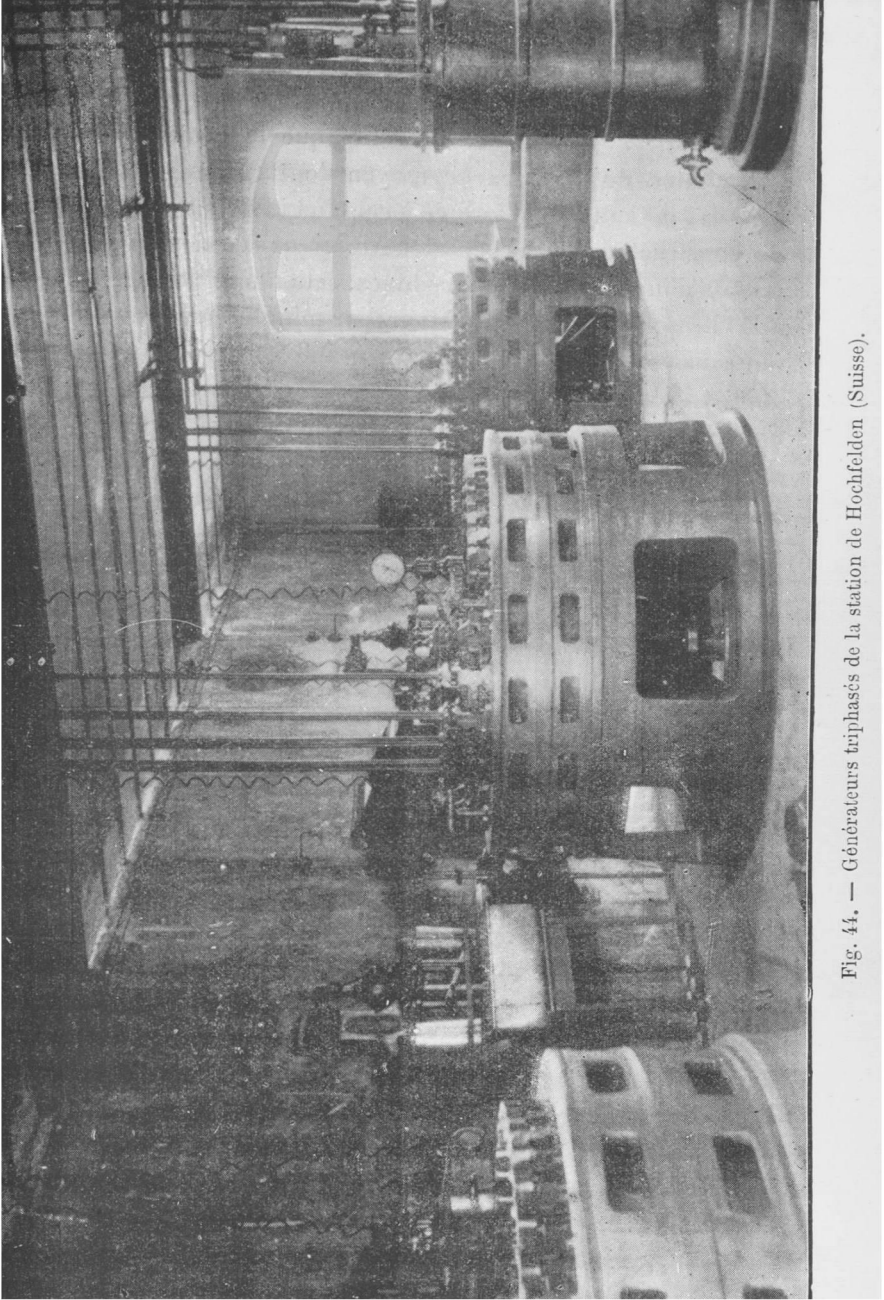


Fig. 44. — Générateurs triphasés de la station de Hochfelden (Suisse).

pression à 190 volts pour la distribution définitive de l'éclairage et de la puissance mécanique.

Alternateurs du Niagara. — Lorsque le projet d'utilisation des chutes du Niagara au moyen de turbines prit un corps sérieux, la Compagnie formée à cet effet invita un grand nombre de constructeurs d'Europe et d'Amérique à lui soumettre des projets d'installation. Les machines, actionnées par des turbines à la vitesse angulaire de 250 tours par minute, devaient avoir une puissance de 5 000 chevaux. Un grand nombre de ces projets était extrêmement remarquable ; on se résolut cependant à employer des machines de construction américaine, en raison du prix du transport et des droits élevés dont sont frappées à l'importation les marchandises étrangères. Quelques-uns des dessins fournis (y compris ceux de M. Brown) étaient du type « cloche » ; mais pour diverses raisons (basées notamment sur les difficultés de construction résultant des dimensions et de la vitesse angulaire imposées), le professeur Forbes et M. Coleman Sellers furent invités, en mai 1893, à élaborer d'autres études d'alternateurs du type indiqué. Le professeur Forbes s'arrêta à un inducteur extérieur mobile, en forme de cloche, avec pôles convergeant vers l'intérieur, maintenus par un anneau extérieur en acier ; cette disposition donnait au système une grande solidité en même temps qu'une grande puissance d'action comme volant. Il commença par étudier une machine diphasée, à 8 pôles, à la fréquence très réduite de 16,66 périodes par seconde. Puis, quand la Compagnie Westinghouse eut été choisie comme maison de construction, on se décida à adopter la fréquence de 25 périodes par seconde avec enroulement d'induit pour 2 000 volts. Les dessins publiés par le professeur Forbes¹ se réfèrent à la première étude et présentent, en ce qui concerne l'induit, certaines complications qui disparaissaient avec l'adoption de 2 000 volts, au lieu de 30 000, comme tension initiale.

¹ *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, novembre 1893

La figure 45 donne une coupe verticale ¹ du type des machines du Niagara telles qu'elles sont établies. Son inducteur extérieur mobile se compose d'un anneau en acier forgé, à l'intérieur duquel sont boulonnés douze noyaux polaires en fonte convergeant vers le centre, et relié à l'arbre vertical par un manchon à six bras en acier fondu. L'arbre traverse en haut un coussinet de bronze soutenu par quatre bras rayonnant eux-mêmes à l'in-

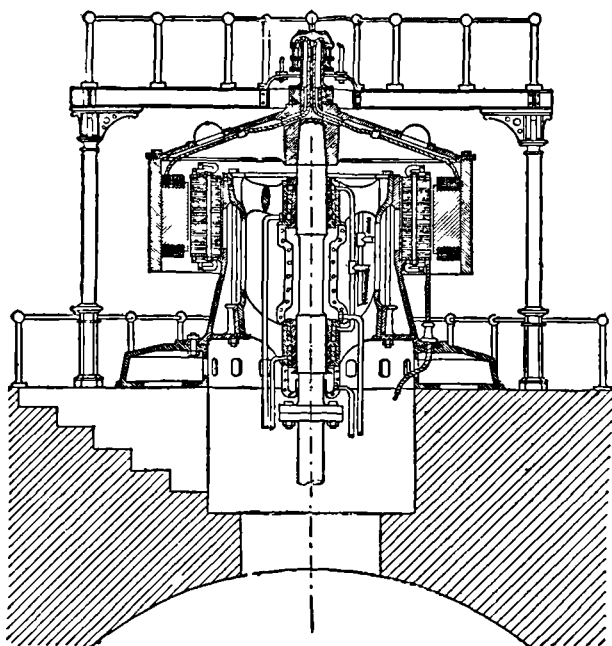


Fig. 45. — Section d'un alternateur du Niagara de 5 000 chevaux.

térieur d'un anneau de fonte. Ce dernier, tout en étant réglable à volonté, est fixé dans un revêtement cylindrique en fonte qui repose sur la plaque de fondation circulaire et porte l'induit fixe intérieur. Le noyau de ce dernier est formé de segments de disques en tôle mince, reliés ensemble par huit boulons d'acier au nickel. 187 gorges ou rainures sont pratiquées à la surface

¹ D'après l'*Electrical Engineer* (N. Y.) du 16 janvier 1895.

extérieure du noyau pour recevoir les conducteurs de cuivre, qui, au nombre de 384, sont de section rectangulaire de 32 sur 8 millimètres. Chaque gorge entre les dents de l'induit porte deux barres semblables montées côte à côte. L'isolement est fait au mica et les liaisons sont établies en deux circuits indépendants par des connecteurs terminaux recourbés. La tension réelle, à la vitesse angulaire de 250 tours par minute, est de

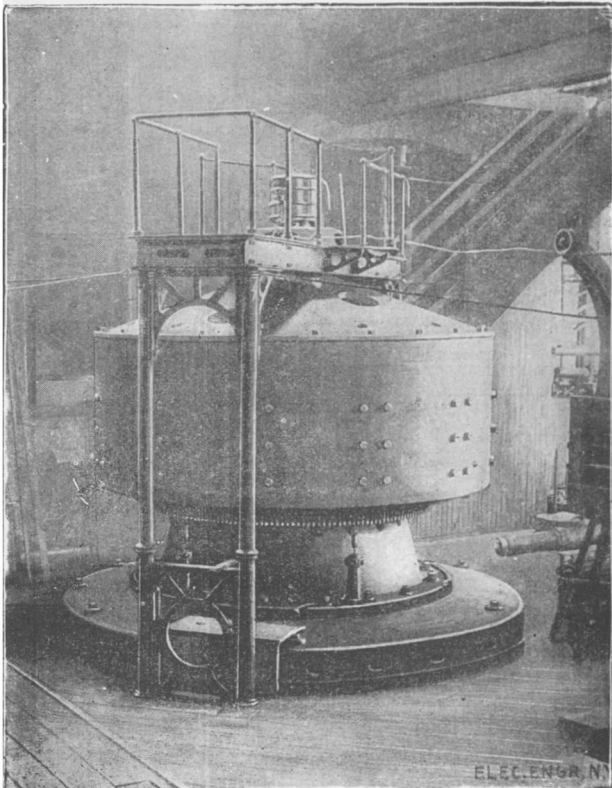


Fig. 46. — Générateur du Niagara vu en perspective.

2250 volts, et le débit dans chacun des deux circuits, de 775 ampères. Avec douze pôles cette vitesse angulaire correspond à 25 périodes par seconde. L'enroulement inducteur reçoit un courant continu (issu d'un transformateur rotatif) par l'entre-

mise de deux bagues de contact fixées au haut de l'arbre. La figure 46 donne une vue extérieure de l'une de ces machines. La hauteur totale est de 4 mètres environ.

Générateurs de Strasbourg. — Les générateurs triphasés récemment construits par l'Allgemeine Gesellschaft, de Berlin, pour la ville de Strasbourg sont du type à réluctance variable, à éléments électriques (cuivre) fixes.

Générateurs asynchrones. — Divers expérimentateurs, et parmi eux M. Brown et les ingénieurs de la General Electric Company, de Schenectady (Etat de New-York), ont reconnu que les moteurs asynchrones, polyphasés ou non, peuvent fonctionner comme générateurs à la condition d'être mécaniquement actionnés à une vitesse un peu plus élevée que celle du synchronisme (voir p. 164). Mais il est impossible d'alimenter un circuit uniquement avec une de ces machines employée comme génératrice ; elle n'est pas auto-excitatrice. Il faut un courant alternatif ou polyphasé préalablement fourni aux conducteurs principaux ou aux bornes. Il serait probablement avantageux, dans les stations centrales où la charge est susceptible de très brusques accroissements, d'employer un ou plusieurs générateurs asynchrones en même temps que d'autres alternateurs, en faisant tourner le générateur asynchrone comme moteur sans charge à une vitesse angulaire juste au-dessous de celle du synchronisme jusqu'à ce qu'on en ait besoin. Par simple accélération de la vitesse du moteur qui l'actionne (sans attendre le synchronisme), il commencera à fonctionner comme générateur, ses pulsations électromotrices se synchronisant parfaitement avec celles du circuit, bien que sa vitesse ne soit pas synchrone.

Dans les expériences effectuées en Suède ¹ par M. Daniel-

¹ *Electrical World* (N. Y.), janvier 1893, p. 44 ; *Electrical Review*, XXXII, p. 169, février 1893.

son, en 1893, on a couplé un moteur triphasé asynchrone avec un générateur triphasé synchrone. En entraînant alors le premier comme générateur et en employant le second comme moteur agissant sur un frein, on a reconnu que la machine asynchrone ne fournissait pas de courant si le circuit ne renfermait que des résistances (lampes) ou une résistance à self-induction.

CHAPITRE II

COMBINAISONS POLYPHASÉES

C'est seulement après que l'idée de combiner des courants de phases différentes pour l'entraînement des moteurs se fut développée qu'on imagina les moyens de monter en des systèmes réguliers les groupes distincts de bobines dans lesquelles se produisait cette induction en discordance de phases. On a généralement envisagé la combinaison de courants di- ou triphasés par rapport aux moteurs ; on peut cependant l'étudier utilement aussi en ce qui concerne les générateurs.

Il existe, pour les circuits polyphasés, deux modes généraux de combinaison que l'on peut caractériser sous les noms res-

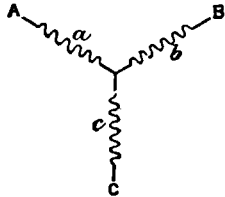


Fig. 47. — Montage en étoile.

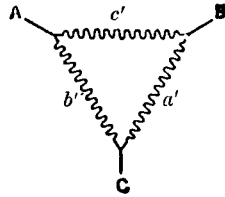


Fig. 48. — Montage en triangle.

pectifs de *montage en étoile* et de *montage en triangle*. Dans le montage en étoile, les bobines dans lesquelles il est engendré ou absorbé de la puissance sont reliées à une jonction commune d'où elles partent en rayonnant chacune sur une ligne particulière. On peut donner à la comparaison entre les deux systèmes une forme plus concrète en envisageant le cas d'un système triphasé. La figure 47 représente schématiquement le montage en étoile de trois bobines a , b et c destinées à recevoir

des courants dans un ordre régulier successif tel que le courant arrive au centre de figure, d'abord par a (pour s'écouler ensuite par l'une des deux autres bobines ou par les deux), puis par b et ensuite par c . La figure 48 au contraire montre trois bobines a' , b' et c' montées en triangle, ce triangle fermé étant relié aux circuits extérieurs par ses angles.

On peut également réaliser d'autres montages plus com-

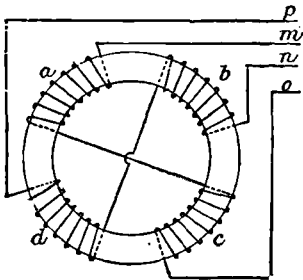


Fig. 49. — Système diphasé à enroulements indépendants.

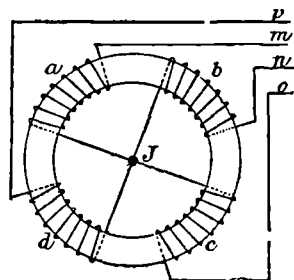


Fig. 50. — Système diphasé étoilé.

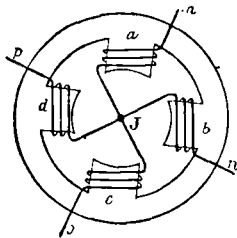


Fig. 51. — Système diphasé étoilé.

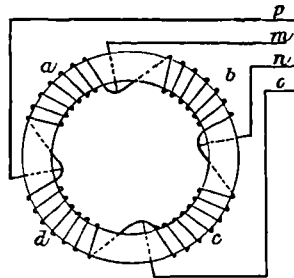


Fig. 52. — Système diphasé triangulaire.

plexes dans lesquels se trouvent réunis simultanément les deux dispositions typiques. On en voit une combinaison dans la figure 60, page 55.

Un simple système diphasé permettant de considérer séparément les divers montages possibles en fournit une autre illustration.

1. Enroulements indépendants. — Les bobines du généra-

teur qui sont en concordance de phase peuvent être reliées entre elles par l'une quelconque des méthodes employées dans les machines ordinaires, tandis que les autres bobines, en concordance de phase entre elles mais en discordance de phase par rapport aux deux premières, seront connectées de même. On aura ainsi deux circuits complètement indépendants, comme dans la figure 49 où les bobines *a* et *c* appartiennent à un même circuit et sont reliées aux lignes *m* et *o*, tandis que les bobines *b* et *d* constituent avec les lignes *n* et *p* un autre circuit absolument distinct.

2. *Montage étoilé.* — Les bobines ou groupes de bobines peuvent être reliés par une de leurs extrémités à une jonction commune *J* et former ainsi une étoile, leurs bornes libres aboutissant aux fils de ligne, comme on le voit sur les figures 50 et 51. La première représente les bobines enroulées sur un anneau, tandis que, dans la figure 51, elles sont enroulées sur des projections polaires. Elles sont différentes au point de vue magnétique ; mais, en ce qui concerne les circuits seuls, elles sont identiques.

3. *Montage en triangle.* — Les bobines peuvent être toutes connectées entre elles de manière à former un circuit fermé ; les fils de ligne sont alors fixés aux points de jonction des bobines, comme dans la figure 52, qui n'est qu'un anneau Gramme ordinaire à quatre sections, mais dont les connexions sont reliées à quatre lignes, au lieu de correspondre à un commutateur à quatre segments.

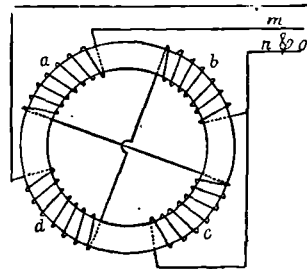


Fig. 53. — Système diphasé à enroulements indépendants et à trois fils de ligne.

4. *Variété du cas 1.* — Tout en laissant les bobines indépendantes, on peut relier ensemble deux des bornes en discordance de phases et n'employer qu'un seul fil de retour, comme

dans la figure 53, ce qui réduit à trois, au lieu de quatre, les fils de ligne.

COMBINAISON DES FORCES ÉLECTROMOTRICES

Il faut voir comment, dans chacun des cas précédents, les forces électromotrices des bobines individuelles se combinent entre elles et l'effet de leurs combinaisons sur les différences de potentiel entre les fils de ligne. Admettons que la force électromotrice de la bobine a obéisse à la loi $E_{\max} \sin \omega t$, dans laquelle E_{\max} est sa valeur maxima atteinte dans chaque période et calculée sur les bases antérieurement exposées (voir p. 9 et 29).

Systèmes diphasés. — Si les bobines sont reliées entre elles de façon indépendante, comme dans la figure 49, ou en un montage étoilé tel que celui de la figure 50, la différence de potentiel entre les bornes m et o sera $2 E_{\max} \sin \omega t$. Dans le cas du montage en étoile, il existe également une tension de $\sqrt{2} E_{\max} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{4} \right)$ entre les bornes m et n ; c'est-à-dire que la tension entre les deux fils de ligne en discordance de phases est égale à 1,4 fois la tension aux bornes de l'une des bobines et se trouve en avance d'un huitième de période sur la bobine précédente.

Si les bobines sont reliées en triangle, comme dans la figure 52, la différence de potentiel entre m et p est naturellement celle développée en a , c'est-à-dire $E_{\max} \sin \omega t$, tandis que la tension entre n et p suit la loi $\sqrt{2} E_{\max} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{4} \right)$; autrement dit, elle est égale à 1,4 fois la tension aux bornes d'une bobine et en phase intermédiaire avec les bobines a et b .

Quand on se sert d'un retour commun la différence de potentiel entre chaque fil de départ et le fil de retour est simplement le double de la différence de potentiel entre les extrémités d'une bobine; mais la différence de potentiel entre les deux fils

de départ est égale à 1,4 fois cette dernière, soit $2\sqrt{2} E_{\max} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right)$.

Systèmes triphasés. — Pour trouver comment varie la différence de potentiel entre les fils de ligne d'un système triphasé quand les bobines du générateur sont montées en étoile, considérons la figure 54. Nous pouvons, comme précédemment,

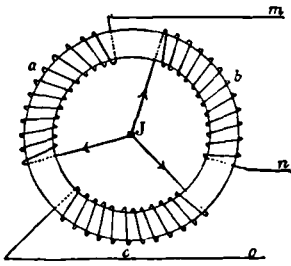


Fig. 54. — Système triphasé étoilé.

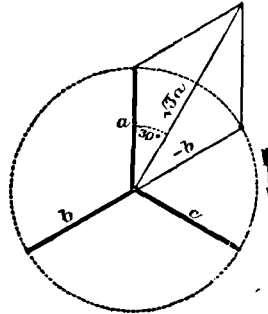


Fig. 55. — Système triphasé étoilé. Diagramme tournant.

prendre pour point de départ la bobine *a*, aux bornes de laquelle la différence de potentiel est $E_{\max} \sin \omega t$. Considérons comme positive la force électromotrice qui agit à partir de la jonction commune ; celle en *b* est $E_{\max} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$.

La différence de potentiel entre *m* et *n* est égale aux différences des tensions en *a* et *b*, ou $E_{\max} \sin \omega t - E_{\max} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) = \sqrt{3} E_{\max} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)$.

Exemple. — Si $E_{\max} = 141$ volts, la force électromotrice efficace développée par *a* est de 100 volts. La différence de potentiel entre les lignes *m* et *n* sera de $\sqrt{3} \times 100 = 173$ volts, et cette tension aura sur *a* une avance de phase de $\frac{\pi}{6}$.

Le diagramme tournant de la figure 55 montre clairement ce qui se passe. Les lignes *a*, *b* et *c* représentent les forces électromotrices dans les bobines correspondantes. Retrancher *b* revient à la représenter en sens inverse, comme on le

voit en $-b$, et, en complétant alors le parallélogramme des forces, on obtient la force électromotrice résultante en avance sur a de $\frac{\pi}{6}$ et de valeur $\sqrt{3}$ fois aussi grande.

Si les bobines d'un système triphasé sont reliées en triangle, comme dans la figure 56, la différence de potentiel entre o et m est simplement égale à la force électromotrice développée en a .

Un générateur ou un moteur triphasé n'est généralement pas

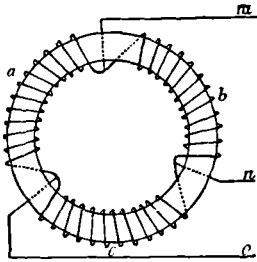


Fig. 56. — Système triphasé triangulaire à 3 bobines.

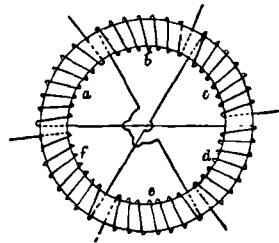


Fig. 57. — Système triphasé triangulaire à 6 bobines.

constitué par le simple montage de trois bobines comme celles de la figure 54. Il peut exister six bobines ou six groupes de bobines, comme dans la figure 57; les paires de bobines opposées, dans lesquelles les courants sont de phase opposée, sont reliées en série de manière à agir comme une seule bobine de force électromotrice double.

La figure 57 n'est en somme que la représentation schématique de la disposition des bobines de la figure 22; seulement ces dernières y sont réparties sur une circonférence entière, au lieu de sous-tendre simplement l'intervalle séparant un pôle N de son voisin. Les bobines étant connectées deux à deux, on n'a en réalité que trois bobines. En les prenant par ordre

$$\begin{aligned} a + d \\ c + f \\ e + b, \end{aligned}$$

on voit que chaque paire est à une distance angulaire de 120° des autres. On peut en conséquence les traiter comme les trois

bobines de la figure 54 ; autrement dit, on peut les coupler soit en étoile, comme dans la figure 58, auquel cas la différence de potentiel entre *m* et *o* sera $2\sqrt{3} E_{\max} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right)$, soit en triangle, comme dans la figure 59, ce qui donnera pour la différence de potentiel entre *k* et *s* $2 E_{\max} \sin \omega t$.

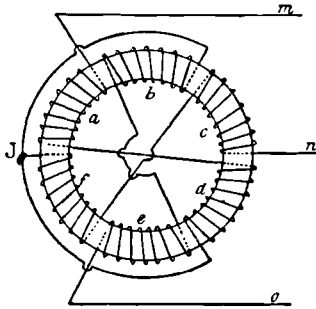


Fig. 58. — Système triphasé. Couplage en étoile à 6 bobines.

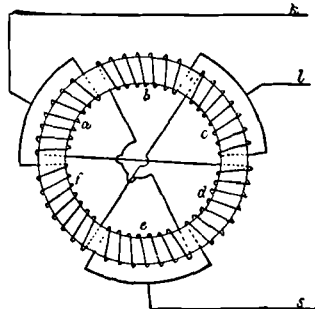


Fig. 59. — Système triphasé. Couplage en triangle à 6 bobines.

On voit sur la figure 60 une combinaison des deux montages, en étoile et en triangle, et, sur la figure 61, les connexions correspondantes pour six bobines dextrorsum roulées sur un anneau. Dans ce cas, la différence de potentiel entre deux

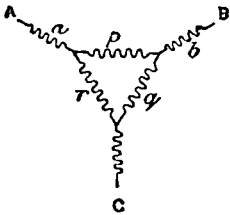


Fig. 60. — Système triphasé, montage en triangle étoilé.

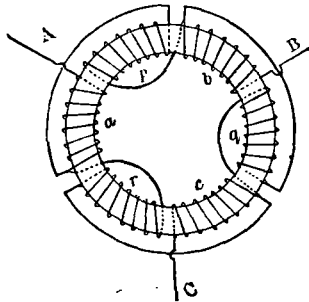


Fig. 61. — Système triphasé à 6 bobines couplées en triangle étoilé.

bornes quelconques, A et B, par exemple, sera régie par la loi $2 E_{\max} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{3} \right)$, la force électromotrice en *a* étant $E_{\max} \sin \omega t$.

Ces combinaisons ont été imaginées par Dobrowolski en vue d'obtenir dans un moteur, aux divers points de sa rotation, un couple plus uniforme que ne le permettraient trois bobines simplement triphasées.

COMBINAISON DES COURANTS

Il y a lieu de considérer aussi les valeurs relatives du courant dans les divers conducteurs d'un système polyphasé reliés en étoile ou en triangle. Nous énoncerons tout d'abord quelques règles générales utiles à la détermination de ces valeurs dans un montage quelconque.

1. Quand un nombre quelconque de fils se réunissent en un point commun, la somme algébrique des valeurs instantanées de tous les courants qui les parcourent est égale à zéro, le sens de chacun d'eux étant pris comme positif, par exemple, quand il s'éloigne du point de jonction.

2. Dans le cas des courants alternatifs, cette règle n'est applicable qu'aux valeurs instantanées et non pas aux valeurs efficaces des courants, à moins qu'ils ne soient tous en concordance de phase.

3. Quand deux courants en discordance de phase se rencontrent dans un conducteur commun, on peut trouver leur résultante au moyen de la méthode donnée dans la figure 29, où OP et OQ peuvent être pris pour les deux courants, et OR pour leur résultante. On peut encore recourir à la formule suivante qui découle immédiatement de la construction : — Si $i_a \sin(\omega t + \varphi')$ est l'un des courants, et $i_b \sin(\omega t + \varphi'')$, l'autre, leur somme est alors $\sqrt{i_a^2 + i_b^2 + 2i_a i_b \cos(\varphi'' - \varphi')} \sin(\omega t + \varphi''')$, dans laquelle on a

$$\text{tang } \varphi''' = \frac{i_a \sin \varphi' + i_b \sin \varphi''}{i_a \cos \varphi' + i_b \cos \varphi''}.$$

4. Il est nécessaire de se conformer strictement à une notation quelconque indiquant les sens considérés comme positif et

négatif. Si, par exemple, il s'agit d'un montage en étoile dans un générateur, il sera commode de prendre comme sens positif celui qui a pour origine la jonction commune, et dès lors le sens positif dans les fils de ligne sera celui qui ira du générateur aux lampes ou aux moteurs. Dans un montage en triangle, on pourra prendre comme positif le sens de rotation des aiguilles d'une montre autour du triangle.

Dans l'application de ces règles à la détermination des valeurs relatives et des phases de courant dans un système quelconque, on remarquera tout d'abord que les courants dépendent des impédances des divers circuits. On ne peut en conséquence poser de règles générales que pour un système symétrique symétriquement chargé.

Si donc on prend un générateur diphasé, à montage en triangle, dont les deux circuits sont également chargés, le courant dans la ligne m (Fig. 52) sera la somme, à chaque instant, des courants circulant dans les bobines a et b . Si le courant en a est $I \sin \omega t$ et celui en b $I \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$, le sens positif du courant en t étant celui qui s'éloigne de la jonction, on devra écrire :

$$I \sin \omega t - I \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right),$$

d'où l'on lire pour le courant en m :

$$\sqrt{2} I \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{4} \right).$$

Dans le cas de bobinages étoilés et indépendants, les courants dans les bobines sont nécessairement les mêmes que dans les fils de ligne.

Quand, dans un système diphasé, on fait usage d'un fil de retour, comme dans la figure 49, bien que la charge sur chacune des phases puisse être la même, la différence de phase entre les deux courants augmente un peu au delà d'un quart de période, c'est-à-dire que le courant dans la phase d'avant atteint son maximum un peu plus tôt que si les courants étaient indé-

pendants, et l'autre courant arrive un peu plus tard à son maximum; mais on peut rendre aussi faible que l'on veut cet écart de décalage par rapport au quart de la période en diminuant la résistance de la ligne. Même dans une ligne absorbant 15 p. 100 de la puissance totale, la différence de phase n'augmente que de $\frac{\pi}{30}$ environ¹, de sorte que, pour les besoins de la pratique, on peut combiner les courants comme dans le cas ci-dessus du montage en triangle, et dire que l'intensité dans le fil de retour est $\sqrt{2}$ ou 1,4 fois égale à celles des autres fils et intermédiaire entre elles comme phase.

On peut combiner les courants dans les bobines d'un générateur triphasé montées en triangle de la même manière que dans un générateur diphasé.

On a d'après la figure 53, page 53

$$\sin \omega t - \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) = \sqrt{3} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right).$$

C'est-à-dire que le courant du fil de ligne est $\sqrt{3}$ ou 1,73 fois celui qui parcourt les bobines. En comparant ces résultats avec ceux obtenus pour les forces électromotrices, on voit que, dans le montage en étoile, la différence de potentiel entre les fils de ligne est supérieure à la différence de potentiel aux bornes des bobines et que l'intensité reste la même, tandis que, avec le montage en triangle, l'intensité dans le fil de ligne est plus grande que dans les bobines, mais qu'ici la force électromotrice reste la même.

GROUPEMENT DES LAMPES DANS UN SYSTÈME POLYPHASÉ

Les divers modes de groupement des lampes dans les circuits polyphasés permettent d'illustrer les principes précédents.

Lampes sur circuit diphasé. — Supposons un générateur G

¹ Rodet et Busquet. *Les courants polyphasés*, p. 19.

(Fig. 62), fournissant deux courants en quadrature; on peut affecter ces courants, comme dans la figure, à l'alimentation distincte de deux groupes de lampes, tandis que, pour actionner des moteurs, on peut faire travailler les quatre fils. Mais, ainsi qu'on l'a fait ressortir précédemment, on n'a besoin que de

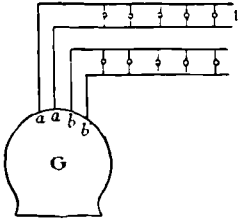


Fig. 62. — Lamps sur circuit diphasé à 4 fils.

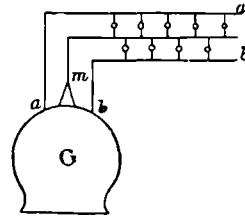


Fig. 63. — Lamps sur circuit diphasé à 3 fils.

trois fils, un fil médian m (Fig. 63), servant de retour commun. Si les deux circuits doivent porter des nombres égaux de lampes, il faut donner au fil médian une section plus forte qu'aux fils extérieurs; mais cette section n'a pas besoin d'être double, en raison du décalage des courants, puisque l'intensité maxima dans ce fil médian ne sera que $\sqrt{2}$ fois égale à celle des autres fils. La différence de potentiel entre a et b ne sera pas non plus double de celle entre a et m ou entre b et m , mais seulement $\sqrt{2}$ fois aussi grande. Par le fait, si les lampes alimentées par les deux circuits étaient des lampes de 70 volts, on pourrait en ajouter une troisième série de 100 volts reliée aux fils a et b .

On peut monter un système triangulaire de lampes, comme dans la figure 64, avec quatre fils de ligne. Dans ce cas, les lampes en question étant de 100 volts, la différence de potentiel entre a et a' serait de 141,4 volts, de même qu'entre b et b' . Avec des nombres égaux de lampes, l'intensité dans l'un quelconque des quatre fils de ligne sera 1,41 fois celle nécessaire à l'une quelconque des séries de lampes.

Si les lampes sont montées en étoile, comme dans la figure 65, il y aura avantage à relier à la terre (c'est-à-dire à un

fil commun qui n'a pas besoin d'être isolé) la jonction commune J , à la condition que les bobines du générateur soient aussi montées en étoile, de manière à pouvoir être également mises à la terre. Cette disposition revient, par le fait, à

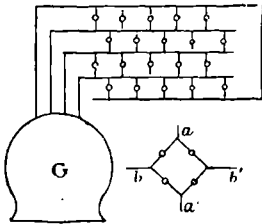


Fig. 64. — Lamps sur circuit diphasé triangulaire à 4 fils.

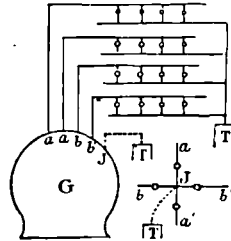


Fig. 65. — Lamps sur circuit diphasé étoilé à 4 fils.

un système à quatre fils dans lequel les phases seraient deux à deux en concordance. Si les lampes sont de 100 volts, il doit y avoir 200 volts de a en a' ou de b en b' , et il y en aura 141,4 de a ou a' à b ou b' .

Lamps sur circuit triphasé. — Les figures 66 et 67 représentent des circuits triphasés analogues aux deux systèmes diphasés mentionnés en dernier lieu. La figure 66 donne un

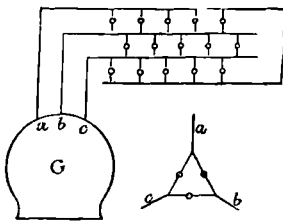


Fig. 66. — Lamps sur circuit triphasé triangulaire.

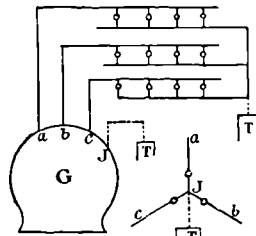


Fig. 67. — Lamps sur circuit triphasé étoilé.

montage en triangle. A nombres égaux de lampes dans les trois groupes, l'intensité dans l'un quelconque des trois fils de ligne sera égale à 1,73 fois celle nécessaire à une série quelconque de lampes.

De même, si les lampes sont montées en étoile, on peut

mettre à la terre (Fig. 67) le centre de figure, pourvu qu'il en soit de même du point correspondant du générateur (ou du transformateur). C'est ce qui a été fait pour les lampes de Francfort lors du transport triphasé de Lauffen en 1891, et ce qui existe encore dans la distribution d'Heilbronn (p. 246). Si les lampes sont de 100 volts, la différence de potentiel entre deux quelconques des trois circuits sera de 173 volts.

Aucun des modes de montage, en étoile ou en triangle, n'assure par lui-même l'indépendance absolue des divers circuits parallèles de lampes, bien que, en somme, les systèmes étoilés la réalisent plus approximativement. Quand on éteint ou qu'on allume des lampes dans un groupe quelconque, la tension des autres en est plus ou moins affectée; mais l'emploi du fil de retour commun au centre de l'étoile diminue notablement cet effet.

Parmi les curiosités du fonctionnement polyphasé on peut mentionner les lampes à incandescence à trois filaments réunis en un même point, avec trois bornes extérieures; les premières ont été montrées en 1891 par Dobrowolski. La Compagnie Edison-Swan en a construit d'autres à trois spires pour la communication faite par l'Auteur à la Royal Institution en février 1894. A la même occasion il a été produit un foyer à arc triphasé avec trois charbons rayonnant à 120° les uns des autres. L'arc ou la flamme présentait un mouvement gyrateur.

ÉCONOMIE DE CUIVRE

On a fait valoir au profit de l'adoption des systèmes polyphasés, comparativement aux systèmes à courants alternatifs ordinaires, l'économie réalisée dans le poids total de cuivre nécessaire au transport d'une puissance donnée à une distance déterminée. D'une manière générale l'exactitude de cette revendication est hors de question. Le conflit d'opinions auquel elle a donné lieu repose uniquement sur ce que, dans la discus-

sion, on n'a pas pris comme base le même criterium. L'économie de cuivre, qui est le facteur le plus important dans le prix d'un transport à grande distance, dépend, comme chacun sait, de la différence de potentiel sous laquelle on emploie le courant, de sorte que la comparaison équitable de différents systèmes comporte comme principe l'emploi d'égales tensions. Mais alors se pose la question de savoir entre quels points du système la comparaison de la différence de potentiel doit être faite.

Il faut se rappeler que, si une tension élevée est le secret de l'économie de cuivre dans un transport et une distribution d'énergie, la différence de potentiel sous laquelle on peut faire fonctionner un système dépend, suivant les cas, de diverses considérations. Dans les systèmes de distribution à basse tension, la différence de potentiel est celle exigée par les lampes à incandescence ; or, comme celles-ci ne sont pas pratiques au-dessus de 100 à 110 volts, cette limite se trouve imposée au système. D'autre part s'il ne s'agit que de distribution de puissance mécanique, et non pas d'éclairage, ou si l'on peut employer des transformateurs, la limite est déterminée par la considération totalement différente de l'isolement sur lequel on peut compter en toute sécurité.

Aussi, faut-il, pour résoudre la question, distinguer nettement les deux systèmes et considérer les mérites respectifs de chacun.

1. Systèmes à haute tension. — Dans tout système à haute tension la difficulté consiste à assurer un isolement qui ne cède pas ; c'est cette considération qui pratiquement limite la tension. Par suite, en comparant les systèmes ordinaire et polyphasés, on devra se placer dans des conditions identiques à cet égard.

Dans le cas des courants alternatifs simples (aussi bien que dans celui des courants continus), on a assez souvent mis une ligne au potentiel de la terre en ayant soin d'isoler l'autre suffisamment eu égard à la différence de potentiel entre les deux lignes. Il est clair qu'ici c'est la tension maxima entre les lignes

qui constitue ce que nous appelons la *tension du système*. Mais si les deux lignes sont individuellement isolées de la terre de manière à supporter en toute sécurité la tension maxima ligne-terre, il peut exister entre ces lignes une différence de potentiel égale au double de cette tension maxima sans risque de rupture de l'isolant, pourvu toujours que les lignes et les circuits respectifs auxquels elles aboutissent soient assez bien isolés l'un de l'autre pour parer à tout danger de ce côté. La question est donc de savoir si, dans la comparaison des avantages des divers systèmes, on prendra comme base la différence de potentiel entre deux lignes quelconques ou entre une ligne et la terre. Si l'on prend comme base de comparaison la différence de potentiel maxima entre un point quelconque de la ligne et la terre, l'emploi de courants polyphasés n'apporte aucune économie de cuivre ; en effet chaque ligne d'un système *quelconque*, portant un certain courant sous la tension maxima possible au-dessus de la terre, peut être considérée comme transportant par suite une certaine puissance ; la puissance totale est, en conséquence, simplement proportionnelle au nombre des fils de ligne, auquel le poids total de cuivre est également proportionnel.

Par exemple, un système triphasé monté en étoile avec jonction commune à la terre, et dans lequel il existe entre chaque ligne et la terre une différence de potentiel de 1 000 volts (et, par suite, 1732 volts de ligne à ligne), ne présente aucun avantage, en ce qui concerne l'isolement de la ligne, sur un système ordinaire dans lequel il y aurait entre chaque ligne et la terre une différence de potentiel de 1 000 volts (soit 2 000 volts de ligne à ligne). Pour transmettre une puissance égale, avec perte identique sur les lignes, il faut donner à chacun des deux fils du système ordinaire un poids égal à une fois et demie celui de chacun des trois fils du système triphasé ; les deux systèmes exigeront donc des quantités totales de cuivre égales.

Mais si, au contraire, on prend comme base de comparaison la différence de potentiel maxima entre deux lignes quelconques, on équilibre alors non plus les risques de rupture d'isolement des lignes, mais les risques de rupture d'isolement des appareils,

machines, transformateurs, etc., dans lesquels la qualité de l'isolement doit être considérée comme égale. Dès lors, sur ce terme de comparaison il y a réellement économie de cuivre à employer des courants triphasés, comme on peut le voir à l'aide des considérations suivantes.

Prenons d'abord une installation en triangle (Fig. 56, p. 54). Si la distribution est symétrique, le courant i_a dans une des branches du triangle (Fig. 162, p. 212) est $\frac{1}{\sqrt{3}}$ du courant i_b dans la ligne (voir p. 58). Par suite, la puissance absorbée dans une des branches est $\frac{1}{\sqrt{3}} i_b U$, U étant la différence de potentiel entre les lignes (i_b et U sont censées exprimées en ampères et en volts efficaces). La puissance totale est donc $\sqrt{3} i_b U$. — Si l'on prend un montage en étoile, la différence de potentiel entre les extrémités de l'une des branches de l'étoile est $\frac{1}{\sqrt{3}} U$, et l'intensité dans chaque branche est la même que celle de la ligne. La puissance totale est donc encore, comme précédemment, $\sqrt{3} i_b U$. Soit r la résistance d'une des lignes ; la perte totale de puissance dans les trois lignes sera $3 r i_b^2$.

Considérons maintenant un système ordinaire destiné à transporter la même puissance $\sqrt{3} i_b U$. Soit x la résistance d'une ligne, telle qu'on ait la même perte $3 r i_b^2$. La résistance totale des deux lignes sera $2x$; l'intensité, $\sqrt{3} i_b$, et la perte $6 i_b^2 x$; d'où $6 i_b^2 x = 3 i_b^2 r$, ou $x = \frac{1}{2} r$. La résistance de l'une des deux lignes à courants ordinaires ne devra donc être que la moitié de celle de l'une des trois lignes triphasées. En d'autres termes, le système ordinaire exige deux fils ayant chacun une section double de celle de chacun des trois fils du système triphasé, et le poids de cuivre exigé par ce dernier n'est que les trois quarts de celui exigé par un système ordinaire quelconque.

Un système diphasé à quatre fils marche exactement de pair avec un système ordinaire, en ce qui touche l'économie de cuivre.

Mais si, dans un système diphasé, on n'emploie que trois fils, dont l'un fonctionne comme retour commun, la différence de potentiel entre les deux lignes de départ est d'environ $\sqrt{2}$ fois la

tension U entre chaque ligne et le fil commun ; la tension du système doit en conséquence être regardée comme égale à $\sqrt{2}U$, et il faut dans ce cas plus de cuivre que pour une transmission alternative ordinaire à $\sqrt{2}U$ volts.

2. Systèmes à basse tension. — Ici la tension est subordonnée aux exigences des lampes à incandescence. Ce que l'on cherche, c'est le transport de la puissance sous différence de potentiel entre les lignes aussi élevée que possible, concurremment avec le maintien exact de la différence de potentiel voulue aux bornes des lampes. Nous laisserons de côté pour l'instant les modes de distribution dits à trois et cinq fils, dans lesquels sont employés des fils de compensation, et, en comparant le système triphasé à trois fils au système alternatif ordinaire à deux fils, on voit, d'après les considérations de la page 59, que, avec des lampes montées en triangle, le système triphasé a l'avantage de ne demander que 75 p. 100 du cuivre exigé par le système alternatif simple. Si les lampes sont montées en étoile, la différence de potentiel entre les lignes est $\sqrt{3}$ fois celle aux lampes, avec cette conséquence que le cuivre nécessaire est seulement le quart de celui que comporte un système ordinaire à deux fils ; mais le réglage du système exige un fil de retour relié à la jonction commune et est ainsi comparable à un système alternatif ordinaire plutôt à trois fils qu'à deux fils.

M. Goerges, dans un mémoire communiqué à la Société électrotechnique de Berlin et reproduit dans l'*Elektrotechnische Zeitschrift* du 17 janvier 1895, donne les constantes suivantes pour les poids respectifs des conducteurs à égalité de puissance, de perte de charge et de tension :

Courants alternatifs ordinaires à 2 fils	100
Courants alternatifs ordinaires à 3 fils (le troisième fil étant supposé de section moitié de celle des autres) . .	31,35
Courants alternatifs diphasés, 4 fils	100
Courants alternatifs diphasés, 3 fils (la différence de potentiel étant prise entre les lignes et le retour commun) . .	72,8
Courants alternatifs triphasés, 3 fils (triangle)	75
Courants alternatifs, 4 fils (fil neutre partant de la jonction commune)	29,2
THOMPSON. — Courants polyphasés.	5

Une autre manière d'envisager la question consiste à considérer la tension à laquelle il faudrait porter les fils d'un système de manière à pouvoir transporter avec des pertes égales la même puissance, à égalité de poids total de cuivre dans les lignes. Si un système triphasé est monté en étoile avec quatre fils, la différence de potentiel entre l'une quelconque des trois lignes et le fil neutre étant de 1 000 volts par exemple, celle entre les fils d'un système ordinaire devra être de 1 830 volts pour donner le même rendement. On suppose ici que le système est équilibré de manière à ce que le quatrième fil ne laisse passer aucun courant. La différence extrême de potentiel de fil à fil dans le système triphasé ne sera que de 1 732 volts. Si l'on ne fait pas usage d'un quatrième fil dans le système triphasé (ce qui n'est pas nécessaire quand il s'agit uniquement de l'alimentation de moteurs ou de transformateurs), la différence de potentiel du système ordinaire doit, pour donner le même rendement, être portée à 2 000 volts.

COMBINAISON DES CHAMPS MAGNÉTIQUES

Le principal objet du fonctionnement polyphasé est de produire des *champs magnétiques tournants* par suite de la combinaison de champs magnétiques alternatifs dont les phases ne concordent pas. Aussi y a-t-il lieu d'examiner maintenant comment on peut combiner des courants décalés les uns par rapport aux autres en vue de réaliser des champs magnétiques résultants.

On peut partir de ce fait que, si des courants alternatifs simples circulent dans une bobine entourant un noyau, l'aimantation que prend ce noyau est alternative. Si le dit noyau est uniquement formé d'air, autrement dit si l'on n'a affaire qu'à un solénoïde, on aura un *champ alternatif*. S'il est en fer, le *flux* qui y sera développé sera *alternatif*, c'est-à-dire qu'on aura un flux produit dans un sens, croissant jusqu'à un maximum, puis disparaissant pour changer de sens, passer par un maximum inverse

et disparaître de nouveau pour repasser encore par le même cycle, et ainsi de suite. La fréquence de ce flux alternatif sera la même que celle de la force magnétomotrice qui lui donne naissance, c'est-à-dire identique à celle du courant. Si le fer est convenablement divisé et qu'il n'y ait pas d'autres circuits amenant des perturbations par réactions, les ondulations du flux seront pratiquement en concordance de phase avec celles du courant environnant. Au contraire, tout courant parasite dans le noyau et tout courant secondaire induit par le noyau dans des conducteurs voisins auront inévitablement pour effet de retarder la phase du flux magnétique alternatif et de le décaler en arrière. Ces réactions par courants induits dans des circuits secondaires fermés jouent en fait, comme on le verra, un rôle important dans le moteur polyphasé moderne.

Il va de soi que (en l'absence de réactions secondaires) une force magnétisante qui va et vient suivant une direction donnée produira un flux magnétique alternatif, tandis qu'une force magnétisante de valeur constante mais changeant continuellement de direction, en tournant dans l'espace, tendra à produire un flux magnétique tournant. Que ce champ magnétique rotatif résultant ait ou une valeur constante ou une vitesse de rotation uniforme, cela dépendra non seulement de l'uniformité de la force magnétisante rotative originaire et de l'absence de courants secondaires, mais aussi de la forme des masses magnétiques, ainsi que de leur disposition, magnétiquement symétrique ou non, autour de l'axe de rotation des forces magnétiques.

Pour commencer et simplifier notre étude, nous considérons le problème des combinaisons de forces magnétisantes en vue de produire une force magnétisante résultante.

Si l'on peut représenter le sens et l'intensité d'un champ magnétique par le sens et la longueur d'une ligne, on pourra appliquer à la composition de vecteurs la règle ordinaire du parallélogramme des forces et trouver la résultante de deux champs magnétiques, différant de sens et de grandeur, en composant suivant leur diagonale les vecteurs qui les représentent. Dans les cas où les deux composantes ont des valeurs qui varient

d'une façon périodique régulière, il s'agit de savoir si elles ont la même période de variation et quelle différence de phase elles présentent.

Considérons, par exemple, deux composantes A et B, dont les sens sont fixes, mais dont les grandeurs peuvent varier. Prenons d'abord le cas (Fig. 68) où elles varient toutes deux sans

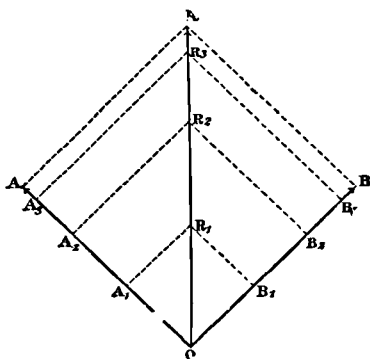


Fig. 68. — Composition de vecteurs sans différence de phase.

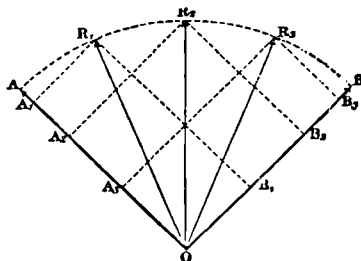


Fig. 69. — Composition de vecteurs en différence de phase.

différence de phase. Quand la composante A a la faible valeur OA_1 , et la composante B la faible valeur OB_1 , elles ont pour résultante OR_1 . Quand A croît jusqu'en OA_2 , et B jusqu'en OB_2 , la résultante est OR_2 , et il est évident que, si les grandeurs de OA et de OB croissent et décroissent simultanément, leur résultante OR variera en concordance de phase avec elles, mais conservera toujours le même sens. Bref, deux vecteurs alternatifs d'égale période et de phase identique ont pour résultante un autre vecteur alternatif d'égale période, de phase identique et de sens déterminé.

Mais si, comme dans la figure 69, les deux composantes passent par leurs variations périodiques avec une différence de phase, leurs accroissements et leurs décroissances ne concordant pas, leur résultante ne conservera plus un sens déterminé. Supposons les variations de A et de B telles que, quand OA est grand, OB est petit, et que OB augmente quand OA décroît; il est dès lors évident que la résultante changera, comme dans la figure, de

OR_1 , à OR_2 , OR_3 , etc.; et, si les variations des deux composantes suivent une loi convenable, il peut se faire que la résultante change continuellement de sens sans changer de grandeur; en d'autres termes, deux vecteurs alternatifs peuvent se présenter comme ayant pour résultante un vecteur tournant de valeur constante. Nous allons voir quelle doit être la loi qui réalise cet effet.

En 1883¹, M. Marcel Deprez communiqua à l'Académie des Sciences un théorème important relatif à la production d'un véritable champ magnétique rotatif par la combinaison de deux champs magnétiques alternatifs différant en phase d'un quart de période.

On sait qu'il est possible de décomposer un mouvement circulaire uniforme en deux mouvements rectilignes harmoniques à angles droits l'un par rapport à l'autre, ayant tous deux même amplitude, même période et différant en phase d'un quart de période. Soit P un point tournant d'un mouvement uniforme autour d'un centre O. Les projections du rayon OP sur les deux axes (Fig. 70) sont OM et ON. Si l'on désigne par l le rayon OP, on a $ON = l \sin \omega t$, et $OM = l \cos \omega t = l \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$. Pendant la rotation du point P, le point N oscillera le long de la ligne YY', et l'amplitude de ses oscillations sera égale au rayon du cercle décrit par P. Le point M oscillera de même le long de la ligne XX' avec la même amplitude et dans un temps égal; mais ON sera maximum quand OM sera nul, et *vice versa*. Il en résulte, au point de vue cinématique, qu'on peut produire un mouvement circulaire uniforme par deux mouvements de lignes droites, en les combinant à angles droits, à la condition qu'ils soient harmoniques, d'égale période, de même amplitude et qu'ils diffèrent exactement d'un quart de période.

Mécaniquement ce mouvement est équivalent à celui de deux pistons ayant même course et actionnant par leurs deux bielles une même manivelle, mais montés à angles droits l'un par rapport à l'autre (Fig. 71). Si, au contraire, on donne à l'arbre un

¹ *Comptes rendus*, 1883, II, p. 1193.

mouvement de rotation, ce mouvement sera décomposé en deux mouvements rectilignes ; l'appareil agira alors comme une pompe à double effet. Si, d'autre part, les cylindres sont disposés de manière à produire deux mouvements rectilignes dont l'un soit en avance sur l'autre d'un quart de période, l'appareil combinera ces mouvements en un véritable mouvement circulaire et équivaldra à une machine à deux manivelles à cylindres parallèles.

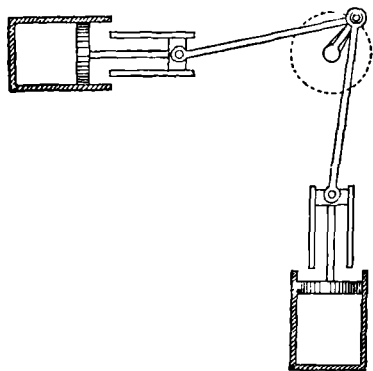
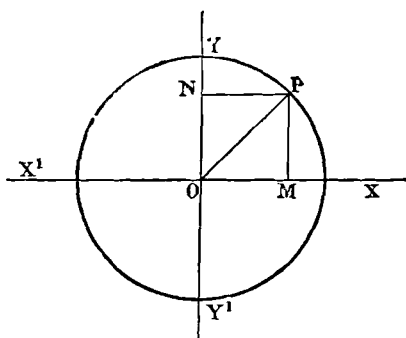


Fig. 70. — Théorème de M. Deprez.

Fig. 71. — Représentation mécanique.

M. Deprez reconnut qu'on pouvait réaliser magnétiquement une semblable combinaison. Si on lance dans une bobine un courant alternatif de manière à produire un champ magnétique alternatif ou oscillant suivant la ligne $O X$, et un second courant alternatif dans une seconde bobine de manière à déterminer un second champ magnétique alternatif suivant la ligne $O Y$, on aura comme résultat un champ magnétique *tournant*, à la condition que les deux champs primitifs aient même période et même amplitude et diffèrent en phase exactement d'un quart de période. S'ils sont d'égale période mais non d'amplitude exactement égale, ils se résoudreont en un champ magnétique à rotation *elliptique*, c'est-à-dire en un champ dont l'intensité et le sens seront représentés par les valeurs successives du rayon vecteur mené à une ellipse de son centre de figure et interceptant des surfaces égales dans des temps égaux. On aura également un champ rotatif elliptique si les deux champs magnétiques

composants, tout en ayant même période et même amplitude, ne diffèrent pas exactement d'un quart de période. Pour donner un champ tournant parfait correspondant à un mouvement circulaire uniforme, les deux composantes doivent varier respectivement comme le sinus et le cosinus ¹ d'un même angle.

Ce n'est cependant pas la seule combinaison permettant la production d'un champ magnétique tournant. Les dispositions mécaniques analogues aux machines à trois manivelles et aux pompes à triple effet suggèrent immédiatement d'autres solutions. Dans le premier cas on emploie trois cylindres avec trois pistons fonctionnant en phases successives décalées d'un tiers de période l'une par rapport à l'autre. Si les trois cylindres sont montés (comme dans la machine Brotherhood) à 120° les uns des autres, leurs bielles peuvent actionner une seule manivelle. S'ils sont montés parallèlement, il faut alors trois bielles angulairement espacées de 120° l'une de l'autre. Si celles-ci n'occupaient pas exactement ces positions respectives, les différences de phases des mouvements ne seraient pas exactement d'un tiers de période. La différence de phase du mouvement doit correspondre à l'espacement périphérique des organes qui réalisent la combinaison. C'est un principe de cinématique que, dans la combinaison de mouvements harmoniques, pour produire une rotation, la phase, dans l'espace, de l'angle des organes qui effectuent la combinaison doit être le supplément de l'angle représentant la phase, dans le temps, du mouvement; autrement le mouvement résultant ne sera pas une rotation *uniforme*.

Le fameux système de courants triphasés (*drehstrom* des Allemands) pour la production d'un champ magnétique tournant est l'analogie électrique du mécanisme à trois bielles. Pour traiter ces combinaisons de champs magnétiques, on peut procéder analytiquement. On a trois bobines, ou trois paires de bobines, produisant chacune un champ magnétique composant alternatif suivant une direction déterminée et l'on cherche le champ résultant.

¹ Voir également Ferraris, « *Rolazioni elettrodinamiche* », Académie de Turin, mars 1888.

tant de leur combinaison. Quand les bobines sont montées sous un certain angle l'une par rapport à l'autre, il faut tenir compte non seulement de l'intensité de chacun des champs composants déterminée par la phase du courant, mais aussi de son sens. On y arrive plus aisément en divisant le champ produit par chaque circuit en ses composantes suivant deux axes rectangulaires X et Y. — Prenons, par exemple, les bobines de l'anneau de la figure 58 ; les bobines *b* et *e* produiront ensemble un flux horizontal dans le sens de *Ob* suivant l'axe des X de la figure 72, dont les changements de valeur suivront la loi $\mathcal{H} \sin \omega t$. Les bobines *d* et *a* produiront dans le sens de *Od* un champ qui suivra la loi $\mathcal{H} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right)$. De même les bobines *f* et *c* produiront dans le sens *Of* un flux régi par la loi $\mathcal{H} \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right)$.

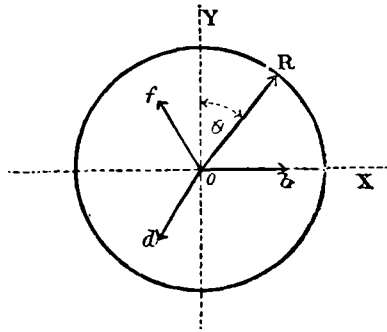


Fig. 72. — Champs tournants.

$$0 = \omega t$$

En additionnant les composantes de ces champs suivant l'axe des X, on a

$$\mathcal{H} \sin \omega t - \mathcal{H} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \cos \frac{\pi}{3} - \mathcal{H} \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \cos \frac{\pi}{3} = \frac{3}{2} \mathcal{H} \sin \omega t ;$$

et, en prenant les composantes suivant l'axe des Y,

$$\mathcal{H} \left(\sin \omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \cos \frac{\pi}{6} - \mathcal{H} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \cos \frac{\pi}{6} = \frac{3}{2} \mathcal{H} \cos \omega t.$$

Si l'on mène une ligne OR représentant $\frac{3}{2} \mathcal{H}$ à l'échelle et faisant l'angle ωt avec l'axe des Y, on voit que, ωt croissant avec

le temps et R tournant autour du point O , la projection de OR sur l'axe des X est $\frac{3}{2} \kappa \sin \omega t$, et, sur l'axe des Y , $\frac{3}{2} \kappa \cos \omega t$. OR représente en conséquence le sens de la résultante du champ à un instant quelconque. Le champ a , par suite, une valeur constante égale à une fois et demie le champ produit par une paire de bobines et tourne à vitesse angulaire constante.

D'une manière générale on peut dire que, avec un montage symétrique de bobines, si l'on désigne par m le nombre de phases, le rapport du champ résultant au champ produit par une phase est $\frac{m}{2}$.

On voit donc quelles sont les relations de temps et d'espace dans le simple fonctionnement diphasé et le simple fonctionnement triphasé. Pour produire un champ magnétique tournant d'un mouvement uniforme, on peut avoir pour composantes soit deux champs égaux différant d'un quart de période par rapport au temps et situés à 90° (ou un quart de circonférence) l'un de l'autre dans l'espace; soit trois champs égaux différant l'un de l'autre d'un tiers de période par rapport au temps et placés respectivement à 120° (ou un tiers de circonférence) l'un de l'autre dans l'espace. Il pourrait naturellement se présenter d'autres cas. En se reportant à la figure 71, page 70, on verra qu'en montant simplement les deux cylindres sous un angle quelconque autre qu'un angle droit, on pourrait décomposer un mouvement circulaire uniforme en deux mouvements harmoniques simples d'égale période ne différant pas d'un quart de période. On a vu page 71 qu'un mouvement circulaire uniforme peut être reconstitué par deux mouvements harmoniques simples égaux ne différant pas d'un quart de période, à la condition que la phase, quant à l'espace, de leurs positions angulaires fût égale au supplément de la phase, par rapport au temps, de leurs mouvements.

On peut très rapidement discuter les cas où la phase de temps des deux composantes ne correspond pas à la phase d'espace de leurs positions angulaires. On a alors comme résultat non plus un mouvement circulaire uniforme, mais un mouvement elliptique. Le champ résultant, tout en restant rotatif, ne tourne pas à

vitesse angulaire uniforme et ne conserve plus une grandeur invariable. Les cas de rotation résultante elliptique peuvent se classer en plusieurs catégories.

Si les deux mouvements harmoniques simples composants sont de même amplitude et d'égale période, mais sans occuper des positions relatives telles que l'angle qui les sépare dans l'espace soit le supplément de la différence de phase existant entre eux dans le temps, le mouvement résultant sera, non plus circulaire, mais elliptique.

Si les deux composants, d'égale période et occupant des positions angulaires relatives supplémentaires de leur différence de phase dans le temps, n'ont pas la même amplitude, il y aura mouvement elliptique, et le grand axe de l'ellipse coïncidera avec la direction du composant de plus grande amplitude.

Si les relations de phase ne sont pas supplémentaires et si les amplitudes des deux composants sont inégales, le mouvement résultant sera néanmoins encore elliptique si les périodes des composants harmoniques sont égales.

Il suit de là que la résultante de trois (ou plusieurs) composantes harmoniques simples quelconques d'égales périodes, quelles que soient leurs amplitudes et les relations entre leurs angles mutuels et leurs relations de phase dans le temps, sera une rotation elliptique (ce cas général comprenant les deux cas particuliers d'un mouvement rectiligne harmonique simple, quand les phases de toutes les composantes dans le temps sont semblables, et de mouvement circulaire uniforme quand les composantes sont égales comme amplitude et comme relations de phase dans le temps correspondant à leurs différences angulaires dans l'espace). C'est pour cette raison que des systèmes polyphasés dissymétriques, tels que le soi-disant système « monocyclique » (qui est un système triphasé tordu sur lui-même), actionnent des moteurs presque aussi bien qu'un système symétrique.

Revenant au cas des combinaisons di- et triphasées proprement dites, on remarquera que, même malgré l'égalité d'amplitude de leurs composantes et le réglage convenable de leurs relations

de phase, on ne peut avoir comme résultat un mouvement circulaire uniforme si les composantes individuelles ne sont pas vraiment harmoniques, c'est-à-dire ne sont pas exactement des fonctions sinusoïdales. On sait maintenant que, dans bien des cas¹, la forme des courbes de forces électromotrices, d'intensités et de forces magnétomotrices dans les systèmes à courants alternatifs industriels en usage diffère très notablement de celle d'une simple sinusoïde. On voit aisément quel sera en général l'effet

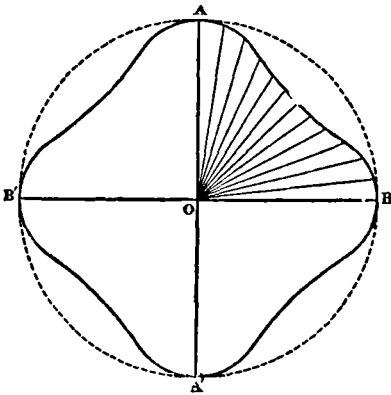


Fig. 73. — Composantes à sommets aigus.

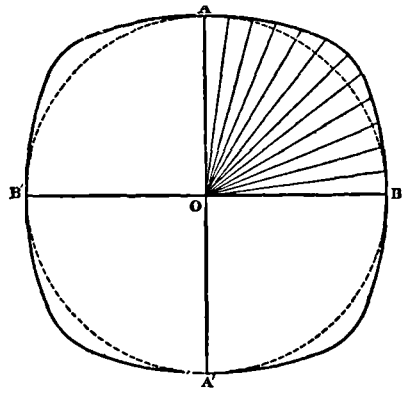


Fig. 74. — Composantes à sommets aplatis.

de tout écart entre ces courbes et la forme sinusoïdale simple. Prenons une combinaison diphasée ; si les courbes composantes présentent des sommets aigus, la courbe résultante aura la forme générale de la figure 73, tandis que, si les courbes composantes affectent la variété à sommets aplatis et larges, un peu rentrants, la résultante affectera la forme générale de la figure 74. Si l'une des deux courbes ou les deux présentent un contour ridé par suite de la présence d'une sous-composante d'un ordre de fréquence plus élevé, le contour de la résultante sera également accidenté. Cet état de choses correspond au cas, tout à fait sans importance, d'un moteur appelé à fonctionner avec un champ magnétique tournant dans lequel l'amplitude de la force

¹ Voir, pour un exemple récent, les courbes données par Flemming dans *The Electrician* du 22 février 1895 pour certains alternateurs employés à Londres.

magnétique résultante subit des fluctuations périodiques plus rapides.

Dans les paragraphes précédents nous avons intentionnellement discuté la combinaison de vecteurs composants à un point de vue plutôt abstrait ou cinématique. Les phénomènes de rotation dans les moteurs polyphasés sont à la fois plus concrets et plus complexes. Le champ magnétique initial y affecte rarement un simple mouvement circulaire uniforme. Ils sont pour la plupart multipolaires ; ils présentent des pôles saillants, des dents et autres discontinuités de structure qui toutes doivent avoir une tendance à faire tourner le champ magnétique plus ou moins par saccades et avec des variations de grandeur de place en place. Ce fait est néanmoins d'importance secondaire ; nous verrons en effet que les actions inductives dans les masses conductrices rotatives ont nécessairement une tendance à réagir contre tous les écarts de la rotation simple et uniforme. D'ailleurs, dans le cas idéal, ce que l'on cherche n'est pas un champ magnétique tournant uniformément, mais une combinaison d'un champ magnétique tournant et d'une série de courants induits, combinaison telle que les conducteurs portant ces courants (ou le noyau de fer dans lequel ils sont encastrés) soient sollicités autour de son axe par un couple suffisant et suffisamment uniforme. Le couple mécanique n'est pas uniforme dans les machines à vapeur aux différents points de leur course, même pour celles qui comportent deux et trois manivelles. Mais, même dans les plus mauvais moteurs polyphasés, le couple est beaucoup plus uniforme que dans la meilleure machine à vapeur. Aucun moteur polyphasé, aucun moteur à simples courants alternatifs n'a besoin d'un volant pour remédier à l'irrégularité de son moment de rotation.

Enfin, il est bon de rappeler que le principe des combinaisons de vecteurs (telles que le parallélogramme bien connu de vecteurs) n'est applicable à des forces magnétomotrices, des flux magnétiques et des courants électriques que quand on considère ces quantités comme des *vecteurs*, c'est-à-dire quand

on tient compte de leur sens réel dans l'espace ; on ne peut, en conséquence, y recourir lorsqu'il s'agit de quantités dont la plage de variations affecte la forme d'un circuit ; telles sont la force magnétomotrice totale, le flux total dans un circuit, ou les combinaisons de courants se réunissant de plusieurs fils en un seul fil commun. Ces dernières quantités n'ont qu'une valeur *relative* ou *d'échelle*, leurs directions variant sur toute la longueur du circuit. Si l'on considère la force magnétique en un point, on se trouve en présence d'une quantité dont le sens est parfaitement défini et, par suite, susceptible de se combiner avec une autre force magnétique en ce point. De même, quand on a affaire à des champs magnétiques dont les sens sont, à un instant donné, uniformes dans l'espace considéré, comme dans le cas des champs magnétiques dans le théorème de M. Deprez, page 69, et dans celui qui le suit, comme encore en ce qui concerne le champ résultant dans un moteur triphasé particulier, les principes des combinaisons de vecteurs peuvent s'appliquer. Mais dans un moteur multipolaire où le flux suit des trajectoires courbes, comme on le voit dans les figures 24 et 127, le flux ne peut être, dans son ensemble, considéré comme un vecteur, et c'est pourquoi au Chapitre V, dans la discussion de la progression du champ magnétique, on a tracé des diagrammes pour montrer comment les forces magnétomotrices en circuit suivent une marche périphérique dans le moteur.

Le lecteur doit bien distinguer nettement les applications du polygone de vecteurs dans le cas où des quantités *vectorielles* s'ajoutent, et l'application de la même construction géométrique quand il s'agit de l'addition de quantités *scalaires* suivant une fonction sinusoidale du temps. Dans ce dernier cas les relations de phase des quantités sont représentées par l'inclinaison de lignes les unes sur les autres ; la légitimité du procédé dépend uniquement des propriétés particulières de la fonction sinusoidale.

CHAPITRE III

PROPRIÉTÉS DES CHAMPS MAGNÉTIQUES TOURNANTS

Quand on réfléchit à toute l'attention qui a été donnée aux champs magnétiques et aux combinaisons des champs de deux ou plusieurs aimants, on est surpris de voir combien peu on a envisagé les propriétés des champs magnétiques tournants. La base essentielle du moteur polyphasé moderne est la production de ces champs magnétiques tournants à l'intérieur desquels des masses métalliques sont forcées de prendre un mouvement de rotation par suite des courants qui y sont induits. On produit, comme on l'a déjà vu, des champs magnétiques tournants par un artifice qui consiste à combiner ensemble deux ou plusieurs champs magnétiques oscillants par l'emploi de courants alternatifs décalés les uns par rapport aux autres; mais on peut étudier et démontrer par des moyens très simples, et sans artifices de ce genre, les principales propriétés des champs tournants. Il suffit à cet effet d'un appareil permettant de faire tourner sur lui-même un aimant dont on explore alors le champ tandis qu'il tourne à une certaine vitesse connue.

Ce sujet semble avoir été abordé pour la première fois vers 1825, lors de la discussion du phénomène des rotations d'Arago, qu'il est, en conséquence, utile de résumer.

Rotations d'Arago. — Comme il est souvent arrivé dans d'autres branches de la science, la découverte des rotations magnétiques a été faite simultanément par plusieurs savants en faveur des-

quels la priorité en a été revendiquée. Vers 1824, Gambey¹, le célèbre constructeur d'appareils de Paris, avait accidentellement remarqué qu'une aiguille de boussole, dérangée de sa position d'équilibre et amenée à osciller sur son pivot, s'arrêtait plus tôt si le fonds de sa boîte, son cadran, était en cuivre que lorsqu'il était en bois ou autre matière. Barlow et Marsh², à Woolwich, avaient, à la même époque, remarqué l'action sur une aiguille magnétique d'une sphère de fer tournant dans son voisinage. Arago³, que l'on prétend avoir entendu parler de ce phénomène par Gambey, mais qu'on dit aussi⁴ l'avoir découvert de son côté en 1822, en travaillant avec de Humboldt à des déterminations magnétiques, est sans aucun doute le premier qui ait rendu compte de son observation; il le fit verbalement devant l'Académie des Sciences le 22 novembre 1824. Après avoir suspendu une aiguille aimantée au centre d'anneaux de diverses substances, il la déplaça latéralement de 45° environ et compta le nombre d'oscillations qu'elle faisait avant que son angle de déviation tombât à 10°. Dans un anneau de bois ce nombre fut trouvé de 145, de 66 dans un anneau de cuivre mince, et de 33 seulement dans un autre anneau en cuivre épais.

La présence de la masse de cuivre avait donc pour effet d'amortir les oscillations de l'aiguille. Chaque oscillation avait la même durée que précédemment, mais les amplitudes allaient en diminuant; le mouvement s'éteignait comme sous l'influence d'un certain frottement invisible. Arago fit observer qu'il mettait ainsi en évidence la présence d'une force existant uniquement tant qu'il y avait mouvement relatif entre l'aiguille et la masse de cuivre. Il donna à ce phénomène le nom de magnétisme de rotation. En 1825, il publia une nouvelle expérience

¹ Voir Jamin, *Cours de physique*, III, p. 296, 1869, et Verdet, *Conférences de physique*, I, p. 415, 1872.

² *Edinburgh Philos. Journal*, XIII, p. 122, 1825.

³ *Annales de Chimie et de Physique*, XXVII, p. 363; XXVIII, p. 325; XXXII, p. 213.

⁴ Arago, *Œuvres complètes*, IV, p. 424.

dans laquelle, s'appuyant sur le principe de l'action et de la réaction, il déterminait une réaction sur une aiguille immobile en mettant en mouvement un disque de cuivre. Il suspendit une aiguille aimantée à l'intérieur d'une bouteille de verre fermée au fond par une feuille de papier ou de verre et la maintint au-dessus

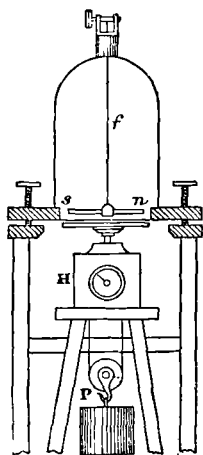


Fig. 75. — Disque tournant d'Arago.

d'un disque de cuivre tournant (Fig. 75). Dans cette expérience, si l'on fait tourner lentement le disque, l'aiguille est simplement déviée du plan du méridien magnétique et tend à tourner dans le sens de rotation du disque, comme invisiblement entraînée par lui. Si l'on tourne plus vite, la déviation augmente. Si la rotation est active au point d'entraîner l'aiguille au delà de 90° , elle prend un mouvement continu de rotation. Arago reconnut cependant que la force qui sollicitait l'aiguille n'était pas simplement tangentielle. En suspendant une aiguille verticalement au plateau d'une balance au-dessus du disque tournant, il observa qu'elle était repoussée quand on faisait tourner le disque. Le pôle le plus voisin du disque était

donc également sollicité par une force radiale tendant, si le pôle se trouvait suspendu près du bord du disque, à l'entraîner radialement vers l'extérieur, et, au contraire, vers l'intérieur s'il était plus voisin du centre.

Poisson, imbu des principes de Coulomb sur l'action magnétique à distance, essaya d'échafauder une théorie du magnétisme de rotation en affirmant que tous les corps acquéraient une aimantation temporaire en présence d'un aimant, mais que dans le cuivre ce magnétisme temporaire mettait plus de temps à disparaître. Vainement Arago fit-il observer que la théorie n'était pas d'accord avec les faits ; le prétendu « magnétisme de rotation » menaçait de devenir une idée fixe.

Les choses en étaient là quand divers expérimentateurs anglais Babbage et Herschel, Christie, et, plus tard, Sturgeon et Faraday, reprirent l'étude de ce phénomène. Babbage et

Herschel mesurèrent la valeur de l'action retardatrice exercée sur l'aiguille par diverses substances, et ils reconnurent que l'argent et le cuivre (qui sont les meilleurs conducteurs de l'électricité) étaient à cet égard les plus puissants ; après eux venaient l'or et le zinc, tandis que le mercure et le bismuth leur étaient bien inférieurs sous ce rapport.

En 1823, ils annoncèrent qu'ils avaient réussi à inverser l'expérience d'Arago : en faisant tourner l'aimant sous un disque de cuivre monté sur pivot (Fig. 76), ils avaient obtenu une rotation rapide de ce disque. Ils firent également cette observation importante que des fentes radiales pratiquées dans le disque de cuivre (Fig. 77) diminuaient sa tendance à tourner sous l'action de l'aimant. En prenant comme égale à 100 la force qui tend à entraîner le disque non fendu, ils trouvèrent qu'elle se réduisait à 88 avec une seule fente radiale, à 77 avec deux, à 48 avec quatre et à 24 avec huit. Ampère, en 1826, montra qu'un disque tournant de cuivre exerçait également un couple sur un fil de cuivre voi-

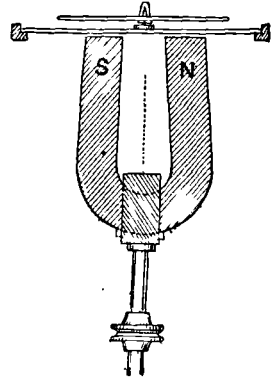


Fig. 76. — Expérience de Babbage et Herschel.

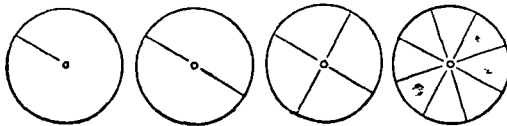


Fig. 77. — Disques fendus employés par Babbage et Herschel.

sin parcouru par un courant. Seebeck en Allemagne, Prévost et Colladon en Suisse, Nobili et Bacelli en Italie confirmèrent les observations des expérimentateurs anglais et en ajoutèrent d'autres. Sturgeon démontra que le ralentissement produit par un pôle magnétique sur un disque de cuivre mobile était réduit par la présence d'un second pôle magnétique de nom contraire placé à côté du premier. Cinq ans après il revint sur la question et en arrivait à cette conclusion que l'effet observé était dû

à une perturbation électrique, à « une sorte de réaction analogue à celle qu'on rencontre dans l'électromagnétisme », lorsque la publication des brillantes recherches de Faraday sur l'induction magnéto-électrique, en 1831, devança l'explication complète sur la voie de laquelle il était. Faraday prouva en effet que le mouvement relatif d'un aimant et d'un disque de cuivre développait inévitablement dans le métal du disque des courants qui, à leur tour, réagissaient sur le pôle de l'aimant avec des forces mutuelles tendant à diminuer ce mouvement relatif, c'est-à-dire à entraîner l'élément stationnaire (aimant

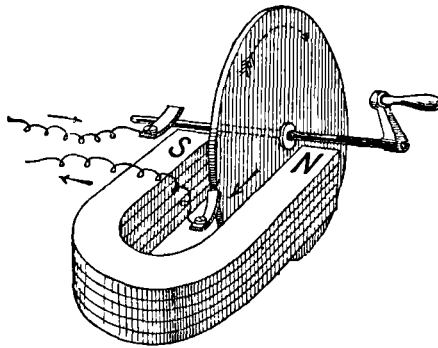


Fig. 78. — Machine à disque de Faraday.

ou disque) dans le sens du mouvement de l'organe mobile, et à s'opposer toujours au mouvement de cet organe mobile. Il se développe en réalité dans le disque mobile des courants circulaires qui sont parasites si on ne les recueille pas à l'aide de contacts à glissement. C'est ce que fit Faraday quand il introduisit entre les pôles d'un puissant aimant son disque de cuivre engagé par un bord (Fig. 78) et le fit tourner en disposant sur le bord et sur l'axe des contacts à ressort à pression douce pour capter ces courants. La force électromotrice, qui agit normalement au mouvement et au flux magnétique du champ, développe des courants suivant le rayon du disque. Si on ne leur offre pas une issue extérieure, ces courants se frayent eux-mêmes une voie de retour intérieure dans le métal du disque. La figure 79 montre comment circule une

paire de courants parasites développée dans un disque tournant entre des pôles magnétiques. Ces courants sont symétriquement situés¹ de part et d'autre du rayon de force électromotrice

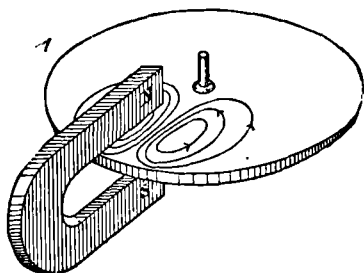


Fig. 79. — Courants parasites dans un disque tournant.

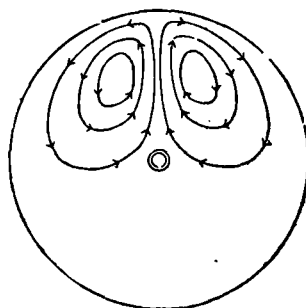


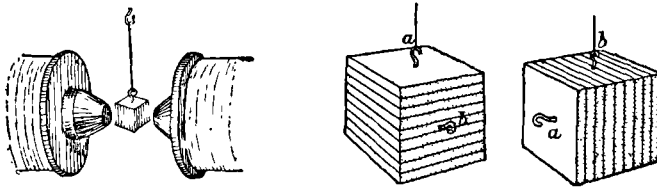
Fig. 80. — Trajectoires de courants parasites.

maxima (Fig. 80). Leur sens de circulation est toujours tel qu'ils tendent à s'opposer au mouvement relatif. Le courant parasite dans la partie qui s'éloigne des pôles tend à attirer les pôles en avant ou à tirer en arrière cette partie du disque. Le courant parasite dans la partie qui s'avance vers les pôles tend, au contraire, à les repousser et à être repoussé par eux. Il est dès lors évident que toute fente pratiquée dans le disque tendra à limiter la circulation de courants parasites et, en les limitant, à augmenter la résistance de leurs trajectoires possibles dans le métal, sans que pour cela la force électromotrice en soit amoindrie. Sturgeon² décrit dans ses *Recherches* un grand nombre d'expériences destinées à reconnaître dans quels sens circulent les courants parasites dans les disques. Matteucci s'est également livré à des investigations semblables mais plus complètes. L'induction dans des sphères tournantes a été l'objet d'études mathématiques de la part de Jochmann et plus tard du regretté Hertz.

¹ A moins que la vitesse de rotation ne soit *très* grande, auquel cas la self-induction des circuits parasites détermine un retard de temps qui tord la position du rayon de courant maximum en avant du rayon de force électromotrice maxima.

² *Edinburgh Philosophical Journal*, juillet 1825 ; et *Philosophical Magazine*, avril et mai 1832. Voir également Sturgeon « *Scientific Researches* », p. 211.

Faraday a exécuté plusieurs expériences intéressantes sur les courants parasites. Entre autres, il suspendit à un fil tordu un cube de cuivre directement en regard des pôles d'un puissant électro-aimant (Fig. 81). Avant l'application du courant, le cube, par son poids, détordait son fil de suspension et se mettait à tourner rapidement. Si alors on excitait l'électro-aimant par l'envoi du courant, le cube s'arrêtait instantanément, pour recommencer à tourner dès que le courant était interrompu. Matteucci renouvela cette expérience en la variant; il construisit un cube formé de pièces carrées découpées dans une feuille de cuivre et séparées les unes des autres par du papier. Ce cube



Courants parasites.

Fig. 81. — Expérience de Faraday. Fig. 82. — Expérience de Matteucci.

feuilleté (Fig. 82), lorsqu'il était suspendu dans le champ magnétique par un crochet *a* fixé de telle façon que ses lames fussent parallèles aux lignes de force du champ, n'était nullement arrêté dans son mouvement de rotation par l'application subite du courant sur l'électro-aimant; tandis que, s'il était suspendu par le crochet *b*, de telle sorte que ses lames fussent dans un plan vertical, son mouvement de rotation s'arrêtait immédiatement quand on excitait l'électro-aimant. La circulation des courants parasites n'était en effet possible que dans le dernier cas, leurs trajectoires devant être dans des plans normaux aux lignes de force.

Après l'explication donnée par Faraday des rotations d'Arago comme uniquement dues à des courants parasites induits, l'intérêt particulier qu'ils excitaient tant qu'on en ignorait la cause semble presque s'être évanoui. Quelques années plus tard, il est vrai, l'attention fut ramenée sur eux quand Foucault montra

qu'ils étaient susceptibles d'échauffer le disque de métal si, en dépit de l'effort exercé, on forçait leur rotation dans le champ magnétique. Comment cette observation a-t-elle conduit à donner le nom de Foucault aux courants parasites découverts par Faraday comme explication du phénomène d'Arago; ce n'est pas très net. Si quelqu'un a des titres à l'honneur de voir son nom attaché aux courants parasites, c'est assurément Faraday ou Arago et non pas Foucault.

Un peu plus tard Le Roux émit l'idée paradoxale qu'un disque de cuivre tournant entre des pôles d'aimant concentriques n'en est pas échauffé et n'a aucun effort à supporter. En voici l'explication : — Si un pôle Nord annulaire est placé en regard de l'une des faces du disque et un pôle Sud annulaire en regard de l'autre face, il ne se développe pas de courants parasites dans le disque, bien qu'il soit pénétré par un flux magnétique. En effet, si tout autour du disque il existe des forces électromotrices égales dirigées radialement vers l'intérieur ou vers l'extérieur, les courants ne trouveront aucune voie de retour suivant un rayon quelconque du disque. La périphérie prendra simplement un potentiel légèrement différent de celui du centre; mais il n'y aura pas de circulation de courants parce que les forces électromotrices autour de toute trajectoire fermée dans le disque se trouvent équilibrées.

En 1884, Willoughby Smith publia¹ sur les disques métalliques tournants une étude d'où il résulte que des disques de fer développent des forces électromotrices supérieures à celles engendrées dans des disques de cuivre de mêmes dimensions.

Gulthrie et Boys, en 1879², suspendirent à l'aide d'un fil de torsion une plaque de cuivre au-dessous d'un aimant tournant et reconnurent que la torsion était directement proportionnelle à la vitesse de rotation. Ils firent ressortir qu'un instrument de ce genre était des plus exacts pour la mesure de la vitesse des machines. Ils effectuèrent également des expériences sur les

¹ Communication à la Royal Institution : *Volta et l'induction magnéto-électrique*, juin 1884.

² *Proc. Physical Soc.*, III, pt. III, p. 127, et IV, p. 55.

effets de variation de la distance entre la plaque de cuivre et l'aimant et sur la variation du diamètre et de l'épaisseur du disque de cuivre.

Des expériences furent faites sur divers métaux et l'on trouva que le couple exercé variait comme la conductibilité du métal, autant qu'on en pouvait juger après la réduction de celui-ci en forme de plaque. MM. Gutherie et Boys appliquèrent alors cette méthode à la mesure de la conductibilité des liquides.

En 1880, de Fonvielle et Lontin observèrent qu'un disque de cuivre légèrement suspendu sur un pivot pouvait être maintenu en rotation d'une façon continue — une fois lancé — quand on le plaçait, en présence d'un aimant, à l'intérieur d'une bobine en fil de cuivre roulée sur une carcasse rectangulaire (telle que la bobine d'un ancien galvanomètre) et alimentée par des courants alternatifs issus d'une bobine ordinaire de Ruhmkorff. Ils donnèrent à leur appareil le nom de gyroscope électromagnétique.

Cependant personne ne paraît avoir eu avant 1879 l'idée d'appliquer les rotations d'Arago à la construction d'un moteur (voir p. 95).

Expériences sur un champ magnétique tournant. — Le simple appareil de la figure 76 permet d'effectuer un certain nombre d'expériences intéressantes et faciles. Une aiguille de boussole montée sur pivot et placée au-dessus de l'aimant tourne synchroniquement avec lui. Si l'on dispose au-dessus de lui et près l'une de l'autre un certain nombre de petites boussoles-breloques, elles tournent toutes à l'unisson avec lui. Tout disque de tôle ou de fer blanc monté sur pivot tourne aussi synchroniquement. Un clou ou une plume d'acier posé sur une feuille de verre au-dessus de l'aimant se met à tourner en même temps que lui et arrive à prendre une grande vitesse de rotation, en tournant toujours synchroniquement avec celui-ci. Il en est de même d'une petite clé de fer; mais, si l'on commence par faire tourner l'aimant très rapidement et qu'on place alors sur le verre la clé ou le clou, ils n'arrivent pas à se mettre *au pas* avec l'aimant et ne tournent pas. Si, à l'aide d'une poivrière, on

saupoudre de limaille de fer la feuille de verre (un morceau de glace est préférable) placée au-dessus des pôles animés d'un lent mouvement de rotation, on constate un très curieux et très bel effet. Grâce aux champs dus aux composantes verticales des pôles, chaque houpe de limaille se dresse, au passage des pôles, sur une de ses extrémités et fait une culbute complète à chaque tour de l'aimant. A chacune de ces culbutes les houpes de limaille se trouvent légèrement déplacées en sens contraire du mouvement de rotation et donnent, au fur et à mesure que la vitesse augmente, l'illusion de particules valsant en chœur et tendant progressivement soit à s'entasser au centre, soit à s'échapper du champ vers les bords de la feuille de verre. Des billes ou des boutons de fer tournent aussi synchroniquement avec l'aimant. Des billes ou de petits ellipsoïdes de cuivre ou de laiton tournent cependant très lentement et ne restent pas en concordance avec l'aimant mobile, comme le font les corps en substances magnétiques. Des disques en cuivre, en laiton, en zinc, et surtout en aluminium, montés sur pivots et placés au-dessus de l'aimant, prennent également un mouvement de rotation lent et asynchrone, entraînés par les courants parasites qui y sont développés.

Mais, si les disques sur pivots, aiguilles de boussoles et autres objets mobiles ne sont pas placés dans la partie intérieure de la circonférence décrite par l'aimant, mais se trouvent déplacés latéralement à une certaine distance, tout à fait en dehors de la trajectoire des pôles mobiles, le mouvement de rotation produit sur les disques est de sens contraire à celui de l'aimant. Si le disque est placé concentriquement au-dessus de l'aimant tournant, à une hauteur de 15 à 20 centimètres au-dessus de ses pôles, et qu'on le déplace latéralement de cette position co-axiale, on peut, à une certaine distance, trouver un point où le disque ne tend à tourner dans aucun sens. A l'intérieur de la zone de ces points neutres il y a tendance à rotation dans le même sens que l'aimant; extérieurement, en sens inverse. Cette zone neutre s'élargit au fur et à mesure que la distance verticale augmente. Si l'on place un disque en un point neutre, on peut déterminer sa

rotation en mettant dans l'intervalle des fragments de fer ou même des bandes ou des anneaux de cuivre dans des positions



Fig. 83.

Expériences
sur les
champs tour-
nants. — Cage
de cuivre.

telles qu'elles tordent le champ sur lui-même ou qu'elles introduisent par courants parasites un nouveau champ tournant. Si l'on dispose au-dessus de l'aimant tournant une cage conductrice en lames de cuivre, établie comme dans la figure 83, et qu'on place au-dessus de sa partie supérieure *a* un disque d'aluminium bien équilibré sur pivot, ce disque peut prendre un mouvement de rotation bien que la distance entre l'aimant et le disque soit beaucoup trop grande pour qu'il y ait mouvement sans cet intermédiaire. L'action est encore plus énergique si l'on insère en *b* une masse de fer de manière à augmenter l'induction due à l'aimant tournant.

On peut réaliser une autre expérience intéressante, présentée par l'Auteur à la Royal Institution en février 1894, en découpant une lame de cuivre, avec deux longues fentes pratiquées sur presque toute sa longueur, suivant la forme indiquée par la figure 84. Elle peut avoir plusieurs décimètres de long sur 8 à



Fig. 84. — Expériences sur les champs tournants. — Lane de cuivre fendue.

10 centimètres de large. Cette bande étant montée horizontalement avec son point *A* placé concentriquement au-dessus de l'aimant tournant et chargé d'un bloc de fer pour augmenter l'action inductive, il se développera dans ladite bande des courants parasites (en réalité triphasés) capables de faire tourner un disque métallique légèrement équilibré monté sur pivot à l'extrémité opposée *B*. Le disque employé dans cette expérience était en cuivre à bord saillant avec un disque intérieur plus petit en fer; un montage sur agate réduisait le frottement.

On peut reproduire tous ces phénomènes beaucoup plus énergiquement en substituant à l'aimant permanent actionné mécaniquement un appareil quelconque produisant un champ magnétique par la combinaison de véritables courants polyphasés, comme on le verra plus loin. Ceux qui n'ont pas à leur disposition des appareils de ce genre, mais qui possèdent des batteries d'accumulateurs capables de fournir 5 à 10 ampères sous 10 ou 20 volts ou plus, nous sauront gré de décrire ici un mode de reproduction artificielle de véritables courants polyphasés au moyen d'un commutateur à main.

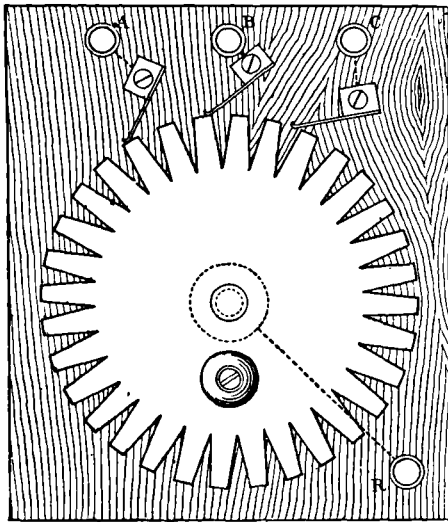


Fig. 85. — Commutateur à main pour la réalisation de courants triphasés.

La figure 85 en représente un modèle très simple permettant de réaliser un champ tournant ; il suffit d'en relier les bornes A, B et C aux bornes *m*, *o* et *n* d'un anneau enroulé comme dans la figure 58, page 55, et de relier une pile par un de ses pôles à la borne de retour R du commutateur, et par l'autre à la jonction commune J de la bobine. Quand on fait tourner rapidement la manivelle, les trois contacts à ressort reçoivent à des intervalles successifs des courants que l'on peut dire décalés d'un tiers de période, bien qu'en réalité il n'y ait pas, naturellement, de ren-

versements. On voit que les intervalles chevauchent d'un angle de 60° ; autrement dit, le courant en B est appliqué un sixième de période avant que celui en A soit rompu; ce courant n'est appliqué en B que pendant un sixième de période, après lequel

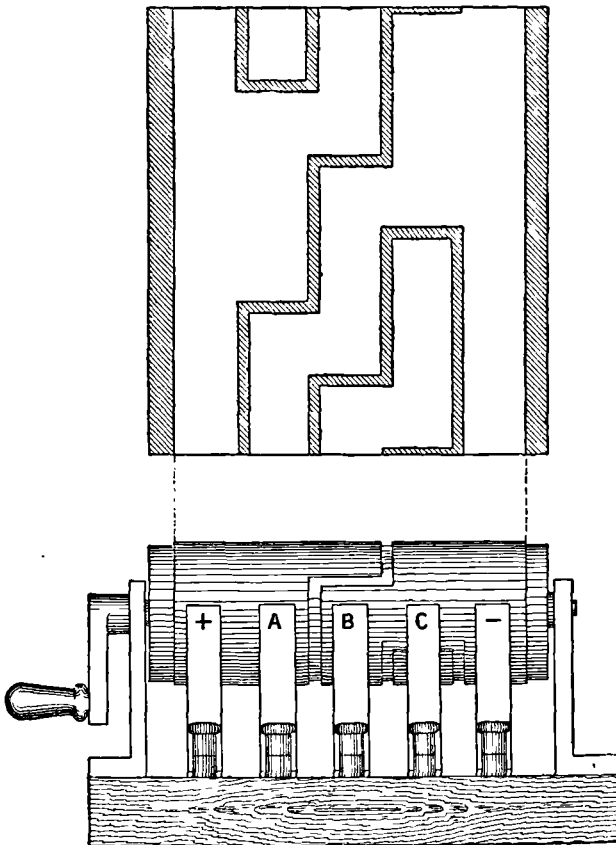


Fig. 86. — Commutateur à main pour la production de courants triphasés.

B et C reçoivent tous deux des courants pendant un nouveau sixième de période, et ainsi de suite. La surface de contact des dents est égale à la moitié du pas et les becs des ressorts de contact partagent le pas en trois. On peut découper dans une même feuille de laiton ce commutateur que les étincelles détériorent rapidement mais qui se répare aisément.

On voit dans la figure 86 un commutateur plus compliqué qui *renverse* en bon ordre les courants dans les trois lignes, sans exiger une quatrième ligne comme fil de retour. L'appareil se compose d'un cylindre de bois d'environ 5 centimètres de diamètre sur 12,5 de long, sur lequel sont fixées par des vis deux pièces de contact convenablement espacées. Sur ce cylindre portent cinq ressorts, dont trois sont les bornes des trois lignes et les deux autres sont reliés aux bornes de la batterie. Un développement, en haut de la figure, montre, exactement en demi-grandeur d'exécution, le mode d'espacement des pièces de contact.

Si l'on suit attentivement l'ordre des opérations pendant une révolution, on voit que le courant se renverse successivement dans chaque ligne, et que, le courant s'écoulant dans la ligne A par une borne +, le courant de retour à une borne — passe de la ligne B à la ligne C, et ainsi de suite en ordre successif et régulier.

Une disposition analogue (mais, naturellement, avec des espacements différents des contacts) permet d'imiter des courants diphasés avec quatre fils de ligne. Elle exige six ressorts, à moins qu'on n'emploie un fil de retour commun. Par le fait, le commutateur ci-dessus décrit s'applique très bien à des appareils diphasés si l'on emploie la borne C avec une ligne de retour commune pour les deux circuits partant de A et de B.

Pour reproduire avec ce commutateur triphasé des expériences simples de champ tournant, il suffit d'avoir un électro-aimant annulaire convenablement enroulé. On prend à cet effet un noyau annulaire en fil de fer ou en disques estampés, d'un diamètre extérieur de 8 à 10 centimètres sur 5 à 8 de diamètre intérieur, et pouvant avoir 1,23 centimètre d'épaisseur. Après l'avoir isolé avec du ruban ou du papier vernissé, on l'enroule soigneusement de six bobines égales de fil de cuivre de 1,6 mm de diamètre, guipé (ou d'un toron de 7 brins de 0,6 mm pour avoir plus de souplesse). Chacune des six bobines couvrira ainsi un arc de 60°. On peut munir de bornes leurs extrémités, de manière à les relier à volonté en étoile ou en triangle

Chacune d'elles doit comporter au moins 100 spires. Si l'on emploie du fil plus fin (ce qui présente certains avantages), on roulera sur l'anneau un nombre de spires proportionnellement plus grand. Ce petit anneau ainsi constitué permettra de réaliser presque toutes les expériences ci-dessus décrites.

Pour opérer sur une plus grande échelle, on peut aisément se procurer des courants polyphasés si l'on se trouve sur un circuit d'éclairage à courant continu. Il est facile en effet de brancher sur lui un petit moteur destiné à desservir un transformateur rotatif. Supposons une alimentation sous 100 volts ; on adaptera à cet effet sans difficulté un petit moteur de 1 cheval, ou même de $1/2$ ou de $1/4$ de cheval, pourvu que son

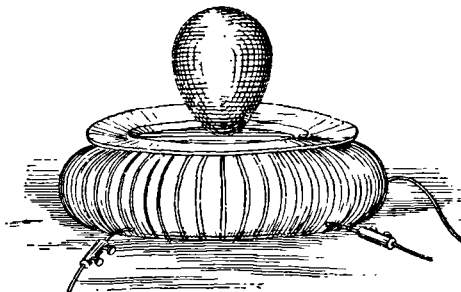


Fig. 87.

arbre soit assez long du côté opposé au commutateur pour recevoir trois bagues de contact isolées, reliées à trois points symétriques de l'enroulement d'induit. Sur ces trois bagues trois balais capteront le courant triphasé (p. 208).

Une des plus curieuses expériences susceptibles d'être effectuées dans ces conditions est celle de la rotation sur lui-même d'un œuf de cuivre. Il faut cependant ici pour la production du champ tournant un électro-aimant annulaire un peu plus grand que celui ci-dessus décrit. Un anneau de 20 centimètres de diamètre enroulé de 6 ou 12 sections et connecté comme dans les figures 58 ou 59 sera de bonnes dimensions. Le sectionnement en 12 bobines élémentaires (voir Fig. 159, p. 205) est très commode en ce qu'il peut également s'appliquer à des courants diphasés. L'anneau étant placé sur une table, on peut

le recouvrir d'une assiette ordinaire en porcelaine, et un œuf de cuivre, plein ou creux, ou, mieux encore, rempli de tournure de fer, se mettra à tourner rapidement quand on appliquera le courant. Sa vitesse de rotation allant en augmentant, il finira par se dresser et par pivoter sur une de ses extrémités. Un œuf en aluminium tourne encore mieux. Un disque épais de cuivre ou d'aluminium, à faces légèrement convexes et arrondi sur ses bords, se met de même à tourner et se redresse progressivement jusqu'à arriver à pivoter sur un de ses diamètres.

ILLUSTRATIONS MÉCANIQUES D'UNE TRANSMISSION POLYPHASÉE

Nous avons fait plusieurs fois allusion aux analogies entre les appareils à courants polyphasés et les machines à deux ou trois manivelles en vue d'éviter les points morts. On peut aisément

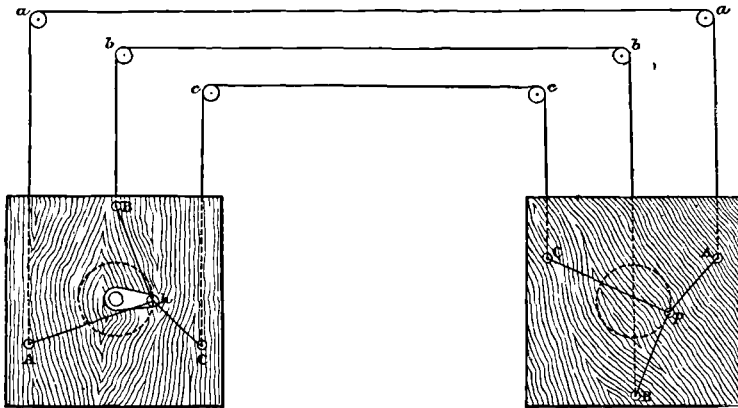


Fig. 88. — Illustration mécanique d'une transmission triphasée.

construire des modèles mécaniques correspondant à un cas particulier quelconque de courants polyphasés; ils sont des plus instructifs. En voici un très simple imaginé par l'auteur pour illustrer une simple transmission triphasée de puissance.

On attache trois cordes au bouton P d'une petite manivelle tournant autour d'un axe O au milieu d'un tableau fixe (Fig. 88). Ces trois cordes traversent trois trous équidistants A, B, C , garnis d'œillets en porcelaine pour diminuer les frottements. Lesdites cordes passent ensuite sur trois poulies a, b, c pour aboutir à distance à un tableau semblable au précédent, où elles se réunissent en un point de jonction commun p muni d'un crayon. En tournant à la main la manivelle h on imprimera également au point p un mouvement circulaire, bien qu'aucune manivelle ne le guide, et il décrira (approximativement) une circonférence sur le tableau de droite.

CHAPITRE IV

GENÈSE DES MOTEURS A CHAMP TOURNANT

La conception d'un mouvement produit par l'emploi de plusieurs pôles magnétiques agissant successivement pour attirer une armature n'est pas nouvelle. On trouverait des moteurs multipolaires dans un certain nombre des premiers brevets de Wheatstone, en même temps que plusieurs moteurs de Pacinotti, aux environs de 1861 à 1865, impliquent la même idée. Nulle part cependant on ne rencontre quoi que ce soit relatif à l'action des pôles par induction de courants dans la partie mobile.

Premier moteur d'induction. — Au milieu des nombreuses inventions modernes les modestes débuts du moteur polyphasé, dont l'apparition remonte à 1879, ont passé inaperçus. La figure 89 reproduit le moteur élémentaire présenté par M. Walter Baily à la *Physical Society* de Londres le 28 juin 1879, à l'occasion d'une communication faite par lui sur « Un mode de production des rotations d'Arago ».

Jusqu'alors on n'avait pu produire ces rotations appliquées à un disque de cuivre qu'en faisant tourner au-dessous de lui un aimant permanent. Au lieu de recourir à ce moyen, Baily employa un électro-aimant fixe dont il faisait passer progressivement l'aimantation à quatre pôles successifs, déterminant ainsi dans le disque de cuivre monté sur pivot des courants parasites dont la réaction donnait à ce disque un mouvement mécanique dans le sens de la succession des pôles.

Dans ce modèle primitif le disque avait environ 6 centimètres de diamètre ; les quatre noyaux, de 10 centimètres de haut à peu près, étaient reliés à une culasse commune et recouverts chacun de 150 spires environ de fil de cuivre isolé de 2,5 mm de diamètre. Les bobines en étaient reliées deux à deux en série, comme

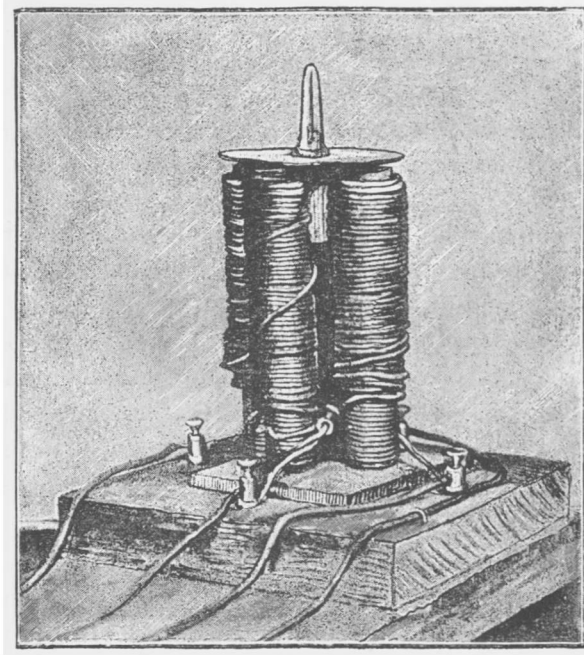


Fig. 89. — Moteur polyphasé de Walter Baily (1879).

deux électro-aimants indépendants montés diagonalement l'un par rapport à l'autre. Les deux circuits aboutissaient séparément à un ingénieux commutateur tournant formé simplement de ressorts et de touches de contact fixées sur un cylindre de bois, avec une manivelle permettant de le faire tourner. Dans ce mouvement les courants de deux batteries sont amenés à se renverser alternativement dans les deux circuits, en déterminant dans les quatre pôles les successions suivantes de polarités :

N O	N N	O N	S N	S O
↘	↓	↙	←	↘
O S	S S	S O	S N	O N

et ainsi de suite. M. Baily avait d'ailleurs une idée très nette de la manière dont était ainsi représenté un champ magnétique tournant. On en jugera par ses expressions mêmes :

« La rotation du disque est due à celle du champ magnétique dans lequel il pivote, et l'on doit s'attendre à ce que, si l'on pouvait produire par d'autres moyens un mouvement semblable, on obtiendrait de même la rotation du disque.

« Il est possible que la rotation de l'aimant soit le seul moyen pratique de réaliser une rotation uniforme du champ ; mais on verra dans ce mémoire que le disque peut tourner en vertu de la rotation intermittente du champ effectuée à l'aide d'électro-aimants. » L'auteur entre alors dans la discussion du résultat fourni par l'augmentation d'intensité d'un pôle quand un pôle voisin, de même signe, diminue d'intensité, et il émet cette idée que, si l'on disposait sous le disque tout un cercle de pôles en les excitant successivement par paires opposées, la série d'impulsions que recevrait ainsi ce disque tendrait à le faire mouvoir dans un même sens autour de son axe. Il ajoute même : « A la limite, c'est-à-dire avec un nombre infini de pôles, on retomberait sur le cas d'une rotation *uniforme* du champ magnétique, telle qu'on l'obtient en faisant tourner des aimants permanents. » Revenant ensuite au cas de son modèle réel à deux paires de pôles aa' et bb' , il fait remarquer que, si la paire bb' est disposée de manière à ce qu'il s'y produise un renversement *avant* qu'il ne s'effectue dans la paire aa' , la rotation se fera dans un sens ; tandis que, s'il y a renversement dans la paire bb' *après* celui de la paire aa' , la rotation aura lieu dans l'autre sens. Il poursuit en démontrant comment on peut effectuer le renversement du sens de rotation soit en renversant l'action du commutateur, soit en *inversant* les connexions de l'une des deux batteries. Le dessin qui accompagne le mémoire original indique que les noyaux doivent être feuilletés ; mais ceux du modèle sont massifs. Dans un paragraphe final l'auteur fait remarquer que l'action sur le disque peut être beaucoup amplifiée par le montage de quatre autres électro-aimants au-dessus du disque, en regard des électro-aimants inférieurs et

connectés avec eux de manière à présenter une polarité opposée.

Le modèle fonctionne parfaitement avec quatre éléments secs employés à l'excitation des électro-aimants.

À cette occasion, quand, il y a une quinzaine d'années, ce mémoire fut lu et le modèle montré, le professeur Guthrie demanda ironiquement quelle puissance on pouvait attendre de ce moteur, ce à quoi M. Baily répondit modestement que, jusqu'alors, il ne le regardait que comme un jouet scientifique.

Recherches de M. Marcel Deprez. — En 1880, M. Marcel Deprez présenta à la Société de Physique un mémoire sur la synchronisation électrique des rotations. Des courants diphasés

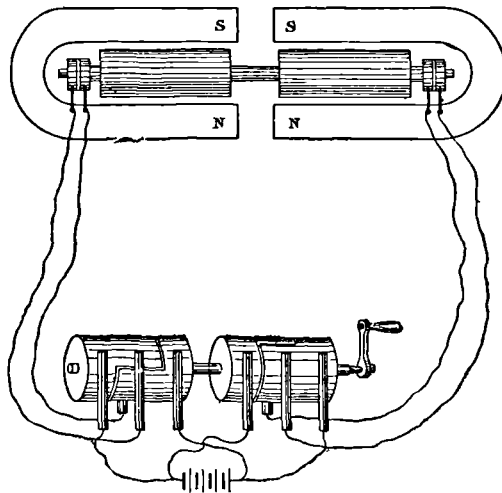


Fig. 90. — Appareil de Marcel Deprez.

artificiellement produits y étaient indiqués comme transmis par un commutateur tournant à un moteur synchrone formé de deux induits en navette montés sur un même arbre et placés chacun entre les pôles d'un aimant en fer à cheval ; l'un d'eux était décalé angulairement de 90° par rapport à l'autre, de sorte qu'il ne pouvait pas y avoir de points morts. On voit sur la figure 90 comment les courants étaient transmis de la batterie aux deux induits.

Cet appareil ne ressemble à celui de M. Baily qu'en ce que son fonctionnement exige un système diphasé de courants. Tous deux peuvent fonctionner soit avec des courants artificiels diphasés produits par commutation d'un courant de pile, soit avec des courants diphasés périodiques produits par induction. Leur mode de fonctionnement est cependant complètement différent. Celui de M. Deprez est une simple combinaison de deux moteurs ordinaires à angles droits l'un par rapport à l'autre, de manière à ne pas présenter de points morts. On n'y trouve impliqué nulle part le principe du champ magnétique tournant. Le moteur de M. Baily offre, au contraire, comme caractère essentiel le déplacement progressif d'un champ magnétique dans un ordre régulier autour d'un point central, et il développe par induction des courants dans une masse métallique qui tourne sans contacts ni commutateur.

Trois ans après, M. Deprez posa le théorème important qui a été discuté page 69, relativement à la production d'un véritable champ tournant par la combinaison de deux courants alternatifs décalés d'un quart de période.

Ce théorème n'a cependant porté aucun fruit ; il est resté dans le pur domaine des abstractions géométriques.

Recherches du professeur G. Ferraris. — En 1887, divers savants étudiaient cette question indépendamment les uns des autres.

Le professeur Galileo Ferraris¹, de Turin, était déjà arrivé en 1885 aux mêmes idées fondamentales que MM. Baily et Deprez. Mais le résultat de ses études a été plus fructueux en ce que, sans connaître les travaux d'aucun d'eux, il fit un tout de leurs deux conceptions. Comme Baily, il proposa de produire la rotation d'un conducteur au moyen de courants parasites induits en lui par le déplacement progressif d'un champ magnétique, et d'engendrer ce champ mobile, comme un véritable champ tournant, par la combinaison à angles droits l'un par rapport à

¹ Ferraris, « Rotazioni elettrodinamiche », *Acad. de Turin*, mars 1888.

l'autre de deux courants alternatifs décalés d'un quart de période.

En 1883, il construisit le moteur représenté en plan dans la figure 91 et exposé en 1893 à Chicago ; il n'avait cependant pas été publiquement produit avant 1888. Il se composait de deux paires d'électro-aimants AA et BB à culasse commune constituée par un enroulement extérieur de fil de fer. On lançait dans ces deux circuits deux courants alternatifs de phase différente et la partie centrale tournait sur son axe.

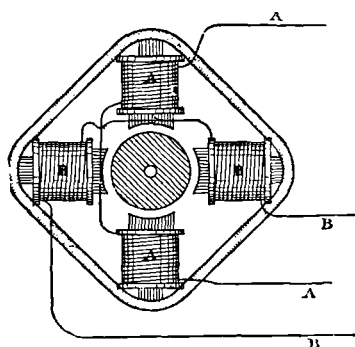


Fig. 91.

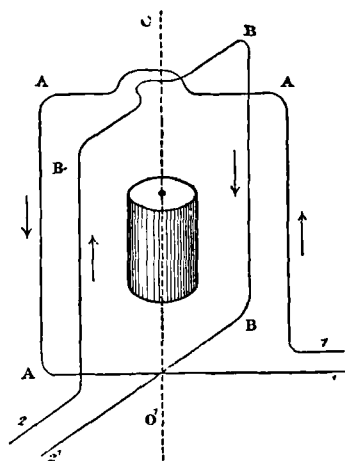


Fig. 92.

Moteurs Ferraris (1885).

La première publication de Ferraris parut en mars 1888 sous le titre de *Rotations électrodynamiques produites à l'aide de courants alternatifs*. Après avoir exposé la théorie géométrique du champ magnétique tournant, il suggéra un mode simple de production des courants diphasés voulus, consistant à diviser un courant alternatif en deux parties dans l'une desquelles on insérerait une résistance sans self-induction, et dans l'autre une bobine à grande self-induction mais de faible résistance. Les deux enroulements du moteur devaient être respectivement introduits dans ces deux circuits. La différence de phase ainsi produite devait être assez voisine d'un quart de période pour

être effective. Il exprimait d'ailleurs l'opinion qu'on pouvait de cette façon obtenir toutes les actions produites par la rotation d'un aimant. Il décrivait enfin les expériences suivantes faites dans l'automne de 1885.

Deux bobines plates, l'une de gros fil, l'autre de fil plus fin, schématiquement représentées en AA et BB de la figure 92, étaient montées à angles droits l'une par rapport à l'autre. Dans la première on lançait le courant du primaire d'un transformateur Gaulard, et dans la seconde celui du secondaire, avec plus ou moins de résistance sans self-induction. Au centre de figure était suspendu un petit cylindre fermé en cuivre creux. Si l'on appliquait le courant sur l'un seulement des deux enroulements, le cylindre restait immobile ; mais dès l'application du second courant il se mettait à tourner. Pour renverser le sens de rotation il suffisait de changer, à l'aide d'un commutateur inverseur, les connexions de la seconde bobine. On obtenait les mêmes résultats en substituant au cuivre un cylindre de fer ; ce cylindre feuilleté, formé de disques de tôle, prenait aussi un mouvement de rotation.

Cette expérience suggéra l'idée de construire des moteurs à courants alternatifs sur ce principe, mais en modifiant la forme de l'appareil ; il était en effet évident, comme le faisait remarquer le professeur Ferraris, qu'un moteur tel que celui expérimenté était sans valeur comme mode industriel de transformation de puissance. Il étudia en conséquence un modèle plus grand, dont la partie mobile était un cylindre de cuivre, du poids de 4,5 kg, de 18 centimètres de long sur 8,9 cm de diamètre, monté sur un axe horizontal de 1 centimètre de diamètre. Ce cylindre était entouré de deux jeux de bobines A A et B B à angles droits l'un par rapport à l'autre, comme dans la figure 93. Il n'avait cependant encore qu'une faible puissance. Ferraris discuta la théorie élémentaire de l'appareil, en faisant ressortir que l'action inductive devait être proportionnelle au *glissement*, c'est-à-dire à la

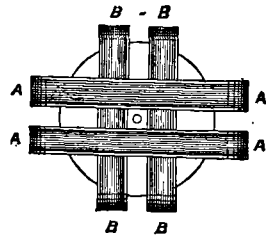


Fig. 93.
Second moteur Ferraris.

différence entre la vitesse angulaire du champ magnétique et la vitesse de rotation du cylindre, que le courant induit dans le métal en mouvement devait lui être également proportionnel, et que la puissance du moteur était proportionnelle à la fois au glissement et à la vitesse de rotation de l'élément mobile.

Ferraris combina aussi des appareils de mesures pour courants alternatifs basés sur ce principe. Finalement, il réussit à produire la rotation d'une masse de mercure placée dans un vase dans le champ magnétique. En 1894, Ferraris donna une nouvelle discussion de la théorie de ces moteurs ; on la trouvera au chapitre VIII.

Moteur Borel. — En 1887, M. Borel imagina un moteur à courants alternatifs destiné à un compteur produit sous le nom de compteur Borel-Paccaud. C'était, en réalité, un moteur

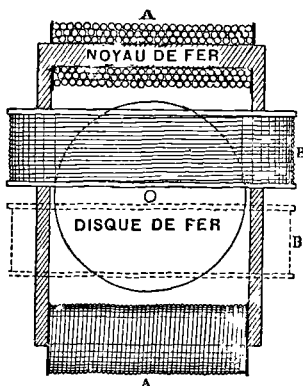


Fig. 94. — Moteur Borel.

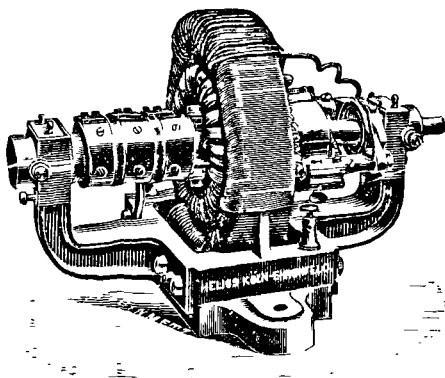


Fig. 95. — Moteur Coerper.

diphase dans lequel la différence de phase était obtenue d'un courant alternatif simple par l'emploi de deux circuits dont les constantes de temps étaient différentes. Sur deux côtés d'un bâti en fer étaient enroulées deux bobines A A destinées à créer un champ alternatif orienté de gauche à droite. Extérieurement au châssis étaient enroulées deux autres bobines B (dont l'une est enlevée dans la figure 94 pour faire voir l'intérieur), tendant à produire un second champ alternatif à angles droits avec le

premier. Au centre de figure de l'ensemble était montée une roue en fer qui prenait un mouvement de rotation sous l'action du champ tournant résultant de la combinaison.

Premiers moteurs de la Compagnie Hélios, de Cologne. — En 1887, la Compagnie Hélios construisit, conformément à un brevet de M. Coerper ¹, différents petits moteurs, les uns pour courants ordinaires, synchrones et asynchrones, et un autre triphasé, représenté par la figure 95. La partie mobile de ce moteur était munie de trois bagues de contact, recevant un courant triphasé. Comme ce moteur exigeait trois conducteurs et que tous les efforts alors tentés pour obtenir un fonctionnement satisfaisant avec deux fils seulement ne réussissaient pas, la Compagnie laissa tomber ce brevet en 1890. — Un brevet plus récent, de 1891, décrit un moteur à courants alternatifs simples avec enroulement additionnel agissant uniquement sur le fer de la partie mobile et qui n'est introduit que pour le démarrage.

Moteurs Bradley. — Au nombre des premiers pionniers américains du fonctionnement polyphasé, il faut compter Charles

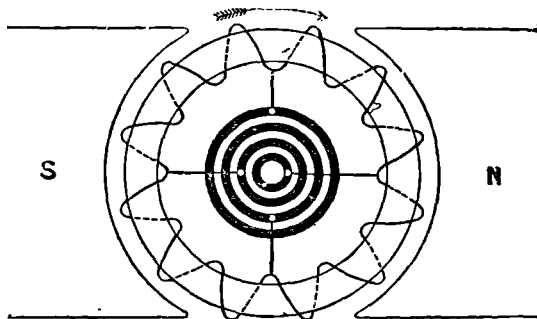


Fig. 96. — Moteur Bradley.

S. Bradley, dont les travaux remontent à 1887. Son brevet américain, daté du 8 mai 1887 (n° 390439), décrit un générateur à anneau Gramme (Fig. 96), dont quatre points symé-

¹ Brevet anglais n° 9013 de 1887. Voir également Brevets allemands n° 43538 de 1887 et 70084 de 1891. Cf. *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1893, p. 82.

triques sont reliés à quatre bagues de contact. Il réalisait ainsi deux courants alternatifs décalés d'un quart de période. Dans son esprit cette disposition avait pour but d'obtenir plus de puissance, ce qui est exact en fait, la puissance d'une machine polyphasée étant, à égalité de poids, notablement plus élevée que celle de toute autre. Il indiquait également que sa machine pouvait servir de moteur, tout en restant muet sur les propriétés du champ tournant. Il revendique en effet seulement : « Un moteur électrique rotatif formé d'un inducteur, d'un induit et de deux paires de collecteurs, tels que des bagues de contact et des balais, respectivement reliées, indépendamment l'une de l'autre, à l'enroulement d'induit en des points alternés et connectés à deux circuits extérieurs indépendants. » C'était bien là, dès 1887, la description d'un moteur polyphasé. — En octobre 1888 (brevet américain n° 404 463) surgit un moteur asynchrone actionné par des courants parasites développés dans une masse de fer indépendante. L'organe mobile recevait par quatre bagues de contact des courants diphasés. Tout le principe du glissement magnétique est ici complètement exposé.

Dans un troisième brevet (n° 409 430), publié le 20 août 1889, Bradley décrit un induit analogue, dénudé en trois points équidistants et relié à trois bagues de contact, constituant ainsi un système triphasé. Cette machine était également destinée à servir soit comme génératrice, soit comme réceptrice. — Dans un autre brevet de même date, il indique encore un moyen de diviser un courant alternatif simple en deux autres de phases différentes à l'aide de ses machines.

Recherches de Nikola Tesla. — Quand même d'autres recherches n'auraient pas été faites dans la même voie, les travaux de Nikola Tesla, de 1887 à 1891, auraient suffi à eux seuls à asseoir sur des bases solides la conception du moteur à champ tournant. Il arriva, en 1886, à la conviction intime qu'il devait exister un moyen d'entraîner un induit en y développant par induction, au lieu d'y lancer (comme dans les moteurs électriques ordinaires), des courants par l'entremise de contacts, de commu-

tateurs et de balais. Dès octobre 1887, ses études étaient assez avancées pour lui permettre de couvrir par des brevets pris en Amérique de nombreux points d'un caractère plus ou moins fondamental. Ceux-ci furent suivis d'autres demandes de brevets faites en novembre et décembre de la même année ; mais aucun ne sortit du Patent Office jusqu'en mai 1888, où il lui en fut accordé une véritable fournée.

Le premier de ces brevets donne l'aspect général des vues de M. Tesla. On y lit ce qui suit : « Bien que j'aie décrit différents moyens d'atteindre le but proposé, on trouve dans tous les mêmes

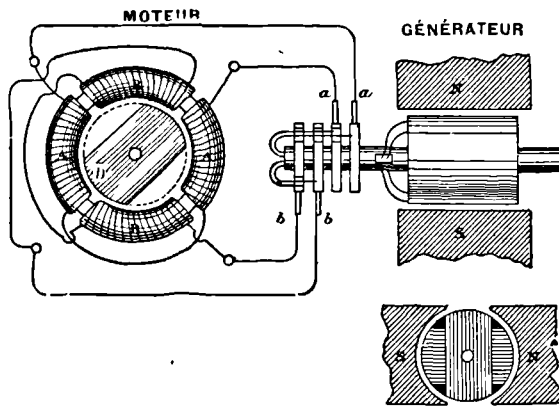


Fig. 97. — Système Tesla.

principes de construction et le même mode de fonctionnement que voici : on y fait usage d'un moteur à deux ou plusieurs circuits indépendants dans lesquels on lance, à des intervalles déterminés et de la manière ci-après décrite, des courants alternatifs en vue de réaliser un déplacement progressif du magnétisme ou des « lignes de force » en conformité de la théorie bien connue, et de déterminer une action corrélative du moteur. Il est évident qu'on peut utiliser un déplacement progressif des lignes de force à produire le mouvement ou la rotation de l'un quelconque des organes du moteur, l'induit ou l'inducteur, et que, si les courants envoyés dans les divers circuits du moteur ont un sens convenable, il n'y aura pas besoin de commutateur ; mais, pour éviter dans le

système tous les dispositifs habituels de commutation, je préfère relier directement les circuits du moteur à ceux d'un alternateur spécial. » Il indique alors, suivant un schéma (Fig. 97, reproduite d'après la figure 9 de la spécification), comment s'effectue sur un générateur l'enroulement de deux bobines distinctes dont les extrémités libres sont reliées à des bagues de contact isolées montées sur l'arbre. De quatre balais qui portent sur les bagues partent quatre fils allant au moteur. C'est, en réalité, un simple alternateur diphasé induisant deux courants en quadrature. Le moteur est représenté avec anneau à noyau feuilleté, garni de quatre bobines, dont deux sont mises en circuit avec une paire de fils, et les deux autres font partie du second circuit de l'alternateur. A l'intérieur de l'anneau est disposé un disque mobile D, en fer, dont deux segments sont de préférence abattus parallèlement de manière à lui donner la forme d'un barreau, et qui tourne

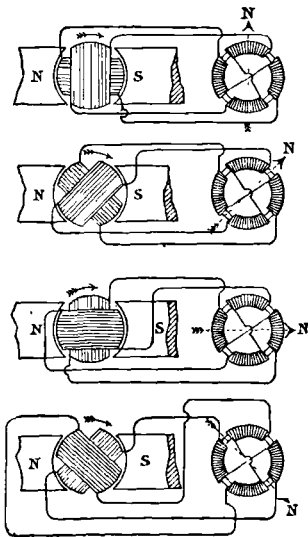


Fig. 98.

en vue de faire passer d'un côté de l'anneau à l'autre le plus grand flux possible. Cette forme oblongue n'est cependant pas indispensable à la rotation ; un disque circulaire se met aussi bien en mouvement. M. Tesla attribuait ce phénomène à une certaine inertie ou résistance magnétique au déplacement du flux, et il voyait une confirmation de cette conception dans l'observation qu'un disque d'acier subit une action plus puissante qu'un disque de fer doux. Dans une série de huit figures schématiques, M. Tesla exposait les phases successives par lesquelles passent les bobines du générateur pendant une révolution et les variations correspondantes et résultantes d'aimantation produites dans l'anneau du moteur. Le sens résultant du champ magnétique se déplace progressivement à la périphérie et entraîne avec lui le disque de fer (Fig. 98).

Cette combinaison équivaut à un moteur synchrone diphasé, fonctionnant, non pas par induction de courants dans la partie mobile, mais par réactions magnétiques, et actionné par le courant d'un générateur diphasé approprié.

M. Tesla décrivait en même temps d'autres modifications du système. Un de ses moteurs comportait un induit en tambour formé de deux bobines à angles droits l'une par rapport à l'autre, recevant les courants de quatre bagues de contact. Cet induit tournait entre les deux moitiés d'une carcasse extérieure en fer ou en acier, de préférence feuilletée en vue de l'élimination des courants parasites (!). Elle ne portait aucun enroulement et n'était aimantée que par la polarité de l'induit. — On voyait ensuite un générateur et un moteur triphasés établis sur les mêmes données que le générateur et le moteur décrits en premier lieu. Le générateur était garni de trois bobines mobiles et de six bagues de contact. Il était relié par six fils à l'anneau du moteur formé de six bobines roulées sur six projections polaires convergentes qui constituaient un inducteur bipolaire triphasé. La partie mobile était, comme précédemment, un disque ou un cylindre de fer fraisé sur deux segments parallèles, de manière à présenter une forme allongée. — Venait ensuite une combinaison diphasée, dont le générateur contenait un aimant mobile et deux paires de bobines induites fixes, tandis que le moteur se composait, comme précédemment, d'un disque de fer à segments abattus comme organe mobile, entouré de deux bobines fixes montées à angles droits l'une par rapport l'autre. — On y voyait encore une forme de moteur monté de manière à faire arriver les courants diphasés à ses enroulements mobiles ainsi qu'à des enroulements faits sur un anneau extérieur fixe. Il avait été reconnu avantageux dans le cas où l'on employait une carcasse extérieure en fer ou un aimant immobile de lui donner une polarité magnétique fixe en l'excitant séparément par un courant continu. Naturellement, ces moteurs étaient synchrones.

Il construisit des transformateurs applicables à ces systèmes, en roulant une bobine de fils primaires et une de fils secondaires

sur un même anneau de fer feuilleté dans lequel l'aimantation subissait un déplacement successif de polarité.

En novembre apparaît la première conception d'un véritable moteur d'induction. Jusque-là M. Tesla n'avait vu la production et le maintien du mouvement de rotation que par « attraction directe » des éléments magnétiques du moteur. « J'ai découvert, dit-il, qu'on pouvait dans ces systèmes obtenir des résultats avantageux en utilisant le déplacement primaire des pôles à développer des courants dans un conducteur fermé maintenu sous l'influence du champ du moteur, de manière à déterminer la rotation par la réaction de ces courants sur le champ inducteur. » Il montait, à l'intérieur de l'anneau destiné à créer le champ magnétique tournant, un cylindre ou un disque de fer doux portant deux bobines de fil isolé reliées à angles droits l'une par rapport à l'autre et dont les bouts respectifs étaient connectés de manière à ce que chacune formât un circuit fermé distinct ; ce cylindre était porté par un arbre reposant sur des coussinets. — Dans un autre type la partie mobile était formée d'un noyau de fer composé de disques pour éviter le développement de courants parasites et logé à l'intérieur de bobines ou de conducteurs extérieurs « appliqués longitudinalement sur le cylindre » et constituant un ou plusieurs circuits indépendants autour du noyau. Si l'on employait ainsi des plaques de cuivre, il fallait les fendre longitudinalement. Cette construction avec emploi de circuits induits fermés sur l'organe mobile d'un moteur enroulé en vue d'un déplacement successif et progressif de la polarité magnétique était l'objet de revendications spéciales. La revendication encore plus accentuée d'un nouveau mode de transmission électrique de l'énergie mérite d'être rapportée dans les termes mêmes employés par M. Tesla :

« Je sais bien que la mise en rotation d'un moteur par le déplacement intermittent des pôles de l'un de ses éléments n'est pas chose nouvelle. On l'a réalisée en faisant passer par des bobines actives indépendantes montées sur l'un des éléments le courant issu d'une pile ou autre source de courants directs ou

continus, en renversant ce courant par des dispositions mécaniques convenables, de manière à lui faire parcourir les bobines alternativement en sens contraires. Mais dans ce cas le potentiel des courants primaires reste le même; leur sens change seul. Dans mon invention, au contraire, j'emploie de véritables courants alternatifs, et elle consiste précisément dans la découverte du mode d'utilisation de ces courants.

« La différence des deux systèmes et les avantages du mien sautent aux yeux. En engendrant un courant alternatif dont chaque impulsion implique une élévation et une décroissance de potentiel, je reproduis dans le moteur exactement les conditions du générateur, et ces courants, avec la création de pôles résultants qui en est la conséquence, permettent à la progression des pôles d'être continue et non plus intermittente. En outre, la difficulté pratique d'interrompre et de renverser un courant d'intensité considérable est telle qu'aucune des dispositions actuelles ne saurait réaliser économiquement ou pratiquement la transmission de l'énergie par renversements, suivant la méthode connue, d'un courant continu. En ce qui concerne le mode d'action sur l'un des organes du moteur, mon invention implique donc l'emploi d'un courant alternatif et non pas d'un courant renversé ou d'un courant qui, tout en restant continu et de même sens, se déplace de bobine à bobine au moyen d'une forme quelconque de commutateur, inverseur ou interrupteur. En ce qui touche la partie de l'invention qui consiste à agir sur les deux organes du moteur simultanément, je considère l'emploi de courants alternatifs ou inversés comme faisant partie de son objet, bien que n'estimant pas l'emploi de courants inversés comme ayant une importance pratique quelconque.

« Je revendique en conséquence :

« Le mode ici décrit de transmission de l'énergie par production d'un déplacement progressivement continu des polarités soit de l'un des organes soit des deux organes (induit, inducteur ou aimants) d'un moteur, à l'aide de courants alternatifs développés dans des circuits indépendants, comprenant les bobines

magnétisantes de l'un des organes, ou des deux, comme il est ici indiqué. »

En avril 1888, Tesla reconnaît la possibilité d'employer un retour commun dans un système diphasé, ce qui permet de réduire à trois, au lieu de quatre, les fils de liaison. Il indique aussi la manière de recueillir des courants diphasés sur une dynamo ordinaire à courant continu, en la munissant de quatre bagues de contact séparément connectées à quatre points symétriques de son commutateur. Passant de là à des générateurs à trois bobines reliées à un point commun (comme dans la machine à arcs bien connue de Thomson-Houston), avec leurs trois bouts libres connectés aux segments d'un commutateur, Tesla montre que, en reliant chacun des trois bouts à une bague de contact distincte par des balais collecteurs, on peut recueillir trois courants alternatifs de phases symétriques. Il

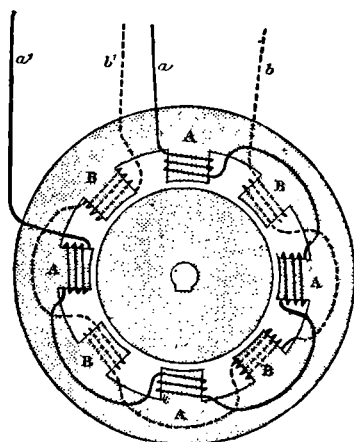


Fig. 99. — Champ multipolaire.

représente une étude d'inducteur tétrapolaire présentant quatre pôles (alternativement N et S) dans le circuit A, et quatre pôles intermédiaires dans le circuit B. En pareil cas la progression du champ ne se fait pas d'un mouvement uniforme. Le champ d'un pôle A ne se substitue pas circulairement à celui du suivant B. L'aimantation du pôle A va en disparaissant pendant qu'une nouvelle aimantation va en se développant dans le pôle B voisin.

établit d'ailleurs que, dans ce cas, le moteur ou le transformateur doit également posséder trois bobines excitatrices montées symétriquement.

Dès le début de ses recherches Tesla paraît avoir saisi l'importance de la construction multipolaire au point de vue de la réduction de la vitesse. En mai 1888, il avait déjà conçu des moteurs synchrones multipolaires dont le sentiment se développa successivement chez lui. La figure 99

En avril 1889, Tesla décrit des manières d'actionner des moteurs diphasés avec un courant alternatif ordinaire *par création de phases* pour le démarrage des moteurs synchrones; il met à cet effet les deux jeux de bobines en parallèle avec une résistance sans induction dans une des branches (Fig. 100), et une résistance à self-induction (ou bobine de réaction) dans l'autre. On retire du circuit ces résistances quand le moteur a démarré et celui-ci continue à tourner synchroniquement. Tesla, n'a pas revendiqué d'une manière générale ce dispositif et il a eu raison : Ferraris l'avait en effet déjà employé (p. 100) ; mais

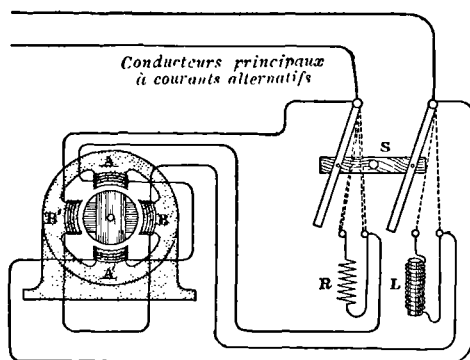


Fig. 100. — Dispositif de création de phases.

il l'a réclaté comme moyen d'obtenir le démarrage d'un moteur synchrone. Voici ses propres expressions : « Je crois être le premier à actionner des moteurs électro-magnétiques par courants alternatifs... en déterminant un mouvement progressif ou une rotation de leurs pôles ou points de plus grande attraction magnétique au moyen de courants alternatifs jusqu'à ce qu'ils aient atteint une vitesse déterminée, puis en faisant produire à ces mêmes courants une simple alternance de leurs pôles, ou, en d'autres termes, en opérant un changement dans l'ordre et le caractère des connexions du circuit pour convertir un moteur fonctionnant d'après un principe en un autre régi par un principe différent en vue de l'objectif décrit. » Il ne paraît avoir envisagé que les moteurs synchrones.

A ce brevet en succédèrent d'autres visant diverses espèces de moteurs à décalage artificiel et momentané, dont l'un est indiqué dans la figure 101 ; on y voit deux jeux de bobines destinés à être couplés en parallèle sur des conducteurs de courants alternatifs ordinaires. L'une des paires de bobines à longs noyaux de fer, était enroulée de gros fil ayant un grand coefficient de self-induction et une faible résistance ; l'autre comportait des noyaux très courts recouverts de fil de haute résistance. Il en résulte un retard des courants dans la première comparativement à ceux de la seconde, ce qui détermine un

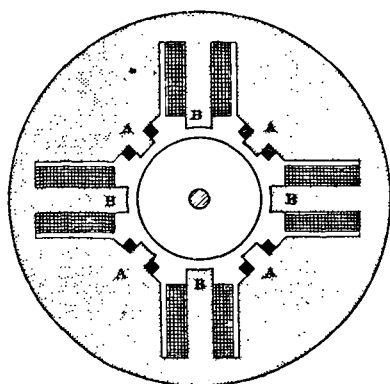


Fig. 101. — Moteur à phases artificielles.

déplacement progressif de polarité. — D'autres formes diverses furent imaginées entre 1889 et 1891, époque où cette longue série aboutit en fin de compte à un moteur à six pôles dans lequel la différence cherchée de phase était produite dans un seul jeu de bobines par l'emploi d'un condensateur excité par des courants dans un enroulement secondaire. — Cette importante série de brevets est passée entre les mains de la Compagnie Westinghouse. Pour détails plus complets sur l'œuvre de Tesla, on pourra consulter sa communication de mai 1888 à l'American Institute of Electrical Engineers, ainsi que le livre publié par M. T. C. Martin sur *Les inventions de Tesla*.

Moteurs Haselwander. — Dans l'été de 1887, Haselwander,

ingénieur d'Offenburg (grand-duché de Bade), construisit une machine triphasée de 10 chevaux environ, à induit annulaire de 40 centimètres de diamètre, enroulé de 12 bobines, et à inducteur tétrapolaire mobile interne. Elle était en outre munie

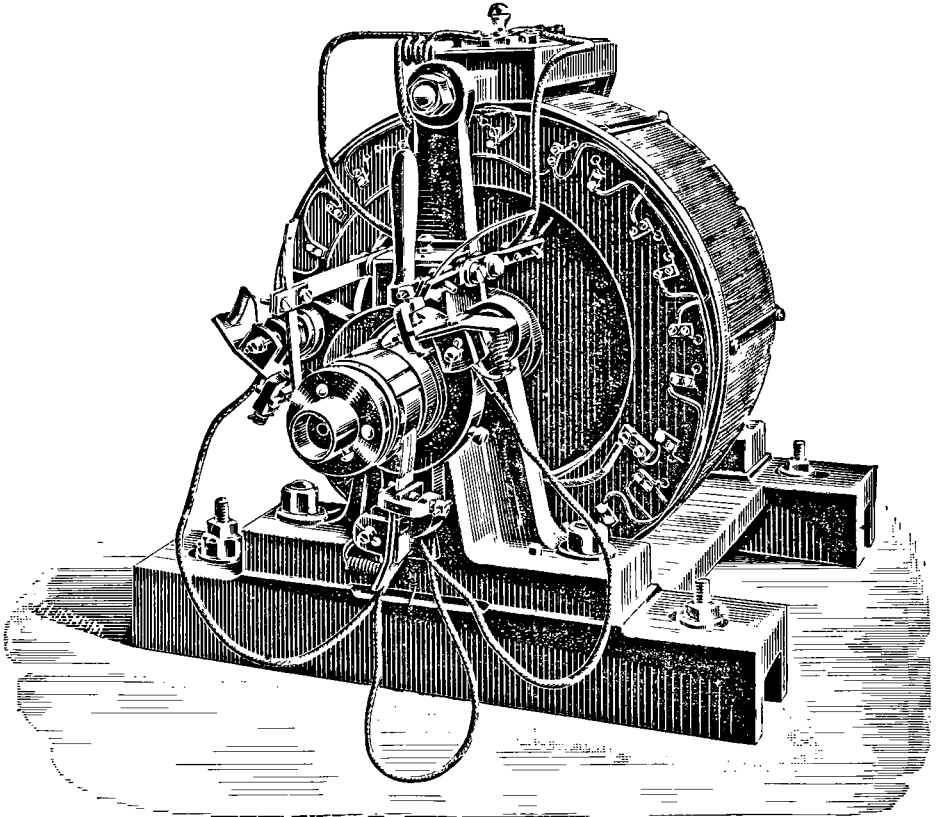


Fig. 102. — Moteur Haselwander (1887).

d'un commutateur pour l'excitation de son propre inducteur. Elle figurait à l'Exposition de Francfort en 1891.

Voici quelle était l'idée poursuivie par l'inventeur : — Une machine dynamo ou un moteur quelconque à courants continus développe en réalité dans ses groupes successifs de bobines des forces électromotrices alternatives de phases différentes, et

THOMPSON. — Courants polyphasés.

8

L'objet du commutateur est de transformer ces courants polyphasés en une succession imbriquée de courants de même sens. Dans la transmission de l'énergie par courants continus, deux machines de ce genre sont reliées l'une à l'autre par deux fils de ligne. Le courant continu ondulatoire développé par la machine primaire (ou génératrice) est de nouveau résolu en ses composantes par le commutateur de la machine secondaire (ou réceptrice), pour reprendre la forme d'une série de courants alternatifs polyphasés. Haselwander eut alors l'idée de supprimer les deux opérations similaires, mais inverses, intermédiaires, consistant à composer d'abord et à commuter, pour ensuite commuter inversement et décomposer les courants polyphasés engendrés dans les sections individuelles de l'induit. On arrive ainsi à la transmission polyphasée de la puissance en supprimant le commutateur et les balais, à cette seule exception près qu'on peut les utiliser subsidiairement à la dérivation d'une petite fraction des courants pour l'excitation des inducteurs. Les bobines étaient montées en étoile, mais elles étaient munies de bornes qui permettaient de grouper soit en série soit en parallèle les bobines individuelles dans chacune des trois phases. Chacune des 12 bobines contenait 52 spires de fil de 1,52 mm de diamètre. On pouvait recueillir dans chaque phase un courant de 24 ampères sous 100 volts, à la vitesse angulaire de 960 tours par minute. Cette machine (Fig. 102) est décrite dans un mémoire du D^r J. Epstein dans l'*Elektrotechnische Anzeiger* de 1891¹.

Moteur Wilson. — Dans un brevet (n^o 18525 de 1888) E. Wilson décrit un moteur diphasé à induit en anneau ou en tambour avec commutateur. L'inducteur et l'induit étaient tous deux alimentés par des courants diphasés ; la position des balais régissait le sens de rotation.

Moteurs Wenström. — Wenström prit en 1890 un brevet

¹ Voir également le *Rapport officiel de l'Exposition électrotechnique de Francfort* de 1891 (publié en 1893), p. 251 ; ainsi que *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1891, p. 540 et 609.

anglais (n° 5425) pour un système triphasé dans lequel il décrit et représente avec une remarquable clarté l'enroulement d'un générateur triphasé. Il propose de relier en étoile les trois enroulements. La spécification de ce même brevet comprend également un transformateur et un moteur triphasés.

Recherches de M. von Dolivo Dobrowolski. — M. von Dolivo Dobrowolski est l'un des chefs électriciens de l'Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft de Berlin. C'est à lui qu'est due l'expression de « Drehstrom », courant tournant (originellement appliquée à un système triphasé) pour désigner un système polyphasé de courants (ou du moins le champ tournant que ces courants permettent de réaliser).

Son premier brevet anglais (n° 10933 de 1889) se rapporte aux parties mobiles de machines polyphasées et se réfère particulièrement à la production, par Ferraris, de champs tournants dans lesquels des corps conducteurs sont actionnés par les courants parasites qui y sont induits. Son but était d'employer comme partie mobile une carcasse de fer dans laquelle sont engagés des conducteurs ou vaisseaux de cuivre, en barres ou bandes, disposés de manière à se présenter transversalement à la direction du mouvement de rotation et au flux du champ, ces conducteurs étant réunis en court-circuit par leurs extrémités. Les dessins qui l'accompagnent représentent des formes simples d'organes rotatifs (y compris une « cage d'écureuil ») en court-circuit avec des masses de fer.

Les deux brevets suivants (nos 19554 et 19555 de 1889) ont trait à une forme de générateur polyphasé et à un transformateur triphasé. Ce dernier avait un noyau à trois branches ; le circuit magnétique était monté en étoile.

En août 1890 apparaît la spécification du brevet n° 15 260 de ladite année qui a pour objet d'ajouter à la jonction commune d'un système triphasé (ou polyphasé quelconque) un retour commun, de manière à rendre les trois (ou n) circuits indépendants les uns des autres, et indiquant un appareil de réglage pour les tensions dans chacun des circuits. On y trouve décrits

deux transformateurs triphasés auto-régulateurs, dont l'un, applicable aux transports à grande distance, ainsi qu'une combinaison de trois transformateurs séparés.

Le brevet n° 20425 de 1890 décrit un organe rotatif feuilleté enroulé de bobines isolées ; et, après avoir indiqué comment, au démarrage, la réaction des courants dans l'élément mobile se combine avec le champ produit par les courants primaires pour diminuer le couple moteur, il suggère l'idée d'introduire dans le circuit en mouvement des résistances susceptibles d'effectuer un réglage. Les dessins représentent des résistances liquides.

Dans le brevet n° 3191 de 1891, Dobrowolski produit des transformateurs polyphasés destinés à transformer des courants d'un nombre quelconque de phases différentes en un système triphasé, en même temps que des moyens de transformer des courants triphasés en courants d'un plus grand nombre de phases. Dans son brevet n° 13503 de la même année il décrit sa méthode de réalisation de courants de phase intermédiaire par des combinaisons de systèmes en triangle et en étoile. Il montre, par exemple, comment, dans un système triphasé, on peut obtenir six phases de courants avec les trois fils de ligne, au moyen de six bobines dont trois sont individuellement en série avec les trois lignes, et les trois autres reliées en dérivation sur lesdites lignes, ces six bobines étant convenablement espacées sur le noyau inducteur. Par l'introduction de ces phases intermédiaires Dobrowolski cherchait à rendre plus constant le couple moteur qui, en l'absence de réactions de la part de l'organe mobile, tendrait à osciller entre certaines valeurs maxima et minima dans chaque période complète. Ces différents modes d'enchaînements de circuits et de phases sont étudiés dans un grand nombre de figures.

Installations polyphasées à l'Exposition de Francfort, 1891.

— On ne saurait faire un historique complet du développement des courants polyphasés sans mentionner particulièrement l'Exposition électrotechnique de Francfort-sur-le-Main dans l'été de 1891. Bien que nominale internationale, cette Exposition

fut surtout défrayée par des maisons allemandes et dut son principal intérêt aux appareils polyphasés exposés par un grand nombre de ces maisons. Le rapport officiel¹ en donne de multiples illustrations, en même temps que les épreuves effectuées pendant plusieurs mois par le jury des récompenses. C'est à lui que sont empruntées les notes suivantes en ce qui concerne les expositions de cette classe.

MM. W. Lahmeyer et C^{ie}, de Francfort, envoyaient, de leur station centrale modèle à la halle des machines, un courant triphasé sous 75 volts, qui actionnait plusieurs moteurs triphasés, y compris la machine historique de Haselwander (Fig. 102, p. 113), un moteur synchrone de 18 chevaux, du type courant Lahmeyer à quatre pôles, mais muni de trois bagues de contact au lieu du commutateur ordinaire, et un certain nombre de petits moteurs.

MM. Shuckert et C^{ie} avaient deux grands générateurs diphasés à induits de leur type connu en anneau plat, munis de bagues de contact. L'une de ces machines, située dans la halle des machines, fournissait la puissance nécessaire à la station de prise d'eau dans le Main; l'autre, installée à plus de 1 500 mètres de distance, dans le Palmgarten, alimentait le hall de distribution de l'Exposition. Comme l'enroulement en anneau de ces induits était connecté en triangle (Fig. 52, p. 50), il était indispensable d'employer deux circuits indépendants avec quatre lignes en tout; mais l'introduction de transformateurs (voir Fig. 157) permettait d'employer un système de transmission à distance à trois fils. Des machines analogues, avec inducteurs à excitation constante, étaient employées comme moteurs. Elles tournaient synchroniquement et fournissaient plus de puissance que si elles eussent servi comme moteurs asynchrones sans excitation séparée. La machine de 25 chevaux employée comme moteur dans l'Exposition avait, par le fait, un commutateur auxiliaire pour lui permettre d'exciter son propre champ magnétique. Le moteur de 50 chevaux à la station des pompes était excité sépa-

¹ *Allgemeiner Bericht über die Internationale Elektrotechnische Ausstellung in Frankfurt am Main, 1891, 2 vol., Francfort, 1893.*

rément. Les transformateurs appliqués étaient également en forme d'anneau plat; les bobines en étaient roulées dans des gorges pratiquées dans un noyau formé de feuillard bobiné en spirale fermée.

MM. Siemens et Halske exposaient divers petits moteurs triphasés, dont un type à élément mobile à circuit fermé sur lui-même, un autre type à organe tournant muni d'un commutateur auquel étaient amenés, par trois balais équidistants, les courants triphasés, après avoir traversé les trois circuits des enroulements de la partie fixe. On voyait également dans leur exposition trois générateurs triphasés, dont l'un ressemblait à leur alternateur ordinaire et avait comme induit un jeu de 24 bobines (en trois séries de huit bobines chacune) tournant entre deux couronnes de 16 pôles alternés; l'autre, analogue comme lignes générales à leurs dynamos à courant continu, portait un induit en tambour relié, en trois points équidistants de l'enroulement, à trois bagues de contact.

Quant à l'Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft, de Berlin, elle avait assumé, avec la Compagnie des ateliers d'Oerlikon, de Zurich, l'intéressante démonstration d'un transport d'énergie à grande distance, sous haute tension, entre Lauffen et Francfort, ci-dessous décrite tout au long. C'était un transport triphasé. Le moteur de 100 chevaux de l'Exposition, qui recevait le courant de Lauffen distant de 177 kilomètres, était employé à pomper l'eau nécessaire à l'alimentation d'une cascade artificielle. Il est représenté dans la figure 104, page 121. — Un plus petit moteur triphasé¹ de 3 chevaux environ, employé à l'entraînement d'une petite dynamo à courant continu chargée de lampes, était d'une construction inverse de celle actuellement en usage dans les moteurs d'induction. Les courants arrivaient par trois bagues de contact à l'induit mobile, tandis qu'une partie extérieure fixe, formée de disques d'anneau en tôle revêtus d'un enroulement fermé sur lui-même, constituait par induction son champ magnétique. — Un moteur encore moindre, avec organe mobile

¹ Appartenant aujourd'hui au laboratoire du Collège technique de Finsbury.

d'induction sans contacts, servait à actionner un petit ventilateur. — D'autres moteurs, exposés au même endroit par la Compagnie d'Oerlikon et construits sur les dessins de M. Brown, présentaient la construction aujourd'hui en usage d'un induit extérieur fixe formé de disques d'anneau reperçés pour le logement des enroulements ; de son côté, l'organe mobile était également formé de disques de noyau reperçés avec simple circuit de cuivre en barres réunies en court-circuit par deux disques terminaux, comme une cage d'écureuil. L'un de ces moteurs, d'une puissance de 20 chevaux, à 1 200 tours par minute, ne pesait que 420 kilogrammes.

Transport de Lauffen à Francfort. — A Lauffen, près d'Heilbronn, la Neckar présente une chute de 3,60 m environ, dont la puissance avait été, il y a quelques années, partiellement utilisée par une fabrique de ciment ; sur les 1 500 chevaux disponibles, 1 200 environ étaient captés par des turbines, mais il en restait encore suffisamment pour fournir les 200 ou 300 chevaux qu'on se proposait d'appliquer à l'éclairage de la ville d'Heilbronn distante de 9 à 10 kilomètres. Pendant que ce projet était à l'étude, on eut l'idée, à l'automne de 1890, de saisir l'occasion fournie par l'Exposition de Francfort pour montrer ce qu'on pouvait obtenir d'un transport d'énergie à grande distance sous haute tension, et faire voir, en même temps, les avantages des champs tournants ou des courants polyphasés. Lauffen est, comme on l'a vu, à 177 kilomètres de Francfort. Le transport de 100 chevaux qu'on se proposait de faire par trois fils de 4 millimètres seulement de diamètre et avec un rendement de 75 p. 100 au moins exigeait l'emploi d'une tension qui ne pouvait pas être inférieure à 8 000 volts. Ce tour de force fut néanmoins réalisé. L'ingénieur de la ligne et de la station génératrice de Lauffen était M. Oscar von Miller, de Munich. Le concours de deux grandes Sociétés industrielles, l'Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft, de Berlin, et les Ateliers de construction d'Oerlikon, de Zurich, lui était assuré, ainsi que la sympathique coopération du service impérial des Postes allemand dans la tâche difficile

de la pose et de la construction de la ligne¹. Le fil de cuivre fut prêté pour la circonstance par une maison de Hedderheim. Les deux générateurs, étudiés par M. C. E. L. Brown et construits par la Compagnie d'Oerlikon, sont décrits page 30. Chacun d'eux était capable de fournir trois courants, de 1 400 ampères chacun, sous 55 volts environ, à la fréquence de 40 périodes par seconde. A chacune des extrémités de la ligne étaient installés des transformateurs triphasés : à Lauffen, pour relever la tension à 8 500 volts ; à Francfort, pour la ramener à 65 volts environ. Ces transformateurs (construits les uns à Berlin, les autres à Oerlikon) étaient à immersion dans l'huile pour meilleur isolement. Ils ressemblaient extérieurement à ceux de Hochfelden (Fig. 44, p. 43). Les connexions des enroulements, tant à basse qu'à haute tension, correspondaient au montage en étoile ; les jonctions communes étaient mises à la terre pour les deux. Le diagramme de la figure 103 est par lui-même suffisamment explicatif. Les lignes étaient montées sur 3 000 poteaux à peu près, de 7,5 m de haut environ ; chacun d'eux portait trois

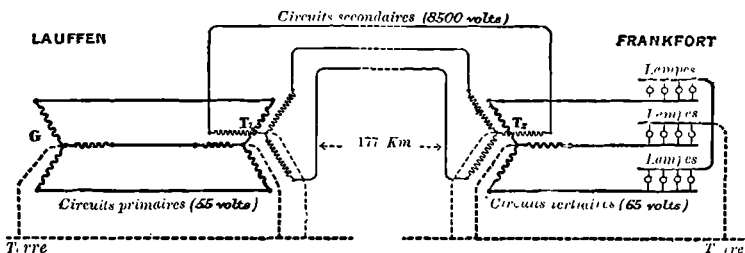


Fig. 103. — Circuits du transport de Lauffen-Francfort.

isolateurs de porcelaine à garde d'huile. Elles traversaient les territoires de quatre états, Wurtemberg, Bade, Hesse et Prusse, en suivant généralement la voie du chemin de fer de la Neckar, mais en évitant le long tunnel qui traverse l'Odenwald à Krähberg et passant par-dessus la montagne. Le poids de cuivre

¹ On trouvera, dans les volumes du *Rapport officiel* publié à Francfort en 1893, un plan de la route, avec des descriptions détaillées des machines et de la ligne, ainsi que les essais faits par les membres de la commission sous la direction du professeur H.-F. Weber, de Zurich.

total employé dans les lignes s'élevait à 60 tonnes à peu près. La construction de la ligne a été effectuée sous la direction de

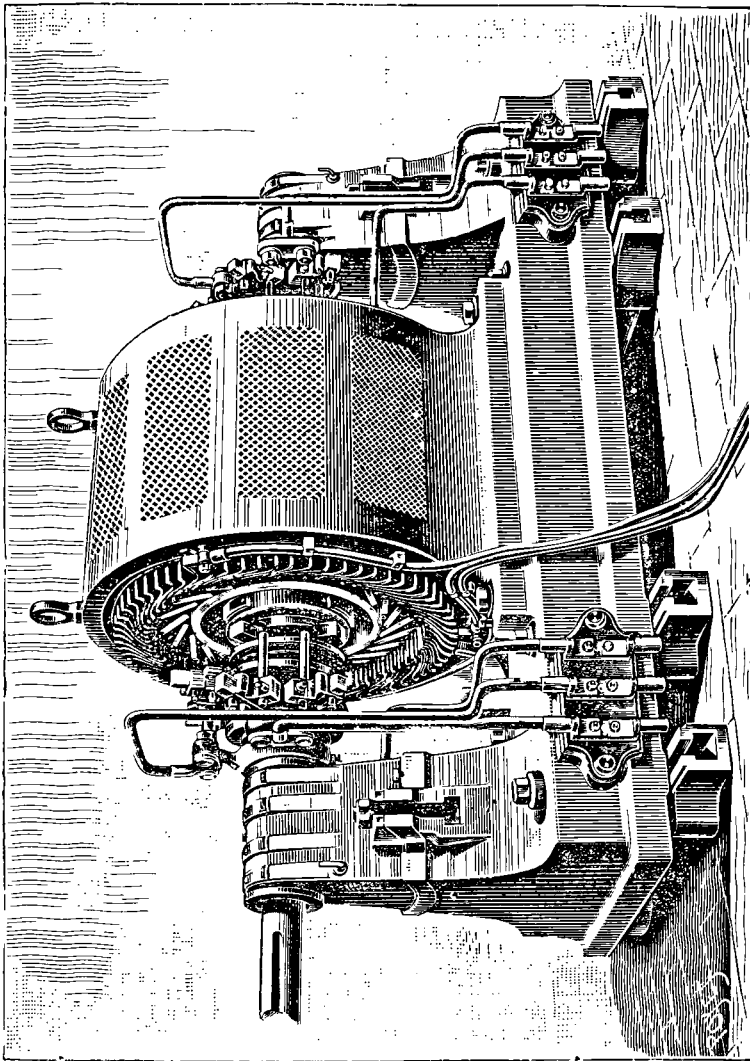


Fig. 101.— Moteur triphasé de 100 chevaux (Dobrowolski).

M. Ebert, inspecteur des télégraphes de l'Empire allemand, avec la collaboration du service postal et télégraphique du Wurtemberg. Le Directeur général des Postes de l'Empire, le D^r von

Stephan, prit personnellement un grand intérêt à cette opération, et sa haute influence contribua largement à son succès. Le 24 août 1891 la ligne était livrée officiellement aux deux Compagnies chargées de l'entreprise, et le lendemain les lampes de l'Exposition de Francfort étaient alimentées par la puissance fournie à Lauffen. Dans l'Exposition se trouvaient un moteur triphasé de 100 chevaux (Fig. 104), étudié par M. von Dolivo Dobrowolski et construit par l'Allgemeine Gesellschaft, ainsi que d'autres petits moteurs auxquels il a déjà été fait allusion. Ce moteur actionnait une pompe centrifuge qui absorbait environ 60 chevaux et élevait l'eau d'alimentation d'une cascade artificielle de 10 mètres de chute environ dans les jardins de l'Exposition. En plus de ces moteurs, le courant ainsi transmis alimentait à peu près 1 000 lampes à incandescence.

On était tout d'abord très sceptique quant au résultat de ce transport dans ces conditions nouvelles d'emploi de tensions aussi élevées sur une ligne de cette longueur et avec des courants polyphasés. Certains électriciens prétendaient que le rendement serait notablement réduit par des perturbations possibles dues à la capacité des lignes agissant comme des condensateurs ou aux dérivations inévitables avec les 10 000 isolateurs qui supportaient la ligne. Dans l'intimité, ceux qui avaient des liens étroits avec l'entreprise exprimaient des craintes relatives au rendement qui pouvait tomber au-dessous de 50 p. 100, et l'on eut un instant l'appréhension qu'on ne laissât pas le jury faire des essais complets. Mais l'expérience a démontré l'inanité de ces craintes. Les essais minutieux auxquels s'est livrée la Commission pendant l'automne ont été faits pour la plupart sous la tension de 8000 volts, et ils ont donné pour la puissance électrique recueillie à Francfort jusqu'à 74 p. 100 (en moyenne) de celle fournie au générateur par les turbines de Lauffen. On a étudié les différentes sources de pertes ; celles-ci ont été mesurées et les résultats des nombreux essais effectués ont été consignés dans le rapport du professeur Weber, dont les conclusions sont ci-dessous résumées :

1. Dans l'exploitation Lauffen-Francfort pour la transmission

électrique d'énergie sur une distance de 170 kilomètres¹, au moyen d'un système de courants alternatifs, sous une tension de 7 500 à 8 500 volts, avec conducteurs nus montés sur isolateurs en porcelaine à gardes d'huile, le rendement minimum sur le circuit tertiaire à Francfort a été de 68,5 p. 100 et le plus fort rendement, de 75,2 p. 100 de la puissance fournie par la turbine à Lauffen.

2. Dans ce transport à distance, la seule cause de perte appréciable aux instruments de mesures a été celle provenant de la résistance du circuit (effet Joule).

3. Des considérations théoriques ont démontré que l'influence de la capacité sur de longs conducteurs nus aériens pour le transport à distance de l'énergie par courants alternatifs, dans les conditions de l'expérience et avec une fréquence de 30 à 40 périodes par seconde, était d'un ordre de grandeur tel qu'il n'y avait pas lieu de s'en préoccuper dans l'étude des transmissions électriques.

4. En ce qui concerne notre appréciation générale sur les essais ci-dessus relatifs à la détermination du rendement de la transmission Lauffen-Francfort, nous ajoutons, comme quatrième résultat, que : le fonctionnement électrique par courants alternatifs sous 7 500 à 8 500 volts dans des conducteurs de 170 kilomètres de long, isolés à l'huile, à la porcelaine et à l'air, présente autant de régularité, de sécurité et de stabilité que le fonctionnement par courants alternatifs sous quelques centaines de volts de tension à travers des conducteurs de quelques mètres de longueur. .

Lors d'études ultérieures faites dans le courant de l'année par le docteur Kittler et M. W. H. Lindley², on est arrivé à des tensions excessives, dépassant dans certains cas 28 000 volts, en montant deux transformateurs en série à chaque extrémité de la ligne, avec les résultats ci-après résumés : la transmission d'énergie de Lauffen à Francfort, sous la tension élevée de 25 000 volts

¹ Longueur de la ligne électrique.

² *Rapport officiel de l'Exposition de Francfort*, II, p. 451.

(de ligne à ligne, soit 14 000 à 15 000 volts entre les lignes et la terre), et avec une fréquence de 24 périodes par seconde, a donné un rendement de 75 p. 100 environ avec une charge de 180 chevaux à peu près.

La transmission de Lauffen-Francfort a été beaucoup plus qu'une simple expérience. Elle a été une hardie et heureuse démonstration, non seulement de l'utilité des tensions élevées dans les transports d'énergie, mais du succès des courants polyphasés. A ce titre, elle fera époque dans le développement industriel des applications électriques. Elle a provoqué un immense intérêt dans tout le continent européen et en Allemagne en particulier. On en trouve la preuve dans ce fait que, dès la conception de ce projet, l'empereur d'Allemagne voulut contribuer personnellement, pour une somme de 12 500 francs, aux frais de sa réalisation.

CHAPITRE V

STRUCTURE DES MOTEURS POLYPHASÉS

Nous avons précédemment considéré un moteur polyphasé comme un appareil dans lequel un champ tournant développe les rotations d'Arago dans une masse métallique mobile. Mais on peut également l'envisager, et à juste titre, comme une sorte de transformateur rotatif, dont les circuits primaire et secondaire sont roulés sur un noyau de fer construit de manière à permettre à l'un des deux enroulements de cuivre de tourner.

Si l'on considère comme primaire ou inducteur l'élément du moteur qui reçoit les courants polyphasés destinés à produire le champ tournant, l'autre élément, mobile ou fixe, doit être regardé comme le circuit secondaire ou induit.

Les courants primaires induisent en effet des courants dans les enroulements secondaires, sur lesquels agit alors le champ magnétique dans lequel ils se trouvent, et qui sont en conséquence entraînés mécaniquement. Le système étant ainsi envisagé, il devient évident que, pour arriver au meilleur résultat, il faut offrir aux courants induits, qu'on appellera ou non parasites, des trajets ou conducteurs qui les utilisent le plus avantageusement possible au point de vue mécanique. Si, par exemple, on a pour le courant le choix entre deux voies dont l'une se trouve dans un champ magnétique faible où son action contributive à la rotation est petite, tandis que l'autre est dans une position où, au moment où le courant est le plus intense, il existe un champ puissant tendant énergiquement à aider cette

rotation, il sera naturellement avantageux de faire passer le courant par la seconde de ces deux voies.

De même, le circuit primaire ou inducteur peut rester immobile, tandis que le secondaire ou induit tourne ; ou bien encore le montage peut être inverse, le circuit primaire tournant, alors que l'élément secondaire ou induit reste fixe et, par sa réaction, entraîne l'élément primaire. Le premier de ces deux modes de procéder offre ce grand avantage, mis à profit dans tous les moteurs polyphasés, à l'exception des plus grands, qu'il n'est besoin comme circuit secondaire que d'un simple enroulement en court-circuit, ce qui débarrasse la machine de tout commutateur, collecteur, bague de contact, ou de connexions souples, résultat précieux au point de vue de la simplicité de la construction mécanique. Le second mode de construction exige des collecteurs et des balais pour la transmission du courant à la partie mobile ; mais il permet de modifier aisément la résistance de l'enroulement secondaire fermé, ce qui ne constitue pas cependant un bien grand avantage. A cette dernière catégorie appartient une petite machine triphasée (Fig. 95), construite en 1887 par la Compagnie Hélios, ainsi que l'un des deux moteurs de l'Allgemeine Gesellschaft exposés à Francfort en 1891 et établis sur les dessins de Dobrowolski. On fait aujourd'hui peu de moteurs de ce genre.

Dans les machines dont l'inducteur est fixe, le champ magnétique tourne rapidement, et la partie mobile cherche à se mettre en synchronisme, ou dans le voisinage du synchronisme, avec lui, le magnétisme induit dans l'élément mobile tendant à conserver un sens fixe par rapport à la masse métallique. Dans les moteurs du second genre, à inducteur mobile, cet inducteur tend à tourner en sens inverse de celui du champ magnétique qu'il développe lui-même, et à produire ainsi dans la masse secondaire immobile qui l'entoure une aimantation dans un sens déterminé. C'est cependant seulement dans le cas où il atteint la vitesse du synchronisme que le magnétisme dans l'élément induit arrive à un sens fixe par rapport à la masse de métal soumise à l'induction. Dans tous les autres cas, le magnétisme tourne

lentement par rapport aux masses induites, avec une fréquence égale à la différence entre celle des courants initiaux et celle du mouvement réel.

Organes mobile et fixe. — Ces considérations soulèvent la question de savoir quel est celui des deux éléments, inducteur ou masse induite, qu'on peut vraiment qualifier d'induit et d'inducteur. Pour les dynamos et alternateurs ordinaires on sait que cette question est régie non pas par le fait accidentel du mouvement donné ou non à l'un ou l'autre des éléments, mais bien par ce caractère que le magnétisme conserve ou non un sens invariable relativement à la masse métallique. Dans l'inducteur de toute dynamo, moteur ou alternateur, le magnétisme a un sens déterminé. Dans l'élément induit de chacune de ces machines, dynamo, moteur ou alternateur, le magnétisme change rapidement de sens en ce qui concerne la masse métallique; l'induit d'un moteur est d'ailleurs l'organe qui reçoit le courant fourni par la ligne.

Par suite, on peut regarder comme correspondant à l'induit l'organe du moteur polyphasé qui reçoit le courant de ligne, tandis que l'autre, dans lequel le magnétisme a un sens sensiblement fixe par rapport aux masses métalliques, correspond à l'inducteur; c'est en fait un inducteur qui n'est excité par aucun courant distinct ou une portion quelconque de courant commun, mais bien par les courants parasites induits en lui.

Cependant, depuis que l'ouvrier a acquis la notion que l'élément tournant s'appelle induit, on entend très communément désigner ainsi l'organe mobile des moteurs polyphasés; et pourtant, en réalité, dans presque tous les moteurs de ce genre, tels que ceux des figures 169, 171 et 172, l'induit est, à proprement parler, l'organe fixe qui entoure l'organe mobile.

Pour éviter toute confusion à cet égard nous nous abstenons généralement d'employer les expressions d'induit et d'inducteur dans la description des éléments des moteurs polyphasés; nous appellerons *organe* ou *élément mobile* la partie tournante, et *organe* ou *élément fixé* la partie immobile (*rotor* et *stator* des

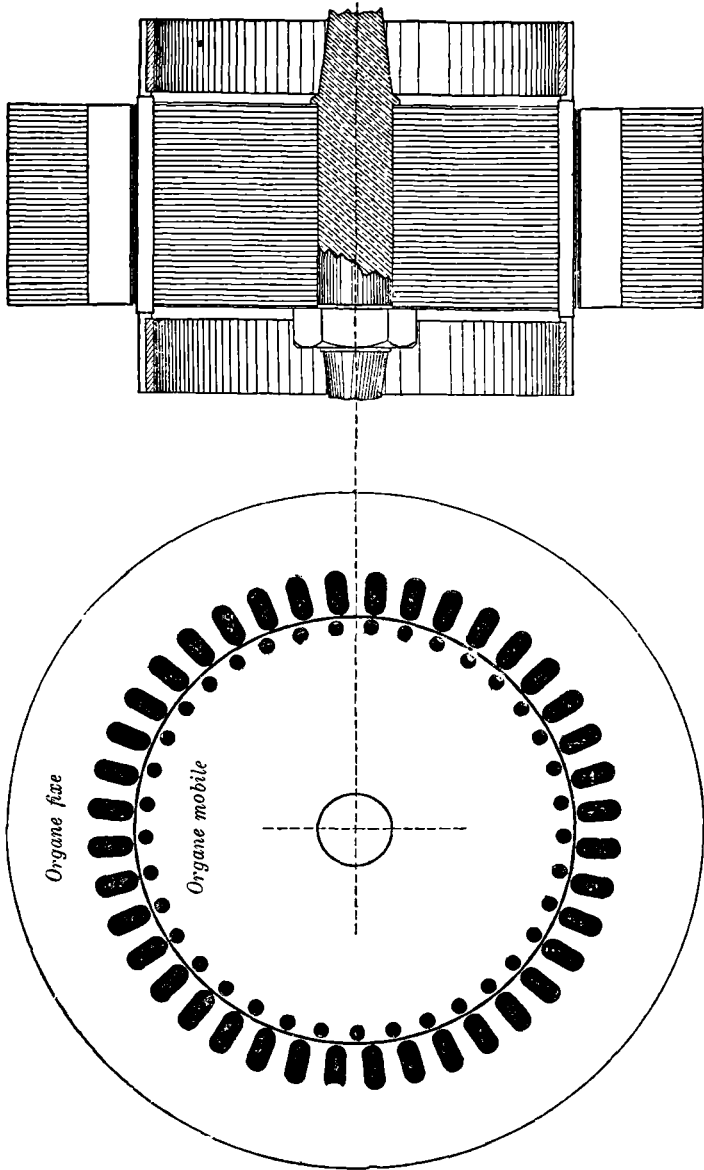


Fig. 105 et 106. — Organes fixe et mobile d'un moteur Brown.

Anglais); l'enroulement de l'organe fixe est communément le primaire, et celui de l'organe mobile, le secondaire.

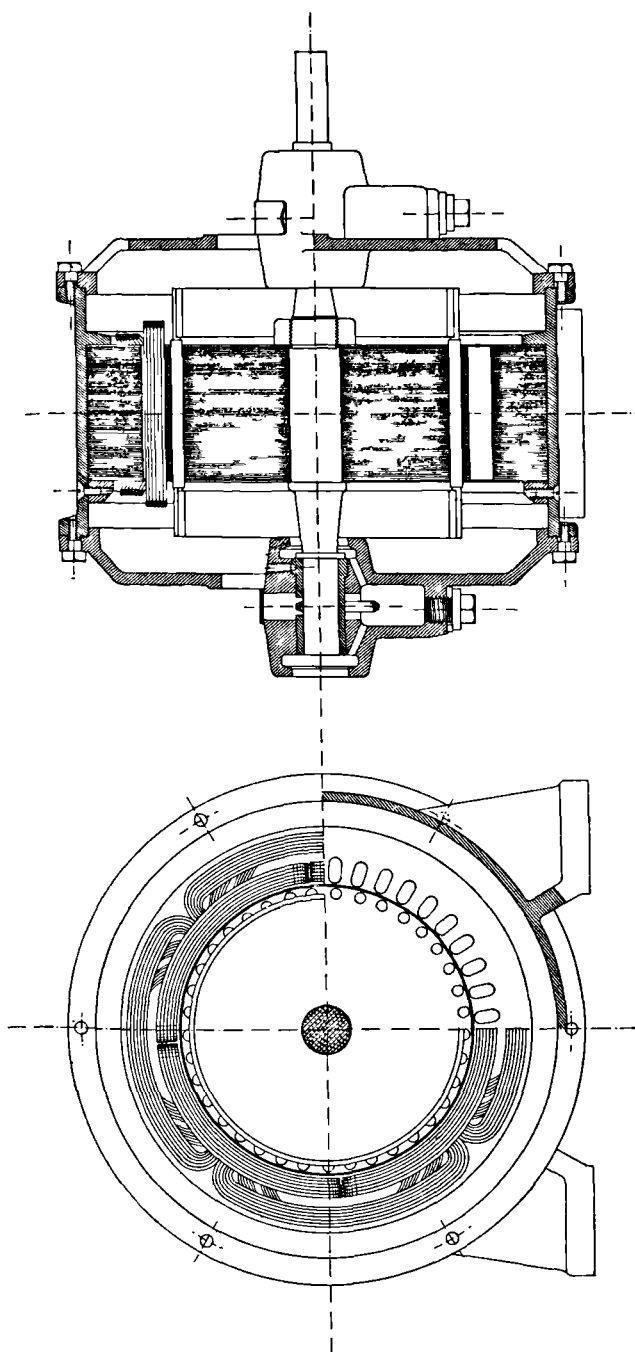


Fig. 107. — Moteur diphasé tétrapolaire, de 6 chevaux, à 1200 tours par minute. (Système Brown.)
(Échelle : $\frac{1}{6}$.)

THOMPSON. — Courants polyphasés.

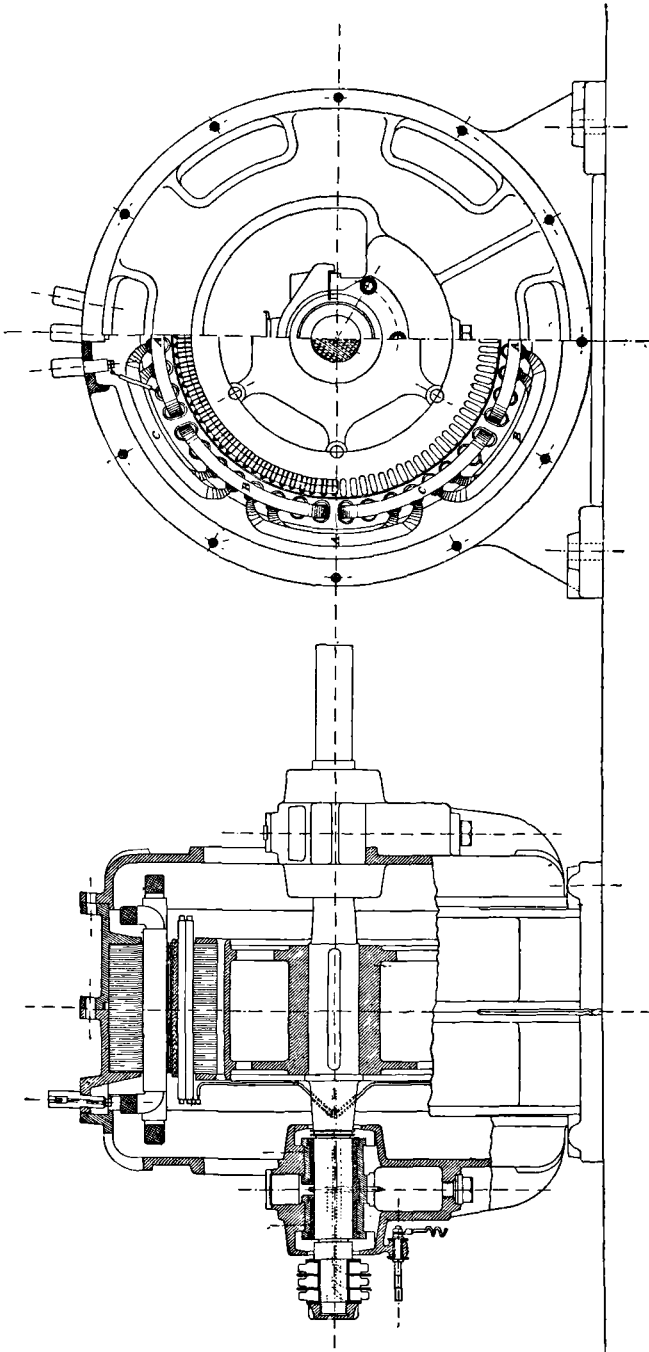


Fig. 108. — Moteur triphasé de 100 chevaux sous 5 000 volts, à 600 tours par minute.

(Échelle : $\frac{1}{20}$.)

Ces deux éléments sont ordinairement formés de tôles estampées, percées de trous pour le logement des enroulements. La figure 106 représente les disques ainsi estampés du moteur diphasé à 4 pôles, de 6 chevaux, dont la figure 107 donne le dessin complet. On y remarquera que les trous sont poinçonnés très près de la périphérie extérieure de l'organe mobile et très près également de la périphérie interne de l'organe fixe, de manière à ne laisser après ajustage qu'une simple toile de métal à travers laquelle il puisse se produire des dérivations magnétiques. On en voit d'autres types dans les figures 36 et 108. La figure 106 donne une section du moteur parallèlement à l'arbre; elle montre les disques mis en place. L'organe mobile est flanqué à chacune de ses extrémités d'une plaque métallique épaisse; dans les grands moteurs des boulons passant à une certaine distance de l'arbre relie ces deux flasques. On voit également dans la figure les tiges conductrices de cuivre enfilées dans des tubes de papier et mises en court-circuit à leurs extrémités par de larges cercles de fer qui offrent une grande surface de refroidissement.

La remarque précédente relative au synchronisme ne doit pas être prise dans ce sens que le nombre de tours de l'organe mobile tend à devenir égal au nombre de périodes qui, pour le même temps, constitue la fréquence des courants. Ce serait bien le cas si le champ était bipolaire; mais presque tous les moteurs polyphasés sont multipolaires, et la vitesse réelle de rotation est réduite en raison inverse du nombre de paires de pôles dans le champ tournant. Si, par exemple, on lance des courants d'une fréquence de 60 périodes par seconde dans un moteur enroulé de telle sorte que son organe fixe produise un champ tournant de six pôles alternés, c'est-à-dire trois paires de pôles, la polarité se déplacera d'un tiers de la circonférence 60 fois par seconde; autrement dit, le champ à 6 pôles effectuera 20 révolutions complètes par seconde, et c'est *cette* vitesse angulaire que tendra à atteindre l'organe mobile. L'avantage des montages multipolaires est ainsi de permettre de faibles vitesses angulaires sans renvois.

Structure de l'organe mobile. — Nous avons fait remarquer (p. 125) que, pour obtenir le meilleur résultat mécanique, il fallait faire passer les courants induits dans l'élément mobile par des voies magnétiquement situées de manière à aider, aussi puissamment que possible, les forces d'entraînement.

Considérons le cas le plus élémentaire, celui du cylindre de cuivre dans un champ magnétique, comme dans le moteur primitif de Ferraris (Fig. 92). L'action produite équivaut à celle que déterminerait une paire de pôles magnétiques situés de part et d'autre du cylindre et tournant autour de lui. Supposons le

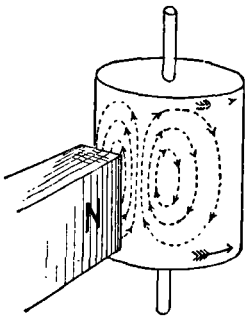


Fig. 109. — Courants parasites induits dans un cylindre de cuivre.

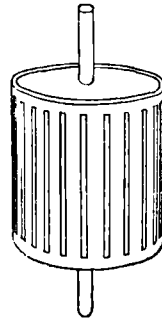


Fig. 110. — Cylindre de cuivre repercé de fentes longitudinales.

pôle nord en avant du cylindre (Fig. 109) et passant devant lui en allant de droite à gauche (ou dans le sens de rotation des aiguilles d'une montre, vu de dessus). L'action inductive sera la même que si le pôle restait immobile et que le cylindre tournât de gauche à droite. D'après le principe exposé page 5, elle développera, dans la partie passant sous le pôle, des forces électromotrices ascendantes dans le sens indiqué par les flèches, ce qui déterminera la production d'une paire de courants parasites tels que ceux représentés sur le schéma. Or, l'effort mécanique exercé sur un conducteur parcouru par un courant, lorsqu'il est situé dans un champ magnétique, est toujours dans une direction normale au flux magnétique et à la ligne de circulation du courant. La partie du cuivre qui porte le courant dirigé vers le haut dans le champ sera sollicitée latéralement vers la gauche,

tandis que les parties dans lesquelles le courant circule horizontalement seront simplement sollicitées vers le haut ou vers le bas sans contribuer en rien à la constitution du couple moteur. D'autre part, les portions du cuivre dans lesquelles les courants circulent vers le bas seront soumises, si elles se trouvent dans le même champ magnétique, à des forces tendant à les faire tourner en sens contraire. Dès lors on obtiendra évidemment un meilleur résultat si l'on peut faire passer les courants de retour allant vers le bas par quelque autre voie qui les ramène à travers un champ de polarité opposée à celle qu'ils traversaient en montant. Ils contribueront ainsi doublement à la production du mouvement.

Comme premier pas dans cet ordre d'idées, on améliorera évidemment le système en découpant dans le cylindre de cuivre des fentes parallèles s'étendant jusque dans le voisinage des bases du cylindre, comme dans la figure 110, ou bien en formant ce cylindre de barres parallèles reliées ensemble à chaque bout par un anneau métallique. Dobrowolski, qui semble avoir eu le premier l'idée de cette dernière structure à laquelle il a donné le nom de *Schluss-anker* (induit fermé), paraît avoir pensé qu'il importait peu que ces barres fussent isolées du noyau de fer. Il les regardait comme de simples veines de cuivre logées dans une masse compacte de fer.

Un noyau de fer dans le cylindre est naturellement un grand perfectionnement par rapport à une simple enveloppe ou une masse solide de cuivre, en ce qu'il améliore beaucoup le circuit magnétique et renforce le champ, ce qui a pour effet d'augmenter non seulement l'action inductive de l'organe fixe, mais aussi l'action mécanique des courants dans la production du couple moteur. Un cylindre massif en fer fonctionnerait d'ailleurs naturellement comme organe mobile : il serait excellent au point de vue magnétique ; mais la haute résistivité du fer empêche la circulation des courants induits de s'effectuer assez librement, et on améliore beaucoup le système en l'entourant d'une enveloppe de cuivre ou d'une cage d'écureuil en liges de cuivre, ou encore en noyant (comme dans la figure 111)

des tiges de cuivre (mises en court-circuit par des bagues à leurs extrémités) dans des trous pratiqués dans le voisinage immédiat de sa surface.

Mais tous les courants parasites à trajectoire circulaire, comme dans la figure 109, sont moins avantageux au point de vue de l'action mécanique que des courants confinés dans des passages spéciaux, et, de plus, avantageux ou non mécaniquement, ils consomment de l'énergie dépensée en chaleur; aussi vaut-il

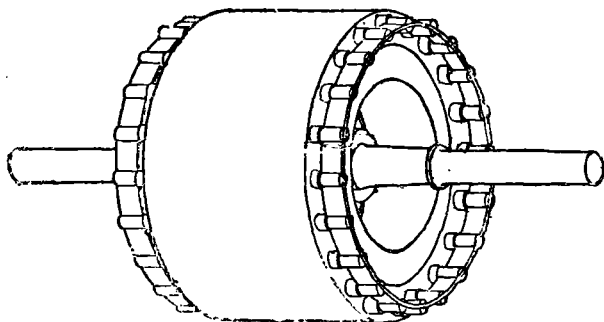


Fig. 111. — Organe mobile moderne à circuit fermé.

mieux, comme l'a fait M. Brown, adopter un autre mode de construction encore plus perfectionné qui consiste à former le noyau de disques minces ou d'anneaux de tôle douce, à les isoler (légèrement) les uns des autres et à les protéger (très efficacement) de tout contact avec les tiges de cuivre constitutives du circuit conducteur. On arrive ainsi à la forme (Fig. 111) d'organe mobile généralement employée dans les petits moteurs, et même dans les grands, à la *cage d'écureuil* en tiges de cuivre engagées dans un noyau en tôles de fer isolé et munies d'une bague de cuivre (ou, dans certains cas, de mallechort), les mettant en court-circuit à chaque extrémité.

On n'est cependant pas arrivé à cette forme sans de nombreuses expériences. Les recherches de M. Brown à cet égard, recherches qui n'ont pas encore été publiées, quoique remontant à 1890, sont du plus haut intérêt. M. Brown fit construire un grand nombre d'anneaux, tous de même diamètre intérieur,

bobinés de différentes façons, mais tous montés de manière à recevoir une égale excitation par courants triphasés, ainsi qu'un certain nombre d'organes rotatifs différents, de 199 centimètres de diamètre extérieur et ajustés de façon à tourner dans l'un quelconque des anneaux. Il pouvait ainsi expérimenter la manière de se comporter d'une grande variété de combinaisons, éprouver le couple mécanique exercé quand on les faisait tourner à différentes vitesses angulaires et mesurer la puissance respective qu'ils développaient. La figure 112, reproduite d'après le dessin qui servit à leur construction aux ateliers d'Oerlikon, montre dans ses quatre quadrants quatre de ces structures d'anneaux et quatre des constructions essayées pour l'organe mobile.

Voici la description des quatre anneaux en question :

A, *anneau perforé*, poinçonné de 24 trous de 18 millimètres de diamètre et dont chacun recevait 12 fils ; — B, *anneau lisse*, noyau annulaire uni, avec enroulement en deux couches, contenant 24 groupes de bobines de 19 spires chacune ; — C, *anneau finement denté*, à 48 dents séparées par des rainures contenant chacune 9 fils ; — D, *anneau à larges dents*, séparées par 12 grandes rainures comportant chacune 36 spires de fil. La longueur de ces noyaux annulaires parallèlement à l'arbre était de 150 centimètres.

Quant aux quatre éléments mobiles différents, indiqués dans la figure 112, ils étaient ainsi constitués : — *a*, cylindre massif en fer, percé de 44 paires de trous ; — *b*, masse de fer en double T, analogue à celle de la bobine en navette de Siemens, mais sans fil ; — *c*, cylindre en fer feuilleté formé de disques percés de 30 trous dans le voisinage immédiat de la périphérie, et garnis de fortes tiges de cuivre de 10 millimètres de diamètre, toutes réunies en court-circuit à leurs extrémités par deux bagues de cuivre en faisant une cage d'écureuil ; — *d*, cylindre de fer massif revêtu d'une enveloppe cylindrique en cuivre de 4 millimètres d'épaisseur.

En dehors des quatre formes ici représentées, six autres avaient été préparées : — *e*, un simple cylindre en fer massif ; — *f*, un cylindre massif en fonte ; — *g*, un cylindre massif en

acier; — *h*, un cylindre en fer percé de quatre grands trous (comme l'indique le cercle pointillé en *h* de la figure 112); — *j*, un cylindre en acier fondu, dont deux segments parallèles à l'axe avaient été enlevés; — *k*, une forme en double T, comme *b*, mais établie en feuilles de tôle; — et finalement un cylindre percé de trous, comme *a*, mais en fer massif et garni de conduc-

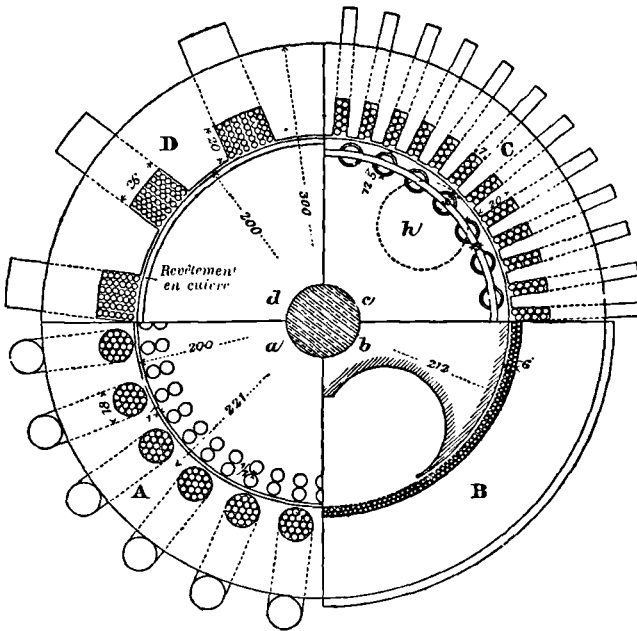


Fig. 112. — Eléments expérimentaux annulaires, fixes et tournants, essayés par Brown.

teurs en cuivre mis en court-circuit, mais sans isolement par rapport au fer.

Parmi ces divers éléments mobiles, le double T feuilleté donna les plus mauvais résultats; il ne tourna sous aucune charge. Le cylindre massif en fer était bien supérieur à celui de fonte, en même temps que celui revêtu d'une enveloppe de cuivre les surpassait tous deux, quel que fût l'anneau employé extérieurement. On fit des essais au frein en même temps que le moteur était utilisé à entraîner une petite dynamo dont la puissance extérieure était mesurée électriquement et réglée à

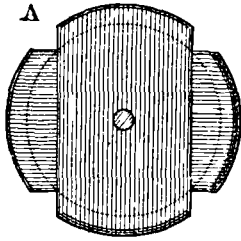
volonté. On reconnut comme meilleure forme d'élément mobile, quel que fût l'anneau employé, le cylindre feuilleté avec barres de cuivre montées en cage d'écureuil.

Des quatre anneaux, celui à surface lisse fournit les moins bons résultats. Les anneaux rainés à denture fine ou grosse donnaient lieu à un couple supérieur à celui de l'anneau à trous ; mais ils déterminaient l'un et l'autre, et notamment celui à large denture, un échauffement considérable de tous les éléments rotatifs massifs et produisaient un chant désagréable. Avec l'anneau à trous, les organes rotatifs s'échauffaient moins ; mais celui en cage d'écureuil, à conducteurs isolés et noyau feuilleté, restait absolument froid en ce qui concerne le fer ; les parties cuivre ne chauffaient que légèrement.

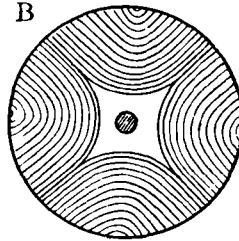
Ces résultats déterminèrent le choix en faveur des enroulements pratiqués dans des trous, pour les deux éléments mobile et fixe, et, depuis, ce mode de montage a pleinement justifié cette préférence.

Il n'est pas probable que beaucoup de pionniers de ces nouveaux moteurs se soient livrés à des essais analogues. Il n'est cependant pas sans intérêt de comparer les multiples modes d'enroulement imaginés par différents inventeurs à diverses époques. La plupart des types d'organes mobiles représentés dans la figure 113 sont empruntés à des spécifications de brevets dont les dates sont indiquées.

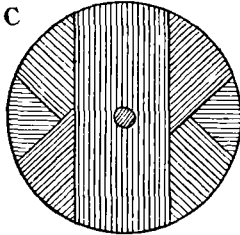
A est le type de Tesla, de 1888, avec deux bobines fermées roulées sur un noyau feuilleté, à angles droits l'une par rapport à l'autre ; il est applicable à un champ bipolaire. — B, du même auteur, est postérieur d'un an et demi au précédent et donne un enroulement utilisable avec un champ à 4 pôles. — C, bien que décrit également en vue d'un champ à 4 pôles, ne peut en réalité s'appliquer qu'à un champ à 2 ou à 6 pôles, puisque les bobines sont roulées suivant des diamètres. Il n'est vraiment applicable qu'à un champ dans lequel un pôle S se déplace diamétralement en regard d'un pôle N qui se déplace en même temps. — Pour des raisons inverses, le type D décrit par Tesla pour un champ bipolaire s'applique en fait à un champ



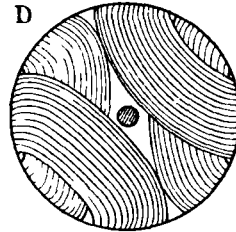
A
Tesla. — Champ bipolaire.
Mai 1888.



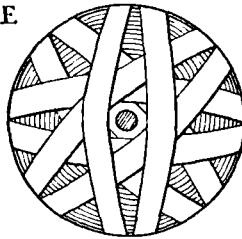
B
Tesla. — Champ à 4 pôles.
Décembre 1889.



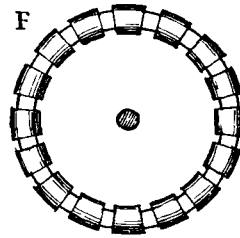
C
Tesla. — Champ à 4 pôles.
Décembre 1889.



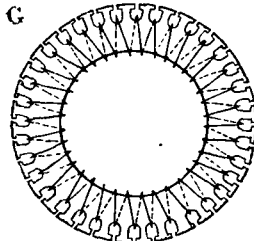
D
Tesla. — Champ bipolaire.
Décembre 1889.



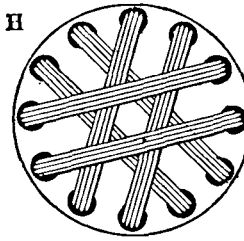
E
Tesla. — Champ bipolaire.
Janvier 1891.



F
Tesla. — Champ à 4 pôles.
Décembre 1889.



G
C^{ie} Hélios. — Champ à 4 pôles.
1887.



H
Dobrowolski. — Champ bipolaire.
1889.

Fig. 113. — Types divers d'éléments mobiles.

à 4 pôles. — E constitue un enroulement rationnel pour un champ à 2, à 6 ou à 10 pôles, mais non pour un champ à 4 ou 8 pôles. — Le type représenté en F est un simple anneau Gramme enroulé d'une série de bobines formant un circuit fermé ou une série de circuits fermés. Il ne donnerait que des résultats extrêmement médiocres s'il était simplement couplé en un seul circuit fermé, attendu que les f. é. m. induites y seraient en opposition mutuelle. — On peut reprocher le même défaut au type G proposé par M. C. Coerper, de la C^{ie} Hélios, en 1887 (voir p. 103). — Le type H a été imaginé en 1889 par von Dolivo-Dobrowolski.

Enroulement de l'élément mobile. — Le moment est venu de poursuivre l'étude du meilleur mode de couplage des conducteurs de l'organe mobile, ou de son enroulement dans le cas où il est réellement bobiné de fil. Comme nous l'avons fait remarquer précédemment, il est évident qu'on arrivera au meilleur résultat en reliant les conducteurs de telle sorte que les courants passant dans un sens à travers un champ d'une certaine polarité reviennent en sens contraire dans un champ de polarité différente. Dans une machine bipolaire les spires de l'enroulement devront en conséquence sous-tendre un diamètre, ou à peu près, tandis que, dans une machine à 4 pôles, l'arc sous-tendu devra être de 90°, et, dans une à six pôles, de 60° ou à peu près. Cette condition comporte un grand nombre de groupements des connexions et n'est pas, dans le cas de petites machines, incompatible avec la forme à court-circuit ou en cage d'écureuil. Mais une autre considération intervient, notamment dans les machines plus importantes; c'est la nécessité d'adopter un groupement ou un enroulement qui permette l'introduction, au moment du démarrage du moteur, d'une résistance auxiliaire dans le double but (voir p. 162 et 223) d'obtenir un couple de démarrage plus énergique et d'empêcher le brusque développement d'une trop grande intensité quand on applique le courant.

Pour mieux préciser les faits, considérons le cas d'un organe

mobile comprenant 24 conducteurs passant dans 24 trous pratiqués à la périphérie des disques de noyau, et placé dans un champ tournant à 6 pôles. Si le champ tourne dextrorsum par rapport à l'élément mobile, et qu'un pôle nord se trouve juste en face du conducteur n° 1 (Fig. 114), en induisant en lui une

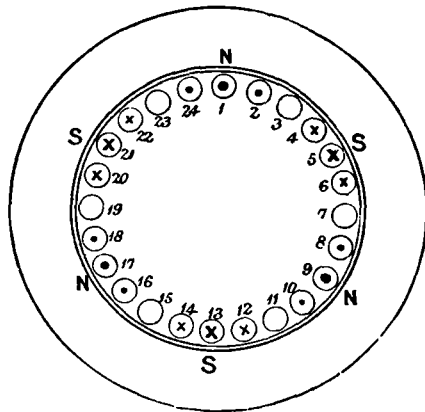


Fig. 114. — Organe mobile à 24 conducteurs pour étude de groupement.

force électromotrice dirigée vers le haut (c'est-à-dire tendant à envoyer un courant vers l'observateur), il sera induit dans les nos 9 et 17 des f. é. m. égales et de même sens, et, dans les nos 3, 13 et 21 des f. é. m. encore égales mais de sens contraire. Pour arriver au meilleur résultat, il faut relier ensemble ces six conducteurs, et il se présente plusieurs manières de le faire. Nous regarderons ces six conducteurs comme « homologues ».

1^{er} Mode de groupement. — Les six homologues en série. — Si l'on réunit tous en série les six conducteurs, en une sorte d'enroulement en zigzag ou ondulé, ils formeront un circuit fermé. Dans ce cas, on aura dans l'enroulement quatre circuits ainsi fermés ; les nos 2, 6, 10, 14, 18 et 22 en formeront un semblable, et les autres de même (Fig. 115).

2^o Mode de groupement. — Homologues reliés en groupes diamétraux. — Supposons qu'on relie chacun d'eux en une

spire fermée avec son voisin à l'extrémité opposée d'un diamètre. On obtient ainsi trois circuits fermés indépendants pour les six homologues, comme dans la figure 116, soit 12 circuits distincts

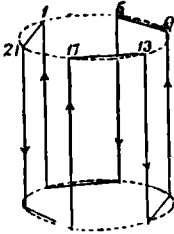


Fig. 115.

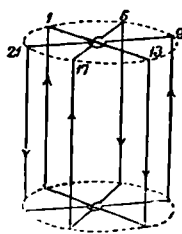


Fig. 116.

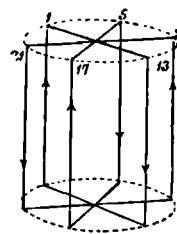


Fig. 117.

Divers modes de groupement de conducteurs d'organe mobile.

pour tout l'élément mobile. Mais, si les f. é. m. qui agissent dans un sens sur un côté et en sens contraire sur l'autre côté sont égales, il n'y a aucune raison pour ne pas relier les différentes spires en leur point de croisement, comme dans la figure 117. L'application du même raisonnement au reste des conducteurs conduit à la simple formation d'un faisceau des 24 conducteurs reliés par leurs deux extrémités; ils sont ainsi tous mis en court-circuit.

3^e Mode de groupement. — *Homologues voisins reliés deux à deux par paires.* — Admettons que chaque conducteur soit cou-

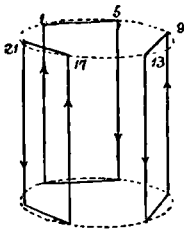


Fig. 118.

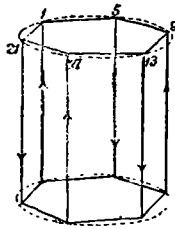


Fig. 119.

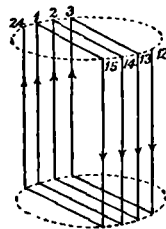


Fig. 120.

Divers modes de groupement de conducteurs d'organe mobile.

plé en un circuit fermé avec son « homologue » le plus voisin. On aura, comme dans la figure 118, 3 circuits fermés indépendants, ou 12 circuits distincts pour tout l'organe mobile. Il n'y

aura évidemment pas de différence si l'on couple le n° 1 avec le n° 5 ou le n° 21. De là, la figure 119 qui les représente tous reliés ensemble à leurs extrémités par des connecteurs hexagonaux ; au point de vue électrique, le résultat sera le même. La conséquence logique et pratique de ce mode de construction est la structure en cage d'écureuil qui met en court-circuit tous les conducteurs. Les méthodes 2 et 3 sont électriquement équivalentes ; mais la troisième est naturellement meilleure au point de vue mécanique.

4° Mode de groupement. — Conducteurs voisins groupés comme homologues. — Si l'on accepte, ce qui est moins avantageux, de négliger de légères différences de phase et qu'on traite les conducteurs voisins comme s'ils étaient simultanément soumis à la même action, on peut combiner des groupes de conducteurs voisins comme s'ils étaient homologues. Dans la figure 120, par exemple, on peut considérer les conducteurs n°s 24, 1, 2, et 3 comme faisant suite aux n°s 12, 13, 14 et 15, et les combiner de différentes manières. On peut les relier en quatre circuits fermés indépendants : le n° 24 avec le n° 15 ; le n° 1 avec le n° 14 ; le n° 2 avec le n° 13 ; et le n° 3 avec le n° 12. On peut aussi les coupler tous en parallèle, en réunissant en faisceau les n°s 1, 2, 3 et 24 et les reliant aux deux extrémités avec les n°s 12, 13, 14 et 15, également réunis en faisceau. On peut enfin les relier en série en un seul circuit fermé dans leur ordre numérique et finalement joindre le dernier au premier. Dans ce cas, l'ensemble des 24 conducteurs constituera trois groupes indépendants, composés chacun de 8 conducteurs en série.

Un autre mode de groupement électriquement équivalent au précédent consiste à combiner les n°s 1, 2, 3 et 4 avec les n°s 5, 6, 7 et 8 comme fils de retour dans un groupe. Dans ce cas également, si la combinaison est faite en série, l'ensemble des 24 conducteurs constituera 3 groupes indépendants.

Il est évident que, dans le cas de la combinaison de conducteurs « homologues » en circuits fermés, quel que soit le nombre d'entre eux couplé en série ou en parallèle, le courant dans

chaque conducteur sera le même nonobstant le mode de groupement, attendu que, en raison de la connexion en série de 2, 4, 6 ou plus d'entre eux, la résistance et la force électromotrice totales augmentent dans la même proportion. A ce point de vue, tant qu'on a affaire à des « homologues », il n'y a pas la moindre différence dans l'action du moteur, que le groupement soit fait en circuits indépendants, ou en série, ou en parallèle. Mais, si l'on veut s'arranger de manière à pouvoir introduire une résistance de démarrage dans les circuits de l'organe mobile, on se trouve dans l'obligation d'employer des modes de combinaison en série, afin de simplifier le nombre des bagues collectrices et des balais nécessaires, de diminuer l'intensité sur laquelle on doit agir, et de réduire en même temps au minimum l'influence de la résistance de contact des balais, etc., après le retrait de la résistance additionnelle.

5° Mode de groupement. — Groupement pour insertion de résistance de démarrage. — Dans les cas où il faut introduire des résistances de démarrage dans les circuits de l'élément mobile en vue d'augmenter le couple initial, on prend habituellement des dispositions qui permettent de dériver de l'organe mobile le courant à l'aide de bagues collectrices et de balais de contact. Pour éviter des complications, on groupe ordinairement les enroulements en étoile en trois séries avec une jonction commune, chacun des bouts libres aboutissant à une bague montée sur l'arbre. Des trois balais de contact partent des fils qui passent par trois résistances convenables (on emploie fréquemment des résistances liquides telles que de l'eau contenant du carbonate de soude en dissolution avec plaques de charbon comme électrodes) pour se rendre à une jonction commune. Cette construction, qu'on peut voir dans la figure 108, s'applique à l'alimentation de l'organe fixe aussi bien par courants diphasés que par courants triphasés. Mais, pour ce groupement en trois séries, il est préférable que le nombre de conducteurs par pôle du champ tournant soit un multiple de trois. Ce n'est pas le cas dans l'exemple que nous avons pris plus haut, où l'on a un

organe mobile à 24 éléments dans un champ à 6 pôles ; mais on pourrait appliquer ce dispositif avec un organe mobile à 18 ou 36 éléments. On peut, il est vrai, diviser l'enroulement en trois séries symétriques (comme dans le mode de groupement n° 4 ci-dessus) ; mais les trois séries ne peuvent être groupées en étoile à moins qu'on n'ajoute une quatrième bague pour retour commun.

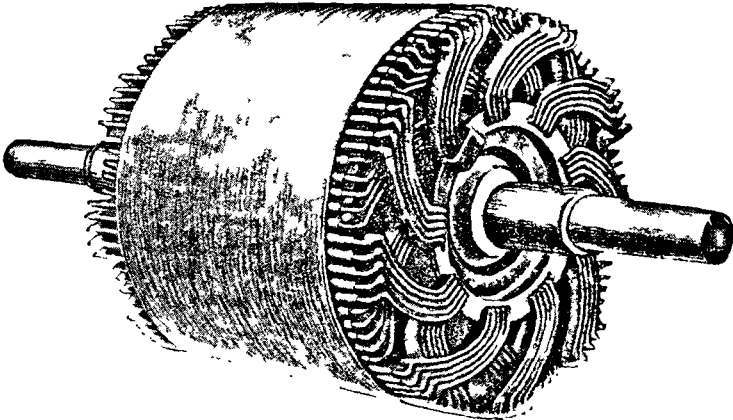


Fig. 121. — Organe mobile enroulé de la Compagnie d'Oerlikon.

La figure 121 représente un organe mobile, avec son bobinage, construit par la Compagnie d'Oerlikon.

Il n'est pas sans importance de signaler un détail relatif à la forme de construction en cage d'écureuil. Dans tous les cas où le nombre de conducteurs sur l'organe mobile a un facteur commun avec le nombre de pôles du champ tournant, il y a (plus particulièrement au démarrage) tendance de la part du moteur à fonctionner indûment comme simple transformateur. Un appareil de ce genre, tel que le représente la figure 122, constituerait un excellent transformateur triphasé fixe, le champ tournant induisant simplement des courants triphasés synchrones dans les enroulements de la partie centrale. La tendance au mouvement serait alors extrêmement faible. Dans tous les moteurs d'induction, il y aurait tendance à la production de quelque chose d'analogue si le nombre de conducteurs ou de groupes de

conducteurs sur l'organe mobile correspondait à celui des conducteurs de l'organe fixe. Pour éviter cet inconvénient, on donne généralement aux deux organes des nombres différents de groupes ou de conducteurs, et, dans le cas où tous les enroulements sont mis en court-circuit, on pousse cette précaution jusqu'à choisir des nombres qui n'aient même pas de facteur commun. Comme exemple, on peut voir le moteur diphasé de Brown (Fig. 105, p. 128) dans lequel l'organe fixe est percé de 40 trous destinés à recevoir l'enroulement primaire, et dont l'élément mobile est une cage d'écurie à 37 barres.

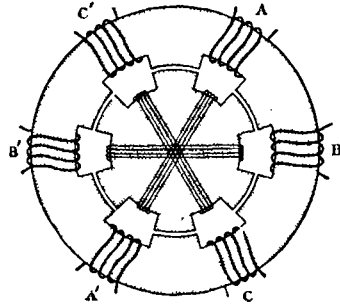


Fig. 122. — Pseudo-moteur :
Transformateur triphasé.

Structure et enroulement de l'organe fixe. — L'enroulement de l'élément fixe d'un moteur est généralement analogue à un enroulement en tambour avec conducteurs passés dans des trous réservés dans le fer, comme on l'a vu précédemment dans les figures 37, 41 et 42 ; pour les petits moteurs, il est parfois identique à un enroulement d'anneau Gramme, comme l'indiquent schématiquement les figures 49 et 57. Dans l'étude de la théorie d'un moteur, on prend habituellement, pour plus de facilité, un simple enroulement tel que celui de la figure 49, avec champ diamétral pour l'organe mobile. Il est bon, en conséquence, de suivre les connexions correspondantes pour un élément fixe multipolaire enroulé en tambour, tel qu'on le trouve communément dans la pratique. La figure 123 donne un diagramme analogue à celui de la figure 49, avec une seule spire par bobine traversant les trous de fer. On voit, dans figure 124, le même fer enroulé en tambour ; les sens du courant dans les conducteurs actifs y sont les mêmes que précédemment. Les points dans les trous indiquent un courant venant vers l'observateur ; les croix, un courant qui s'en éloigne.

Imaginons maintenant l'organe fixe coupé suivant la ligne CD

et redressé en un arc de rayon beaucoup plus grand, et un certain nombre de ces arcs placés bout à bout. On obtiendra l'en-

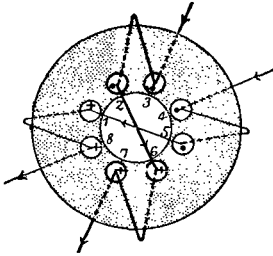


Fig. 123. — Anneau.

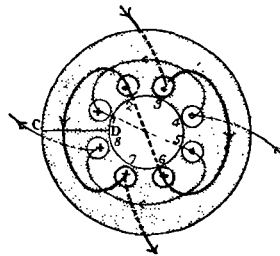


Fig. 124. — Tambour.

Bobinages d'organes fixes diphasés bipolaires.

semble représenté par la figure 125 qui reproduit en principe l'enroulement du moteur Brown diphasé de la figure 173.

Le fil de chaque bobine, tel que celui qui traverse les trous 3 et 6, peut être enroulé plusieurs fois avant de passer au trou

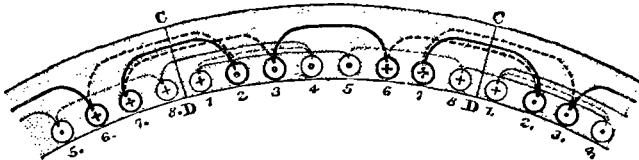


Fig. 125.

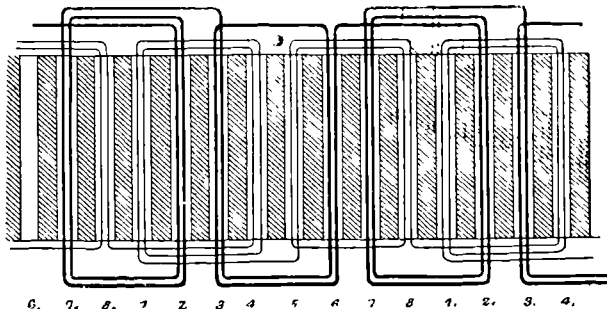


Fig. 126.

Bobinage d'organe fixe diphasé multipolaire (Brown).

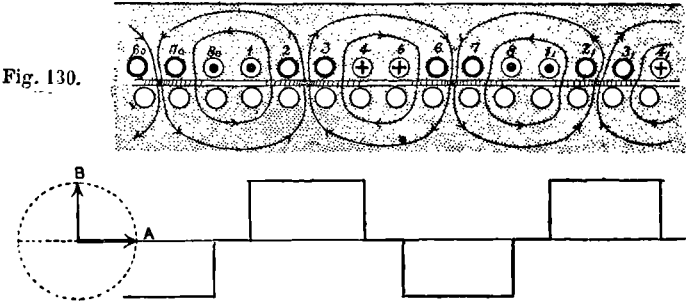
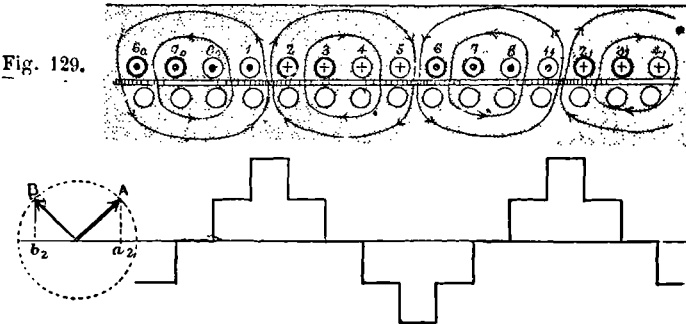
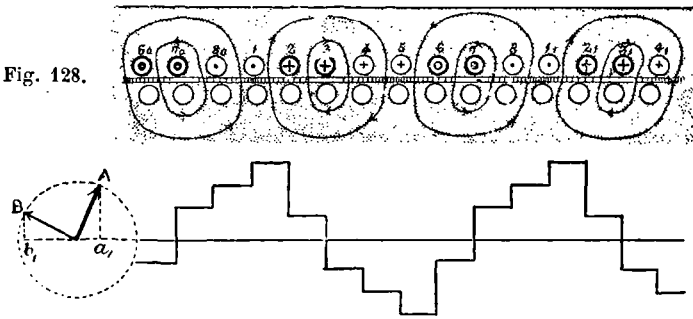
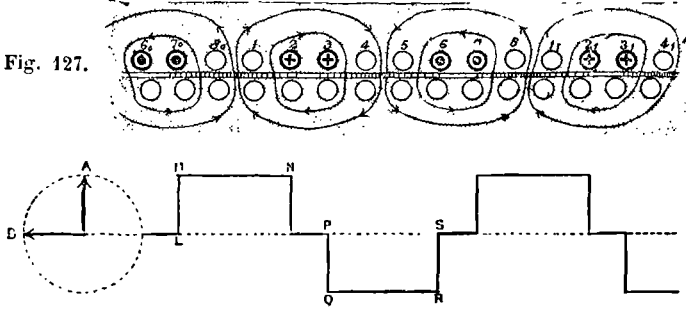
suivant. Par exemple, l'enroulement dans le moteur particulier de Brown auquel il est ici fait allusion vient en avant par 3 et s'en va par 6 pour rentrer par 3 et ressortir par 6 un certain

nombre de fois ; il passe ensuite à 2 pour revenir en avant et va successivement plusieurs fois de 2 à 7 avant de passer à 3, et ainsi de suite.

Ce mode d'enroulement est développé en plan sur la figure 126, avec deux spirés seulement par bobine.

Progression du champ. — En se reportant aux figures 127 à 130, dans lesquelles la surface de l'élément fixe est redressée au lieu d'être courbe, on peut voir la manière dont progressent les pôles magnétiques le long d'un élément fixe multipolaire à enroulement de ce genre.

Les trous par lesquels passent les conducteurs de l'élément fixe sont représentés par la série supérieure de cercles ; la série inférieure est celle des trous affectés au passage des conducteurs de l'élément mobile (abstraction faite des courants qui y circulent). Un entrefer est réservé sur les figures entre les deux éléments fixe et mobile. Pour distinguer les bobines appartenant à chaque circuit, on a tracé les trous de l'un (que nous appellerons circuit n° 1) en traits plus gros que ceux de l'autre (n° 2). Dans le diagramme tournant à la gauche de chaque figure, la manivelle en gros trait indique la phase du courant dans le circuit n° 1, et celle en trait fin, la phase dans le circuit n° 2. Dans la figure 127, le courant dans le circuit n° 1 est à son maximum, et le n° 2 ne porte aucun courant. Le flux magnétique circule à travers le fer suivant des trajectoires analogues à celles indiquées par les flèches. La *force magnétomotrice* développée par les bobines de l'organe fixe en chaque point de sa surface est indiquée par la courbe anguleuse située au-dessous de chaque figure. Voici comment elle est obtenue : — Dans l'espace qui sépare les trous 7₀ et 2, il existe une certaine force magnétomotrice due au courant dans les conducteurs 6₀, 7₀, 2 et 3. Sa valeur, à un instant quelconque, peut être représentée par la projection de la manivelle A sur une ligne verticale (le courant dans les bobines étant proportionnel à cette projection). On peut en conséquence tracer la ligne L M égale à la projection de A ; M N représente alors approximativement



Progression rotative.

la force magnétomotrice en chaque point le long de la surface comprise entre les trous 7₀ et 2. Entre 2 et 3 la force magnétomotrice est nulle, les conducteurs d'un côté neutralisant l'action des conducteurs situés de l'autre côté. Entre 3 et 6 la force se renverse et est représentée par la courbe P Q R S au-dessous de l'axe horizontal.

Dans la figure 128, la phase a avancé de $1/16$ de période. Si l'on trace pour les bobines du circuit n° 1 une courbe analogue à celle de la figure précédente, en prenant A a_1 pour la force magnétomotrice, ainsi qu'une courbe analogue pour les bobines du circuit n° 2 avec B b_1 comme force magnétomotrice, la somme de ces courbes sera alors celle indiquée en dessous (Fig. 128).

Dans la figure 129, la phase a avancé de nouveau de $1/16$ de période, de sorte que les intensités sont égales dans les deux circuits. La courbe tracée au-dessous donne la somme de leurs forces magnétomotrices. Après un nouveau $1/16$ de période, la courbe serait encore de forme irrégulière comme dans la figure 128 ; elle n'est pas indiquée dans les schémas. Un nouveau $1/16$ de période encore plus tard, l'intensité dans le circuit n° 1 est tombée à zéro et a atteint un maximum dans le circuit n° 2, de sorte que la courbe de la figure 130 est analogue à celle de la figure 127, mais déplacée en avant de la distance qui sépare deux trous. Un quart de période après, elle s'est déplacée de deux nouveaux conducteurs, et, après une autre demi-période, elle a passé les huit trous et est revenue à la position indiquée dans la figure 127 par rapport au jeu suivant de bobines. Les pôles ont, par le fait, passé par un cycle complet.

Si ces courbes représentent approximativement la distribution de la force magnétomotrice, elles ne représentent pas celle du flux ; il ne doit pas en effet exister de changements aussi brusques que ceux indiqués par les angles des courbes ci-dessus. L'épanouissement naturel du flux et le fait de son déplacement en avant dans l'intersection des conducteurs tendent à adoucir l'action des angles dans la courbe de force magnétomotrice, de sorte que la courbe représentant la densité du flux ou

l'induction en chaque point est une courbe à sommets régulièrement arrondis assez analogue à une sinusoïde ; tout écart d'une sinusoïde sera en réalité une irrégularité contre laquelle réagiront énergiquement les courants dans les conducteurs, et l'on peut, en conséquence, sans erreur sensible, admettre que l'induction suit dans sa distribution la forme sinusoïdale.

On remarquera que l'ordonnée maxima dans la courbe de la figure 129 est supérieure à l'ordonnée maxima de la figure 127 dans le rapport de $\sqrt{2} : 1$. Ainsi la valeur maxima de l'induction tend à se modifier. Les conducteurs de l'élément mobile tendent cependant à réagir en sens inverse, de sorte qu'en réalité la modification est presque nulle.

M. von Dolivo Dobrowolski a donné, en 1891, la courbe représentée dans la figure 131, dans laquelle sont ajoutés les effets des deux courants magnétisants I et II dans un simple

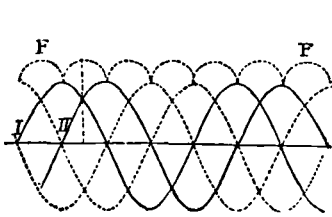


Fig. 131. — Moteur diphasé.

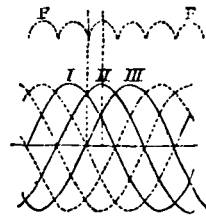


Fig. 132. — Moteur triphasé.

Courbes de Dobrowolski.

moteur diphasé ; elle donne lieu à un champ d'intensité variable représenté par la courbe supérieure F F, dont les ordonnées varient de 40 p. 100. Dans la figure 132, on trouve les courbes également fournies par lui pour un moteur triphasé ; les variations n'y sont que de 14 p. 100. Plus le nombre de phases est élevé, moins cette variation prend d'importance. En conséquence, M. Dobrowolski était d'avis que ces fluctuations du champ étaient un inconvénient dans un moteur et en affaiblissaient le couple mécanique ; mais, dans les vues modernes relatives au moteur alternatif simple, elles ne paraissent pas être nuisibles. Ces fluctuations, autant qu'elles peuvent se présenter en dépit des effets de réaction des conducteurs voisins, agissent comme s'il était

superposé à un champ tournant constant un certain nombre de champs alternatifs fixes présentant des pôles en tout point où un groupe de conducteurs appartenant à l'un des circuits est situé dans le voisinage d'un groupe de conducteurs appartenant à un autre circuit et ayant une fréquence égale à celle d'alimentation.

Induction. — L'induction maxima \mathfrak{B} admissible dans le fer de ces moteurs dépend de la fréquence d'alimentation. La perte d'énergie par cycle dans les noyaux de fer par suite de l'hystérésis n'augmente pas proportionnellement à l'induction. Si celle-ci passe de 4 000 à 8 000 gauss, la perte par hystérésis passe à peu près du simple au quadruple, d'après la loi empirique donnée par Steinmetz qui fixe cette perte comme proportionnelle à la puissance 1,6 de \mathfrak{B} . Avec des inductions élevées, les noyaux de fer se surchaufferaient donc, à moins qu'on ne réduisît la fréquence. Inversement, de faibles fréquences permettent des inductions qui ne sont pas admissibles avec des fréquences élevées. Voici les valeurs données par Kolben :

Pour 40 cycles par seconde. . . .	$\mathfrak{B} =$	6 500 à 5 500 gauss
-- 50	—	6 000 à 5 000 —
— 60	—	5 000 à 4 500 —
— 80	—	4 500 à 4 000 —
— 100	—	4 000 à 3 500 —
— 120	—	3 500 à 3 000 —

Dans le fer situé entre les trous l'induction est souvent plus élevée que ne l'indiquent ces chiffres et peut être portée jusqu'à 11 500 gauss pour une fréquence de 40 cycles par seconde.

L'épaisseur radiale du fer de l'organe fixe (C D, Fig. 125) peut être un peu inférieure à la moitié du pas polaire, de manière à livrer aisément passage à la moitié du flux émanant d'un pôle et qui se distribue comme on le voit dans les figures 24 et 25.

CHAPITRE VI

THÉORIE ÉLÉMENTAIRE DES MOTEURS POLYPHASÉS

Dans l'exposition de la théorie des moteurs polyphasés, nous nous proposons avant tout de donner les relations générales entre la vitesse de rotation du champ magnétique, la vitesse angulaire de l'élément mobile de la machine, la résistance des circuits, le couple moteur et le rendement de l'appareil. Nous développerons ensuite un mode analytique de traitement de la question.

Pour plus de simplicité nous prendrons une machine bipolaire dans laquelle le fer de l'organe fixe a généralement la forme représentée par la figure 103, et dont l'entrefer soit assez petit pour permettre de négliger les dérivations magnétiques.

Supposons un champ magnétique tournant produit dans l'organe fixe par des courants di- ou triphasés. Les courants dans l'organe mobile (comme on le verra plus nettement dans le chapitre suivant) créent également un champ magnétique qui, composé avec celui de l'organe fixe, donne naissance à un champ tournant résultant. C'est à ce champ résultant que sont dus les forces électromotrices dans les conducteurs et le couple moteur. Nous envisagerons ce champ comme constitué par un flux uniforme passant diamétralement à travers l'organe tournant et coupant, dans sa rotation, les conducteurs tant de l'élément fixe que de l'élément mobile.

Soient ω_1 la vitesse angulaire du champ tournant $= \frac{2\pi n_1}{T}$ tours par seconde dans une machine bipolaire, $\frac{1}{T}$ étant la fréquence

correspondant à une période T . (Si la machine est multipolaire, on aura $\omega_1 = \frac{2\pi n}{Tm}$, m étant le nombre de ses paires de pôles.) ;

ω_2 la vitesse angulaire de l'élément ou organe mobile de la machine $= \frac{2\pi n_2}{T}$, n_2 étant le nombre réel de tours qu'il fait par seconde ;

W le couple mécanique entre les éléments fixe et mobile ;

P la puissance totale, en watts, transmise à l'organe mobile par l'organe fixe ;

p la puissance utile, en watts, réellement employée à faire tourner l'élément mobile.

$\omega_1 - \omega_2$ est le *glissement*⁴ de l'élément mobile par rapport au champ, ou la différence de leurs vitesses angulaires. Si le champ a une vitesse angulaire $\omega_1 - \omega_2$ supérieure à celle de l'organe tournant, il est clair que l'action inductive sur les circuits de ce dernier sera exactement la même que si l'organe mobile tournait en sens inverse avec une vitesse angulaire $\omega_1 - \omega_2$, tandis que le champ resterait immobile.

$P - p$ est la puissance dissipée en échauffement des conducteurs et du fer de l'organe mobile, puisque c'est la différence entre la puissance totale fournie à cet élément et celle qu'il utilise.

Mais P est proportionnel à W et à ω_1 , et, par suite, en choisissant des unités convenables, on peut écrire $P = W \omega_1$. p est de même proportionnel à W et à ω_2 , et l'on peut écrire $p = W \omega_2$.

D'où, en divisant cette dernière équation par la précédente,

$$\frac{p}{P} = \frac{\omega_2}{\omega_1},$$

ce qui montre que le rendement de l'organe mobile est égal au rapport des deux vitesses angulaires.

Nous allons maintenant considérer le rendement de l'organe fixe. Le moteur à champ tournant est simplement une sorte de

⁴ Certains auteurs appliquent l'expression « glissement » au rapport des deux vitesses angulaires. On peut en établir la distinction en employant pour ce dernier rapport le mot « glissage ».

transformateur rotatif dont les enroulements fixe et mobile constituent respectivement les circuits primaire et secondaire. Or, si l'on a $\omega_2 = \omega_1$, il n'y aura pas de courants induits dans les conducteurs de l'élément mobile ; l'organe fixe fonctionnera uniquement comme bobine de réaction. Il suit de là que, si la condition d'alimentation des courants primaires est celle de différence de potentiel constante, le flux magnétique dans la machine, tournant à la vitesse angulaire ω_1 , aura une valeur sensiblement constante quelle que soit la charge, exactement comme le flux dans le fer d'un transformateur ordinaire. Naturellement, ceci n'est vrai que si le courant dans les bobines de l'organe fixe n'est pas réduit ; il n'en est plus de même si, par exemple, on intercale une résistance en circuit avec les bobines de l'élément fixe, ou si le moteur démarre sans aucune résistance dans son circuit mobile, comme on le verra ci-après. De plus, s'il n'y a que très peu de dérivations magnétiques dans l'entrefer entre les organes fixe et mobile (comme c'est en réalité le cas dans les moteurs bien étudiés), les seules forces électromotrices dans les conducteurs de l'organe mobile seront celles développées par le champ résultant, et, par suite, les courants maxima dans les conducteurs correspondront à la situation de ces conducteurs dans la partie du champ où l'induction est maxima. Et, comme le flux est constant pour toutes les charges (si les conditions ci-dessus sont remplies), il s'ensuit que le couple moteur sera proportionnel aux courants dans l'organe mobile. Mais, ces courants étant eux-mêmes proportionnels au glissement $\omega_1 - \omega_2$, il en résulte que W est également proportionnel à $\omega_1 - \omega_2$ et qu'on peut écrire $W = b (\omega_1 - \omega_2)$, b étant une constante qui dépend de l'intensité du champ, du rayon de l'organe mobile, et de la longueur ainsi que de la résistance de ses conducteurs.

On peut donc écrire :

$$\begin{array}{ll} \text{Puissance utile, en watts.} & p = b\omega_2 (\omega_1 - \omega_2) ; \\ \text{Puissance totale, en watts.} & P = b\omega_1 (\omega_1 - \omega_2) ; \\ \text{Puissance dissipée, en watts} & P - p = b (\omega_1 - \omega_2)^2. \end{array}$$

L'application du diagramme bien connu pour les rendements

des moteurs est dès lors possible : — on tracera un carré $ABCD$ (Fig. 133) dont le côté AB sera numériquement égal à ω_1 , et on prendra sur ce côté une longueur BF numériquement égale à ω_2 . La surface $AHFD$ représentera la puissance totale fournie ; l'aire $AFGK$ ou $GLCH$, la puissance utilisée, et le carré $KGHD$, la puissance dissipée en échauffement des conducteurs de l'organe mobile. Le rendement s'approchera d'autant plus de l'unité que

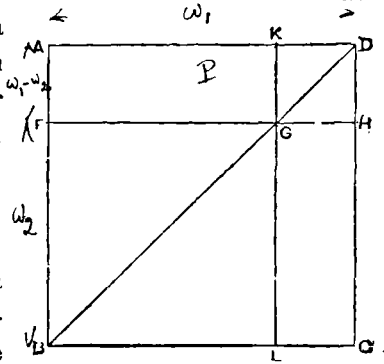


Fig. 133. — Diagramme figuratif du rendement.

le point F sera plus voisin de A , et, comme dans le cas des moteurs à courant continu, n'était l'affaiblissement du champ par réaction d'induit, la puissance extérieure serait maxima pour $\omega_2 = \frac{\omega_1}{2}$, le rendement n'étant alors que de 50 p. 100.

On voit maintenant que, quand le moteur tourne à une vitesse angulaire bien inférieure à sa vitesse de régime, les dérivations magnétiques et autres causes jouent un rôle assez important pour que le couple moteur soit réellement moindre qu'à une vitesse plus élevée. La figure 133 est néanmoins applicable aux cas de fonctionnement normal, et elle montre comment ces moteurs à champ tournant se comportent exactement de la même manière que les moteurs à courant continu¹.

Dans les bons moteurs modernes à champ tournant, le glissement n'est guère que de 4 p. 100 au plus, sauf pour de très petites dimensions de machines où il peut atteindre 10 p. 100 à pleine charge.

Dans l'étude ci-dessus, il n'a pas été tenu compte de la perte due à l'échauffement des conducteurs du circuit primaire ou fixe. Cet échauffement, comme la perte ordinaire RI^2 dans le circuit d'excitation d'une dynamo quelconque, ne représente qu'une faible pro-

¹ Leur caractéristique commune est en effet la constance de la puissance pour un régime donné, contrairement aux alternateurs dans lesquels la puissance est constamment et essentiellement variable. (N. d. T.)

portion de la puissance totale fournie et peut se calculer aisément d'après la résistance des bobines de l'organe fixe. On n'a pas davantage fait entrer en ligne de compte les pertes par hystérésis dans le fer de l'élément fixe, auxquelles il faut aussi, naturellement, pourvoir par une excitation supplémentaire ; mais elles sont faibles dans une machine bien étudiée. En dehors des pertes par hystérésis ou par courants parasites dans le fer, les frottements dans les coussinets viennent encore en déduction de la puissance disponible.

FLUX MAGNÉTIQUE RÉSULTANT DANS UN MOTEUR

On a vu ci-dessus, d'après la considération des analogies avec un transformateur, que le flux magnétique dans le moteur était approximativement constant pour toutes les charges normales. On a vu également (p. 150) que, dans l'entrefer qui sépare les éléments mobile et fixe, l'induction variait sensiblement comme une fonction sinusoïdale d'un point à un autre sur la périphérie. Désignons par \mathcal{B} cette induction dans le sens où elle est maxima. Elle est, comme dans le noyau d'un transformateur, le résultat des actions magnétisantes des enroulements tant primaire que secondaire. M. Gisbert Kapp¹ a donné une discussion de la réaction, que l'on peut résumer de la manière suivante :

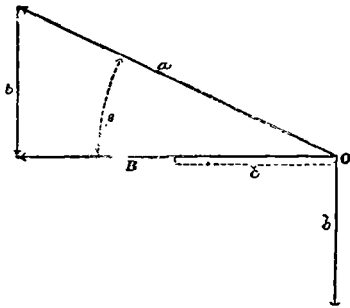


Fig. 134.
Figuration du couple moteur.

Prenons une ligne B (Fig. 134) représentant l'induction maxima \mathcal{B} dans un moteur. Dans une machine bipolaire, on peut la considérer comme tournant dans le sens de rotation des aiguilles d'une montre autour de O comme centre avec une vitesse angulaire ω_1 . Le

champ est dû à l'action combinée de celui développé par les courants primaires dans l'élément fixe et de celui créé par les

¹ Gisbert Kapp, *Transmission électrique de l'énergie*, 4^e édition, 1894, p. 310.

courants secondaires dans l'élément mobile. Ces derniers sont en concordance de phase avec le champ résultant (s'il n'y a pas de dérivations magnétiques) ; ils lui sont proportionnels ainsi qu'au glissement, et tendent à produire une réaction magnétique transversale. On peut les représenter par une longueur c prise sur la ligne B . Ce courant c tend à produire un champ magnétique transversal proportionnel à lui-même. Représentons-le par la ligne b normale à B . On a $b = kc$, k étant un coefficient qui dépend de la réluctance du circuit magnétique et du nombre des spires de l'élément mobile. Complétons le triangle Bba en menant la ligne a ; a représentera alors en grandeur et en phase le champ magnétique qui doit être créé par les courants primaires dans l'élément fixe, puisque B est la résultante de a et de b . L'angle β correspond à la fraction de période dont le courant dans l'élément mobile retarde sur le champ créé par les courants primaires.

En outre, comme le couple moteur est proportionnel à la fois à B et à c , c'est-à-dire à B et à b , l'aire du triangle $a B b$ représentera ce couple.

c étant d'ailleurs fonction de la force électromotrice dans les conducteurs de l'organe mobile, il est proportionnel au glissement, à \mathfrak{B} et à une constante dépendant inversement de la résistance R dans le circuit mobile ; on peut en conséquence écrire

$$c = \frac{\mathfrak{B} \times \Omega}{R},$$

Ω étant le glissement ($\Omega = \omega_1 - \omega_2$), ou

$$\Omega = \frac{cR}{\mathfrak{B}},$$

et, en remplaçant c par $\frac{b}{k}$,

$$\Omega = \frac{b}{\mathfrak{B}} \times \frac{R}{k};$$

mais $\frac{b}{\mathfrak{B}}$ est égal à $\tan \beta$; le glissement est donc proportionnel à $R \tan \beta$. Autrement dit, si le glissement est considérable, l'angle β sera grand.

CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT

Il y a ici trois régimes à considérer, et, quant à présent, nous envisagerons le cas d'une alimentation sous différence de potentiel constante et une machine exempte de dérivations magnétiques.

(i.) *Démarrage.* — Ici $\omega_2 = 0$ et le glissement $= \omega_1$. Les intensités dans l'élément mobile sont très considérables ; il en est de même des courants primaires. Par suite, l'angle β de décalage entre les courants primaires et le champ résultant sera très grand. Le couple moteur sera énorme s'il n'y a pas de dérivations magnétiques.

(ii.) *Fonctionnement à faible charge.* — Ici ω_2 est très sensiblement égal à ω_1 ; et, comme le glissement est faible, les courants dans l'organe mobile seront peu intenses et la réaction sera faible. L'angle β sera petit et a ne sera pas beaucoup supérieur à B.

(iii.) *Fonctionnement à fortes charges.* — Ici le glissement $\omega_1 - \omega_2$ doit être assez considérable pour permettre la production, dans l'organe mobile, de courants d'intensité telle qu'ils développent le couple moteur nécessaire à la vitesse réelle de rotation.

En plus de ce qui précède, si la vitesse angulaire est portée artificiellement jusqu'au synchronisme par une puissance extérieure de manière à vaincre les frottements, etc., il n'y aura ni courants développés dans l'élément mobile ni couple moteur. Si l'on augmente artificiellement cette vitesse encore au delà, de telle sorte que l'organe mobile tourne plus vite que son champ, son entraînement absorbera de la puissance, et le moteur fonctionnera en générateur, en renvoyant du courant dans le réseau d'alimentation, comme nous allons le voir.

COUPLE AU DÉMARRAGE

Nous avons jusqu'ici envisagé un moteur fonctionnant dans des conditions nominales, de telle sorte que les courants dans l'organe mobile ne fussent pas excessifs et que l'effet des dériviatiions magnétiques y fût négligeable. Quand, cependant, on veut faire démarrer le moteur, le glissement est si important que des courants de très haute intensité seront développés dans le circuit mobile si sa résistance est faible. Ces courants entraîneront de très intenses dans les bobines primaires pour le maintien du flux magnétique, exactement comme dans un transformateur. L'action sera triple. D'abord, il sera perdu en puissance thermique RI^2 dans les bobines de l'élément fixe une fraction considérable de la tension d'alimentation. Ensuite, les ampères-tours des bobines fixes et mobiles, se faisant opposition les uns aux autres avec de très grandes forces magnétomotrices, feront passer un certain flux par des voies suivant lesquelles il ne traversera pas les deux séries de bobines (il se produira, par exemple, des dériviatiions suivant la longueur de l'entrefer); ce flux déterminera dans les bobines fixes et mobiles des forces électromotrices en plus de celles développées par le champ résultant commun, et elles réagiront sur les courants circulant dans ces bobines. Enfin, non seulement les phénomènes précédents diminueront le véritable champ résultant, mais le peu qui en restera sera décalé par rapport au courant dans le circuit tournant, de sorte que le couple moteur sera considérablement réduit, au lieu d'être renforcé par un glissement excessif quand le circuit mobile aura une faible résistance. C'est ce que démontre très simplement la construction donnée par M. Kapp. Quand le glissement est grand, le triangle aBb prend la forme de la

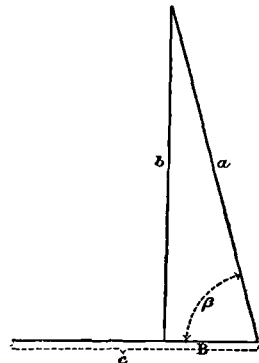


Fig. 135.

figure 135 ; en effet, le glissement étant proportionnel à R tang β , et R étant très petit, tang β doit être très grande, et β voisin de 90° ; le champ initial a sera limité par les considérations précédentes, et le couple moteur (représenté par l'aire du triangle) sera très petit. En augmentant R , on diminuera nécessairement tang β , ce qui rendra B et la surface plus grands ; on obtiendra ainsi un couple moteur plus énergique au démarrage. Ainsi donc, l'introduction, au démarrage, d'une résistance non inductive dans le circuit mobile permet à la machine de démarrer avec un couple plus grand.

RELATION ENTRE LE COUPLE MOTEUR ET LE GLISSEMENT

Pour arriver à une expression du couple moteur en fonction du glissement et de la résistance de l'organe mobile, on remarquera que la figure 134 donne

$$b = a \sin \beta$$

et

$$\mathfrak{B} = a \cos \beta.$$

Or, de l'équation $\Omega = \frac{b}{\mathfrak{B}} \times \frac{R}{k}$, on tire $\frac{\Omega}{R} k = \frac{b}{\mathfrak{B}}$. Par suite, en modifiant simplement l'échelle de la figure 134, on peut

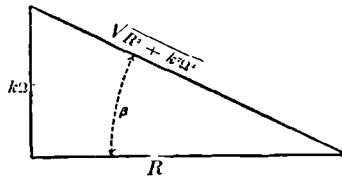


Fig. 136.

dénommer autrement les côtés du triangle, comme l'indique la figure 136, dans laquelle Ω désigne le glissement.

On voit d'après elle que $\sin \beta = \frac{k \Omega}{\sqrt{R^2 + k^2 \Omega^2}}$
 et $\cos \beta = \frac{R}{\sqrt{R^2 + k^2 \Omega^2}}$.

Par suite, le couple moteur W , qui est proportionnel à $b \times \mathfrak{B}$, est proportionnel à $a^2 \sin \beta \cos \beta$; et, si l'on représente par q une quantité comprenant a^2 et des constantes de construction, on a

$$W = q \cdot \frac{\Omega R}{l^2 + k^2 \Omega^2}.$$

On suppose ici constant (voir p. 154) le champ magnétique initial α .

Si l'on veut chercher à se rendre compte graphiquement du sens de cette équation, on peut tracer une courbe de W en fonction de Ω , pour une valeur déterminée de R .

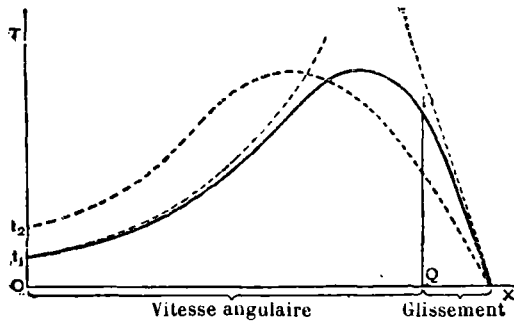


Fig. 137.

Admettons que la ligne $O X$ (Fig. 137) représente la vitesse de rotation du champ magnétique, et prenons-en une partie $O Q$ équivalente à la vitesse angulaire du moteur; le reste $Q X$ représentera le glissement, ce qui revient à porter le glissement en sens inverse à partir de X . Les ordonnées donneront dès lors les valeurs du couple moteur calculées d'après l'équation. Par exemple, $Q X$ étant pris égal à Ω , $P Q$ donnera la valeur correspondante de W . En partant ainsi de X , où le glissement est nul, on obtiendra la courbe XPt_1 , qui s'élève rapidement, atteint un maximum et s'infléchit ensuite jusqu'à la valeur Ot_1 représentant le couple moteur au démarrage. Ce couple a une certaine valeur maxima pour laquelle $\beta = 45^\circ$. On remarquera que la portion initiale ascendante de la courbe

THOMPSON. — Courants polyphasés. 11

est presque une ligne droite, asymptote à une ligne droite qui représenterait la relation entre le couple mécanique et le glissement si le champ magnétique était constant et qu'il n'y eût pas de dérivations magnétiques. En fait cette ligne correspond à l'expression $W = b(\omega_1 - \omega_2)$ de la page 154. Autrement dit, si, dans l'équation actuellement considérée, on envisage des valeurs de Ω petites par rapport à R , on pourra donner à l'équation la forme $W = q \frac{\Omega}{R}$. A l'autre extrémité de la courbe, où le glissement est considérable, la courbure s'accroît. On peut dès lors arriver à une valeur approchée en supposant Ω très grand par rapport à R , ou R^2 petit relativement à Ω^2 ; et, dans ce cas, l'équation devient $W = q \frac{R}{\Omega}$. C'est l'équation d'une hyperbole (représentée en pointillé). Quand le moteur est au repos, $\Omega = \omega_1$, ou $OQ = 0$, ce qui donne en Ot_1 la valeur $W = q \frac{R}{\omega_1}$. C'est-à-dire qu'au démarrage le couple moteur est proportionnel à la résistance de l'organe mobile. Si maintenant on prend pour R une valeur plus élevée et qu'on trace une nouvelle série d'ordonnées, on obtient une nouvelle courbe (également indiquée en pointillé) qui, partant aussi de X , atteint encore un maximum égal au précédent et redescend ensuite, mais, cette fois, jusqu'en t_2 seulement. L'introduction d'une résistance plus élevée a donc pour effet d'augmenter le couple moteur au démarrage; mais elle a aussi pour résultat de donner à ce couple sa valeur maxima quand le glissement est plus grand. Le moteur développe pratiquement la même puissance extérieure que précédemment; mais il tourne avec un plus grand écart entre sa vitesse à faible charge et sa vitesse à pleine charge, et son rendement à pleine charge en est diminué. Si, avec 5 p. 100 de glissement et 95 p. 100 de rendement, on n'obtient pas un couple de démarrage suffisant, on peut le réaliser en introduisant de la résistance, en acceptant alors (à pleine charge) 10 p. 100 de glissement, par exemple, et se contentant de 90 p. 100 de rendement. On comprend dès lors la raison du mode de construction moderne de l'organe mobile permettant l'introduction, au démarrage, d'une résistance que l'on met ensuite en court-

circuit dès que cet élément mobile a acquis une vitesse suffisante.

Dans les diverses théories du moteur à champ tournant¹, la question est prise de différents points de vue ; mais, quelles que soient les complications mathématiques dont on l'entoure, l'expression du couple mécanique est de la forme générale

$$W = g \frac{\Omega R}{R^2 + k^2 \Omega^2}.$$

Le mode précédent de déduction de cette formule, bien qu'il soit incomplet en ce que toutes les quantités en jeu n'y interviennent pas, a peut-être l'avantage de maintenir en évidence le principe primordial et de permettre à l'élève de suivre dans toute son étendue la signification physique des expressions. La quantité k est, il ne faut pas l'oublier, une constante qui dépend de la réluctance du circuit magnétique et du nombre de spires de l'organe mobile ; c'est en réalité la self-induction d'une spire complète de conducteur sur le moteur. La quantité g implique a^2 et le nombre total de spires complètes sur l'organe mobile. En comparant cette formule à celle donnée par d'autres auteurs, il faut se rappeler que Ω est une vitesse angulaire égale à $\frac{2\pi}{T} (n_1 - n_2)$ (voir p. 153).

Steinmetz donne à l'expression du couple moteur, en livres sur un rayon de 1 pied, c'est-à-dire en foot-pounds, la forme suivante

$$W = \frac{gc^2 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \Omega R}{R^2 + k^2 \Omega^2}$$

¹ L. Duncan, « Moteurs à courants alternatifs », *Elect. World* (N. Y.), XVII, pp. 341, 357.

Hutin et Leblanc, *La Lumière électrique*, XL, p. 373.

D^r J. Sahulka, « Sur les moteurs à courants alternatifs à champ tournant », Leipzig, 1892.

R. V. Picou, « Les moteurs électriques à champ magnétique tournant », Paris, 1892.

E. Arnold, « Théorie et calcul des moteurs asynchrones à courants alternatifs » et articles divers dans *l'Elect. World* (N. Y.), 1893-94.

G. Ferraris, « Méthode de traitement des vecteurs rotatifs ou alternatifs, etc. », *The Electrician*, 1894, XXXIII, pp. 110, 129, 152, 184.

Reber, « Théorie des moteurs di- et triphasés », *Amer. Inst. Elect. Engineers*, octobre 1894.

Steinmetz, *American Institute Elect. Engineers*, décembre 1894, p. 803.

transcrite conformément aux notations ci-dessus, $\frac{N_2}{N_1}$ étant le rapport des spires secondaires aux spires primaires, et

$$g = \frac{550}{746 \frac{\pi \lambda N_p}{T}}$$

où $\frac{1}{T}$ est la fréquence, et N_p le nombre de pôles. La théorie de ce savant est très complète en ce qu'il tient compte tant des

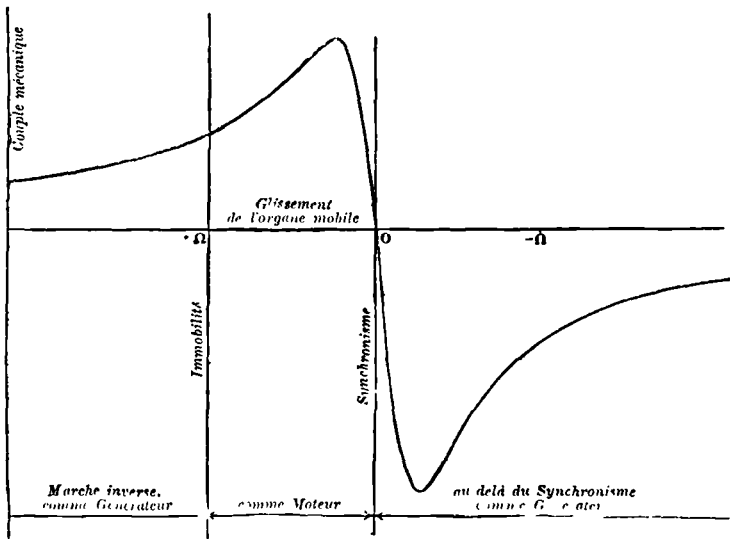


Fig. 138.

dérivations que de l'hystérésis magnétiques, et qu'il donne une expression de la force contre-électromotrice e dans les conducteurs de l'organe fixe, en fonction de la force électromotrice initiale et d'une expression comprenant ces quantités. En relevant des valeurs du couple moteur pour des glissements différents, il obtient la courbe de la figure 138, qui présente le même caractère que celle de la figure 137, sauf qu'elle s'étend dans les deux sens. Si, en effet, par des moyens mécaniques, on porte la vitesse angulaire du moteur au delà du synchronisme, le

couple devient négatif et la machine fonctionne en générateur, ce qui correspond à la branche inférieure de la courbe (voir p. 47). Si, au contraire, on fait tourner le moteur en sens inverse du mouvement de rotation du champ, le couple diminue, comme on le voit à gauche de la figure.



CHAPITRE VII

THÉORIE ANALYTIQUE DES MOTEURS POLYPHASÉS

La méthode suivante pour le traitement de la théorie des moteurs polyphasés est une modification de celle due à M. Potier¹. Au lieu de considérer le champ tournant comme un flux constant coupant les conducteurs de

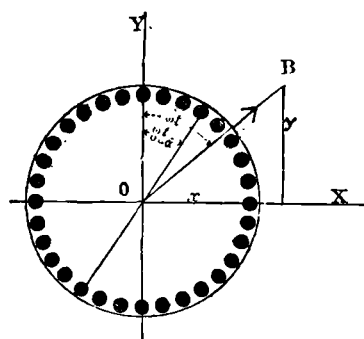


Fig. 139.

l'organe mobile en mouvement, on peut le décomposer en deux flux alternatifs dans les sens constants des axes X et Y (Fig. 139) à angles droits l'un par rapport à l'autre. Dès lors on pourra rapporter à ces axes communs tous les mouvements de l'organe mobile et les flux et courants dont il est le siège.

Soit OB , comme grandeur et comme sens, le flux magnétique tournant (c'est-à-dire la résultante du champ initial dû au courant dans l'organe fixe et du champ dû aux courants dans l'organe mobile). x et y donnent alors le sens et l'intensité respectifs de ses composantes horizontale et verticale à un instant quelconque.

Si le champ tourne à une vitesse angulaire uniforme de ω , radians par seconde et conserve une intensité constante, on a

$$x = x_{\max} \sin \omega_1 t \quad \text{et} \quad y = y_{\max} \cos \omega_1 t,$$

¹ A. Potier, « Sur les moteurs à induit fermé sur lui-même », *Bull. de la Soc. Internationale des Electriciens*, mai 1894, p. 248.

x_{\max} et y_{\max} étant les valeurs maxima des composantes horizontale et verticale et représentant la grandeur du flux tournant.

Si l'on veut cependant avoir une expression tout à fait générale et comprenant les champs à rotation elliptique tels qu'on les rencontre dans les moteurs à courants alternatifs simples, on écrira :

$$x = x_{\max} \sin \omega_1 t \quad \text{et} \quad y = y_{\max} \sin (\omega_1 t + \varphi), \quad (1)$$

expressions dans lesquelles x_{\max} et y_{\max} ne sont pas nécessairement égaux.

Nous envisagerons d'abord le cas général.

Supposons que l'organe mobile comporte N_s barres conductrices ; on peut toujours les considérer comme $\frac{N_s}{2}$ spires roulées en tambour, chacune d'elles ayant une certaine résistance r .

Si l'organe mobile tourne à une vitesse angulaire de ω_2 radians par seconde, on peut représenter par $\omega_2 t$ (voir Fig. 139) l'angle que fait avec la verticale le plan de l'une des spires.

Le flux qui pénètre cette spire est $x \cos \omega_2 t - y \sin \omega_2 t$. La force électromotrice induite dans cette spire sera due tant au fait qu'elle change d'inclinaison par rapport aux champs x et y qu'à ce que x et y changent de valeur.

On aura alors pour la force électromotrice instantanée, en désignant par x' et y' les taux de variation ou les dérivées de x et y par rapport au temps,

$$e = -x\omega_2 \sin \omega_2 t - y\omega_2 \cos \omega_2 t + x' \cos \omega_2 t - y' \sin \omega_2 t, \\ e = \cos \omega_2 t (x' - y\omega_2) - \sin \omega_2 t (y' + x\omega_2) = ir, \quad (2)$$

i étant le courant dans la spire.

Pour avoir une expression du couple mécanique dû à toutes les spires, il faut intégrer l'expression du couple dû à une seule d'entre elles entre les limites d'une demi-révolution ; et à cet effet il est plus commode de représenter par α l'angle que fait une spire particulière quelconque avec l'axe des Y. Le couple

dû à une seule spire sera alors égal à $i (y \cos \alpha + x \sin \alpha)$. En substituant dans l'expression ci-dessus et intégrant entre les limites $\alpha = 0$ et $\alpha = \pi$, sans oublier que l'angle π contient $\frac{N_s}{2}$ spires, de sorte que

$$\sum \sin^2 \alpha = \sum \cos^2 \alpha = \frac{N_s}{4}, \quad \text{et} \quad \sum \sin \alpha \cos \alpha = 0,$$

on a pour le couple moteur instantané

$$W_t = \frac{N_s}{4r} \left[y (x' - y\omega_2) - x (y' + x\omega_2) \right].$$

Prenant le cas général dans lequel $x = x_{\max} \sin \omega_1 t$, et $y = y_{\max} \sin (\omega_1 t + \varphi)$, et remplaçant x, y, x' et y' par leurs valeurs, on obtient, après intégration entre les limites $\omega_1 t = 0$ et $\omega_1 t = 2\pi$ et en divisant ensuite par 2π ,

$$W_{\text{moy}} = \frac{1}{2} \frac{N_s}{4r} \left[2x_{\max} y_{\max} \omega_1 \sin \varphi - \omega_2 (x_{\max}^2 + y_{\max}^2) \right]. \quad (3)$$

Cette expression générale du couple moteur est applicable à toutes les formes de moteurs polyphasés à champs rotatifs elliptiques. Si le champ tourne à une vitesse angulaire uniforme et conserve une valeur constante, de telle sorte que $\varphi = \frac{\pi}{2}$ et que $y_{\max} = x_{\max}$, elle se simplifie en

$$\frac{N_s}{4r} x_{\max}^2 \left[\omega_1 - \omega_2 \right].$$

Si l'organe fixe est du type ordinaire, tel qu'il est indiqué par la figure 105, où la réluctance du circuit magnétique est pratiquement indépendante de la direction du champ, l'expression des composantes, suivant X et Y, de l'aimantation transversale due au courant dans l'organe mobile est très simple; si, en effet, on appelle Φ le flux produit normalement au plan d'une spire par un courant d'une unité dans cette spire, les composantes x_1 et y_1 du champ transversal sont

$$x_1 = -\Phi \Sigma i \cos \alpha \quad \text{et} \quad y_1 = \Phi \Sigma i \sin \alpha.$$

En remplaçant i par sa valeur

$$\frac{1}{r'} \left[(x' - y\omega_2) \cos \alpha - (y' + x\omega_2) \sin \alpha \right],$$

et intégrant entre les limites $\alpha = 0$ et $\alpha = \pi$, de manière à comprendre toutes les spires, on a

$$x_1 = -\frac{N_s \Phi}{4r'} (x' - y\omega_2) \quad \text{et} \quad y_1 = -\frac{N_s \Phi}{4r'} (y' + x\omega_2). \quad (4)$$

Mais on peut remplacer $\frac{N_s \Phi}{4r'}$ par une expression plus simple $\frac{1}{u}$, ce qui donne

$$ux_1 = - (x' - y\omega_2) \quad \text{et} \quad uy_1 = - (y' + x\omega_2).$$

Pour trouver une expression des composantes du champ initial, il suffit de retrancher du champ résultant le champ transversal ; ainsi, si les composantes du champ initial suivant X et Y sont Φ_x et Φ_y , on a

$$\Phi_x = x - x_1 \quad \text{et} \quad \Phi_y = y - y_1,$$

ou

$$\begin{aligned} u\Phi_x &= ux + x' - y\omega_2, \\ u\Phi_y &= ux + y' + x\omega_2; \end{aligned} \quad (5)$$

et, si les composantes du champ initial sont connues, on peut trouver x et y , et *vice versa*.

Appliquons maintenant ces formules au cas d'un moteur simple dont le champ tournant a pour composantes horizontale et verticale

$$x_{\max} \sin \omega_1 t \quad \text{et} \quad x_{\max} \cos \omega_1 t.$$

On a d'après les équations (5)

$$ux_{\max} \sin \omega_1 t + x_{\max} \omega_1 \cos \omega_1 t - \omega_2 x_{\max} \cos \omega_1 t = u\Phi_x,$$

d'où l'on tire la composante du champ initial suivant l'axe des X

$$\Phi_x = \frac{\sqrt{u^2 + (\omega_1 - \omega_2)^2}}{u} \sin(\omega_1 t - \beta),$$

où

$$\beta = \text{arc tang} \frac{\omega_1 - \omega_2}{u}.$$

Suivant l'axe des Y, elle a la même valeur ; seulement elle varie en fonction du cosinus et non plus du sinus.

Le couple moteur est, ainsi qu'on l'a vu page 168,

$$\frac{N_s}{4r} x_{\text{max}}^2 (\omega_1 - \omega_2).$$

Pour obtenir la puissance fournie par l'organe mobile, on multiplie par la vitesse angulaire ω_2 , ce qui donne

$$P = \frac{N_s}{4r} x_{\text{max}}^2 \omega_2 (\omega_1 - \omega_2).$$

Envisageons maintenant la chaleur développée dans l'organe mobile. Dans une spire l'échauffement se produit à raison de $r i^2$ joules par seconde. En remplaçant i par sa valeur et intégrant, comme précédemment, pour la totalité des spires, on trouve

$$\frac{N_s}{4r} \left[(x' - y\omega_2)^2 + (y' + x\omega_2)^2 \right]$$

pour l'échauffement à l'instant considéré.

Si l'on prend alors la moyenne de cette expression pour une période complète, il vient pour la chaleur développée par seconde

$$P_{\text{éch}} = \frac{1}{2} \frac{N_s}{4r} \left[(x_{\text{max}}^2 + y_{\text{max}}^2) (\omega_1^2 + \omega_2^2) - 4x_{\text{max}} y_{\text{max}} \omega_1 \omega_2 \sin \varphi \right].$$

Dans le cas du champ tournant à vitesse angulaire uniforme, $x_{\text{max}} = y_{\text{max}}$, et $\sin \varphi = 1$, de sorte que

$$P_{\text{éch}} = \frac{N_s}{4r} x_{\text{max}}^2 (\omega_1 - \omega_2)^2.$$

En conséquence,

$$P + P_{\text{éch}} = \frac{N_2}{4r} x_{\text{max}}^2 \left[(\omega_1 - \omega_2)^2 + \omega_2 (\omega_1 - \omega_2) \right],$$

et le rendement de l'organe mobile a pour expression

$$\frac{P}{P + P_{\text{éch}}} = \frac{\omega_2}{\omega_1},$$

résultat déjà trouvé d'après d'autres considérations (voir p. 153).

En considérant la perte de ce chef dans un organe fixe bipolaire, nous désignerons par N' , le nombre total de conducteurs actifs (de sorte qu'on en comptera $\frac{N'}{4}$ par bobine) et par R la résistance totale de ces conducteurs reliés en série.

On peut trouver de la manière suivante la différence de potentiel aux bornes de l'un des circuits, — de celui, par exemple, qui produit le flux horizontal (l'organe fixe étant monté comme l'indique la figure 49).

On a vu que le flux horizontal initial avait pour valeur

$$\frac{\sqrt{u^2 + (\omega_1 - \omega_2)^2}}{u} x_{\text{max}} \sin (\omega_1 t - \beta),$$

et celui-ci doit être égal à

$$\frac{N'_s \Phi}{4} i',$$

où i' est l'intensité dans la bobine de l'élément fixe ; par suite

$$i' = \frac{4}{N'_s \Phi} \frac{\sqrt{u^2 + (\omega_1 - \omega_2)^2}}{u} x_{\text{max}} \sin (\omega_1 t - \beta),$$

et la différence de potentiel aux bornes de l'un des circuits à l'instant considéré est

$$e' = \frac{R}{2} i' + \frac{N'_s}{4} x'.$$

En remplaçant i' et x' par leurs valeurs et désignant $\frac{R}{N'_s} \frac{N_2}{r}$ par λ , on en tire

$$e' = \frac{N'_s}{4} x_{\text{max}} \omega_1 \left[2 \lambda \frac{u}{\omega_1} \sin \omega_2 t + \left(1 + 2 \lambda \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1} \right) \cos \omega_1 t \right].$$

En mettant cette expression sous la forme

$$e' = e_{\max} \sin (\omega_1 t - \gamma),$$

on trouve que

$$\operatorname{tang} \gamma = \frac{\omega_1 - \omega_2}{u} + \frac{\omega_1}{2 \lambda u}.$$

Le décalage du courant était β , correspondant à $\operatorname{tang} \beta = \frac{\omega_1 - \omega_2}{u}$; par conséquent, la différence de phase φ_1 entre le courant et la force électromotrice est telle que

$$\operatorname{tang} \varphi_1 = \frac{u \omega_1}{\omega_1 (\omega_1 - \omega_2) + 2 \lambda [u^2 + (\omega_1 - \omega_2)^2]}.$$

La chaleur développée par seconde dans l'organe fixe est

$$\begin{aligned} R i'^2 &= \frac{1}{2} R \Phi'^2_{\max} \left(\frac{k}{N'_s \Phi} \right)^2 = \frac{1}{2} \frac{R}{N'_s{}^2} \frac{N'_s}{r} \left(\frac{k r}{N'_s \Phi} \right)^2 \frac{N'_s}{r} \Phi'^2_{\max} \\ &= \frac{1}{2} \lambda u^2 \Phi'^2_{\max} \frac{N'_s}{R} = P'_{\text{éch}}, \end{aligned}$$

$$\text{où } \Phi'_{\max} = \frac{\sqrt{u^2 + (\omega_1 - \omega_2)^2}}{u} x_{\max};$$

ou, en remplaçant Φ'_{\max} par sa valeur,

$$P'_{\text{éch}} = \frac{N'_s}{4r} x^2_{\max} 2 \lambda \left[u^2 + (\omega_1 - \omega_2)^2 \right].$$

Pour résumer ces résultats écrivons :

$$K = \frac{N'_s}{4r} x^2_{\max};$$

on a alors :

$$\text{Couple moteur } W = K (\omega_1 - \omega_2)$$

$$\text{Puissance } P = K \omega_2 (\omega_1 - \omega_2),$$

$$\text{Echauffement de l'organe mobile} = K (\omega_1 - \omega_2)^2,$$

$$\text{Echauffement de l'organe fixe} = K 2 \lambda \left[u^2 + (\omega_1 - \omega_2)^2 \right].$$

La valeur maxima de la force contre-électromotrice d'un circuit d'organe fixe diphasé est sensiblement

$$E_{\max} = \frac{N'_2}{4} x_{\max} \omega_1 \left(1 + 2 \lambda \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_2} \right).$$

La valeur maxima du courant dans l'organe mobile quand le moteur fonctionne à charge normale

$$i' = \frac{4}{N'_2 \Phi} \frac{\sqrt{u^2 + (\omega_1 - \omega_2)^2}}{u} x_{\max}.$$

La différence de phase est donnée ci-dessus.

Dans ce qui précède, on a admis que la totalité du flux traversant l'organe mobile coupait les conducteurs de l'organe fixe. C'est sensiblement ce qui a lieu dans les conditions normales de charge ; mais il n'en est plus de même au démarrage, pour les raisons indiquées page 159 ; une grande fraction des champs fixe et mobile se trouve fermée suivant des trajectoires indépendantes. Pour rendre la théorie applicable à toutes les vitesses angulaires et à toutes les charges, il faut faire intervenir la self-induction dans chaque circuit, ainsi que l'induction mutuelle entre les circuits. Les expressions comprenant tous ces termes deviennent si complexes qu'elles ne sont d'aucune utilité pratique quand bien même on pourrait déterminer d'après une étude donnée toutes les quantités en jeu. Aussi l'Auteur a-t-il pensé que la théorie élémentaire exposée au Chapitre VI et l'indication du mode de traitement analytique de la question ici résumé seraient plus accessibles à l'élève que la répétition des théories plus développées auxquelles il est référé page 163.

CHAPITRE VIII

MOTEURS A COURANTS ALTERNATIFS SIMPLES

Les moteurs fonctionnant à courants alternatifs simples ou ordinaires présentent évidemment l'avantage de ne nécessiter que deux lignes, au lieu de trois ou quatre, pour leur alimentation, et de pouvoir s'appliquer sur des canalisations d'éclairage par courants alternatifs comme il en existe dans un grand nombre de villes. Avant l'invention des moteurs polyphasés, les seuls moteurs à courants alternatifs employés étaient les alternateurs courants (étudiés comme générateurs) à inducteurs excités séparément. Ces moteurs ne fonctionnaient qu'en synchronisme parfait avec les générateurs et ne démarraient pas automatiquement. Mais, dès que le moteur polyphasé asynchrone en fut arrivé à la période de succès pratique, il devint évident pour tous qu'on devait pouvoir construire sur des données analogues des moteurs à courants alternatifs ordinaires.

Lorsqu'on lance un courant alternatif dans un groupe de bobines d'un moteur polyphasé, ce courant développe dans l'organe mobile un flux magnétique suivant une certaine trajectoire déterminée. Ce flux atteint un maximum, tombe ensuite à zéro, change de signe, arrive à un maximum négatif, et ainsi de suite, mais il ne change pas de sens comme un champ tournant. Il sera créé des courants très intenses dans les barres de l'organe mobile qui embrassent le flux, mais il n'y aura plus tendance à rotation dans un sens plutôt que dans un autre. Il en est exactement de même d'une machine à vapeur à un seul cylindre ; les forces y sont harmoniques et rectilignes ; quand

la manivelle se trouve à un point mort, il est impossible de faire démarrer la machine sans le secours d'une certaine force extérieure qui rompe l'équilibre. Une fois l'organe mobile bien lancé, il ira en augmentant de vitesse jusqu'à ce qu'il arrive sensiblement au synchronisme et exercera un couple énergétique. On en verra la raison dans la théorie des alterno-moteurs ordinaires que nous allons exposer.

Si l'on prend un solénoïde (Fig. 140), à noyau formé d'un faisceau de fils de fer, et qu'on y lance un courant alternatif, on créera un champ alternatif simple. Si, dans ce champ on suspend un anneau de cuivre, comme dans la figure, on observe¹ que cet anneau tend à tourner sur lui-même jusqu'à ce que son plan soit parallèle à la direction du flux, auquel cas il n'embrasse plus aucune ligne de force. C'est uniquement lorsqu'il occupe une position oblique que l'anneau tend à tourner. Si on le place dans une position telle que son plan soit exactement normal au

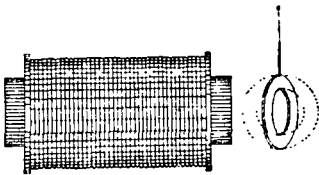


Fig. 140.

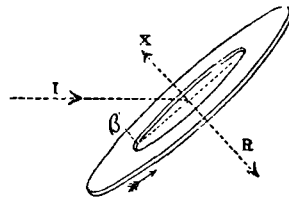


Fig. 141.

Action d'un champ alternatif sur un anneau de cuivre.

flux, il reste encore immobile ; si, au contraire, on le fait virer si peu que ce soit, à droite ou à gauche, il tourne jusqu'à ce que son plan redevienne parallèle au flux. Soit β l'angle que fait le plan de l'anneau avec la direction du champ magnétique (Fig. 141) ; la force électromotrice et, par suite, le courant induit en lui par une modification dans l'intensité du champ seront proportionnels à $\sin \beta$. Mais le moment de rotation qui agit sur l'anneau est proportionnel à l'intensité du courant qui y est développé, à l'intensité du champ et au cosinus de l'angle β .

¹ Voir Elihu Thomson, « Nouveaux phénomènes dus aux courants alternatifs », *Electrical World* (N. Y.), 28 mai 1887.

Il est, par suite, proportionnel au produit $\sin \beta \cos \beta$. La tendance au mouvement est nulle à 0° et à 90° ; dans le premier cas, parce qu'il n'y a pas de courant produit; dans le second, parce que le bras de levier est nul. Le moment de rotation est, au contraire, maximum quand $\beta = 45^\circ$.

Même dans cette position, il n'y aurait pas de couple moteur s'il n'existait pas de décalage de courants dans l'anneau, car la phase de la force électromotrice induite serait en quadrature avec celle du champ. Quand le champ est à son maximum d'intensité, il n'y a pas de f. é. m. développée, et, quand celle-ci atteint son maximum, il n'existe pas de champ magnétique pour la produire. Mais, si la bobine présente de la self-induction qui décale le courant, il se manifeste un couple bien net qui tend à diminuer β . Ce couple sera le plus grand possible si la self-induction et la résistance de l'anneau sont tels, par rapport à la fréquence, que $\frac{2\pi n}{T} L = r$; autrement dit, quand le courant dans l'anneau sera décalé d'un huitième de période.

On peut expliquer ce phénomène en disant que le courant induit dans l'anneau produit un champ transversal qui, hors de phase avec le champ créé par le courant alternatif primaire et incliné sur lui, détermine un champ tournant; et que, celui-ci réagissant à son tour sur le conducteur, il en résulte un couple.

Ce qui se passe s'explique d'une façon plus précise¹ de la manière suivante: supposons l'anneau incliné d'un angle β sur la direction du champ fourni par le solénoïde. Le flux réel qui pénètre l'anneau sera la résultante de: (1) la composante dudit flux dans la direction normale au plan de l'anneau, et (2) le flux transversal dû aux courants dans l'anneau. Ce flux résultant affectera une forme sinusoidale et pourra être représenté par la courbe RR (Fig. 142). Le courant dans l'anneau sera décalé par rapport à lui d'un quart de période et pourra être représenté par

¹ Pour la discussion analytique complète de la question, voir G. T. Walker, « Répulsion et rotation produites par les courants électriques alternatifs », *Phil. Trans. Royal Society*, 1892, A, p. 279. Voir également J. A. Fleming, sur la « Répulsion électromagnétique », *Proc. Royal Institution*, XIII, p. 296, 6 mars 1891, et *Journal of the Society of Arts*, 14 mai 1890.

la courbe CC , où le sens positif est conforme à celui des flèches de la figure 141. Le champ transversal sera alors représenté par la courbe X , et la composante normale du champ initial, par la courbe II fournie par soustraction des ordonnées de XX de celles de RR . On voit que le champ initial, qui est naturellement proportionnel à sa composante normale, est partiellement en concordance de phase avec le courant, de sorte que leur produit est, en somme, positif, et l'application de la règle de Fleming à la figure 141 montre que le couple agit dans le sens qui tend à diminuer β .

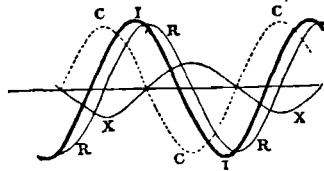


Fig. 112.

Elihu Thomson a pris un induit ordinaire à courant continu, et, après avoir mis les balais en court-circuit, il les a placés obliquement par rapport à la direction du champ. Il a ainsi obtenu la rotation de l'induit sous l'action d'un couple considérable. Les conducteurs de cet induit agissaient exactement comme un anneau placé obliquement, mais avec cette différence que l'obliquité était constamment maintenue par les balais et le commutateur, malgré la rotation de l'induit, et que, par suite, la rotation était continue (voir p. 196).

Cette tendance d'un conducteur à tourner en partant d'une position oblique a été utilisée par lui (p. 195) pour vaincre la difficulté de démarrage d'un alterno-moteur simple.

L'artifice ordinairement employé pour faire démarrer les alterno-moteurs simples consiste en effet à superposer au champ alternatif un champ oblique en discordance de phase avec le précédent. On y arrive habituellement au moyen de bobines supplémentaires montées sur l'organe fixe et alimentées par un courant décalé par rapport à celui des bobines principales; il est alors nécessaire d'employer un dispositif qui détermine une différence de phase des courants dans les deux branches. On peut réaliser de diverses façons cette création de phases discordantes. On a vu (p. 16) que, dans les circuits présentant de la

résistance et de la self-induction, la tangente de l'angle de décalage du courant sur la force électromotrice était égal à $\frac{\omega L}{R}$. Si donc on a dans une des branches du circuit une self-induction relativement considérable et dans l'autre une résistance relativement grande, les courants se trouveront décalés d'un quart de période environ. On peut déterminer cette différence dans la self-induction des deux branches soit en mettant des nombres de spires différents sur les bobines de l'organe fixe et en disposant le fer autour d'elles d'une façon spéciale, comme dans le cas du moteur Tesla (Fig. 101), soit en montant en série sur l'une des branches une bobine de fil enroulée sur un noyau de fer. On peut introduire dans l'autre branche une résistance non inductive.

On peut encore produire un décalage en donnant à l'une des branches, à l'aide d'un condensateur, de la capacité qui a pour effet de retarder le courant. Le genre de condensateur communément employé à cet effet est un condensateur électrolytique formé d'un certain nombre de plaques de fer séparées par une solution de carbonate de soude.

Il existe également un grand nombre de moyens de déterminer une différence de phase à l'aide de transformateurs spéciaux. Ils sont étudiés sous la rubrique *Transformation de phases* au Chapitre IX ci-après.

Un alterno-moteur simple à organe mobile en circuit fermé est décrit dans la spécification d'un brevet anglais en novembre 1892 (n° 20 505) accordé à la Société des ateliers d'Oerlikon, de Zurich. On y trouve expliquée en ces termes la cause déterminante du couple après démarrage du moteur : — « A la suite d'un mouvement de rotation imprimé à la machine d'une manière convenable quelconque, il se développe des courants dans les conducteurs de l'induit qui s'approchent de l'un des pôles des bobines excitatrices et s'éloignent du pôle voisin opposé ; ces courants seront moins énergiquement repoussés par le premier pôle que par le second parce que, en raison de la rotation, un conducteur donné sera, comme phase, dans une position où, à l'état de repos, il devrait faire partie d'un ensemble situé plus en arrière ». La figure 143 donne la vue schématique d'un moteur

bipolaire dont les enroulements de l'organe fixe sont renversés de manière à déterminer des pôles consécutifs en haut et en bas. Cette spécification décrit une manière de faire démarrer le moteur à l'aide d'un enroulement supplémentaire sur l'organe fixe, enroulement portant un courant décalé sur le courant principal, comme on le verra page 228.

Une autre spécification de brevet anglais n° 23 902, fournie par

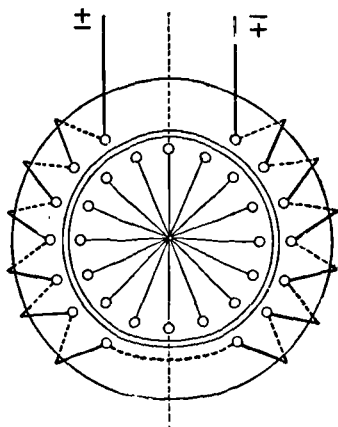


Fig. 143.

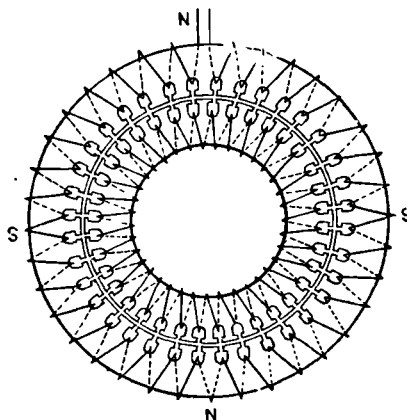


Fig. 144.

M. C. E. L. Brown en décembre 1892, décrit plusieurs alternomoteurs d'induction simples¹ avec organes mobiles en cage d'écureuil.

Depuis cette époque, ces deux maisons ont construit un grand nombre d'alternomoteurs simples ; les principales différences qui les distinguent consistent dans les moyens employés pour effectuer le démarrage et dans l'emploi de noyaux annulaires dentés adoptés par l'une au lieu de noyaux annulaires reperçés préférés par l'autre. Nous n'avons pas à nous occuper de la discussion de priorité² qui s'est élevée entre elles en 1893. Elle paraît s'être close sur la lettre publiée par M. Brown dans l'*Elektrotechnische Zeitschrift* du 14 juillet 1893.

¹ Voir également *Elektrotechnische Zeitschrift*, XI, p. 81, 17 février 1893 ; *Industries*, XIV, p. 89.

² *Elektrotechnische Zeitschrift*, XI, p. 81, 178, 283, 285, 411, 1893 ; *Industries*, XIV, p. 89, 327, 425, 522, 1893.

En mai 1891, la Compagnie Hélios¹ a donné la description d'un type d'alternomoteur simple, tout à fait analogue, représenté par la figure 144.

THÉORIE DE L'ALTERNOMOTEUR SIMPLE

La difficulté de suivre le mode de fonctionnement d'un alternomoteur simple réside dans le fait suivant : tandis que l'organe mobile est soumis à un champ initial alternatif d'une certaine fréquence qui induit des courants avec leurs champs contraires, il existe en même temps une rotation de cet organe qui détermine des phénomènes de courants et de champs magnétiques d'une autre fréquence. Une théorie comprenant tous ces éléments et tenant compte de la grandeur et de la phase de chacun d'eux implique nécessairement une accumulation de symboles dont il n'est pas facile de saisir la signification physique, et, d'autre part, une théorie qui, pour plus de simplicité, en néglige un plus ou moins grand nombre est trop incomplète pour être satisfaisante.

Nous nous proposons d'exposer ici d'abord une théorie analytique intelligible présentée par M. de Bast², puis la méthode graphique due au professeur Ferraris³, et, en troisième lieu, de leur donner une forme qui représente nettement à l'esprit ce qui se passe réellement dans l'organe mobile.

Supposons d'abord un moteur bipolaire lancé et tournant à la vitesse angulaire constante de $\frac{n}{t} = \omega$ tours par seconde, ce moteur étant alimenté par un courant alternatif régulier suivant une loi sinusoidale simple avec une fréquence de $\frac{1}{T} = \omega'$ périodes par seconde ; l'induction \mathfrak{B} ou densité du flux produit par les bobines de l'organe fixe sera à un instant quelconque

$$\mathfrak{B} = \mathfrak{B}_{\max} \sin \frac{2\pi}{T} t = \mathfrak{B}_{\max} \sin \omega' t,$$

¹ Brevet allemand n° 70084.

² De Bast, *Bull. de l'Assoc. des Ingénieurs électriciens*, août 1893.

³ G. Ferraris, « Méthode de traitement des vecteurs rotatifs ou alternatifs, etc. », *The Electrician*, XXXIII, p. 110, 129, 152 et 184.

\mathfrak{B}_{\max} représentant l'induction maxima atteinte dans chaque période, et la perméabilité étant supposée constante. Si S représente la surface enveloppée par un conducteur embrassant l'organe mobile suivant un diamètre environ, incliné d'un angle α sur le plan normal à la direction du champ initial, on aura pour le flux magnétique total

$$\Phi = S \cos \alpha \mathfrak{B}_{\max} \sin \omega' t,$$

l'induction étant supposée uniforme.

Comme l'organe mobile fait ω tours par seconde,

$$\alpha = 2 \pi \omega t.$$

La f. é. m. dans le conducteur est

$$\begin{aligned} E &= - \frac{d\Phi}{dt} \\ &= - S \mathfrak{B}_{\max} \left[- 2 \pi \omega \sin 2\pi\omega' t. \sin 2\pi\omega t + 2 \pi \omega' \cos 2\pi\omega t. \cos 2\pi\omega' t \right] \\ &= - \frac{S \mathfrak{B}_{\max}}{2} \left[2 \pi (\omega' + \omega) \cos 2 \pi (\omega' + \omega) t + 2 \pi (\omega' - \omega) \right. \\ &\quad \left. \cos 2 \pi (\omega' - \omega) t \right]. \end{aligned}$$

Elle est donc la somme de deux forces électromotrices simples de fréquences $(\omega' + \omega)$ et $(\omega' - \omega)$.

Si l'on désigne par r la résistance du conducteur, et par L son coefficient de self-induction, les impédances respectives A_1 et A_2 , aux deux forces électromotrices seront

$$A_1 = \sqrt{r^2 + 4 \pi^2 (\omega' + \omega)^2 L^2},$$

$$A_2 = \sqrt{r^2 + 4 \pi^2 (\omega' - \omega)^2 L^2}.$$

La valeur instantanée du courant dans le conducteur sera

$$\begin{aligned} I &= - \frac{S \mathfrak{B}_{\max}}{2} \left[\frac{2 \pi (\omega' + \omega)}{A_1} \cos \left\{ 2 \pi (\omega' + \omega) t - \varphi_1 \right\} \right. \\ &\quad \left. + \frac{2 \pi (\omega' - \omega)}{A_2} \cos \left\{ 2 \pi (\omega' - \omega) t - \varphi_2 \right\} \right], \end{aligned}$$

φ_1 et φ_2 étant les angles de décalage déterminés par :

$$\cos \varphi_1 = \frac{r}{A_1},$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{r}{A_2}.$$

L'énergie potentielle du conducteur est

$$W = -I\Phi = -IS\mathfrak{B}_{\max} \cos \alpha \sin 2\pi\omega't,$$

et, par suite de son déplacement du petit angle $d\alpha$, le travail élémentaire effectué est, au signe près,

$$dW = IS\mathfrak{B}_{\max} \sin 2\pi\omega't \sin \alpha d\alpha.$$

En remplaçant I par sa valeur donnée ci-dessus et $d\alpha$ par $2\pi\omega dt$, on trouve

$$\begin{aligned} dW &= \frac{S^2 \mathfrak{B}_{\max}^2}{2} \left[\frac{2\pi(\omega' + \omega)}{A_1} \cos \left\{ 2\pi(\omega' + \omega)t - \varphi_1 \right\} \right. \\ &\quad \left. + \frac{2\pi(\omega' - \omega)}{A_2} \cos \left\{ 2\pi(\omega' - \omega)t - \varphi_2 \right\} \right] \\ &\quad \times \left[2\pi\omega \sin 2\pi\omega't \sin 2\pi\omega t \right] dt. \end{aligned}$$

L'intégration de cette expression entre les limites $t = 1$ et $t = 0$ donne la puissance moyenne pour un conducteur

$$\begin{aligned} P &= \frac{2\pi\omega S^2 \mathfrak{B}^2}{8} \left[\frac{2\pi(\omega' - \omega)}{A_2} \cos \varphi_2 - \frac{2\pi(\omega' + \omega)}{A_1} \cos \varphi_1 \right] \\ &= \frac{2\pi\omega r S^2 \mathfrak{B}^2}{8} \left[\frac{2\pi(\omega' - \omega)}{A_2^2} - \frac{2\pi(\omega' + \omega)}{A_1^2} \right]. \end{aligned}$$

On obtiendra la puissance moyenne totale en multipliant par le nombre de conducteurs N , et le couple moteur sera fourni par le quotient de la puissance moyenne totale par la vitesse angulaire en radians par seconde = $2\pi\omega$:

$$\text{Couple moteur } W = \frac{NP}{2\pi\omega}.$$

On obtient ainsi comme expression finale¹ la formule suivante :

$$\text{Couple moteur } W = \frac{r^2 N S^2 \mathfrak{B}^2 \pi}{4} \left[\frac{\omega' - \omega}{r^2 + \frac{1}{4} \pi^2 (\omega' - \omega)^2 L^2} - \frac{\omega' + \omega}{r^2 + \frac{1}{4} \pi^2 (\omega' + \omega)^2 L^2} \right].$$

Le professeur Ferraris a donné² une méthode de traitement de la question dans laquelle le champ magnétique alternatif est considéré comme décomposé en deux champs magnétiques tournant en sens contraires. C'est un problème familier en mécanique que la résolution d'un mouvement rectiligne harmonique simple quelconque en deux mouvements circulaires égaux de sens contraires. On en voit dans la figure 145 un mode de

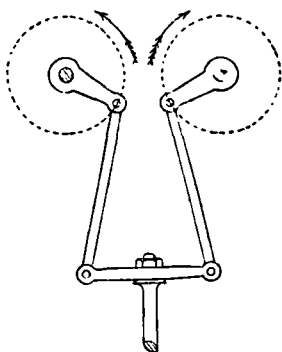


Fig. 145.

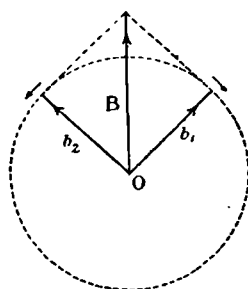


Fig. 146.

solution bien connu des ingénieurs. L'amplitude du mouvement initial est égal au diamètre de chacun des cercles suivant lesquels s'effectue le mouvement résultant. Ferraris s'est cependant attaqué au problème du champ magnétique alternatif d'une façon absolument générale, en appliquant la notion géométrique des vecteurs tournants.

Si l'on représente par le vecteur b_1 , qui tourne uniformément

¹ Comparer Hutin et Leblanc, *La Lumière électrique*, XL, p. 418 (1891).

² Galileo Ferraris, « Mode de traitement des vecteurs rotatifs ou alternatifs avec application aux moteurs à courants alternatifs », *The Electrician*, XXXIII, p. 110, 129, 152, 184 (1894).

dans le sens de rotation des aiguilles d'une montre autour du point O, la grandeur et le sens d'un champ magnétique tournant, et par b_2 la grandeur et le sens d'un autre champ de même intensité tournant en sens contraire avec la même fréquence ω' , on voit que le sens du champ magnétique résultant sera toujours dirigé suivant la ligne B, et que sa grandeur oscillera entre les valeurs $+ 2b$ et $- 2b$ en fonction sinusoïdale du temps, de sorte qu'on peut poser $B = 2b \sin 2\pi \omega' t$.

Inversement, étant donné un champ alternatif variant suivant la fonction sinusoïdale $B_0 \sin 2\pi \omega t$, comme dans un alternomoteur simple, on peut le décomposer en deux champs tournant en sens inverses avec la même fréquence ω' , et considérer séparément l'action de chacun d'eux sur l'organe mobile.

Si celui-ci tourne dans le sens de rotation des aiguilles d'une montre avec une fréquence ω , la fréquence du mouvement de rotation du champ tournant dans ce même sens par rapport à l'organe mobile sera $\omega' - \omega$, et la fréquence de rotation du champ tournant en sens inverse par rapport à cet organe mobile sera $\omega' + \omega$.

On peut envisager chaque champ comme engendrant des courants dans l'organe mobile, et le couple moteur dû à ces courants circulant dans des conducteurs situés dans le champ peut être déterminé à l'aide des formules employées dans le cas des moteurs à champ tournant.

On a vu précédemment (p. 161 et 163) qu'un champ, tournant avec un glissement Ω par rapport à l'organe mobile, produisait un couple

$$W = q \frac{r\Omega}{r^2 + \frac{4}{\pi^2} L^2 \Omega^2}.$$

Le couple déterminé par les deux champs tournant inversement aura donc pour valeur

$$W = qr \left[\frac{\omega' - \omega}{r^2 + \frac{4}{\pi^2} L^2 (\omega' - \omega)^2} - \frac{\omega' + \omega}{r^2 + \frac{4}{\pi^2} L^2 (\omega' + \omega)^2} \right],$$

expression identique à celle ci-dessus déduite, dans laquelle

$$q = \frac{NS^2 \mathfrak{B}^2 \pi}{4}.$$

Il n'est pas nécessaire de considérer le couple exercé en raison de ce fait que les courants dus à l'un des champs tournants circulent dans des conducteurs plongés dans le champ magnétique tournant *en sens inverse*, parce que la fréquence de ces courants diffère de 2ω de celle du champ opposé et que, par suite, ce couple change rapidement de sens.

Pour trouver le couple dû au champ tournant dans le sens des aiguilles d'une montre, avec la fréquence $\omega' - \omega$, traçons la courbe O P Q W (Fig. 147) (voir p. 161, Fig. 137 dans laquelle cette courbe est renversée) qui indique la relation entre le glissement et le couple obtenue d'après les formules

$$W = g \frac{r\Omega}{r^2 + 4\pi^2 L^2 \Omega^2}$$

Soit $O Q_1$ la vitesse de rotation d'un champ de fréquence ω' ; en prenant ensuite en arrière de Q_1 une longueur $Q_1 P_1 = \omega$ (= vitesse angulaire de l'organe mobile), on détermine l'abscisse $OP_1 = \omega' - \omega$, et l'ordonnée correspondante $P_1 P$ représente le couple en question.

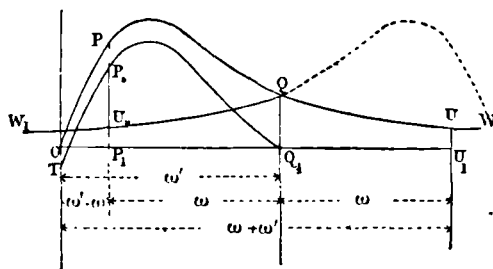


Fig. 147.

Pour trouver le couple dû au champ tournant en sens inverse des aiguilles d'une montre, on prendra au delà de Q_1 la longueur $Q_1 U_1 = \omega$, et on aura l'abscisse $OU_1 = \omega' + \omega$, qui déterminera l'ordonnée UU_1 représentant le couple dû au glissement $\omega' + \omega$. Celui-ci étant de sens contraire au couple PP_1 , on peut découper sur PP_1 une partie $PP_1 = UU_1$, et on aura $P_1 P_1$ qui représentera le couple réellement exercé sur l'organe mobile.

Pour plus de commodité dans la détermination des couples

du au champ de rotation inverse de celle des aiguilles d'une montre, on peut tracer la courbe QW_1 , symétrique de QW par rapport à QQ_1 , et en déduire ensuite les portions interceptées telles que U_1P_1 , sur les ordonnées telles que PP_1 . En opérant ainsi pour toutes les ordonnées comprises entre O et Q_1 , on obtient la nouvelle courbe TP_1Q_1 , dont les ordonnées représentent le couple réel pour diverses valeurs de ω .

Quand $\omega = 0$, autrement dit quand l'organe mobile est stationnaire, les deux couples opposés se font équilibre ; au fur et à mesure que ω augmente, le couple s'élève jusqu'à un maximum et retombe ensuite à 0 avant que ω soit arrivé à égaler tout à fait ω' , et tout accroissement ultérieur de ω produit un couple inverse.

Ce raisonnement suppose que \mathcal{B}_{\max} reste fixe, ce qui n'est vrai qu'autant que le moteur est alimenté par le même courant. La courbe ne peut, en conséquence, être regardée comme la véritable caractéristique d'un alterno-moteur simple alimenté sous différence de potentiel constante ; elle est néanmoins utile comme indication de son allure générale. Quand on charge le moteur, sa vitesse diminue légèrement ; il passe plus de courant dans l'organe fixe et le champ initial augmente d'autant, de sorte que la quantité désignée par q n'est nullement constante, mais croît avec la charge. La théorie ici développée explique uniquement comment le flux alternatif est capable de déterminer une rotation.

Pour se figurer mentalement ce qui se passe dans l'organe mobile, appliquons au cas de deux vecteurs tournant en sens inverses la construction donnée page 136 pour trouver le sens du champ résultant et du courant. Dans la figure 148 *a*, soit OP , en longueur et en sens, la grandeur et le sens de l'un (b_1 dans la Fig. 146) des champs magnétiques tournants qui constituent ensemble le champ alternatif $\mathcal{B}_{\max} \sin 2\pi \omega' t$. Supposons que l'organe mobile tourne dans le sens des aiguilles d'une montre en faisant ω tours par seconde, et que OP tourne dans le même sens à une vitesse angulaire légèrement supérieure (ω' tours par

seconde). Comme OP coupe les conducteurs de l'organe mobile à une vitesse angulaire de $(\omega' - \omega)$ tours par seconde, il engendrera des courants dont l'intensité variera en différents points de la circonférence de l'organe mobile en suivant très sensiblement une loi sinusoidale. Ce courant, dont nous désignerons par I_1 l'intensité maxima, produira un champ magnétique transversal normal à la direction de sa circulation, dont on pourra désigner l'intensité par X_1 . Ce champ, combiné avec le champ initial, donne le champ résultant, et l'on peut trouver le sens

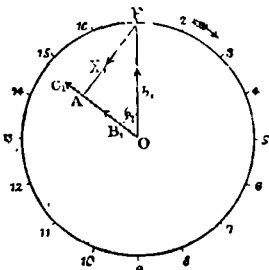


Fig. 148 a.

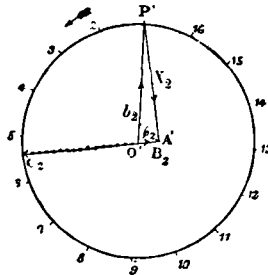


Fig. 148 b.

de chacun d'eux en menant OA sous l'angle φ_1 (connu, voir ci-dessous) avec OP , et abaissant sur elle la perpendiculaire PA ; OA donnera alors le champ résultant B_1 , et PA le champ transversal X_1 en grandeur et en sens. L'angle φ_1 est connu parce qu'on connaît le rapport entre le champ transversal et le champ résultant d'après la vitesse angulaire $\omega' - \omega$, la résistance R et la réluctance de la trajectoire, ce qui détermine $\text{tang } \varphi_1$ (voir p. 157). Si, par exemple, le flux transversal est égal à kI_1 , comme on a

$$I_1 = \frac{B_1 2 \pi (\omega' - \omega)}{R},$$

$$\text{tang } \varphi_1 = \frac{2 \pi (\omega' - \omega) k}{R},$$

φ_1 à pleine charge doit être un peu supérieur à 45° . On peut procéder suivant le même mode de construction en ce qui concerne

OP', Fig. 148 *b*, qui représente l'autre champ tournant (b_2 dans la Fig. 146); mais cette fois, comme

$$\text{tang } \varphi_2 = \frac{2 \pi (\omega' + \omega) k}{R},$$

sa valeur est 40 fois environ égale à $\text{tang } \varphi_1$, parce que ω ne diffère guère de ω' que de 5 p. 100.

φ_2 est, par suite, très voisin d'un angle droit, et B_2 n'est guère qu'un vingtième de B_1 . On voit que l'aire du triangle POA est beaucoup plus grande que celle du triangle P'O'A', ce qui, suivant le raisonnement de la page 156, montre que le couple dans le sens des aiguilles d'une montre est de beaucoup supérieur à celui en sens inverse.

Pour indiquer les sens des courants I_1 et I_2 , on peut faire la convention suivante. Supposons que les barres de l'organe mobile soient mises en court-circuit à chaque bout par un disque de cuivre s'étendant sur toute l'extrémité de l'organe mobile. Un courant uniformément distribué circulant en travers du disque parallèlement à un diamètre quelconque produirait une distribution sinusoïdale de courant dans les barres de cet organe mobile qui portent le courant d'un côté et le ramènent de l'autre, l'intensité maxima étant dans les deux barres reliées par le diamètre parallèle à la direction du courant. On peut ainsi, dans un schéma en cadran, indiquer le sens et la grandeur d'un de ces courants transversalement à la base de l'organe mobile par une ligne menée du centre, dont la longueur soit proportionnelle à la valeur maxima du courant dans les barres de cet élément, et cette méthode est applicable aux moteurs qui ne contiennent pas de disque de cuivre terminal de ce genre, tant qu'il s'agit de la distribution du courant qu'on a l'intention d'indiquer. Dans les figures 148 *a* et 148 *b* les lignes ponctuées C_1 (I_1) et C_2 (I_2) représentent ainsi la distribution du courant à un instant quelconque. Elles sont tracées suivant B_1 et B_2 ou leurs prolongements, le courant étant toujours en concordance de phase avec le magnétisme résultant, et elles sont respectivement égales à X_1 et à X_2 qui sont elles-mêmes proportionnelles aux deux courants. Les pointes

de flèches en indiquent le sens qu'on peut vérifier d'après la règle de Fleming, étant donné que les pointes sur les lignes qui représentent les flux magnétiques sont dirigées dans le sens suivant lequel se mouvrait un pôle Nord.

Après avoir ainsi déterminé le sens et la valeur des champs résultants et des courants dus aux vecteurs OP et OP' tournant en sens inverses, dans les figures 148 *a* et 148 *b*, appliquons

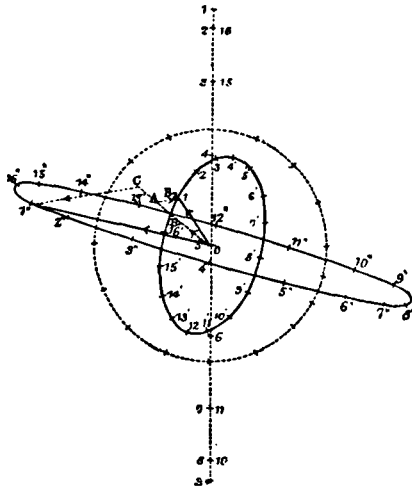


Fig. 149.

l'une des figures sur l'autre et recomposons-les de manière à obtenir un seul champ et un seul courant. A cet effet, on peut diviser le cercle en un certain nombre de parties égales, soit 16, représentant des fractions de période d'un cycle complet. Dans la position 1, OP coïncide avec OP' , et leur somme est égale à un vecteur double de la longueur correspondant à la valeur maxima du champ initial représentée par la ligne $O1$ dans la figure 149.

Si maintenant on ajoute les vecteurs B_1 et B_2 en tenant compte de leur sens, on obtient le vecteur $O1'$ indiqué dans la figure 149, et, en ajoutant I_1 et I_2 , on trouve le vecteur $O1''$. Revenant maintenant aux figures 148 *a* et 148 *b*, faisons passer P et P' à la position 2 en déplaçant simultanément les triangles POA et

$P'O'A'$. L'addition de OP et de OP_1 , de B_1 et de B_2 , de I_1 et de I_2 donnera alors les vecteurs $O2$, $O2'$ et $O2''$ respectivement ; et, en procédant ainsi circulairement sur les figures 148 *a* et 148 *b*, on obtiendra les divers points 1, 2, 3, 4, etc., 1', 2', 3', 4', etc., et 1'', 2'', 3'', 4'', etc., de la figure 149 qui permettront de tracer la ligne et les ellipses représentées.

Ces deux ellipses font immédiatement sauter aux yeux ce qui se passe dans l'organe mobile pendant chaque période. Celle marquée 1', 2', 3', etc., qui en réalité diffère très peu d'un cercle (on a exagéré sur la figure sa distance focale pour montrer son inclinaison), indique qu'il existe un champ magnétique tournant d'intensité très légèrement variable, de même fréquence que le champ initial (représenté par la ligne 1, 2, 3, etc.), qui est lui-même détruit ou plutôt transformé en un champ tournant par les courants développés dans l'organe mobile. Son sens de rotation est le même que celui de ce dernier. L'autre ellipse (marquée 1'', 2'', 3'', etc.) montre qu'il existe un courant tournant qui change de valeur entre des limites très étendues. A l'instant 1'' il vient juste de passer par son maximum et circule de droite à gauche transversalement à la base de l'organe mobile qui se présente à l'observateur ; à l'instant 4'' il est voisin de son minimum et circule vers le bas. En 8'' il est très grand et circule de gauche à droite. On voit qu'il tourne en sens inverse de l'organe mobile et du champ.

Pour comprendre comment un courant de ce genre et un champ tournant peuvent produire un couple, il faut tout d'abord considérer leur relation de phases. Quand le courant est à son maximum dans le voisinage de l'instant 16'', le champ est en concordance de phase avec lui ; autrement dit, ils sont tous deux représentés par des lignes de même sens, avec pointes de flèche orientées de même. Il en résulte un couple considérable dans le sens du mouvement de l'organe mobile. Aux instants 1'' et 2'' le courant diminue et se décale par rapport au champ ; mais le couple reste positif. Dès que l'angle entre eux devient supérieur à un droit, le couple devient négatif ; mais dans l'intervalle le courant s'est affaibli et l'angle change très rapidement, de sorte

que c'est seulement pendant les instants 3'', 4'' et 5'' qu'il existe un faible couple négatif ; pendant les instants 6'', 7'', 8'', 9'' et 10'' le couple est de nouveau positif et très grand en 8''. Pendant une période le couple est deux fois positif et deux fois négatif ; mais le couple positif surpasse de beaucoup le négatif et son action s'exerce plus longtemps.

On peut ne pas apercevoir à première vue comment un champ tournant dont l'intensité varie si légèrement peut produire dans l'organe mobile un courant d'excentricité aussi grande que celle indiquée par l'ellipse. Il ne faut pas cependant oublier que la vitesse angulaire du champ par rapport aux conducteurs n'est que de $(\omega' - \omega)$, tandis que la faible variation d'intensité du champ tournant a une fréquence de ω' périodes par seconde.

L'inclinaison du grand axe de l'ellipse 1', 2', 3', etc., relativement à la direction du champ initial augmente en même temps que la vitesse du moteur ; l'angle qu'ils font entre eux est $\frac{1}{2}(\varphi_2 - \varphi_1)$.

La force contre-électromotrice dans les conducteurs de l'organe fixe est développée par la rotation du champ résultant que nous avons considéré. Sa phase est, en conséquence, indiquée par la position du vecteur O1', O2', O3', etc., que nous avons reconnu comme pratiquement égal au rayon d'un cercle. Cette force contre-électromotrice atteint sa valeur instantanée maxima quand ce vecteur est perpendiculaire à la ligne médiane qui représente la direction du flux alternatif initial. Le courant dans la bobine de l'organe fixe passe par un maximum à l'instant 1 parce qu'alors le flux initial est maximum. On voit donc que l'inclinaison du vecteur O1' à cet instant, ou, en d'autres termes, l'angle qu'il a parcouru depuis sa position normale à la ligne médiane, donne le retard du courant dans les bobines de l'organe fixe sur la force contre-électromotrice. Supposons, par exemple, que le moteur tourne à peu près synchroniquement, φ_1 sera presque nul, de sorte qu'on pourra prendre B_1 comme égal à b_1 et en concordance de phase avec lui. B_2 se trouve, d'autre part, pratiquement tout à fait annihilé. A l'instant 1, quand le courant est à son maximum d'intensité, l'angle dont B_1 s'est avancé depuis qu'il était normal à la ligne axiale est de 90° environ.

C'est le décalage du courant sur la f. é. m. Au fur et à mesure que l'on charge le moteur, φ_1 augmente et le décalage diminue. Il ne faut pas croire toutefois que B_1 décroisse, comme semblerait l'indiquer la figure. On doit augmenter les dimensions de cette figure pour maintenir à peu près constant le vecteur qui représente le magnétisme résultant¹. Il serait ainsi possible pour un moteur donné quelconque d'arriver à une construction pour différents glissements et de tracer la caractéristique d'après les différences de surfaces des triangles ΛOP et $\Lambda'O'P'$.

¹ Le magnétisme résultant est proportionnel à la force contre-électromotrice qui, dans des limites pratiques de fonctionnement, ne varie pas de 2 p. 100. Pour la relation exacte entre la f. é. m. initiale et la f. c. é. m., voir Steinmetz, *Amer. Inst. Elect. Engineers*, décembre 1894, p. 803.

CHAPITRE IX

ALTERNO-MOTEURS DIVERS

On peut classer de la manière suivante les alterno-moteurs :

A. *Moteurs synchrones simples.* — En réalité, alternateurs ordinaires employés comme moteurs. Ils ne démarrent pas seuls.

B. *Moteurs synchrones polyphasés.* — Ci-après mentionnés.

C. *Moteurs asynchrones polyphasés.* — Objet principal de cet ouvrage.

D. *Moteurs asynchrones simples.* — Moteurs ordinaires déjà considérés et exigeant un dispositif quelconque de démarrage pour la production d'une différence de phase entre deux fractions du courant.

E. *Moteurs feuilletés enroulés en série.* — Pour les petites puissances, forme quelconque de moteur à courant continu avec commutateur et balais ordinaires, pourvu que l'inducteur en soit complètement feuilleté. Ils ne donnent pas complète satisfaction, en raison de leur self-induction généralement trop élevée.

Moteurs synchrones polyphasés. — Un système polyphasé de distribution, tout en facilitant beaucoup l'emploi de moteurs démarrant automatiquement, n'exclut pas la possibilité d'installation de moteurs synchrones dans les cas où l'on désire avoir une vitesse angulaire parfaitement uniforme. Un moteur synchrone pour système polyphasé peut consister en un alternateur ordinaire branché sur deux des conducteurs principaux ; mais il

est préférable de le construire identiquement conforme aux générateurs polyphasés décrits au Chapitre I et de le relier à toutes les lignes. Il diffère d'un moteur asynchrone principalement en ce que, au lieu d'un organe mobile, il a un inducteur excité séparément par un courant continu et en ce que, ses pôles conservant toujours la même position par rapport au fer de l'inducteur une fois qu'ils ont atteint la vitesse angulaire des pôles tournants de l'induit, les pôles Nord et Sud se soutiennent mutuellement et l'inducteur est entraîné circulairement en parfait synchronisme. En ce qui concerne les principes qui régissent le fonctionnement synchrone, nous renvoyons le lecteur au traité de l'Auteur sur les machines dynamo-électriques ¹ et autres travaux sur la matière ². Le moteur synchrone ordinaire a besoin d'être amené à sa vitesse de régime à l'aide d'une source quelconque d'énergie, tandis que dans un système polyphasé le champ tournant, en agissant sur les courants parasites dans de larges pôles massifs d'inducteurs, suffit à faire démarrer le moteur. On arrive ainsi à pouvoir assez bien combiner le principe du moteur asynchrone polyphasé avec celui du véritable moteur synchrone pour le rendre capable de démarrer de lui-même ; et, une fois qu'il a acquis sa vitesse, il la conserve sous toutes les charges aussi constante que la périodicité de son alimentation reste elle-même constante.

Il faut remarquer que, si un générateur polyphasé fonctionne

¹ S. P. Thompson, « Traité théorique et pratique des machines dynamo-électriques », traduction française par E. Boistel Baudry et C^{ie} éditeurs, Paris, 1894).

² Dr J. Hopkinson, « Sur la théorie des courants alternatifs, rapportée particulièrement à deux alternateurs reliés dans un même circuit », *Journ. Soc. Tel. Engineers*, XIII, p. 496, 1884.

W. M. Mordey, « Sur le fonctionnement en parallèle, notamment sur de longues lignes », *Inst. of Elect. Engineers*, XXIII, p. 260, 1894.

Blondel, « Couplage et synchronisation des alternateurs », *La Lumière électrique*, XIV, p. 351, 1892.

Steinmetz, « Théorie d'un moteur synchrone », *Amer. Inst. Elect. Engineers*, 17 octobre 1894.

Picou, « Transmission de force par moteurs alternatifs synchrones », *Soc. Internationale des Electriciens*, février 1895.

Bedell et Ryan, « Fonctionnement d'un moteur synchrone simple », *Journ. Franklin Inst.*, mars 1895.

Rhodes, « Théorie du moteur synchrone », *Proc. Physical Soc.*, 1895.

toujours comme moteur synchrone, il n'en démarre pas pour cela nécessairement de lui-même. Le développement de courants dans ses projections polaires doit être facilité par son étude si l'on veut qu'il démarre automatiquement.

La manufacture de coton de Ponemah, Taftville, Conn., Etats-Unis¹, fournit un excellent type d'installation de moteurs synchrones de ce genre. Six cents chevaux-vapeur empruntés à une puissance hydraulique sont transmis, sous la tension de 2 500 volts, à 5 kilomètres de distance. Le système est triphasé. Les moteurs et les générateurs sont de construction identique, et, tout en démarrant d'eux-mêmes, ils fonctionnent en synchronisme parfait sous toutes les charges. On affirme que le rendement industriel de la transmission, depuis la puissance appliquée à la poulie de la dynamo jusqu'à celle fournie par la poulie du moteur, est de 80 p. 100.

On a imaginé un grand nombre d'alterno-moteurs qui ne rentrent dans aucune des catégories de la classification précédente et qui sont à peine susceptibles de classification.

Moteur Elihu Thomson. — Au cours de ses observations sur les actions produites par les courants alternatifs², en 1886-1887, Elihu Thomson a remarqué qu'un anneau de cuivre placé dans un champ magnétique alternatif tendait soit à sortir du champ, soit à tourner de manière à s'orienter lui-même parallèlement au flux. Il en résulte que, si l'on monte un induit ordinaire (enroulé en tambour, par exemple) dans un champ magnétique alternatif et qu'on donne aux balais une inclinaison dans

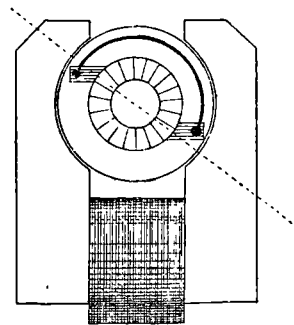


Fig. 150.
Moteur Elihu Thomson.

¹ *Elect. Rev.* (N. Y.), XXIV, p. 210, 2 mai 1894.

² Elihu Thomson, « Nouveaux phénomènes dus aux courants alternatifs », *Elect. World* (N. Y.), 27 mai 1887.

un sens ou dans l'autre, puis qu'on les mette tous deux en court-circuit, l'induit tournera et fournira une puissance considérable. Dès qu'il a pris ce mouvement de rotation, l'induit continue à tourner, même si l'on disjoint ou qu'on retire les balais.

Conformément à ce principe il construisit des moteurs dans lesquels le commutateur et les balais étaient réduits au simple rôle d'organes de démarrage. Ce démarrage une fois obtenu, l'induit était complètement fermé sur lui-même et isolé du reste du circuit. Il fonctionnait simplement comme moteur d'induction. Un moteur de ce genre était exposé à Paris en 1889. — En 1892, Elihu Thomson a fait breveter un alerno-moteur destiné à fonctionner sur des circuits alternatifs ordinaires et dans lequel on obtenait un mouvement de rotation au moyen de condensateurs auxiliaires mis en dérivation sur les bobines couvrant des pôles alternés.

Moteur Ferranti-Wright. — Si l'on place dans une bobine magnétisante alimentée par un courant alternatif une des extrémités d'un barreau feuilleté en fer, on lui donnera une aimantation alternative. Mais, si en un point plus éloigné sur sa longueur

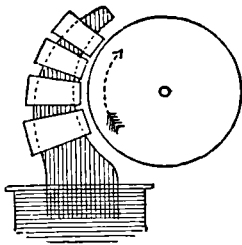


Fig. 151.
Moteur Ferranti-Wright.

on l'entoure d'un fort anneau de cuivre ou d'une virolle, les courants induits dans cette enveloppe et décalés par rapport au courant primaire réagiront localement sur cette aimantation alternative et retarderont la phase de la polarité magnétique en tous les points situés au delà. Par suite, si deux ou trois anneaux ou manchons de cuivre fermés semblables entourent le noyau de fer à

différentes distances suivant sa longueur, on obtiendra le même résultat que si les pôles se déplaçaient le long du fer avec une vitesse déterminée, un pôle Nord étant suivi par un pôle Sud, puis par un pôle Nord, et se dirigeaient successivement vers l'extrémité pour y disparaître. C'est sur ces données qu'est basé le moteur Ferranti-Wright, utilisé dans les appareils de Fer-

ranti pour la mesure des courants alternatifs. Un disque de fer y est monté sur pivots entre deux pièces polaires courbes en fer feuilleté, dont chacune est garnie d'anneaux de cuivre retardateurs, comme l'indique la figure 151.

Moteur Shallenberger. — Ce moteur, également appliqué à des appareils de mesures, détermine la rotation d'un disque de fer par un mode très particulier de création de phases dans le courant alternatif. Le disque est placé entre deux bobines à ouvertures rectangulaires dans lesquelles se trouve, en même temps qu'elle passe aussi au-dessus et au-dessous du disque, une bobine fermée ou plutôt une pièce de cuivre estampée montée obliquement sous un angle de 45° environ par rapport à la bobine principale dont elle reçoit des courants induits. Si elle était placée parallèlement à la bobine principale, elle recevrait des courants induits plus intenses, mais n'aurait aucune action rotative. Si elle lui était perpendiculaire, elle ne recevrait pas de courants et n'aurait, par suite, encore aucune action rotative. Comme ses courants sont légèrement décalés en arrière d'une complète opposition de phase, sa position oblique fournit au champ résultant une composante qui détermine la rotation ; mais le champ tournant résultant est en réalité de forme elliptique (voir p. 73 ci-dessus).

Moteurs Atkinson. — En 1888¹, M. Llewellyn B. Atkinson (de la maison Goolden et C^o) imagina des alterno-moteurs qui présentaient cette disposition particulière de deux organes mobiles (ou induits) montés côte à côte, dont les enroulements (fermés) étaient reliés entre eux, et de deux parties fixes distinctes dans les enroulements desquelles étaient envoyés des courants alternatifs. Chacun des organes mobiles servait alternativement comme transformateur pour envoyer un courant dans les enroulements de son voisin, ce qui déterminait un effort rotatif, bien qu'il n'y eût pas de champ tournant.

¹ Brevets anglais n^o 16852 de 1888 et 7395 de 1889.

Moteurs Stanley-Kelly. — M. William Stanley, de Pittsfield (Massachusetts), qui s'est, depuis 1886, adonné avec M. Westinghouse au développement des machines à courants alternatifs, a imaginé un système diphasé¹ dans lequel le générateur est du type à réluctance variable et la seule partie mobile une roue d'acier à projections polaires en fer feuilleté. Le moteur Stanley-Kelly-Chesney, employé dans ce système, diffère radicalement de la majorité de ceux décrits dans cet ouvrage ; il ne comporte, en effet, réellement aucun champ tournant. L'organe fixe qui reçoit les courants diphasés est formé de deux parties complètement séparées, dont chacune est individuellement alimentée par un des deux courants. Il est, en conséquence, produit deux champs magnétiques alternatifs simples indépendants, décalés entre eux d'un quart de période. A l'intérieur de ces deux organes fixes montés côte à côte tournent deux organes mobiles également montés l'un à côté de l'autre sur le même arbre. Les enroulements de ces derniers sont reliés entre eux de telle sorte que le fil situé directement sous les pôles de l'un des induits est en série avec celui qui se trouve entre les pôles de l'autre. Ainsi connecté chacun des organes mobiles fonctionne alternativement comme moteur recevant le courant et étant entraîné par lui, et comme transformateur envoyant à l'autre le courant. Les bobines sur les deux organes mobiles sont fermés l'un sur l'autre, sans aucune connexion extérieure par bagues de contact ou commutateur. On revendique en faveur de ces moteurs le développement d'un couple au démarrage égal à 1 1/2 à 2 fois celui qu'ils exercent en fonctionnement en pleine charge. On a recours, à cet effet, à des condensateurs montés en parallèle avec les circuits des organes mobiles pour fournir au démarrage le courant nécessaire et éviter la chute inductive de tension. Une résistance est mise en circuit au démarrage.

Moteur Duncan. — C'est une variété intermédiaire entre les moteurs Shallenberger et Ferranti ; la bobine oblique du premier

¹ *Electrical World*, 1893, p. 325.

est remplacée par un noyau de fer oblique entouré, au voisinage de ses extrémités, de circuits d'arrêt en cuivre. Il s'applique à des circuits triphasés et est destiné à servir dans les appareils de mesures.

Moteurs Mordey. — M. W.-M. Mordey a imaginé divers types d'alterno-moteurs. Dans l'un d'eux, un moteur à fer entièrement feuilleté, il propose de faire passer une partie du courant alternatif à travers un commutateur monté sur l'arbre pour l'excitation de l'inducteur, de telle sorte que, au fur et à mesure que le moteur prend de la vitesse, la fréquence du courant dans le moteur lui-même se trouve réduite, jusqu'à ce que le synchronisme soit atteint ; à ce moment, le courant reste de sens constant en ce qui concerne l'inducteur lui-même.

Moteurs Ganz. — La maison Ganz et C^{ie} de Buda-Pesth a suggéré une idée analogue.

Moteur Langdon-Davies. — On a affaire ici à un moteur à phases artificielles créées par deux jeux de bobines, ou plus, montées sous différents angles et dont les enroulements sont calculés de manière à ce que, tout en produisant la même force magnétomotrice, ils aient des angles de phase supplémentaires des angles de position de leurs bobines respectives.

CHAPITRE X

TRANSFORMATEURS POLYPHASÉS

Le principe sur lequel repose la transformation des courants polyphasés en courants de tension supérieure ou inférieure ne diffère guère de ceux qui servent de base à la transformation des courants alternatifs simples. La loi qui établit que le rapport $\frac{E_1}{E_2}$ entre les forces électromotrices du primaire et du secondaire est égal à celui qui existe entre les nombres respectifs de leurs spires $\frac{N_1}{N_2}$ s'applique naturellement à tous les cas de bobines enroulées sur le même circuit magnétique, et les lois relatives aux pertes dans le cuivre et dans le fer sont applicables aux courants polyphasés aussi bien qu'aux courants alternatifs simples.

Sans doute on pourrait effectuer la transformation des courants polyphasés uniquement à l'aide de transformateurs ordinaires de courants alternatifs simples; il faudrait seulement intercaler un transformateur dans chacun des circuits polyphasés pour en élever ou en réduire la tension dans une mesure donnée quelconque. Mais il est préférable de n'avoir qu'un seul transformateur pour tous les circuits, et en procédant ainsi on réalise une économie de matière. Dans le cas, par exemple, d'un fonctionnement en triphasé, de même qu'on peut éliminer trois des six fils primitivement employés et économiser du cuivre en reliant les trois circuits à une jonction commune, de même on arrive à une économie correspondante de fer en établissant une jonction commune à chacune des extrémités des noyaux sur lesquels sont roulés les divers circuits d'un transformateur. La

figure 152 représente schématiquement un transformateur dans lequel les noyaux A B C sont ainsi reliés à chaque bout par une jonction commune. Pour donner aux noyaux l'état de division convenable, il est plus commode de les former de tôles estampées suivant les formes indiquées par les figures 153 et 154. Si les bobines sont enroulées sur A, B et C, le flux à travers ces

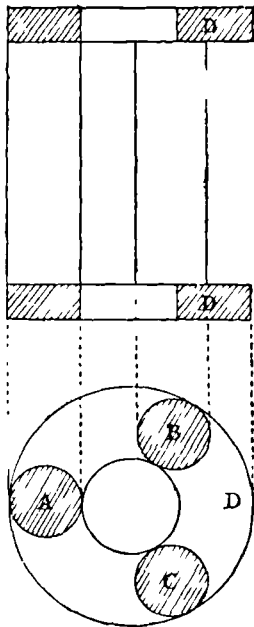


Fig. 152. — Carcasse.

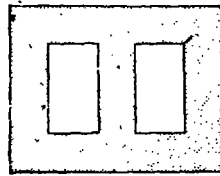


Fig. 153. — Feuille de tôle de noyau.

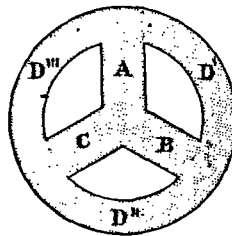


Fig. 154. — Feuille de tôle de noyau.

Transformateurs triphasés.

noyaux suivra une loi analogue à celle de la circulation des courants qui les entourent ; en d'autres termes, on aura un flux triphasé, avec un décalage d'un tiers de période entre les flux d'une branche à l'autre. On voit que les parties D', D'' et D''' de la figure 154 établissent une connexion triangulaire entre les trajectoires A, B et C ; il y aura en conséquence une différence de phase d'un tiers de période entre les phases de flux dans chacune d'elles ; et, d'une manière générale, on peut dire que la figure 55 (p. 53), qui indique les relations tant de grandeur que de phase

des courants dans un circuit en triangle, est également applicable aux flux dans les différentes parties du noyau représentées par la figure 154, où A, B et C remplacent les fils de ligne, et D', D'' et D''' la phase des côtés du triangle. On peut d'ailleurs prendre D', D'' et D''' comme noyaux du transformateur, au lieu de A, B et C; on peut encore enrouler l'un ou l'autre des deux

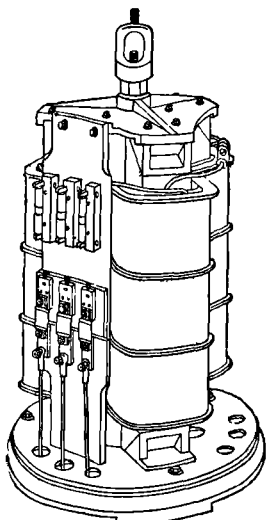


Fig. 155. — Transformateur triphasé Siemens et Halske.

jeux de noyaux ou les deux de bobines primaires ou secondaires, et, comme ces bobines peuvent être elles-mêmes reliées en étoile ou en triangle, il est possible de réaliser un grand nombre de combinaisons et de permutations.

Les transformateurs employés aujourd'hui dans le fonctionnement triphasé sont ordinairement formés de trois colonnes verticales en fer feuilleté, avec culasses communes à leurs extrémités; les bobines primaires et secondaires sont roulées de la manière ordinaire sur les parties verticales du noyau. La figure 155 est l'illustration d'un transformateur triphasé de la maison Siemens et Halske,

de Berlin. Les transformateurs employés dans le fameux transport de Lauffen-Francfort de 1891 et encore en service pour l'alimentation en courants triphasés de la ville d'Heilbronn sont représentés à la page 386 du Rapport officiel mentionné précédemment (voir p. 120). Ils étaient étudiés en vue de transformer l'énergie à 15 000 volts en énergie sous 100 volts, ou *vice versa*, mais étaient susceptibles de divers groupements. On a vu dans la figure 103, page 120, la disposition des circuits. La jonction commune des enroulements tant à haute qu'à basse tension était dans tous les cas mise à la terre.

Pour la transformation diphasée, on pourrait employer deux transformateurs distincts, un sur chaque circuit. Mais, exactement comme pour les circuits eux-mêmes, il y a une certaine

économie de cuivre à les combiner de manière à n'employer que trois lignes au lieu de quatre (l'une, de section légèrement supérieure, servant de retour commun pour les deux autres); de même on réalise une disposition moins coûteuse en combinant les deux circuits de fer en un seul, avec noyau commun pour une partie. La figure 156 représente schématiquement les dispositions et connexions convenables des enroulements.

Pour avoir la même induction maxima dans le fer, il faudra

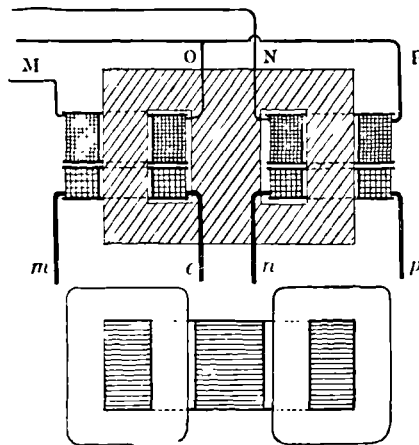


Fig. 156. — Transformateur diphasé, à noyau partiellement commun.

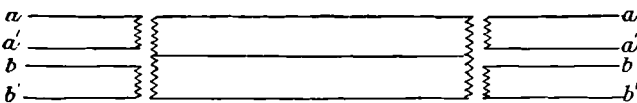


Fig. 157. — Transformateurs diphasés, réduction des fils de ligne à trois.

donner au noyau commun une section égale à $\sqrt{2}$ fois celle des noyaux séparés.

Dans les cas où l'on adopte le montage en triangle pour un générateur diphasé, on ne peut pas donner un retour commun aux circuits; chacun d'eux doit correspondre à deux lignes distinctes. Mais, si l'on emploie des transformateurs aux deux extrémités de la transmission, trois lignes suffisent. Cette disposition, représentée par la figure 157, a été mise en œuvre par

la maison Schuckert et C^{ie} à Francfort, en 1891, dans un de ses transports d'énergie.

Transformation de phases. — Nous ne nous sommes occupés jusqu'ici que du problème consistant à transformer la tension d'un système donné de courants. Mais il en est un autre dont la solution s'impose également, c'est celui qui a pour objet de transformer des courants diphasés en courants triphasés, et réciproquement.

Le développement des idées ci-dessus exposées fera comprendre aisément la simplicité avec laquelle on y arrive.

Quand un transformateur du type indiqué dans la figure 154 fonctionne, son champ présente un caractère rotatif. Le noyau a la forme d'une roue à trois rais. En augmentant le nombre de ces rais, comme on le voit sur la figure 158, on détermine un champ à rotation plus uniforme.

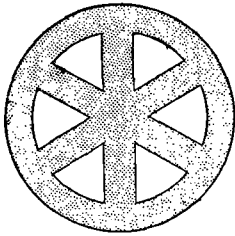


Fig. 158. — Disque de transformateur polyphasé.

On peut multiplier à volonté les rais garnis de bobines primaires, et diviser la jante en autant de parties que l'on veut, garnies chacune d'une bobine secondaire ; on arrive ainsi à transformer un système de courants d'un nombre

quelconque de phases en un système d'un autre nombre quelconque de phases, à la condition de prendre un point de départ autre qu'un courant alternatif ordinaire, de manière à avoir un champ tournant et non pas un simple champ alternatif.

On peut également atteindre le même résultat en divisant la jante en un certain nombre de segments garnis de bobines primaires et en un nombre différent de segments garnis de bobines secondaires. En pareil cas, au lieu de disposer des rais autour du centre, on remplira de fer l'espace central, en réservant les vides juste suffisants aux enroulements. Il n'est même pas nécessaire d'avoir des bobines primaires et secondaires. Si la jante est revêtue d'un enroulement fermé sur lui-même,

comme un anneau Gramme, et qu'on relie successivement, à intervalles égaux sur tout le pourtour de cet enroulement, les fils de l'un des systèmes de courants, il sera possible d'en tirer un système de courants d'un autre nombre quelconque de phases en reliant simplement de la même manière à l'enroulement le nombre de fils voulu.

La première idée de transformation de courants triphasés en courants diphasés dans ces conditions a été suggérée par l'Auteur dans une communication, faite le 23 février 1894 à la Royal Institution, sur les transformations de courants électriques. En cette circonstance, un transformateur annulaire garni de douze bobines en série fermée fut relié, en trois points équidistants A, B et C, à un circuit d'alimentation triphasée (Fig. 159). On pouvait prendre aux deux extrémités d'un diamètre quelconque, tel que A A', en se branchant sur les bobines, un courant alternatif, et en prendre en même temps un autre, de tension égale à celle du premier, aux extrémités d'un diamètre D D' perpendiculaire à A A'. Comme, dans ce cas, les bobines diphasées sous-tendent 180° , tandis que les bobines triphasées en sous-tendent 120° , les tensions relatives seront dans le rapport de 1 à 0,75 ; elles seront proportionnelles (si la distribution du flux magnétique suit une fonction sinusoïdale à la périphérie) à $1 - \cos \beta$, β étant la largeur angulaire.

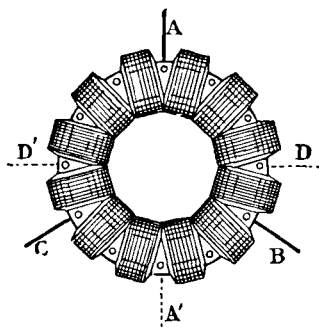


Fig. 159. — Transformateur de tri- en diphasé de S.-P. Thompson.

Un appareil de ce genre permet d'effectuer une transformation quelconque de phases. On améliore beaucoup le circuit magnétique en ajoutant une pièce centrale en fer, convenablement feuilleté, mobile ou fixe.

Quelques jours après, le 1^{er} mars 1894, à une réunion de la National Electric Light Association, à Washington, M. C.-F. Scott, électricien en chef de la Westinghouse Company, proposa

une solution différente du même problème exigeant l'emploi de deux transformateurs. Il en donne dans les termes suivants la description pour une transformation de courants diphasés en triphasés : — « On relie les primaires de deux transformateurs à un générateur diphasé. Les deux forces électromotrices secondaires sont, par suite, décalées d'un quart de période. On donne 100 spires à l'un des secondaires et on le boucle au milieu, ce qui laisse 50 spires de part et d'autre. L'autre secondaire comporte 87 spires, nombre à peu près égal à 50 multiplié par racine

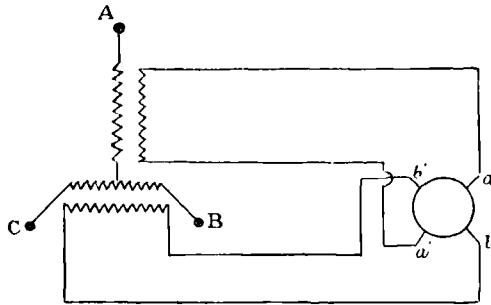


Fig. 160. — Transformation de di- en triphasé, de Scott.

carrée de 3. L'une des extrémités du circuit secondaire est reliée au milieu du secondaire du premier transformateur, comme l'indique la figure 160, et les trois bornes libres sont alors le point de départ de forces électromotrices différant en phase d'un tiers de période. Si l'on suppose la force électromotrice sur chaque primaire de 1 000 volts, sur l'un des secondaires de 100 volts, et sur l'autre secondaire de 87 volts, la différence de potentiel mesurée entre deux bornes secondaires quelconques sera de 100 volts. »

Modes de transformation de courants alternatifs simples en di- ou triphasés. — On doit à M. Désiré Korda le moyen suivant d'obtenir des courants triphasés avec des courants alternatifs simples. Il comporte en principe un transformateur à trois noyaux et une bobine mobile à self-induction. Le circuit portant le courant simple, $i = I \sin \omega t$, est divisé en deux

branches I et II de même résistance ohmique. On insère dans la branche II une bobine de self-induction, telle que

$$\frac{\omega L}{R} = \sqrt{3} = \tan \frac{\pi}{3}. \quad (1)$$

On peut mettre l'expression du courant dans la branche I sous la forme

$$i_1 = \frac{E}{R} \sin \omega t.$$

Celui de la branche II aura pour expression

$$\begin{aligned} i_2 &= \frac{E}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sin \left(\omega t - \varphi \right) \\ &= \frac{E}{2R} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{3} \right). \end{aligned}$$

Autrement dit, i_2 sera la moitié du courant i_1 tant que l'équation (1) sera satisfaite. Si la branche II renferme N spires sur l'un des noyaux du transformateur, la branche I devra en contenir $\frac{1}{2} N$ roulées sur le second noyau, et les sens des enroulements seront opposés l'un à l'autre de manière à produire dans chaque noyau un flux égal décalé d'un tiers de période. Le troisième noyau du transformateur sera enroulé avec les deux branches de manière à créer un troisième flux, également décalé d'un tiers de période par rapport aux deux autres. On obtiendra ainsi des courants triphasés avec les bobines secondaires enroulées sur les trois noyaux.

Modes de transformation (dite *polymorphique*) de courant continu en courants alternatifs polyphasés, ou réciproquement. — Les modes de transformation de courant continu en courants alternatifs simples, ou *vice versa*, sont également applicables aux courants polyphasés. Pour plus de simplicité, nous emploierons les abréviations CA pour courants alternatifs, CC pour courants continus, et CP pour courants polyphasés.

Le plus ancien mode de transformation de CC en CA ou inversement consiste à coupler deux machines, une de chaque

espèce, dont l'une, comme moteur, entraîne l'autre comme générateur. On en trouve un exemple à Cassel, où une alimentation par courant continu à trois fils (avec accumulateurs) est fournie par des dynamos à CC entraînées par des moteurs synchrones à CA recevant des courants alternatifs simples sous haute tension produits à distance.

Suivant une autre méthode, un induit tournant dans un champ

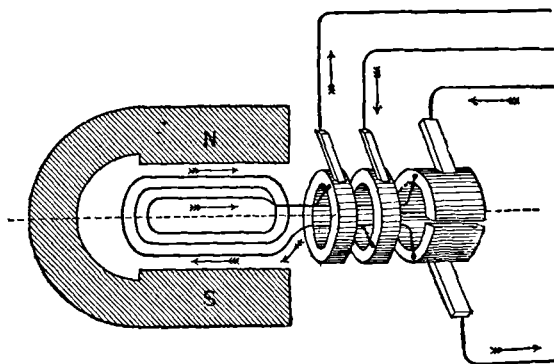


Fig. 161. — Transformateur polymorphe rudimentaire.

magnétique reçoit du CC qui l'actionne comme moteur et fournit extérieurement du CA par l'entremise de bagues collectrices convenablement reliées aux mêmes enroulements. La figure 161 illustre ce mode de transformation qui peut également servir pour la transformation inverse de CA en CC. Le dessin représente l'induit mobile comme une simple bobine avec commutateur à deux coquilles pour les connexions avec le CC ; mais, dans la pratique, on emploie un induit plus complexe avec commutateur à touches multiples. On peut, par exemple, se servir d'un anneau Gramme ordinaire en y ajoutant deux bagues collectrices reliées à deux points de l'anneau espacés de 180°. Une machine de ce genre est en service au Collège technique de Finsbury, à Londres, depuis 1885 ; les bagues collectrices y ont été ajoutées par le docteur Walmsley. Elle sert de transformateur dans les deux sens ; actionnée par une puissance quelconque, elle fournit l'une des deux sortes de courant ou les deux à la fois.

En 1887, la Compagnie Hélios a pris un brevet pour cette même combinaison exactement, et, en 1889, M. Bradley et M. Tesla ont fait breveter des dispositions identiques. Pour produire des courants triphasés avec des CC, il faut relier trois bagues collectrices à trois points symétriques de l'anneau. Pour des courants diphasés, il faut quatre bagues collectrices reliées en des points angulairement espacés de 90° . Dans un appareil récent de MM. Hulin et Leblanc ¹, une série de dix-huit bagues collectrices est reliée à autant de points symétriques et donne lieu à la production de dix-huit courants alternatifs dont chacun est décalé de $1/18$ de période par rapport à son voisin immédiat.

Un simple commutateur combiné tournant, comme celui de la figure 161, suffirait à transformer des CC en CA ou à rectifier des CA en CC, sans aucun inducteur, si l'on ne se heurtait pas à des difficultés pratiques au point de vue de la production d'étincelles. L'inducteur a pour objet d'équilibrer les forces électromotrices dans les différentes parties des enroulements, ainsi que d'entretenir la rotation convenable.

L'Exposition de Francfort en 1891 présentait plusieurs systèmes de transformation basés sur ce principe. Les maisons Lahmeyer et Schuckert notamment avaient exposé un grand nombre de types très intéressants d'appareils polyphasés qui offraient ce caractère particulier.

MM. Schuckert et C^{ie} exposaient une machine à anneau à six pôles susceptible de transformer des courants continus, alternatifs simples, diphasés ou triphasés, en courants de l'une quelconque des trois autres formes ou des trois autres formes simultanément. Elle comportait un induit annulaire ordinaire à commutateur en 144 segments, dont les enroulements en regard des différentes paires de pôles sont reliés transversalement en parallèle (suivant la méthode bien connue de Mordey). Le nombre des sections de l'enroulement étant de 144, et celui des pôles, de six, on a 48 sections entre un pôle quelconque et son voisin

¹ Voir un article avec illustrations dans l'*Electricien* du 21 avril 1894.

de même signe. Aux sections n^{os} 1, 17 et 33, c'est-à-dire en des points équidistants espacés d'un tiers de la distance angulaire qui sépare un pôle quelconque de son voisin de même signe, sont reliés trois fils amenés à trois bagues collectrices dont les balais fournissent des courants triphasés. En quatre points également équidistants sur une même section de l'enroulement (soient les n^{os} 1, 13, 23 et 37) sont connectés quatre fils qui, aboutissant à quatre autres bagues collectrices, donnent des courants alternatifs simples et des courants diphasés.

MM. Schuckert et C^o ont installé à Buda-Pesth une station extérieure à la ville transmettant une puissance de 1 000 kilowatts, par système diphasé, sous une tension de 2 000 volts, à diverses sous-stations réparties dans la ville et où elle est transformée en courant continu. Chacun des transformateurs qui remplissent cet office est une machine double formée d'un moteur à courants alternatifs et d'une dynamo à courant continu montés sur le même arbre. Le rendement de la transformation est de 85 p. 100. — La même maison a monté à Bilbao une installation dans laquelle un générateur triphasé est directement attelé sur une turbine et transmet 46 kilowatts à une station située à plus de 3 kilomètres et où ils sont transformés en courant continu.

On voyait également à Francfort un transformateur tournant, à huit pôles, basé sur le même principe, mais à induit en tambour avec enroulement ondulé. Il était exposé par l'*Allgemeine Gesellschaft* et pouvait recevoir du courant continu sous 400 volts environ qu'il transformait en courant triphasé sous 70 volts à peu près. C'est ce transformateur qui est actuellement en la possession du laboratoire du Collège technique de Finsbury.

M. Hospitalier a établi une classification générale¹ des appareils destinés à transformer des courants d'une certaine espèce en courants d'une autre espèce et il leur a donné le nom de *machines polymorphiques*.

A Dublin, un tramway électrique fonctionnant par courant continu sous 500 volts est actionné par une puissance initiale

¹ *Société française de Physique*, 1894, p. 203.

triphasee à 3500 volts. Dans cette application la transformation est effectuée par des moteurs-dynamos montés dans des sous-stations. Chacune d'elles comporte un moteur synchrone triphasé accouplé rigidement avec un générateur à courant continu. Cet ensemble sort de la British Thomson-Houston Co.

Auto-transformateur. — La question des transformateurs serait incomplètement traitée s'il n'était pas fait allusion à l'*auto-transformateur* parfois employé lorsqu'on a accidentellement besoin de réduire une force électromotrice pendant un court intervalle de temps, comme pour le démarrage d'un moteur. Ce transformateur (ou transformateur « à une seule bobine ») consiste simplement en une bobine de fil, enroulée sur un noyau de fer et mise en dérivation sur les conducteurs principaux. En un certain point de cette bobine, à une distance plus ou moins grande de l'une de ses extrémités, suivant la tension désirée, on branche un fil et l'on prend le courant entre ce branchement et une des extrémités de ladite bobine. On voit qu'on peut ainsi obtenir un courant beaucoup plus considérable que celui réellement fourni par les conducteurs, la partie entre le branchement et l'extrémité choisie agissant comme le secondaire d'un transformateur.

Bobines de réaction polyphasées — On peut établir des bobines de réaction polyphasées sur les mêmes données que les transformateurs polyphasés en mettant sur les noyaux un jeu d'enroulements (di- ou triphasés) au lieu des bobinages primaire et secondaire. Les règles ordinaires d'enroulement des bobines de réaction s'appliquent ici, à la condition qu'on tienne compte des groupements de phases.

CHAPITRE XI

MESURE DE LA PUISSANCE DES COURANTS POLYPHASÉS

La puissance fournie par un courant alternatif en un point quelconque d'un circuit peut se mesurer, comme on sait, de plusieurs manières : soit à l'aide d'un wattmètre, soit par la méthode des trois voltmètres, soit encore par diverses autres méthodes analogues ¹.

Dans le cas de systèmes di- et triphasés, la mesure est plus compliquée. Si les deux ou trois circuits sont séparés, il suffit d'intercaler dans chacun d'eux un wattmètre convenable, et la puissance totale fournie est la somme de celles indiquées séparément. Dans un système triphasé, par exemple, monté soit en étoile, soit en triangle, on peut effectuer une mesure

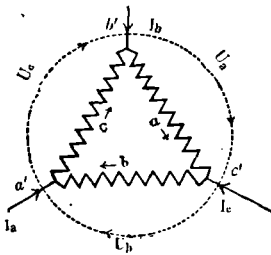


Fig. 162.

distincte sur chacune des branches du circuit.

Il est clair que, pour des moteurs triphasés, ce mode de mesure serait inapplicable et il est facile de montrer qu'on peut réaliser une simplification.

Dans le cas de symétrie parfaite entre les trois circuits, il suffit évidemment de mesurer à l'aide d'un wattmètre la puissance absorbée dans l'un quelconque d'entre eux et de la multiplier par 3 pour avoir la puissance totale. Mais dans une distribution générale on ne saurait admettre une telle égalité de consommation.

¹ A cet égard nous renvoyons le lecteur à des ouvrages tels que *Le transformateur de courants alternatifs* de Fleming ou *Les courants alternatifs d'électricité* de Blakesley.

Mesure de la puissance triphasée. — Quand on a dans trois conducteurs trois courants dont l'un est la résultante des deux autres et qu'il existe une relation correspondante pour les différences de potentiel entre les trois conducteurs, il est clair que ces six quantités ne sont pas indépendantes les unes des autres, et qu'il doit, en conséquence, être possible de mesurer la puissance sans avoir à les mesurer toutes les six.

Considérons le cas simple d'un circuit triphasé de lampes à incandescence connecté *en triangle*, comme dans la figure 162, où *a*, *b* et *c* sont les circuits de lampes. Si l'on désigne par i_a , i_b et i_c les intensités dans ces circuits, et par U_a , U_b et U_c les différences de potentiel entre leurs extrémités respectives, on a pour la puissance totale

$$P = U_a i_a + U_b i_b + U_c i_c.$$

Si l'on regarde comme positif le sens indiqué par les flèches sur la figure, on a à un instant quelconque .

$$U_a + U_b + U_c = 0, \quad \text{d'où} \quad U_a = -U_b - U_c,$$

et, en remplaçant U_a par sa valeur dans l'expression ci-dessus :

$$\begin{aligned} P &= -U_b i_a - U_c i_a + U_b i_b + U_c i_c \\ &= U_b (i_b - i_a) + U_c (i_c - i_a). \end{aligned}$$

Si I_a , I_b et I_c sont les intensités dans les conducteurs principaux aboutissant au triangle, on a $(i_b - i_a) = I_c$, et $(i_c - i_a) = -I_b$; et, par suite :

$$P = U_b I_c - U_c I_b.$$

Cette expression se présente comme la différence de deux puissances par suite du sens adopté comme positif sur la figure ; si l'on renverse le sens de la différence de potentiel entre a' et b' , comme $U_b = -U_c$, on a

$$P = U_b I_c + U_c I_b .$$

Autrement dit, si l'on fait passer le courant I_c par la bobine en série d'un wattmètre dont la bobine en dérivation est reliée entre

c' et a' , et qu'on fasse passer le courant I_b par la bobine en série d'un autre wattmètre dont la bobine en dérivation soit connectée entre b' et a' , la somme des indications fournies par les appareils sera la puissance totale absorbée dans les circuits a , b et c .

Si les circuits sont montés *en étoile*, on pourra arriver à une formule analogue. En appliquant les notations de la figure 54 (p. 53), on a pour la puissance totale

$$P = U_{Jm} i_a + U_{Jn} i_b + U_{Jo} i_c .$$

Si maintenant, on considère les intensités, au lieu des différences de potentiel comme dans le cas du montage en triangle, on a

$$i_a + i_b + i_c = 0, \quad \text{d'où} \quad i_a = -i_b - i_c ,$$

et, en substituant comme précédemment et remarquant que

$$U_{Jn} - U_{Jm} = U_{mn} \quad \text{et} \quad U_{Jo} - U_{Jm} = U_{mo},$$

on trouve

$$P = U_{mn} i_b + U_{mo} i_c .$$

Deux wattmètres de construction convenable suffisent, en conséquence, à la mesure de la puissance. Le docteur Aron¹ a construit un instrument approprié à la mesure de cette consommation ; c'est une modification de son compteur bien connu à pendule, avec montage différentiel. Le second pendule du compteur triphasé est accéléré par les deux bobines mobiles des deux wattmètres ; chacune d'elles est placée à l'intérieur de sa bobine fixe correspondante.

D'autres types d'enregistreurs polyphasés ont été proposés par Duncan² et par Shallenberger³.

¹ *Elektrotechnische Zeitschrift*, XIII, p. 193, avril 1892.

² Brevet anglais, n° 6241 de 1893.

³ Brevet anglais, n° 148 de 1895.

CHAPITRE XII

NOTES SUR L'ÉTUDE DE CONSTRUCTION DES MOTEURS POLYPHASÉS

Comme pour toutes les machines, l'expérience et la pratique peuvent seules, pour les moteurs polyphasés, conduire à une bonne étude de construction. Tout ce que nous pouvons donner ici, c'est le raisonnement fondamental sur lequel reposent les dimensions générales et l'enroulement d'un moteur destiné à un objet particulier.

Voici le problème à résoudre : — Etant donné qu'on veut établir un moteur d'un nombre déterminé de phases appelé à être alimenté sous une tension donnée, quels devront être les dimensions de ses éléments et le nombre de ses spires pour qu'il puisse fournir une certaine puissance fixée d'avance ?

Considérons d'abord l'élément fixe. Le rôle des conducteurs de cet élément (en ce qui concerne l'étude préliminaire) est (1) d'assurer une f. é. m. inverse égale à U , qui est la tension d'alimentation ; (2) de fournir dans chaque circuit une intensité égale à $\frac{P}{U N_c \cos \varphi}$, P étant la puissance totale absorbée à pleine charge par la machine, et N_c le nombre de circuits. On peut prendre 0,85 pour le cosinus de l'angle de décalage ($\cos \varphi$). Par exemple, pour le moteur diphasé de six chevaux représenté par la figure 107, devant fonctionner sous 100 volts, et dont les détails de construction sont donnés page 240, si l'on admet le rendement égal à 80 p. 100, la puissance absorbée à pleine

charge sera de 5 600 watts, et l'intensité dans chaque circuit sera de

$$\frac{5600}{100 \times 2 \times 0,85} = 33 \text{ ampères.}$$

La petitesse de l'élément mobile est limitée par le fait qu'il doit être revêtu (sous réserve des proportions entre l'espace occupé par le fer et celui pris par le cuivre ci-après spécifiés) d'une certaine longueur totale de conducteur actif qui remplira ce rôle. L'équation suivante donne cette longueur pour chaque circuit :

$$U - u = \frac{k \mathfrak{B}_{\text{eff}} l v}{10^8},$$

dans laquelle :

- U est la différence de potentiel d'alimentation, en volts efficaces;
- u la chute de potentiel dans la résistance de l'organe fixe (voir ci-dessous);
- k un facteur dépendant de la largeur angulaire des bobines (voir p. 28) et qui peut être pris comme égal à 0,9 pour un moteur diphasé tel que celui de la figure 97, et comme égal à 0,95 pour un moteur triphasé tel que celui de la figure 57;
- $\mathfrak{B}_{\text{eff}}$ la densité efficace de flux ou induction efficace (voir ci-dessous);
- l la longueur totale de conducteur actif nécessaire;
- v la vitesse linéaire du champ magnétique, en centimètres par seconde.

La chute de potentiel u peut être considérée comme comprise entre 0,03 U pour les petits moteurs et 0,02 U pour les moteurs de 100 chevaux et au-dessus.

Nous avons désigné par $\mathfrak{B}_{\text{eff}}$ la racine carrée de la moyenne des carrés de l'induction dans l'entrefer. Comme la valeur maxima de cette induction ne doit pas dépasser 6 000 webers par centimètre carré ou 6 000 gauss (ce qui correspond à plus de 41 000 gauss dans le fer entre les trous), on peut prendre $\frac{6\,000}{\sqrt{2}}$, soit 4 200 gauss, comme valeur de $\mathfrak{B}_{\text{eff}}$ dans l'expression ci-dessus.

En ce qui concerne v , il est difficile de poser une règle quelconque; cette vitesse dépend en grande partie de la destination du moteur. On peut porter la vitesse linéaire à la périphérie

d'un organe mobile de moteur polyphasé à une valeur beaucoup plus élevée que celle d'un induit de dynamo ordinaire. Alors que 15 mètres par seconde sont une vitesse tangentielle ordinaire pour un induit de 100 chevaux, on peut, à sécurité égale, faire tourner l'élément mobile d'un moteur polyphasé à la vitesse périphérique de 24 mètres par seconde. Cette vitesse périphérique varie très peu avec les dimensions de la machine ; en réalité 20 mètres par seconde sont une bonne vitesse utile pour des machines de 10 à 100 chevaux, bien qu'on puisse la pousser beaucoup au delà pour des machines de très grand rayon. La vitesse v du champ magnétique est de 2 à 5 p. 100 plus élevée, suivant la valeur du glissement. Le rayon de l'organe mobile varie, pour des raisons qui seront ultérieurement développées, très sensiblement en proportion de la racine carrée de la puissance. Comme terme de comparaison des dimensions de moteurs polyphasés bien établis, la formule

$$r = 200 \sqrt{\frac{P_{\text{chx}}}{v}}$$

paraît donner, en centimètres, la longueur de rayon convenable comme base d'étude d'exécution. Cette formule est établie d'après la comparaison de moteurs étudiés pour une fréquence de quarante à cinquante périodes par seconde. Pour des fréquences supérieures on manque de données positives ; mais comme, théoriquement, la fréquence n'influe pas sur les dimensions du moteur, il semblerait que le mode général d'étude de construction ici indiqué est applicable à des fréquences allant jusqu'à 100 périodes par seconde. On pourrait naturellement admettre un écart assez considérable entre la longueur du rayon et celle que fournirait la formule précédente. Si, dans le calcul approximatif des dimensions, on arrivait à une trop grande longueur de l'organe mobile dans la direction parallèle à l'arbre, il est facile d'admettre un rayon supérieur à celui donné par la formule et de refaire le calcul sur cette nouvelle base. On pourra prendre comme nombre convenable de tours par seconde (que nous désignons ici par ω_1) $\frac{320}{T}$ environ. Et, en appelant $\frac{1}{T}$

la fréquence d'alimentation en périodes par seconde, on aura pour le nombre de paires de pôles produit par un seul circuit de l'organe fixe (portant un des courants polyphasés) $\frac{1}{T\omega_2}$, ω_2 étant le nombre de tours par seconde que fait le champ. Ce rapport $\frac{1}{T\omega_2}$ devant être un nombre entier, on pourra prendre le nombre entier qui rendra ω_2 aussi voisin que possible de $1,03 \omega_1$ (correspondant à un glissement de 3 p. 100). La vitesse linéaire sera dès lors $2\pi l'\omega_2$. Un constructeur pourra naturellement modifier ce calcul d'après d'autres considérations telles qu'un approvisionnement préexistant de disques de tôle estampés susceptibles d'être employés dans l'établissement du moteur.

v étant fixée, on a toutes les données nécessaires pour calculer l , qui, avec la section droite du fil, régit la largeur de l'organe fixe.

On peut choisir le diamètre du conducteur de manière à donner au courant une densité de 2,5 à 3 ampères par millimètre carré, suivant le mode d'isolement du fil et sa facilité de refroidissement. Nous désignerons par s la surface occupée par la section transversale du conducteur, y compris son isolant et l'espace perdu entre les fils.

Il s'agit maintenant de voir en combien de parties doit être divisé le conducteur actif dans un même circuit. L'espace total disponible pour les conducteurs de l'organe fixe dépendra de la profondeur radiale l'' de l'enroulement (voir Fig. 105).

Il faut chercher à faire l'' aussi petit que possible, attendu que, plus cette épaisseur sera grande, plus seront considérables les dérivations magnétiques. On pourra en général la prendre comme égale au double de la largeur d'un trou, bien que cette dimension puisse varier suivant d'autres considérations commandées par l'étude. On a vu que le nombre de paires de pôles est de $\frac{1}{T\omega_2}$; ce chiffre et le nombre de phases permettent de déterminer le nombre de trous. Si, par exemple, l'enroulement est semblable à celui de la figure 173, et que le nombre de phases soit de deux, étant donnée la fréquence $\frac{1}{T} = 50$ périodes par seconde et $\omega_2 = 5$ tours par seconde, le nombre de bobines dans

chaque circuit sera de 20, et le nombre total de bobines, de 40. La question de savoir combien il faut laisser de trous pour chaque bobine (ou pour chaque ondulation, si l'on adopte un bobinage ondulé) dépend du diamètre de l'organe fixe et du nombre de bobines ou d'ondulations. On ne saurait prendre de meilleur exemple que celui d'ingénieurs tels que M. C. E. L. Brown qui donne au fer entre les trous à peu près la même largeur qu'aux trous eux-mêmes. Ceci veut dire que, s'il n'y a qu'un petit nombre de bobines, comme dans le moteur à quatre pôles de la figure 107, un certain nombre de trous (quatre dans la figure) sera assigné à chaque bobine ; si, au contraire, le nombre des bobines est considérable, comme dans la figure 173, il suffira de deux trous pour chacune. L'objectif est de tenir l'enroulement aussi voisin que possible de la surface de l'organe fixe. Le nombre le plus convenable de trous N'' étant ainsi déterminé, la largeur de chacun d'eux sera $\frac{\pi l'}{N''}$, et, en prenant l'' égal à deux fois cette largeur, on aura sensiblement pour leur section $\frac{2\pi^2 l'^2}{l''^2}$. Sur cette section, on en réservera une certaine part pour le tube en papier ou autre matière isolante, et l'on aura ainsi laissé l'espace suffisant S pour chaque trou.

On a donc $\frac{S}{s}$ pour le nombre de conducteurs par trou, et $\frac{N''}{N_c} \times \frac{S}{s}$ pour le nombre total de conducteurs dans un seul circuit. La longueur de chaque conducteur sera, en conséquence,

$$L \text{ (cm)} = l \frac{N_c s}{l'' S} .$$

On a ainsi la largeur de face de l'organe fixe. On voit que la dernière variable considérée, la seule qui en réalité détermine la tension cherchée de la machine, est la longueur de chacun des conducteurs actifs, ou, ce qui revient au même, la mesure, parallèlement à l'arbre, de la face transversale de l'organe fixe. Cette mesure est de celles qu'on peut modifier considérablement par rapport à l' sans agir sur le prix de revient de la machine par cheval fourni ou sur son rendement. On reconnaîtra cependant que, dans les grandes machines, on lui donne toujours, relativement à l' , une valeur inférieure à ce qu'elle est dans les petites.

Comme l'organe fixe est formé de tôles assemblées, il y a des raisons mécaniques pour que sa largeur ne soit pas considérable par rapport à sa profondeur radiale. C'est en partie pour ce motif qu'on trouve que le rayon de l'organe mobile varie comme la racine carrée plutôt que comme la racine cubique de la puissance. L'épaisseur radiale est environ la moitié de la largeur d'un pôle. Le fait que l'épaisseur radiale l'' des trous de l'organe fixe diminue par rapport au rayon au fur et à mesure que celui-ci augmente est cause de l'augmentation relative de la largeur de l'organe fixe au fur et à mesure de l'accroissement des dimensions de la machine, attendu que la puissance de celle-ci est proportionnelle au poids de cuivre dans l'organe fixe.

Les dimensions de cet organe étant déterminées, celles de la carcasse en fer de l'organe mobile en découlent immédiatement. La largeur totale de fer feuilleté, parallèlement à l'arbre, est la même pour les deux. On fait l'entrefer aussi étroit que possible, en ne laissant que juste l'espace suffisant pour permettre à l'organe mobile de tourner librement dans les conditions pratiques de fonctionnement. Dans le moteur représenté figure 105, l'entrefer radial n'est que de 0,3 mm ; autrement dit, le diamètre extérieur de l'organe mobile a 1 millimètre de moins que le diamètre intérieur de l'organe fixe. Dans les petits moteurs à 4 ou 6 pôles, l'organe mobile est formé de disques, comme celui représenté figure 105. Quand les pôles sont nombreux la partie centrale de ces disques serait inactive ; la partie feuilletée de l'organe mobile a dès lors la forme d'un anneau qui peut être constitué par des pièces de tôle, enchevêtrées aux points de raccordement, boulonnées ensemble sur le rebord d'un support en fonte, et pouvant affecter la forme d'une roue, comme on le voit sur la figure 172.

On a vu qu'il était désirable, sans être toutefois absolument nécessaire, que le nombre des conducteurs sur l'organe mobile fût incommensurable avec le nombre de trous de l'organe fixe, de manière à éviter, soit au démarrage, soit à une vitesse angulaire quelconque inférieure au synchronisme, toute ten-

dance pour les deux éléments à s'engrener magnétiquement l'un avec l'autre. Quand les liges de l'organe mobile ne doivent être que mises en court-circuit à leurs extrémités par une robuste bague de cuivre, il n'y a aucune difficulté à choisir un nombre dans ces conditions. Dans la figure 105, par exemple, le nombre des trous dans l'organe fixe est de 40, et le nombre de conducteurs de l'élément mobile, de 37.

Mais, quand on veut relier les barres de l'organe mobile en un enroulement régulier soit en vue de l'insertion d'une résistance au démarrage, soit pour l'un des objets étudiés p. 139, il faut un certain discernement dans le choix du nombre de ces conducteurs. Si, par exemple, on cherche à former trois circuits destinés à aboutir à trois bagues collectrices montées sur l'arbre, en vue d'introduire une résistance pour le démarrage, on peut partager l'espace occupé par un même pôle magnétique en trois parties, 1, 2 et 3. Tous les conducteurs de la section 1 en regard d'un pôle Nord peuvent être connectés à ceux de la section 1 en regard d'un pôle Sud, et ainsi de suite, en formant ainsi un bobinage ondulé autour de l'organe mobile ; les conducteurs des sections 2 et 3 constitueront des enroulements ondulés semblables. Si chaque section comporte le même nombre y de conducteurs, le nombre total de conducteurs sera de $3yN_p$, N_p étant le nombre de pôles individuels. Ce nombre aura ordinairement un facteur commun avec celui des trous de l'organe fixe, mais ce ne sera pas en soi un obstacle au démarrage du moteur si les conducteurs sont assez nombreux, et notamment si les nombres compris dans la largeur d'un pôle sont premiers entre eux. Ainsi, dans le moteur représenté par la figure 172, le nombre des trous dans l'élément fixe est de 80, et celui des conducteurs de l'organe mobile, de 180 ; les nombres compris dans la largeur d'un pôle en sont respectivement de 4 et de 9 qui sont premiers entre eux.

En déterminant la section transversale des conducteurs de l'organe mobile on se rappellera que, plus elle sera forte, meilleur sera le rendement de cet organe, à la condition qu'on réserve aussi un espace de fer suffisant. On ne gagne rien à

donner à cet enroulement une section totale supérieure à la section totale des enroulements de l'organe fixe, et dans la pratique on la fait même généralement un peu moindre. Le courant par unité de longueur périphérique dans l'un est (abstraction faite du courant d'aimantation) égal au courant par unité de longueur périphérique dans l'autre. Les conducteurs étant ici en cuivre massif et légèrement isolés exigent beaucoup moins d'espace, pour leur logement, que les conducteurs de l'organe fixe ; aussi la dimension des trous du premier élément est-elle généralement inférieure de plus de moitié à celle des trous de l'organe fixe.

CHAPITRE XIII

QUALITÉS MÉCANIQUES DES MOTEURS POLYPHASÉS

Un moteur doit, au point de vue mécanique, présenter les trois qualités suivantes : (1) développer au démarrage un couple convenable ; (2) être capable de tourner à vitesse angulaire sensiblement constante sous toutes les charges ; (3) rendre en puissance mécanique une forte proportion de la puissance électrique qui lui est fournie.

Démarrage des moteurs polyphasés. — Nous avons examiné au Chapitre VI les conditions qui au démarrage permettent d'obtenir d'un moteur polyphasé un couple énergique. Ce couple effectif dépend naturellement de l'intensité du courant envoyé dans les bobines de l'organe fixe. Il peut s'élever à une valeur triple ou quadruple du couple moteur à pleine charge. Dans le cas de moteurs puissants on ne doit pas chercher à absorber un courant d'intensité égale à celle qui, si on ne la réduisait, circulerait dans le moteur pendant qu'il prend sa vitesse de régime. La résistance intercalée dans le circuit de l'organe mobile a pour effet d'atténuer le courant de l'organe fixe en faisant agir celui-ci comme une bobine de réaction ; sa self-induction n'est pas en effet annihilée par les courants dans l'organe mobile, comme elle le serait si l'on ne mettait pas de résistance. On obtient en même temps, comme on l'a vu au Chapitre VI, un couple beaucoup plus énergique que si l'on atténuait l'intensité par l'inscr-

tion d'une résistance dans le circuit primaire. La figure 163 représente une résistance composée de trois vases remplis de liquide auxquels sont reliés les trois fils venant des collecteurs de l'organe mobile. La jonction commune est formée de trois plaques qu'on peut élever et abaisser dans le liquide de manière à modifier à volonté cette résistance. Dans certains cas la résistance fait partie du corps même de l'organe mobile et un dispositif monté sur son arbre permet de la mettre en court-circuit quand le moteur a atteint sa vitesse normale. Pour tous les petits moteurs, et même pour toutes les dimensions jusqu'à une puissance de 10 chevaux, cette disposition est préférable en ce qu'elle élimine toutes les complications de bagues collectrices,

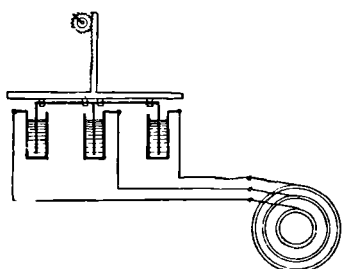


Fig. 163. — Résistance de démarrage de Dobrowolski.

balais, etc. On fait généralement démarrer les grands moteurs sous faible charge et l'on augmente progressivement la charge par embrayage de courroie ou poulie à friction. Pour les grues, monte-charges, etc., on construit des moteurs spéciaux sans collecteurs, balais, ni autres modes d'insertion de résistances dans les circuits

mobiles. On leur donne un fort glissement d'induit (s'élevant jusqu'à 12 p. 100) et un faible facteur de puissance; mais ils démarrent avec un couple initial égal à deux ou trois fois leur couple normal sous charge.

Le tableau suivant, dressé par M. Kolben, donne, pour le démarrage sous diverses charges, l'intensité et la différence de potentiel aux bornes d'un type de moteur de 9 chevaux, pour grue, construit par les ateliers d'Oerlikon. L'effort entre les organes mobile et fixe n'est pas constant pour toutes les positions de l'organe mobile; aussi a-t-on indiqué les couples minimum et maximum.

Le même moteur, tournant à vide à une vitesse angulaire de 1000 tours par minute, sous une tension de 110 volts, prenait 20 ampères. Sous charge normale l'intensité était de 39 ampères

et la vitesse angulaire de 890 tours par minute ; le moteur développait 8,5 chevaux.

COUPLE AU DÉMARRAGE D'UN MOTEUR TRIPHASÉ DE 9 CHEVAUX POUR GRUE

DIFFÉRENCE de potentiel entre le point neutre et chaque borne, en volts.	INTENSITÉ dans chaque branche au démarrage, en ampères.	EFFORT en kilogrammes sur un bras de levier de 13 centimètres au repos.
48,5	60	15 - 30
58	83	30 - 60
69	100	50 - 90
75	105	60-100
80	115	90-140

Le docteur Louis Bell, dans un mémoire communiqué le 17 janvier 1894¹ à l'American Institute of Electrical Engineers,

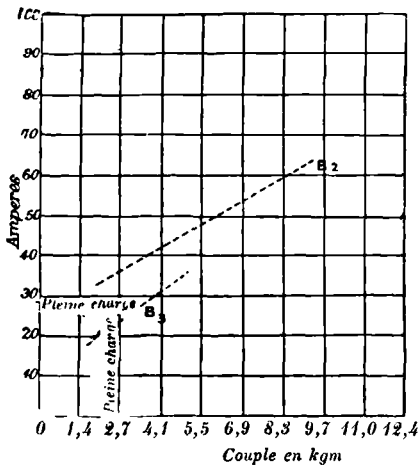


Fig. 164. — Courbes de Bell.

fournit un certain nombre de données expérimentales concer-

¹ *Electrical World*, XXIII, pp. 334-367 et 400 (1894).

nant les conditions de démarrage des moteurs sous charge, le courant nécessaire au démarrage, et d'autres points. Les courbes de la figure 164 sont empruntées à ce travail ; elles représentent le couple de démarrage d'un moteur triphasé de 5 chevaux. B_2 est la variation du couple en fonction de l'intensité pour une résistance déterminée dans le circuit mobile, quand on fait varier la tension et pour une résistance choisie de manière à donner un couple énergétique. B_3 correspond aux mêmes conditions que B_2 , sauf en ce que la résistance était choisie de manière à donner au démarrage des courants modérés. Le couple mécanique était, en pleine charge normale, de 2,5 kgm. On voit que, au démarrage, le moteur développera le couple de pleine charge à intensité bien inférieure à celle de pleine charge. En réalité, à intensité de pleine charge, le couple de démarrage est supérieur de 50 p. 100 au couple de fonctionnement. On trouve dans le même travail des courbes analogues pour un moteur de 10 chevaux, ainsi que d'autres courbes indiquant le résultat de variations dans la résistance additionnelle.

Démarrage des moteurs à courants alternatifs simples. — Les moyens d'obtenir le démarrage d'un moteur à courants alternatifs simples se divisent en deux classes : — (1) ceux dans lesquels on produit un champ tournant en appliquant sur l'organe fixe un enroulement auxiliaire portant un courant en discordance de phase avec le courant dans l'enroulement principal ; (2) ceux dans lesquels les conducteurs de l'organe mobile sont connectés (comme à l'aide de balais portant sur un commutateur) de telle sorte que les courants qui les parcourent déterminent une polarité inclinée par rapport à celle de l'organe fixe.

On peut obtenir la différence de phase des courants dans les deux enroulements de l'organe fixe au moyen d'enroulements ayant eux-mêmes des coefficients inégaux de self-induction, ou en mettant une résistance ou une capacité en série avec l'un d'eux, ou de l'inductance en série avec l'autre ; ou bien encore par une combinaison de ces deux moyens, comme on l'a vu page 178.

La figure 165 représente le schéma des dispositions de commutation adoptées par les ateliers d'Oerlikon pour le démarrage des moteurs. Le dessin montre le levier de l'interrupteur (le

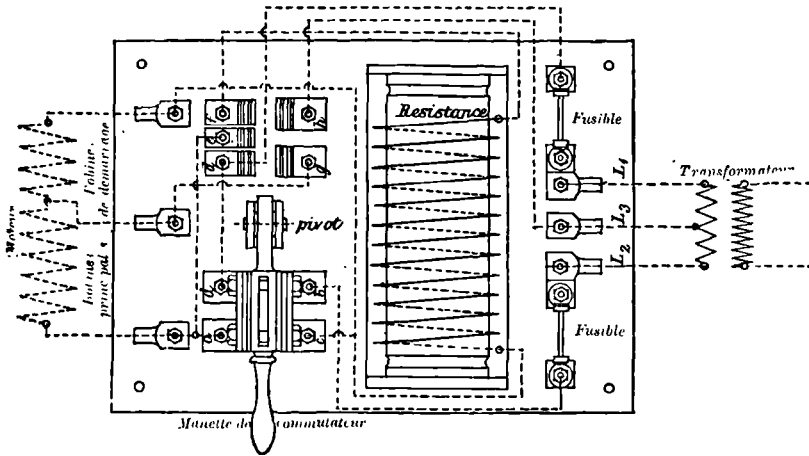


Fig. 165. — Appareil de Kolb n pour démarrage des moteurs à courants alternatifs simples.

« hachoir », comme l'appellent les Anglais) dans la position correspondant à la pleine vitesse. Dans la position de démarrage, les lames de l'interrupteur connectent ensemble les pièces *d*, *e* et *f* ainsi que *g* avec *h*. Les points *L*₁ et *L*₂ reçoivent toute la tension du transformateur, tandis que le point *L*₃ est relié au milieu de ce transformateur, de telle sorte qu'il existe entre *L*₁ et *L*₃ une moindre différence de potentiel qu'entre *L*₁ et *L*₂, mais qu'on peut obtenir plus d'intensité sans en emprunter beaucoup aux conducteurs principaux. Si maintenant on considère l'interrupteur dans la position de démarrage, le courant, après avoir passé de *L*₁ à *d*, trouve deux voies, l'une par *e* aux conducteurs principaux, l'autre par *f* à la bobine de résistance et aux bobines de démarrage, pour revenir en *L*₃ par les pièces *g* et *h*. Dès que le moteur a atteint sa vitesse normale, on ramène l'interrupteur qui relie *a* à *d* et *c* à *b*. On voit que les deux enroulements sont en série et reçoivent toute la tension d'alimentation.

Dans la figure 166 est schématiquement reproduit le disposi-

tif de démarrage employé par M. Brown avec condensateur électrolytique (voir p. 178) marqué K sur la figure. Les lignes en pointillé indiquent les connexions de l'interrupteur au démarrage, et les lignes pleines à la suite, celles correspondant à la pleine charge. Quand le moteur est à l'arrêt, le levier de l'inter-

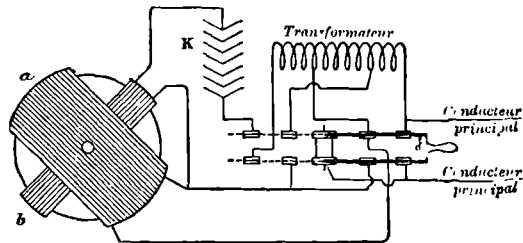


Fig. 166. — Procédé de démarrage de M. Brown.

rupteur est maintenu verticalement. La bobine *a* représente l'enroulement ordinaire de marche, et la bobine *b* l'enroulement auxiliaire qui, dans le cas actuel, est mis complètement hors circuit dès que le moteur a démarré. On aperçoit sur la figure un auto-transformateur (voir p. 210).

Dans la spécification de son brevet anglais n° 24098, de décembre 1892, M. Brown décrit un grand nombre de moyens d'obtenir le démarrage de moteurs à courants alternatifs ordinaires ; les uns comportent l'emploi d'enroulements auxiliaires doués de self-induction et de capacité ; les autres, des procédés qui rentrent dans la seconde classe ci-dessus décrite. Dans ces moteurs l'organe mobile est bobiné comme un induit Gramme ou Siemens, avec liaisons à un commutateur, exactement comme dans le cas d'une machine à courant continu. Deux points opposés de l'enroulement sont également reliés à deux bagues de contact. Quand on veut faire démarrer le moteur, on introduit une résistance entre les balais sur ces bagues collectrices, et l'on cale les balais sur le commutateur de manière à mettre en court-circuit un petit nombre des spires de l'organe mobile qui se trouvent situées obliquement par rapport à la direction du flux alternatif produit par l'organe fixe. La grande intensité

dans les bobines mises en court-circuit les fait tourner de façon à les rendre parallèles au flux alternatif, et, les balais conservant leur position, il se produit un couple continu. Au fur et à mesure que le moteur prend de la vitesse on peut écarter les balais jusqu'à ce qu'ils se trouvent diamétralement opposés. Les balais sur les bagues collectrices sont alors mis également en court-circuit. M. Brown décrit aussi des procédés dans lesquels le courant alternatif venant des conducteurs principaux est fourni à l'organe mobile par le commutateur en vue du démarrage.

Constance de la vitesse angulaire. — En ce qui concerne la constance de la vitesse, on a vu que, dans un moteur bien étudié, le glissement ne doit pas dépasser 5 p. 100 à pleine charge; dans ces conditions, la vitesse angulaire ne peut varier que de 3 ou 4 p. 100 de faible charge à pleine charge. Dans un cas cité par le docteur Louis Bell, on a constaté, dans une installation de 17 moteurs à champ tournant en Colombie, S. C., une variation maxima de vitesse de 2,2 p. 100 seulement entre une puissance de 75 chevaux et celle absorbée uniquement par les frottements dans les moteurs; certains moteurs donnaient même individuellement des variations descendant jusqu'à 1 1/2 p. 100 seulement. Il est cependant possible de faire varier à volonté la vitesse angulaire d'un moteur polyphasé en insérant un rhéostat dans le circuit principal.

Rendement. — Les données ci-après réunies en tableaux montrent le rendement élevé des moteurs polyphasés et à courants alternatifs ordinaires asynchrones.

Nous devons à M. Kolben le premier tableau relatif à des moteurs d'induction triphasés construits par les ateliers d'Oerlikon. Ils n'ont ni bagues collectrices ni balais, et ne comportent l'introduction d'aucune résistance dans le circuit mobile. Tous les organes mobiles sont à enroulement en tambour avec 3, 5, 7 ou 11 sections fermées sur elles-mêmes.

D'autre part M. Kapp, dans son livre sur la *Transmission*

RÉSULTATS D'ESSAIS AU FREIN SUR DES MOTEURS TRIPHASÉS DE LA SÉRIE D'OERLIKON

TYPE N°	354	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368						
Puissance effective sur la poulie, en chevaux	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{4}$	$1\frac{1}{2}$	2	3	$4\frac{1}{2}$	6	9	12	18	24	36	48	60	75	100	125						
Vitesse angulaire à vide, en tours par minute	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	750	600	600	500						
— à demi-charge, en tours par minute	1460	1470	1470	1475	1475	1480	1480	985	985	988	990	990	990	990	740	595	596	496						
— à pleine charge, en tours par minute	1410	1420	1435	1440	1445	1450	1450	960	960	970	970	970	970	725	585	588	488							
Différence de potentiel entre les bornes (montage en étoile), en volts	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190						
Fréquence, en périodes par seconde	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50						
Intensité à vide, en ampères	0,85	1,3	2,2	2,8	3,6	6	7,5	12	14	19	21	25	27	40	48	65	75	90						
— à demi-charge, en ampères	1	1,4	2,6	3,7	4,8	8	11	16	19	25	32	41	53	73	90	115	143	180						
— à pleine charge, en ampères	1,5	2,3	3,3	5,8	7,5	11	14,5	20,5	28	35,5	53	70	100	130	160	200	265	330						
Rendement à pleine charge, p. 100	55	65	68	72	75	78	80	82	87	88	90	91	92	92	93	93	93	94						
Facteur de puissance (cosinus de l'angle de décalage entre la f. é. m. et l'intensité)	0,67	0,75	0,75	0,8	0,8	0,8	0,86	0,8	0,82	0,85	0,85	0,85	0,88	0,9	0,9	0,9	0,91	0,91						
Nombre de pôles	4	4	4	4	4	4	4	6	6	6	6	6	6	8	8	10	10	12						
Intensité au démarrage, courroie tendue et faible charge, en ampères	4	6	11	16	30	36	55	65	75	80	85	90	100	105	112	150	150	220						
	Démarrage sans résistance.												Démarrage avec résistance ordinaire dans le circuit primaire.						Dispositif spécial de démarrage avec auto-transformateur.					

ÉPREUVES DE KOLBEN SUR DES MOTEURS TRIPHASÉS

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	
PUISANCE au frein à la poulie	en chevaux	INTENSITÉ dans chaque branche, en ampères.	DIFFÉRENCE de potentiel entre la borne neutre et chacune des deux autres, en volts.	PUISANCE apparente : $3 \times V \times A$, en watts.	PUISANCE réelle prise au wattmètre aux bornes, en watts.	FAUTEUR de puissance = cosinus de l'angle de décalage.	GLISSEMENT en charge, à la fréquence de 50 périodes par seconde, en p. 100.	RI NDEMENT $\frac{II}{VI}$	
60	44 160	318	60	57 240	48 300	0,844	2	0,91	MOTEUR I Vitesse angulaire théorique : 750 tours par minute. Organe mobile en cage d'écartel. Constructeur : A. E. G.
42	30 910	252	60	45 360	36 800	0,81	1,3	0,84	
20	14 720	150	60	27 000	17 700	0,655	*	0,83	
0	0	125	60	22 500	"	*	*	*	
53,8	39 600	180	93	50 220	42 100	0,84	4	0,94	MOTEUR II Vitesse angulaire théorique : 750 tours par minute. Organe mobile en tambour à onze sections, fermées chacune en court-circuit sur elles-mêmes. Construc- teur : Oerlikon.
46	33 900	158	95	45 000	37 440	0,83	3	0,905	
0	0	40	98	11 760	1 710	0,145	0	*	

électrique de l'énergie, fournit, sur deux moteurs triphasés éprouvés au frein par M. Kolben, des données reproduites dans le tableau de la page 231.

On trouvera enfin ci-après des renseignements sur des moteurs triphasés de diverses dimensions construits par l'Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft :

TYPES	D. R. 1.	D. R. 5.	D. R. 10.	D. R. 50.	D. R. 500.
Puissance normale, en chevaux. . .	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{2}$	1	2	50
Nombre de pôles	2	4	4	4	8
Poids, en kilogrammes	18	65	94	245	1 200
Intensité dans chaque circuit au démarrage, en ampères.	"	"	20	50	400
Intensité dans chaque circuit à pleine charge, en ampères.	1,4	4	8	36	280
Intensité dans chaque circuit à vide, en ampères.	"	"	4,5	15	150
Puissance absorbée à pleine charge, en kilowatts	0,23	0,52	0,985	4,38	40,2
Vitesse angulaire à pleine charge, en tours par minute.	2 300	1 400	1 375	1 395	725
Vitesse angulaire à vide, en tours par minute.	2 380	1 490	1 490	1 490	745
Vitesse angulaire du champ, en tours par minute.	3 000	1 500	1 500	1 500	750
Glissement à pleine charge, p. 100.	23	66	8	7	3,3
Rendement industriel.	"	0,71	0,75	0,84	0,91
Couple moteur, en kgm	"	"	0,52	2,6	49,4

M. Kolben a établi la très intéressante comparaison suivante entre un alterno-moteur synchrone de 80 chevaux installé dans un moulin et un moteur asynchrone de 100 chevaux actionnant une filature. Les figures 167 et 168 donnent les résultats graphiques de cette étude.

Le moteur synchrone est du type Kapp, à induit en disque plat, construit par les ateliers d'Oerlikon. Il est enroulé pour 2000 volts ; son excitatrice est directement attelée sur son arbre. La courbe de sa f. é. m. est presque une sinusoïde. Le moteur asynchrone, représenté par la figure 169, est un moteur triphasé à 18 pôles, à haute tension, établi par les mêmes ateliers, pour 1 750 volts à 50 périodes par seconde,

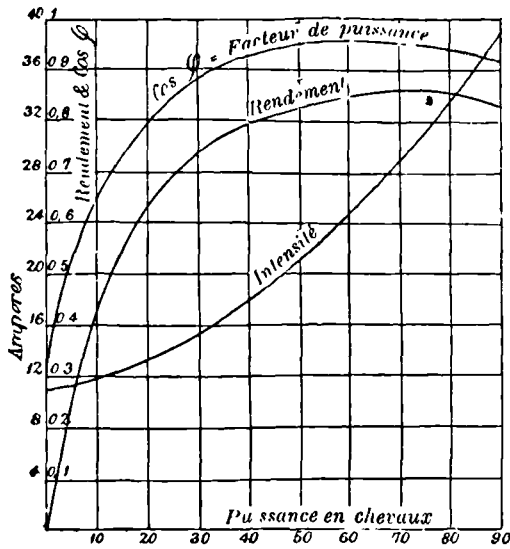


Fig. 167. — Moteur synchrone.

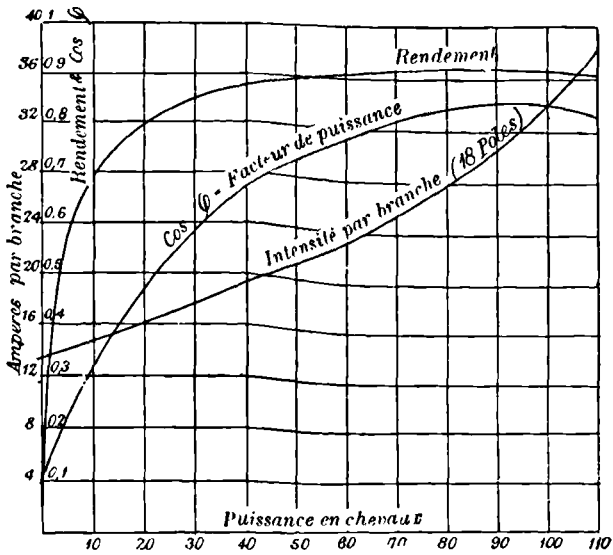


Fig. 168. — Moteur triphasé.

Courbes de Kolben.

et monté pour être actionné par câble à la faible vitesse angulaire de 320 tours par minute.

Les courbes montrent que le facteur de puissance du moteur synchrone est plus favorable, à toutes les charges, que celui du

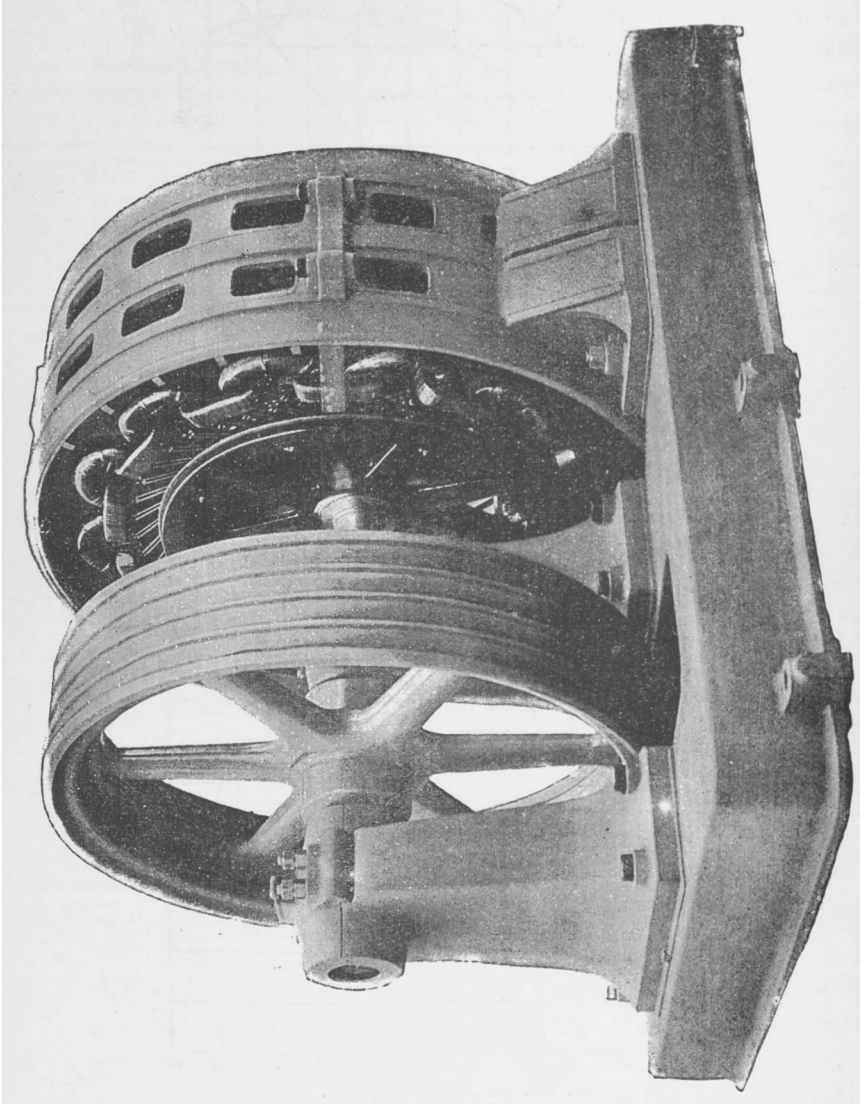


Fig. 169. — Moteur triphasé à 18 pôles, à haute tension (Oerlikon).

moteur asynchrone, bien que la différence à pleine charge soit faible, 0,94 au lieu de 0,86. Ainsi, la différence, avec une perte de 5 p. 100 dans la ligne, déterminerait à peine 1/2 p. 100 de

chute de potentiel supplémentaire dans le conducteur. D'autre part le rendement du moteur asynchrone est plus élevé à toutes les charges; sa courbe est semblable à celle d'un bon transformateur; ce rendement atteint, à pleine charge, 0,91 comparativement à 0,86 fourni par le moteur synchrone. La puissance totale d'excitation, y compris les pertes dans l'excitatrice, est

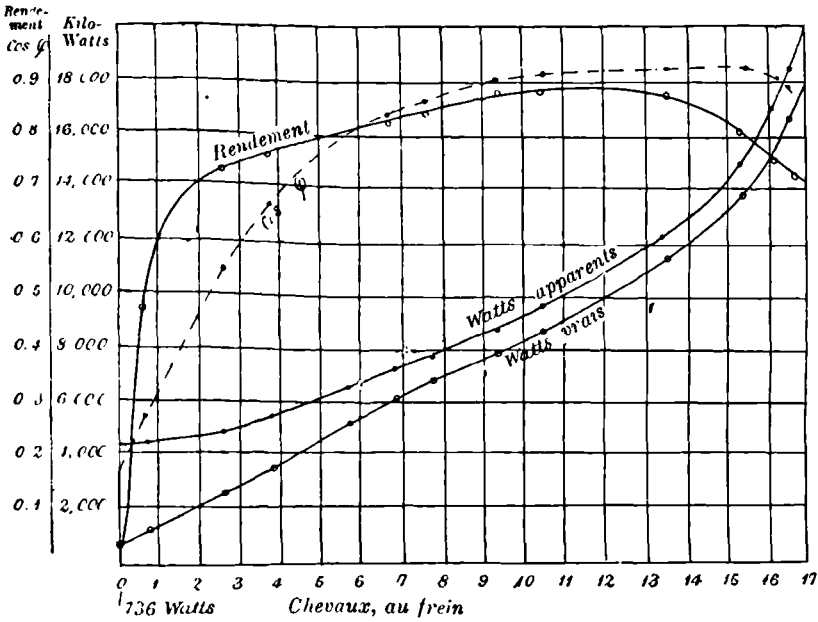


Fig. 170. — Courbes d'Arno.

comptée dans ce rendement, et, notamment à faibles charges, elle le réduit,

M. Ricardo Arno¹ a fait des études de rendement d'un alternomoteur Brown asynchrone, à 6 pôles, de 15 chevaux. Ce moteur était construit pour une fréquence de 40 périodes par seconde, mais pendant les essais elle a été un peu plus élevée, sa vitesse angulaire variant de 876 tours par minute à vide à 850 tours par minute à pleine charge. La figure 170 donne également le

¹ *L'Electricista*, III, n° 7, p. 149.

facteur de puissance ($\cos \varphi$) et la puissance, réelle et apparente, fournie au moteur.

M. Boucherot ¹ a donné aussi des résultats d'essais faits sur deux moteurs Brown diphasés construits par les ateliers Weyher et Richemond, de Pantin. L'un de ces moteurs, de 2-3 chevaux, pesant 120 kilogrammes, a fourni un rendement de 0,76 à la vitesse angulaire de 1 125 tours par minute. Pour un moteur plus puissant, de 17-20 chevaux, pesant 520 kilogrammes, il a atteint 0,90 à 770 tours par minute.

Un moteur diphasé Tesla, de 50 chevaux, construit ² et essayé aux ateliers de la Compagnie Westinghouse, fonctionnait à la vitesse angulaire de 750 tours par minute sur un circuit d'alimentation sous 120 volts avec une fréquence de 25 périodes par seconde. Sa vitesse ne baissa que de 2 p. 100 de la charge nulle à la pleine charge. Il avait un rendement de 0,84 à quart de charge, et de 0,895 à pleine charge. Le couple maximum au démarrage était égal à 2,5 fois le couple développé à pleine charge, ou à 1,5 fois ce dernier avec une résistance dans le secondaire. Avec un rendement aussi élevé à faible charge, on a là un moteur des plus économiques pour un fonctionnement de toute la journée dans lequel la demande de puissance est essentiellement variable. En marche à vide, il prend un courant de 62 ampères, de puissance presque nulle.

Dans le mémoire précédemment cité, le docteur Louis Bell donne les renseignements suivants sur les poids spécifiques, en kg par cheval, de moteurs à champ tournant :

Puissance en chevaux.	Poids spécifique en kilogrammes par cheval.
5	46,720
10	29,935
15	30,845
20	33,110
100	29,935

6 pôles
8 pôles

¹ *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*, XI, p. 481, décembre 1894.

² *Electricity* (E. U.), 15 mai 1895.

QUALITÉS MÉCANIQUES DES MOTEURS POLYPHASÉS 237

Nous donnons encore ci-dessous quelques valeurs relatives de poids et de puissance pour des moteurs-types de construction européenne :

Puissance en chevaux	Poids en kilogrammes par cheval.
2	54,430
6	45,360
13	39,915
50	34,750
70	29,935
100	26,300

Ces poids rivalisent très favorablement avec ceux des moteurs à courant continu. Un moteur ordinaire de 100 chevaux à courant continu pèse rarement moins de 36 kilogrammes par cheval.

Enfin M. Kapp a fait observer que, de deux installations, l'une à moteur diphasé et l'autre à moteur triphasé, celle qui comporte le dernier a le meilleur rendement ; le rapport est de 111 à 100 pour deux moteurs de même poids.

CHAPITRE XIV

TYPES MODERNES DE MOTEURS POLYPHASÉS

Grâce à l'obligeance de deux des maisons qui se sont mises à la tête des applications des moteurs polyphasés, l'Auteur est à même de donner ici la description de plusieurs types récents de ce genre de machines.

Moteurs des Ateliers d'Oerlikon (Zurich). — Depuis l'automne de 1891, les ateliers d'Oerlikon ont poursuivi le développement des moteurs à champ tournant et en ont construit des centaines de différentes dimensions. Dans tous les petits types, triphasés, diphasés ou ordinaires, l'organe mobile est construit simplement en cage d'écureuil, tandis que dans les grands il comporte de véritables enroulements qui permettent, au démarrage, l'insertion de résistances. Dès le mois de juillet 1892, les ingénieurs de cette maison avaient réussi, par des améliorations de détail dans la construction, à réaliser un moteur triphasé de 3 chevaux, à quatre pôles, dont le rendement était de 0,71. Ces ateliers ont adopté comme type une fréquence de 50 périodes par seconde pour la construction de leurs machines. Les moteurs puissants sont généralement montés pour démarrer à vide sur une poulie folle, de manière à éviter une trop brusque irruption de courant, un rendement élevé à pleine charge, avec faible glissement relatif, impliquant un faible couple au démarrage. Mais, pour les grues, les monte-charges, et autres appareils analogues, on construit des moteurs spéciaux (également sans bagues collectrices ni balais), dont le glissement (à pleine charge) atteint

jusqu'à 12 p. 100. Leur facteur de puissance est, en conséquence, peu élevé; mais ils démarrent avec un couple initial égal à deux ou trois fois leur couple sous charge normale. Nous avons reproduit page 224 quelques données relatives à un moteur de grue.

Nous avons également parlé des alterno-moteurs de cette maison et du dispositif de démarrage employé par elle.

Les ateliers de cette Compagnie sont eux-mêmes actionnés par une transmission électrique d'énergie empruntée à une chute d'eau située à Hochfelden, près Bulach, à 23,5 km de distance. Les machines triphasées qui réalisent ce transport sont les premières de ce genre qui aient été construites. Ce sont trois générateurs triphasés, de 200 chevaux chacun. Représentés par la figure 44, page 43, ils ont été étudiés par M. C. E. L. Brown dans l'automne de 1890, en même temps que la machine utilisée lors de la fameuse expérience de Francfort en 1891. — Zurich est alimenté de même par un transport semblable de 300 chevaux pris à une chute d'eau à Killwangen, située à 20 kilomètres de la ville; la puissance est distribuée par lignes aériennes à de nombreux petits moteurs. — On voit également à Saint-Etienne une transmission semblable de 1 000 chevaux, et une autre, d'environ 350 chevaux, à Wangen dans le Wurtemberg.

Moteurs de MM. Brown, Boveri et C^m. — Il a déjà été question page 134 des premiers travaux de M. C. E. L. Brown. Sa maison a, depuis 1892, fait un grand nombre d'installations polyphasées, comprenant générateurs et moteurs. Son obligeance nous permet, ainsi que nous l'avons dit, de donner ici, avec de nombreux détails, la description de plusieurs moteurs de construction récente.

La figure 107 représente, au sixième d'exécution, l'élévation d'un moteur diphasé susceptible de fournir une puissance de six chevaux. On en voit également une coupe verticale sur la même figure, tandis que les tôles estampées des organes mobile et fixe sont reproduites dans la figure 105. L'enroulement de l'organe fixe est effectué suivant le mode indiqué page 40, avec les

extrémités des bobines alternativement recourbées latéralement et arquées en dessus. Ce moteur particulier, étudié en vue d'une tension de 100 volts et d'une fréquence de 40 périodes par seconde, comporte 9 fils de 3,8 mm de diamètre passant dans chacune des 40 rainures de l'organe fixe. L'organe mobile comprend 37 tiges rondes en cuivre, de 9 millimètres de diamètre, toutes mises en court-circuit à chaque extrémité par un large cercle de cuivre qui, indépendamment de ce qu'il sert comme bon conducteur, offre à l'air une grande surface de refroidissement. L'entrefer qui sépare les deux organes mobile et fixe n'a que 0,5 mm d'épaisseur. La valeur maxima de \mathfrak{B} dans le fer entre les rainures est de 11 500 gauss, et dans le fer, en arrière des rainures, de 7 500. On peut enrouler la même carcasse en alterno-moteur ordinaire; elle fournira alors 4 chevaux. Le dessin montre que les paliers sont à graissage automatique. Voici quelques-unes de ses dimensions principales :

Diamètre de l'organe mobile	24,9	cm
Diamètre intérieur de l'organe fixe	25	—
Profondeur radiale —	7	—
Largeur de face —	11,5	—
Profondeur radiale des rainures	2,5	—
Largeur —	1	—
Largeur moyenne du fer entre les rainures.	1	—
Diamètre des trous de l'organe mobile.	1	—
Diamètre des tiges —	0,9	—
Section droite des tiges —	0,64	cm ²
Section droite du conducteur de l'organe		
fixe	0,13	—
Nombre de conducteurs par trou	9	

Les figures 108 et 171 se rapportent à un type de moteur qui a été établi avec divers enroulements pour différentes applications. Sur la figure 108, on voit les enroulements d'un moteur triphasé recevant le courant directement de conducteurs principaux à haute tension, 5 000 volts, avec une fréquence de 40 périodes par seconde et une vitesse angulaire de 600 tours par minute. Dans ces conditions sa puissance est de 100 chevaux; sa hauteur, de 120 centimètres; sa longueur extérieurement

aux paliers, un peu moindre. Le diamètre de l'organe mobile est de 75 centimètres, et sa longueur parallèlement à l'arbre, de moins de 45 centimètres. Dans cet organe mobile sont percés 96 trous qui reçoivent des conducteurs de cuivre isolés, destinés à être connectés en bobinage ondulé en étoile à trois bras ; les trois bouts extérieurs de cet enroulement sont

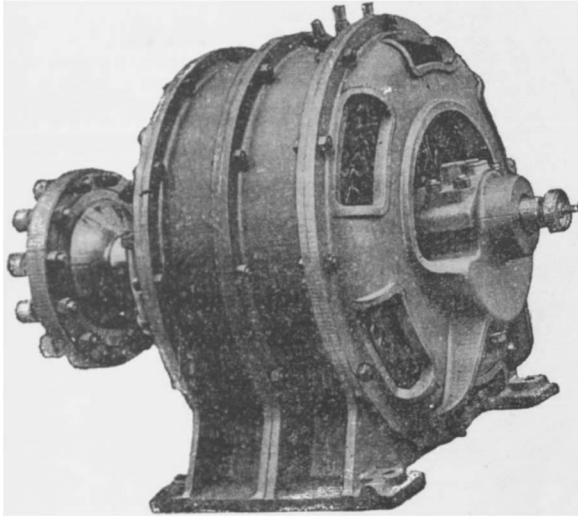


Fig. 171 — Moteur diphasé Brown) de 120 chevaux.

ramenés, par un trou central foré dans l'arbre, à trois bagues collectrices, de manière à permettre, au démarrage, l'insertion d'une résistance extérieure. Les disques de noyau de l'organe fixe sont percés de 48 trous dans lesquels sont enroulées les bobines protégées par de forts tubes en papier spécialement préparé. La disposition de ces bobines pour la production d'un champ à 4 pôles est représentée sur la figure 40. Ce moteur démarre à pleine charge en prenant un courant inférieur à celui de sa marche dans ces conditions.

La même carcasse, enroulée en machine diphasée à 2 000 volts, est représentée par la figure 171 ; sa puissance est de 120 chevaux. La résistance de démarrage est ici placée à l'intérieur de l'organe mobile. Un mécanisme simple dont la commande vient

aboutir à l'extrémité de l'arbre permet de la mettre en court-circuit quand le moteur a démarré. On aperçoit cette commande au bout de droite de l'arbre sur la figure 171.

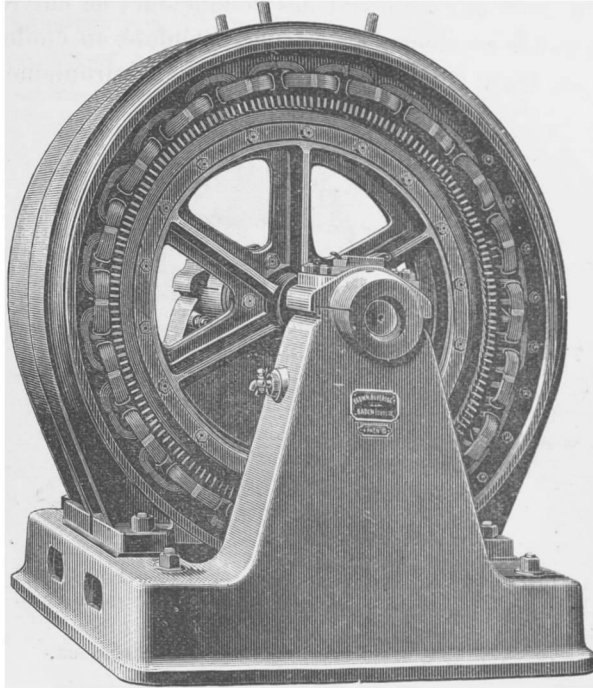


Fig. 172. — Moteur diphasé (Brown) de 100 chevaux, à faible vitesse angulaire.

Les figures 172 et 173 représentent un autre moteur diphasé de 100 chevaux d'un type différent, construit par la même maison et destiné à marcher à faible vitesse angulaire. Ce moteur, alimenté sous une tension de 2 000 volts et une fréquence de 38 périodes par seconde, fonctionne à la vitesse angulaire de 200 tours par minute. Essayé au frein, il a donné jusqu'à 200 chevaux sans se caler. On en voit sur la figure 173 les bobines fixes et le mode de disposition des connexions terminales. Le plan d'enroulement est identique à celui donné par la figure 126 ; chaque bobine est formée de 28 spires. Il comporte 40 bobines (20 pour chacun des deux circuits diphasés) enroulées dans

trous. L'organe mobile comprend 180 conducteurs reliés en trois circuits, dont les extrémités aboutissent à des bagues collectrices permettant d'introduire au démarrage des résistances.

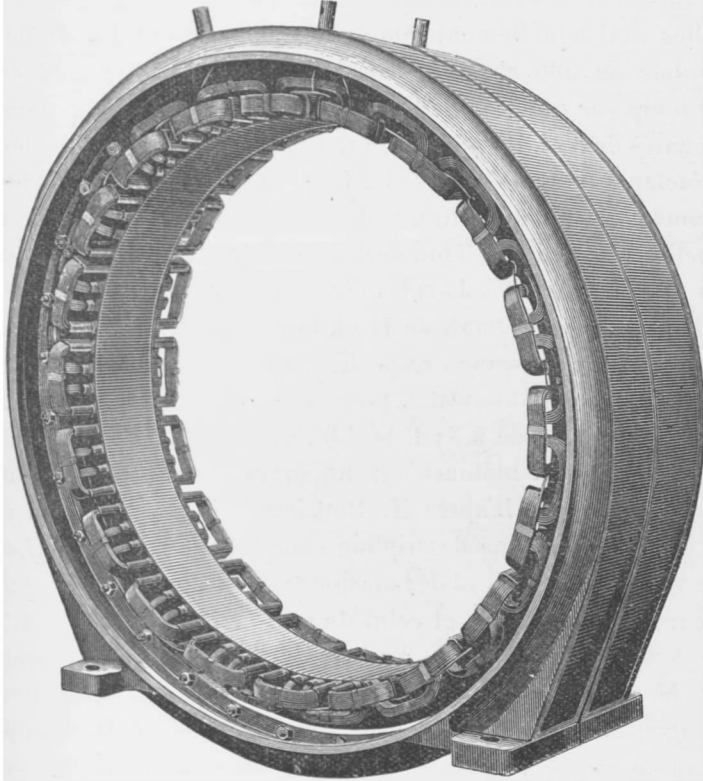


Fig. 173. — Organe fixe du moteur diphasé Brown à faible vitesse angulaire.

Des moteurs du même type établis en vue d'une alimentation par courants alternatifs ordinaires sous une tension de 2 700 volts fourniront 120 chevaux à la vitesse angulaire de 300 tours par minute.

Les moteurs Brown sont aujourd'hui extrêmement employés pour la distribution de l'énergie dans les usines ; le courant triphasé est spécialement applicable à ces installations privées. Nous avons déjà mentionné, page 41, la grande installation de Schönenwerd, près d'Aarau.

On en trouve un autre exemple dans la distribution diphasée appliquée aux ateliers de construction Weyher et Richemond de Pantin, près Paris. Cette usine comportait autrefois trois machines à vapeur distinctes, de 120, 80 et 50 chevaux respectivement. Elles sont actuellement remplacées par une seule machine horizontale de 200 chevaux (capable d'en fournir jusqu'à 400) à 60 tours par minute. Cette machine actionne trois générateurs diphasés de 88 kilowatts chacun, à induits mobiles en tambour et inducteurs fixes à 8 pôles. La fréquence est de 40 périodes par seconde. En travail courant, deux seulement de ces générateurs fonctionnent; le troisième sert de réserve. Jusqu'ici le nombre des moteurs installés dans les divers ateliers est de 17, représentant une puissance totale de 119 kilowatts, soit environ 150 chevaux. Comme puissance respective, ces moteurs se répartissent ainsi : — 1 de 33 kilowatts, pour le montage du charbon ; 2 de 22 ; 1 de 14,5 ; 1 de 9,5 ; 1 de 5,8 ; et le reste de 2 kilowatts et au-dessous. Deux moteurs plus importants sont actuellement en cours d'exécution. D'après M. Boucherot, ingénieur de la maison, qui a donné¹ une description complète de cette installation avec vues des ateliers et des machines, le rendement des grands moteurs serait de 0,94, et celui du plus petit (1,1 kw), de 0,74 ; et le rendement moyen de l'ensemble des moteurs dépasserait 0,89. M. Boucherot estime que ces machines supportent très avantageusement la comparaison avec les machines à courant continu de même puissance. A égalité de rendement, les moteurs diphasés ne seraient pas plus coûteux (y compris l'appareil de démarrage) que les moteurs à courant continu, et tournent à moindre vitesse angulaire. A rendement égal, les générateurs coûtent environ 15 p. 100 de moins que les dynamos à courant continu de puissance équivalente.

Moteurs de l'Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft. — A Berlin, l'Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft a étendu l'application du moteur triphasé à un grand nombre d'objets, notamment

¹ *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*, XI, p. 82, décembre 1894.

à l'entraînement des machines-outils, des appareils à force centrifuge et des monte-charges. Elle s'est fait une spécialité des turbines essoreuses absorbant des puissances diverses de 1 à 7 chevaux, dont les plus grandes sont utilisées dans la boulangerie, et les plus petites dans les raffineries de sucre. — Une raffinerie de sucre d'Uerdingen sur le Rhin, par exemple, est exclusivement desservie par des moteurs électriques au nombre de 91, absorbant environ un total de 490 chevaux. — Dans une fabrique de ciment, à Lägerdorf, sont montés deux générateurs triphasés de 110 chevaux chacun pour la transmission de l'énergie à des monte-charges, des pompes, des broyeurs, et autres outils analogues. — Les ateliers de construction de machines de Colonna, en Russie, possèdent une installation triphasée de 600 chevaux pour l'entraînement de leurs machines-outils et de leurs grues. — Il sera question dans le chapitre suivant des machines triphasées construites par l'Allgemeine Gesellschaft pour la nouvelle station centrale de Strasbourg.

Moteurs de la Compagnie Westinghouse. — Toute la machinerie des ateliers de la Westinghouse C^r à Pittsburg, Etats-Unis ¹, est commandée par des moteurs Tesla diphasés ; l'installation en comprend 39 dont la puissance varie entre 10 et 80 chevaux et qui représentent dans leur ensemble 800 chevaux environ. D'ici à peu de temps on doit en ajouter 16 autres qui doubleront cette puissance totale. Les générateurs sont d'un nouveau type, supérieur à celui de la figure 39 ; les deux circuits y sont connectés en un seul enroulement de la manière représentée par la figure 96. L'éclairage des ateliers est également pris sur les circuits diphasés.

¹ *Electricity* (E. U.), VIII, p. 169, 185 (1895). Voir également le même journal du 15 mai 1895 pour une épreuve de rendement faite sur un des moteurs Tesla.

CHAPITRE XV

DISTRIBUTION DES COURANTS POLYPHASÉS PAR STATIONS CENTRALES

En ce qui concerne uniquement l'éclairage électrique il n'y a pas grand avantage à employer des courants polyphasés de préférence aux courants alternatifs ordinaires; mais quand on a en vue d'autres utilisations d'une alimentation en énergie électrique, et notamment la distribution de la puissance mécanique, on commence à apercevoir les avantages des courants polyphasés.

Heilbronn. — Pendant de longs mois le seul exemple d'une distribution générale par courants polyphasés issus d'une station centrale a été celle de la ville d'Heilbronn qui, ainsi qu'on l'a vu, emprunte son alimentation triphasée à la station génératrice de Lauffen, sur la Neckar, à 14,5 km environ de distance. Le système en a été mis en œuvre par M. Oskar von Miller, de Munich, à l'amabilité duquel nous devons les renseignements suivants.

Les générateurs de Lauffen, qui servent au mémorable transport d'énergie à Francfort (Fig. 30), fournissent chacun environ 4 000 ampères sous 50 volts. Un transformateur élévateur de potentiel modifie les éléments de cette puissance en un courant de 40 ampères sous 5 000 volts, tension sous laquelle les courants sont transmis par trois fils de cuivre aériens de 6 millimètres de diamètre portés par des isolateurs à garde d'huile fixés à des poteaux en charpente. A Heilbronn, ces trois courants arrivent à un transformateur réducteur de potentiel qui les restitue par 133 ampères environ sous la tension intermédiaire de 1 500 volts

à laquelle les courants sont distribués dans les différents quartiers de la ville. L'installation primaire comprend en réalité trois turbines (dont une de réserve), deux générateurs, deux transformateurs élévateurs de potentiel et deux transformateurs réducteurs de potentiel. La transformation finale de 1500 à 100 volts est effectuée à Heilbronn par de petits transformateurs de 5 et 10 kilowatts de puissance, logés dans des colonnes spéciales érigées en 25 points à peu près, convenablement choisis et qui alimentent le réseau à basse tension distribuant le courant aux lampes et aux moteurs des abonnés. Des câbles armés, à trois conducteurs concentriques, répartissent le courant dans 8 kilomètres de voies environ. Les trois circuits comportent des foyers à arc et des lampes à incandescence aussi bien que des moteurs. A la fin de 1894, ils étaient chargés d'un éclairage équivalant à 41 000 lampes de 8 bougies et de 25 moteurs représentant ensemble une puissance totale de 53 chevaux environ. Les petits moteurs jusqu'à 3 chevaux à peu près sont montés de manière à être mis directement sur les circuits sans aucun dispositif spécial de démarrage. Ils sont du type courant triphasé avec organes mobiles en cage d'écureuil. Les plus grands jusqu'à 8 chevaux sont munis de dispositifs de démarrage, comprenant des résistances liquides, de telle sorte qu'ils ne reçoivent la pleine intensité qu'au bout de 15 ou 20 secondes, après lesquelles ils ont pris leur vitesse normale et sont alors directement branchés sur les conducteurs principaux. A mi-route à peu près entre Lauffen et Heilbronn, au hameau de Sontheim, quelques lampes à incandescence municipales sont alimentées par un transformateur réduisant directement les 5 000 volts à 100. Le maintien d'une régulation convenable de la tension dans les trois circuits ne présente aucune difficulté. Les moteurs tendent à équilibrer les tensions et les intensités entre les trois circuits, malgré l'inégale répartition des lampes entre eux.

Entre autres stations polyphasées en fonctionnement nous citerons celle de la gare du chemin de fer de Dresde, celles de Chemnitz, de Buda-Pesth, de Strasbourg et de Bockenheim.

Chemnitz. — A Chemnitz, la maison Siemens et Halske, de Berlin, a monté, en 1894, une station municipale dans le système triphasé. Les générateurs, du type « R », ont une puissance de 104 kilowatts par 52 ampères sous 2000 volts. Leur induit extérieur fixe est formé de disques annulaires, et l'inducteur intérieur mobile, en forme d'étoile, porte 40 pôles alternés. A 150 tours par minute leur fréquence est de 50 périodes par seconde. A la périphérie interne de l'induit sont pratiquées 120 rainures, soit 3 par pôle, destinées à recevoir l'enroulement. Ces rainures sont rétrécies à leur ouverture externe dans laquelle sont logées des cales en bois pour retenir les enroulements. Ces derniers sont disposés comme dans la figure 41 : leurs parties externes sont recourbées suivant deux plans différents et toutes les bobines correspondant à une même phase sont connectées en série. Une des extrémités de chacune des trois séries aboutit à une jonction commune, et les trois autres bouts arrivent extérieurement à trois bornes distinctes fixées sur la machine. Cet enroulement est en conséquence étoilé (Fig. 58). Une bobine auxiliaire sur chaque générateur fournit un courant de synchronisation à 25 volts. Ces générateurs sont au nombre de trois, attelés chacun directement sur une machine à triple expansion et à condensation. L'excitation des inducteurs étant maintenue constante, la chute de potentiel, à pleine charge, sur une résistance non inductive est d'environ 7 p. 100 ; mais, quand les moteurs sont en marche sur le circuit, cette chute de potentiel est susceptible de prendre beaucoup plus d'importance, et sa compensation exige une augmentation de 20 à 30 p. 100 dans le courant d'excitation. Des générateurs les courants se rendent à travers des fusibles, des interrupteurs et des appareils de mesures, à trois barres omnibus sur le tableau, d'où partent les feeders à haute tension des conducteurs de distribution. Des câbles à trois conducteurs concentriques, revêtus de plomb et recouverts d'une armure en acier, portent les courants sous 2000 volts à des transformateurs répartis en vingt-quatre points de la ville et qui les transforment sous 120 volts pour les réseaux à basse tension. La canalisation totale comporte 10 kilomètres environ de câble à

haute tension, 19 kilomètres de câble à trois conducteurs concentriques à basse tension, et 6,5 km de conducteurs nus. Le point d'alimentation le plus éloigné est à 3 kilomètres environ de la station génératrice située elle-même à 1,5 km à peu près du centre de la ville. A la fin de 1894 cette installation desservait l'équivalent d'environ 11 000 lampes de 8 bougies, 160 foyers à arc et 30 moteurs d'une puissance moyenne de 2 chevaux. Ces moteurs comportent, comme les générateurs, un organe fixe dont les bobines sont logées dans des rainures. L'organe mobile est formé de disques de tôle rainés à leur périphérie extérieure et enroulés de bobines reliées également en étoile et aboutissant à trois bagues de contact. Cette disposition permet, comme on l'a vu, pour le démarrage, l'insertion de résistances que l'on retire ensuite progressivement au fur et à mesure que le moteur prend de la vitesse. Lorsqu'il a atteint sa vitesse de régime, l'organe mobile est mis en court-circuit. On trouvera dans l'*Elektrotechnische Zeitschrift* de février 1893 une description complète de cette installation avec dessins à l'appui.

Strasbourg. — Pour l'alimentation de la ville de Strasbourg, dont M. Oskar von Miller est l'ingénieur, on a adopté le système triphasé. Les générateurs, du type à réluctance variable, ont été construits par l'*Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft* et ont une puissance de 400 chevaux chacun. Ces machines sont décrites dans l'*Elektrotechnische Zeitschrift* du 7 février 1895 par M. von Dolivo Dobrowolski.

Bockenheim. — A Bockenheim, important faubourg de Francfort, se trouve une station montée par MM. W. Lahmeyer et C^{ie}. Elle comporte deux alternateurs triphasés, à attelage direct, de 150 kilowatts environ chacun, du même type que ceux employés à Lauffen (p. 31), à induits fixes et inducteurs mobiles, mais avec huit pôles seulement. Ils fonctionnent à 80 volts et les courants ainsi produits sont immédiatement amenés à des transformateurs triphasés ressemblant à ceux de la figure 133, où ils sont transformés sous 660 volts, haute tension sous laquelle ils vont par câbles aux différents points de distribution. Pour

le transport de l'énergie mécanique les moteurs triphasés sont directement reliés aux conducteurs principaux à haute tension. Pour l'éclairage, des transformateurs interposés réduisent la tension et alimentent un réseau spécial de distribution. Des câbles à trois conducteurs concentriques répartissent les courants dans les habitations. Les moteurs asynchrones employés ont des puissances variables allant jusqu'à 20 chevaux ; ils démarrent sous charge et même surchargés. Ceux dont la puissance dépasse 8 chevaux sont cependant munis de poulies folles de manière à démarrer sous faible charge. Le dispositif de démarrage comporte des résistances liquides. L'énergie consommée est enregistrée par des compteurs polyphases d'Aron. L'alimentation de l'éclairage se fait seule par courant continu indépendant. L'ensemble de la puissance consommée par les moteurs dépasse 200 chevaux.

Le réglage de la tension dans les trois circuits ne paraît présenter aucune difficulté. Si l'on adopte dans une distribution triphasée un montage en étoile (tel que celui de la figure 67), le quatrième fil, qui revient à la jonction commune des trois circuits du générateur, sert à égaliser les tensions dans le cas où les nombres de lampes ne sont pas les mêmes dans les trois branches. Mais, à propos de la distribution de Chemnitz, M. Gørges a démontré que ce n'est pas nécessaire. On peut ajouter en un point convenable quelconque du réseau un égalisateur de phases, analogue à un transformateur triphasé, mais dont chaque branche n'est enroulée que d'une seule bobine. C'est en réalité un auto-transformateur ou bobine de réaction triphasée. Ces trois bobines sont reliées en étoile et le quatrième fil des circuits aboutit à leur jonction commune. M. Gørges relate une expérience dans laquelle 100 lampes ont été mises dans l'un des circuits, 20 dans le second et 1 dans le troisième ; il en résultait naturellement une très grande inégalité des trois tensions jusqu'à ce que le quatrième fil fût relié au milieu de l'égalisateur, mais à ce moment elles s'identifièrent toutes immédiatement. L'insertion de moteurs triphasés dans le circuit produit une égalisation semblable des trois tensions. Il y

a quelques années, M. von Dolivo Dobrowolski avait également enregistré ce fait que des transformateurs triphasés ont aussi la même action égalisatrice.

Buda-Pesth. — A Buda-Pesth, MM. Schuckert et C^{ie} ont une station diphasée extérieure à la ville, dont il est fait mention page 210.

Pittsfield. — Une station diphasée fonctionne actuellement, depuis deux ans environ, à Pittsfield (Massachusetts) d'après le système de MM. Stanley, Kelly et Chesney. — Une autre est en voie d'établissement à Montréal.

Installations d'Oerlikon. — Nous donnons dans le tableau de la page 232 une liste des stations triphasées montées par la Compagnie des ateliers d'Oerlikon.

Installations privées. — Dans l'énumération qui précède, il n'a pas été fait mention d'un très grand nombre d'installations privées, dans des usines et ailleurs, où les systèmes polyphasés semblent devoir se substituer à tous les autres modes de transmission et de distribution de l'énergie. En plus de celles mentionnées page 239, comme faites par les ateliers d'Oerlikon, et de celles de la maison Brown, Boveri et C^{ie} (p. 243), on peut en citer une à Hellsjön, en Suède; c'est une transmission triphasée¹ de 400 chevaux à une distance de plus de 13 kilomètres, établie sur les études de feu M. Wenström.

Système « monocyclique ». — M. C. P. Steinmetz a proposé² pour éclairage et puissance mécanique un système de distribution de l'énergie électrique qui, tout en comportant plus d'un cycle, a reçu le nom de « système monocyclique ». L'objectif de ce système est de réaliser les avantages d'un système polyphasé pour moteurs électriques, en les combinant avec

¹ Voir la « Transmission électrique de l'énergie » de G. Kapp, p. 418, 4^e édition, 1894.

² Voir *Electrical World*, XXV, p. 182, février 1895, et *L'Eclairage électrique*, III, p. 152, avril 1895.

LOCALITÉS	PUISSANCE des unités, en chevaux.	PUISSANCE totale actuelle de la station, en chevaux.	DISTANCE du transport, en kilomètres.	TENSION sur la ligne, en volts.	APPLICATION
Lauffen-Heilbronn	300	600	10	5 000	Distribution d'éclairage et de puissance mécanique
Dietikon-Zurich	300	300	15	5 000	de puissance mécanique
Hochfelden-Oerlikon	300	900	25	13 000	—
Pergine, Tyrol	100 200	300	2	1 800	d'éclairage et de puissance mécanique
Wangen, Wurtemberg	100	200	11	5 000	—
Saint-Étienne, France	300	600	6-15	5 000	—
Florensac, France	100	200	"	5 000	—
Triberg, Allemagne	150	300	15	5 000	—
Bellegarde, France	600	600	0,8	1 000	de puissance mécanique
Bremgarten-Zürich	325	1 300	18	5 000	—
Innsbruck, Tyrol	100	200	2	1 800	d'éclairage et de puissance mécanique
Tolède, Espagne	200	200	"	3 500	—
Blies-Schweigen, Allemagne	175	350	4	5 000	—
Riva, Tyrol	150	450	"	3 500	d'éclairage

la facilité de régulation d'un système alternatif ordinaire. Dans les conditions normales la puissance totale est fournie par deux conducteurs principaux entre lesquels est maintenue une différence de potentiel alternative constante. Les parties du réseau où l'on a besoin de puissance motrice reçoivent un troisième fil qui permet d'y faire arriver un courant en discordance de phase avec le courant principal pour le démarrage des moteurs. Les enroulements du moteur sont disposés de telle sorte que, une fois la vitesse de régime atteinte, la f. é. m. inverse est égale à la tension fournie par le troisième fil qui, dès lors, ne fournit plus de courant; les conducteurs principaux, à partir de ce moment, suffisent à l'alimentation. Un des moyens de maintenir la discordance de phase dans le troisième fil consiste à monter sur l'alternateur des bobines décalées par rapport aux bobines principales, de manière à développer une f. é. m. décalée elle-même d'un quart de période sur la f. é. m. principale. L'une des bornes de ces bobines décalées est reliée au milieu de l'enroulement principal de l'alternateur, et l'autre au troisième fil en question. Le nombre des spires de ces bobines décalées est calculé de telle sorte que la f. é. m. développée par elles et celle fournie par la moitié des bobines principales en série avec elles présentent la différence de phase voulue. Quand on a affaire à une installation comprenant un certain nombre de moteurs, la force contre-électromotrice de l'un quelconque des moteurs en marche suffit à en faire démarrer un autre, de sorte que, dans les cas où quelques-uns des moteurs fonctionnent constamment, il n'est pas nécessaire de relier le troisième fil à l'alternateur.

Le système monocyclique est par suite réellement une distribution triphasée dans laquelle deux des phases sont presque en opposition, tandis que la troisième, sensiblement décalée d'un quart de période sur les deux autres, sert auxiliairement au démarrage des moteurs. Prétendre que ce système, parce qu'il n'est pas symétrique, n'est pas un système polyphasé est un simple non-sens.

[Comme l'a dit spirituellement M. Blondel, c'est comme si

l'on soutenait qu'un chien, parce qu'il se tient sur les deux pattes de derrière, n'est pas un quadrupède. — Quel que soit cependant le nom dont on l'affuble, ce système permet de faire bénéficier les anciennes installations à courants alternatifs ordinaires, si fréquentes en Amérique et ailleurs, des avantages des courants polyphasés. Tel a été l'objet de sa conception première, et, si des considérations diverses ont tendu à lui donner, depuis, une ampleur un peu forcée, elle n'en est pas moins intéressante à cet égard, et l'Auteur n'insiste peut-être pas suffisamment sur ce point. (N. du T.)]

L'Auteur a imaginé plusieurs autres manières d'arriver au même résultat. L'une d'elles consiste à utiliser deux courants alternatifs décalés d'une façon quelconque entre un quart et un tiers de période, sur un système de distribution ordinaire à trois fils maintenant constante la différence de potentiel entre chacun des deux fils extrêmes et celui du milieu. Pour le démarrage des moteurs, on réalise avec les deux fils extérieurs un troisième circuit qui fournit un courant décalé par rapport aux deux autres. La phase exacte et le potentiel exact de ce troisième courant sont indifférents ; les moteurs employés peuvent être soit triphasés, soit diphasés avec retour commun.

M. Imhoff a proposé un autre système dissymétrique.

Quand on a affaire à un système à trois fils alimenté par des courants alternatifs ordinaires, comme dans la Cité à Londres, rien n'est plus facile que d'introduire une différence de phase dans le fil médian, de manière à permettre le démarrage et le fonctionnement de moteurs. Il suffit, en réalité, de faire démarrer un seul moteur triphasé sur l'un quelconque de ces circuits ; il contribue au démarrage des autres dans le même circuit, par sa propre tendance à maintenir les différences de phase voulues.

On trouvera dans le *Western Electrician* du 16 février 1893 la description d'un exemple d'éclairage triphasé à Concord (N. H.), en Amérique, et dans l'*Electrical Engineer* de juin 1893, une autre application faite à Winooski (Vt).

Il existe actuellement à Baltimore une station à courants

diphasés alimentée par quatre alternateurs Westinghouse de 1000 kilowatts environ chacun. Ils sont actionnés directement et serviront en grande partie à l'éclairage par arcs aussi bien que par incandescence. Ils alimenteront également des moteurs Tesla diphasés.

L'installation d'énergie électrique la plus importante du monde entier est une installation polyphasée ; c'est celle du Niagara (voir p. 44), établie suivant le système diphasé. Elle est entrée, il y a quelques mois, dans la période d'exploitation.

Si récentes que soient ces innovations et si rapidement qu'elles se développent, on voit déjà leurs applications industrielles s'asseoir sur des bases bien définies. Le résultat final est cependant encore loin d'être atteint. Le problème relatif à la transformation des courants alternatifs en courants continus est en voie de solution, et nul ne peut prévoir les résultats que donneront les méthodes de conversion les plus nouvelles. D'ici à quelques années nous assisterons certainement à des développements qui, actuellement, dépassent encore les horizons ouverts aux électriciens.

FIN

APPENDICE

BIBLIOGRAPHIE RELATIVE AUX COURANTS POLYPHASÉS ET AUX MOTEURS A CHAMP TOURNANT

a. — Livres et Extraits.

- ARNOLD (E.). — Die Theorie und Berechnung der asynchronen Wechselstrom-Motoren [Théorie et calcul des alterno-moteurs asynchrones]. Seydel, Berlin. (Réimprimé d'après le *Zeitschrift für Elektrotechnik*, 1894, fasc. I à VII.)
- The Calculation of Alternating Current Motors [Calcul des alterno-moteurs]. *Elec. World* (N.-Y.), XI à XXIV.
- BANTI (Angelo). — I motori elettrici a campo magnetico rotatorio [Les moteurs électriques à champ tournant]. *Tipografia Elzeviriana*, Rome, 1894.
- HOSPITALIER (E.). — Polyphased Alternate Currents [Courants alternatifs polyphasés]. Alabaster, Gatehouse and Co, Londres, 1892. (Réimprimé d'après l'*Elec. Review*, 1891, p. 418, 474, 501, 534, 554, 590, 724.)
- KAPP (G.). — Electric Transmission of Energie [Transmission électrique de l'énergie]. Whittaker, Londres, 1894.
- MARTIN (T.-C.). — Inventions, Researches and Writings of Nikola Tesla, with special reference to his work in Polyphase Currents and High Potential Lighting [Inventions, recherches et écrits de Nikola Tesla, avec référence spéciale à ses travaux sur les courants polyphasés et l'éclairage sous haut potentiel]. *The Electrical Engineer*, New-York, 1894.
- Offizieller Bericht über die Internationale Elektrotechnische Ausstellung THOMPSON. — Courants polyphasés. 17

- stellung in Frankfurt am Main [Rapport officiel sur l'Exposition d'électricité de Francfort]. J.-D. Sauerlander, Francfort, 1893-94.
- PICOU (R.-V.). — Moteurs électriques à champ magnétique tournant. Baudry et C^{ie}, Paris, 1892.
- RODET ET BUSQUET. — Les courants polyphasés. Gauthier-Villars et fils, Paris, 1893.
- SAHULKA (J.). — Ueber Wechselstrom-Motoren mit magnetischem Drehfelde [Sur les alterno-moteurs à champ tournant]. Deuticke, Vienne, 1892.
- SNELL (A.-T.). — Electric Motive Power [Puissance motrice électrique]. *Electrician Series*, Londres, 1894.

b. — *Mémoires, Articles, etc.*

- 1824-26. ARAGO. — *Ann. Chim. Phys.*, xxvii, 363, 1824; *Ann. Chim. Phys.*, xxviii, 325, 1825; *Pogg. Ann.*, iii, 343, 1825; *Schweigger's Journal*, xlvi, 167, 1826; *Ann. Chim. Phys.*, xxxii, 213; xxxiii, 223; *Œuvres complètes*, iv, 424.
- 1825-32. STURGEON. — Observations on Magnetic Drag on Disks [Observations sur l'effort magnétique exercé sur des disques]. *Edin. Philos. Journal*, juillet 1825 (Article de Barlow sur Sturgeon); *Baumgartner's Zeitschrift*, i, 138, 1826; *Philos. Magazine*; avril et mai 1826; Sturgeon's Scientific Researches [Recherches scientifiques de Sturgeon], 211, Bury, 1850.
1825. BABBAGE et HERSCHEL. — *Phil. Trans. Roy. Soc.*, 1825, 467.
1831. FARADAY. — Explication of Arago's Magnetic Phenomena [Explication des phénomènes magnétiques d'Arago]. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, 1831; et Experimental Researches in Electricity [Recherches expérimentales sur l'électricité], i, 24.
1863. JOCHMANN (Émile). — Ueber die durch Magnetpole in rotirenden körperlichen Leitern inducirten elektrischen Ströme [Sur les courants électriques induits par des pôles magnétiques dans des conducteurs matériels tournants]. *Physik. Gesellschaft*, Berlin, octobre 1863 et janvier 1864.
- 1876-77. BIELMAYR (J.). — Zur Geschichte des Rotations-Magnetismus [Contribution à l'histoire du magnétisme de rotation]. *Program der kgl. bayer. Studien-Anstalt zu Aschaffenburg*.
1879. BAILY (W.-A.) — Mode of producing Arago's Rotations [Mode de production des rotations d'Arago]. *Philosophical Magazine*, octobre 1879.

1880. DEPRez (Marcel). — Synchronisme électrique de deux mouvements quelconques. *Séances de la Soc. française de Physique*, janvier-avril 1880, 48.
- FONVIELLE (DE) et LONTIN. — Nouveau tourniquet électrique. *La Lumière électrique*, II, 158.
- GUTHRIE and BOYS. — On Magneto-Electric Induction [Sur l'induction magnéto-électrique]. *Proc. Physical Soc.*, III, pt. III, 127, et IV, 55.
- HERTZ (Heinrich). — Ueber die Induction in rotirenden Kugeln [De l'induction dans des sphères tournantes]. Discours d'inauguration, Berlin, mars 1880.
1883. DEPRez (Marcel). — Sur le synchronisme électrique de deux mouvements relatifs et son application à la construction d'une nouvelle boussole électrique. *Comptes rendus*, 1883, II, 1193.
1884. SMITH (Willoughby). — Volta- and Magneto-Electric Induction [Induction Volta- et magnéto-électrique]. *Proc. Roy. Institution*, juin 1884.
1887. THOMSON (Elihu). — Novel Phenomena of Alternating Currents [Nouveaux phénomènes dus aux courants alternatifs]. *Amer. Inst. Elec. Engineers*, mai 1887.
1888. [Anon.]. — The New Westinghouse Motor, etc. [Nouveau moteur Westinghouse, etc.]. *Elec. World* (N.-Y.), XII, 222; *Electrician*, XXII, 18.
- DUNCAN (L.). — Alternating Current Electric Motors [Moteurs électriques à courants alternatifs]. *Amer. Inst. Elec. Engineers*, 14 février 1888.
- FERRARIS (G.). — Rotazioni elettrodinamiche prodotte per mezzo di correnti alternate [Rotations électrodynamiques produites au moyen des courants alternatifs]. *Actes de l'Académie royale des Sciences de Turin*, XXII, 360, publiés à Turin par E. Loescher, 1888, et reproduits dans les journaux électriques de l'époque : *La Lumière électrique*, 1888; *Industries*, IV, 505, 1888.
- PATTEN (F.-J.). — Discussion of Duncan's paper [Discussion du mémoire de Duncan]. *Amer. Inst. Elec. Engineers*, 14 février 1888.
- SWINBURNE (J.). — On the Tesla Alternate Current Motor [Sur l'alternateur-moteur de Tesla]. *Electrician*, XXI, 342.
- TESLA (Nikola). — A New System of Alternate Current Motors and Transformers [Nouveau système de moteurs et de transformateurs à courants alternatifs]. *Amer. Inst. Elec. Engineers*, mai 1888; *La*

- Lumière élec.*, xxix, 87; *Elec. Eng.* (N.-Y.), vii, 252; *Industries* iv, 576; *Electrician*, xxi, 173; *Elec. World* (N.-Y.), xi, 281.
1888. THOMSON (E.) and WRIGHTMAN (M.-J.). — Phenomena of Magnetic Propagation [Phénomènes de propagation magnétique]. *Elec. World* (N.-Y.), xxii, 220.
1889. BOIS-REYMOND (DU) (A.). — Arbeitsübertragung durch Wechselstrom [Transport de l'énergie par courants alternatifs]. *Elek. Zeitschrift*, x, 1.
- PATTEN (F.-J.). — The Evolution of a New Type of Alternate Current Motors [Evolution d'un nouveau type de moteurs à courants alternatifs]. *Amer. Inst. Elec. Engineers*, septembre 1891.
1890. DEPOELE (Van), Moteur à courant induit alternatif de, *La Lumière électrique*, xxxv, 40.
- KENNEDY'S Alternating Motor [Alternomoteur de Kennedy]. *Elec. World* (N.-Y.), xv, 335; *Elec. Review*, xxvi, 462.
- PATTEN. — Distribution à courants alternatifs décalés. *La Lumière élec.*, xxxv, 455.
- RICHARD (G.). — Distribution à courants alternatifs décalés de Patten. *La Lum. élec.*, xxxv, 455.
- TESLA (N.). — Moteur à courants alternatifs. *La Lum. élec.*, xxxv, 136.
- Electromoteur à courants alternatifs décalés. *Ibid.*, 462.
- New Alternating Motor [Nouveau moteur alternatif]. *Elec. Review*, xxvii, 207.
- Some New Types of Alternate Current Motors [Quelques nouveaux types de moteurs à courants alternatifs]. *Elec. World* (N.-Y.), xvi, 101.
- THOMSON'S Alternate Current Motor [Moteur à courants alternatifs de Thomson]. *Elec. Review*, xxvii, 77.
- THOMSON (Elihu). — Alternate Current Motor [Moteur à courants alternatifs]. *Western Elec.*, vi, 354, 360.
1891. [Anon.]. — C.-E.-L. Brown's 20 Horse-power Three-Phase Alternate Current Motor [Moteur à courant triphasé de 20 chevaux, de Brown]. *Elec. Review*, xxix, 448.
- [Anon.]. — Frankfort Exhibition [Exposition de Francfort]. *Industries*, 1891.
- [Anon.]. — Haselwander's Motor [Moteur d'Haselwander]. *Elek. Zeitsch.*, 1891, 540; *Elek. Anz.*, 1891, 609; *Western Elec.*, viii, 293.
- [Anon.]. — Multiple Current [Courant multiple]. *Industries*, 1891.

1891. [Anon.]. — Oerlikon Three-Phase Alternator [Alternateur triphasé d'Oerlikon]. *Elec. Review*, xxvii, 381.
- [Anon.]. — Priority in Alternating Current Motors [Priorité relative aux moteurs à courants alternatifs]. *Elec. Eng. (N.-Y.)*, xii, 262.
- [Anon.]. — Transmission d'Heilbronn à Francfort. *L'Electricien*, i, 279.
- [Anon.]. — Vertheilungssystem mittels mehrphasigen Wechselstromes von Haselwander [Système de distribution d'Haselwander par courant alternatif polyphasé]. *Elek. Anz.*, 1891, 609; *Western Elec.*, viii, 293.
- [AYRTON (W. E.)]. — Three articles on Exhibition at Frankfort [Trois articles sur l'Exposition de Francfort]. *Nature*, xliv, 615; xlv, 54, 105.
- Note on Rotatory Currents [Note sur les courants tournants]. *Electrician*, xxviii, 178; *Nature*, xlv, 191.
- BAST (DE). — Electromoteurs à champ magnétique rotatoire. *La Lumière élec.*, xlii, 527; *Bull. Assoc. Ing.-Electriciens*, ii, 359.
- BOIS REYMOND (DU) (A.). — Einige theoretische und experimentelle Untersuchungen über Drehstrom [Quelques recherches théoriques et expérimentales sur le champ tournant]. *Elek. Zeitsch.*, xii, 303, 8 juin 1891.
- Translation of above. Deduction and Experiments on Rotatory Currents [Traduction anglaise de l'étude ci-dessus]. *Elec. Review*, xxviii, 711; *Elec. World (N.-Y.)*, xvii, 478.
- Priority in Rotatory Current Motors [Priorité au point de vue des moteurs à champ tournant]. *Elec. World (N.-Y.)*, xviii, 74.
- BROWN (C.-L.-E.). — Moteurs triphasés d'Oerlikon. *L'Electricien*, ii, 189, 365.
- DOLIVO DOBROWOLSKI (VON) (M.). — Kraftübertragung mittels Wechselströmen von verschiedener Phase (Drehstrom) [Transport de l'énergie par courants alternatifs polyphasés (champ tournant)]. *Elektrotechniker*, 1891, nos 4 et 5; *Elek. Zeitsch.*, xii, 149; *Electrician*, xxvii, 338; *La Lum. élec.*, xli.
- Der Drehstrom und seine Entwicklung [Le champ tournant et son développement]. *Off. Ausstellung-Zeitung Frankfurt am Main*, 1891.
- Die Drehstrommotoren der Allgem. Elek. Ges. [Moteurs électriques de l'Allgemeine Electricitäts-Gesellschaft]. *Elek. Zeitsch.*, 1891, 238; *Electrician*, xxvii, 388.

1891. DOLIVO DOBROWOLSKI (Von) (M.). — Electromoteur. *La Lum. élec.*, xxxix, 212.
- Détails sur la transmission par courants polyphasés. *La Lum. élec.*, xli, 604.
- DUNCAN (L.). — Alternate Current Motors [Moteurs à courants alternatifs]. *Elec. World* (N.-Y.), xvii, 341, 357.
- GERALDY (F.). — Essai d'une théorie simple des machines à champ magnétique tournant. *La Lum. élec.*, xii, 7.
- GOERGES (H.). — Rotatory Currents and the Art of Measuring them [Courants tournants et leur mesure]. *Elec. Review*, xxviii, 506, 517; *La Lum. élec.*, xi, 201; *Elek. Zeitsch.*, xii, 213.
- GUTMANN (L.). — The Inventor of the Rotatory Field System [L'inventeur du système à champ tournant]. *Elec. World* (N.-Y.), xviii, 293.
- Method of Operating Alternate Current Motors [Mode de fonctionnement des moteurs à courants alternatifs]. *Elec. Eng.* (N.-Y.), xii, 230.
- HEINRICH. — The Multiphase Alternating Current on the Frankfort Exhibition [Le courant polyphasé à l'Exposition de Francfort], Machines Schuckert. *Elec. Eng.* (N.-Y.), xi, 273.
- HERING (C.). — Lauffen-Frankfort Power Transmission Plant [Installation du transport d'énergie Lauffen-Francfort]. *Elec. World* (N.-Y.), xviii, 126, 156, 194, 232, 249, 319, 345, 346.
- HOSPITALIER (E.). — Moteurs à courants alternatifs. *Soc. française de Physique*, juillet 1892; *Elec. Review*, xxix, 206; *Elec. World* (N.-Y.), 149; *Electrician*, xxvii, 392.
- HUTIN et LEBLANC. — Etude sur les courants alternatifs, etc. *La Lum. élec.*, xl, n^{os} 18 à 23.
- De l'application des courants alternatifs à la transmission du travail. *Bull. Soc. Internationale des Electriciens*, juillet et août 1891.
- Moteurs à courants alternatifs. *Comptes rendus*, cxii, 935.
- KAPP (G.). — The Electric Transmission of Power [Transmission électrique de l'énergie]. *Electrician*, xxvii, 445, 477; *La Lum. élec.*, xli, 336.
- Lauffen-Frankfort Transmission Plant [Installation du transport Lauffen-Francfort]. *Electrician*, xxvii, 548.
- KENNEDY. — Electromoteur. *La Lum. élec.*, xxxix, 306.

1891. MAY (O.). High-Pressure Transmission of Power : Experiments at Oerlikon [Transmission de l'énergie sous haute tension : expériences d'Oerlikon]. *Elec. World* (N.-Y.), xvii, 291.
- PERRIN. — Transformation des courants alternatifs en continus et inversement. *La Lum. élec.*, xxxix, 109.
- PUPIN (M.-I.). — On Polyphased Generators [Sur les générateurs polyphasés]. *Amer. Inst. Elec. Engineers*, viii, 562, décembre 1891; *Bull. Assoc. Ing.-Elect.*, iii, 89.
- RECHNIEWSKI (W.). — Distribution de l'énergie électrique. *L'Electricien*, ii, 37.
- SAHULKA (J.). — Théorie du champ magnétique tournant de Ferraris. *La Lum. élec.*, xlii, 253.
- SAHULKA et DOBROWOLSKI. — Dispositifs d'électromoteurs à champ magnétique tournant. *La Lum. élec.*, xlii, 563.
- STANLEY AND KELLY. — Distribution of Power by Alternate Currents [Distribution de l'énergie par courants alternatif-]. *Elec. World* (N.-Y.), xvii, 432.
- An Unique Mining Plant [Installation unique pour mines]. (Moteur Tesla). *Elec. World* (N.-Y.), xvii, 223.
- Stanley Alternate Current Motor [Moteur à courant alternatif de Stanley]. *Elec. World* (N.-Y.), xviii, 266.
- STORT. — Zur Geschichte der Kraftübertragung mittels rotirenden magnetischen Feldes (Rückblick) [Coup d'œil rétrospectif sur l'histoire du transport de l'énergie par champ magnétique tournant]. *Elek. Zeitsch.*, 1891, 309.
- TESLA. — Electro-Magnetic Motor [Moteur électromagnétique]. *Elec. Eng.* (N.-Y.), xii, 58; *Elec. Review* (N.-Y.), xvii, 298.
- WESTON (A.-H.). — On the Design of Alternating Current Motors [Sur l'étude des moteurs à courants alternatifs]. *Elec. Review*, xxviii, 491.
- ZICKERMANN (F.). — Ueber Arbeitsmessung bei Wechselstrom mit besonderer Berücksichtigung des Drehstromarbeits-dynamometers von Siemens und Halske [Mesure de la puissance des courants alternatifs, particulièrement à l'aide de l'électro-dynamomètre pour champs tournants de Siemens et Halske]. *Elek. Zeitsch.*, xii, 509.
1892. [Anon.]. — An Instrument for Determining the Phase of Alternate Currents [Instrument pour la détermination de la phase des courants alternatifs]. *Elec. Review*, xxxi, 351.

1892. [Anon.]. — Appareils de Ducrétet et Lejeune. *L'Electricité*, xvi, 416.
- [Anon.]. — Bradley's Multiphase Patents [Brevets Bradley en polyphasé]. *Elec. Eng.* (Lond.), ix, 494.
- [Anon.]. — Polyphase Motors in America [Les moteurs polyphasés en Amérique]. *Elec. World* (N.-Y.), xx, 253.
- [Anon.]. — The Schukert Rotatory Field Motor [Moteur à champ tournant de Schuckert]. *Elec. Review*, xxxi, 216.
- [Anon.]. — Zur Geschichte des Mehrphasenstroms in Deutschland [Contribution à l'histoire du courant polyphasé en Allemagne]. *Elek. Anzeiger*, 1892, 135.
- ARON (H.). — Drehstromzähler [Compteur pour courants tournants]. *Elek. Zeitsch.*, xiii, 193.
- BANTI (A.). — Les machines à courants triphasés de la maison Siemens et Halske de Berlin. *Elek. Zeitsch.*, xlvi, 674.
- BEHN-ESCHENBURG. — Three-phase Power [Puissance triphasée]. *Elek. Zeitsch.*, 1892, 73.
- Arbeitsmessung bei Dreiphasen Drehstrom [Mesure de la puissance des courants triphasés]. *Elek. Zeitsch.*, xiii, 73.
- BLATHY (O.). — Condensers and Self-induction to Split Phase [Condensateurs et self-induction pour la création d'une discordance de phase]. *Zeitsch. für Elek.*, x, 1892, 366.
- Alternating Current Motor [Moteur à courants alternatifs]. *Zeitsch. für Elek.*, 1892, 365.
- BOIS-REYMOND (DU). — Distributing Rotatory Current [Distribution par champ tournant]. *Elec. Review* (N.-Y.), xx, 243.
- BRAUN (F.). — Elektrische Kraftübertragung insbesondere über Drehstrom [Transport d'énergie, notamment par courants polyphasés]. H. Laupp, Tübingen, 1892.
- Ein Drehstrommotor für Vorlesungszwecke [Moteur à champ tournant de Cours]. *Zeitsch. Phys. Chem. Unterr.*, v, 189.
- BROWN (C.-E.-L.). — The Inventor of the Three-phase Alternating System [L'inventeur du système triphasé]. *Elec. Eng.* (N.-Y.), xiii, 85.
- Comparative Merits of the Two-phase and Three-phase Systems [Mérites relatifs des systèmes di- et triphasé]. *Elec. World* (N.-Y.), xx, 114.
- DIEUDONNÉ. — Transmissions existantes par courants alternatifs polyphasés. *L'Électricien*, iv, 39.

1892. DIHLMANN. — Distance de transmission des courants de haut potentiel. *L'Industrie électrique*, 1892, 374; *Elek. Zeitsch.*, 1892.
- DOLIVO DOBROWOLSKI (Von). — Reply to Attack on Multiphase Current Systems [Réponse à une attaque contre les systèmes polyphasés]. *Elec. World* (N.-Y.), xx, 4; voir aussi 36.
- ENNIS. — Development of Divergent-phase Electrical Machinery [Développement des machines électriques à différences de phases]. *Mech. World*, 13 mai 1892.
- FARMAN. — Moteur Schuckert à champ magnétique tournant. *La Lum. élec.*, XLV, 23; *Elec. Review*, XXXI, 216.
- GOERGES (H.). — Recherches récentes sur les moteurs à courants alternatifs. *La Lum. élec.*, XLIII, 124.
- Ueber die Ausgiebigkeit der Ankerwicklung bei Gleichstrom, Wechselstrom und Drehstrom [Débit spécifique de l'enroulement d'induit en courants continus, alternatifs et polyphasés]. *Elek. Zeitsch.*, XIII, 236.
- HEATHER. — Notes on the Production of a Rotating Magnetic Field [Notes sur la production d'un champ magnétique tournant]. *Electrician*, XXVIII, 216.
- HERING (C.). — Transmission of Power with special Reference to the Frankfort Plant [Transport de l'énergie avec référence spéciale à l'installation de Francfort]. *Elec. World* (N.-Y.), XIX, 162; *Nat. Elec. L. Ass.*, février 1892.
- M. Tesla and the Drehstrom System [Tesla et le système à champ tournant]. *Elec. World* (N.-Y.), XIX, 84.
- Efficiency of the Lauffen-Frankfort Power Transmission Plant [Rendement de l'installation de transport d'énergie de Lauffen-Frankfort]. *Elec. Review*, XXXI, 98.
- HOLZ (O.). — Measurement of Lag between two Alternate Currents [Mesure du décalage entre deux courants alternatifs]. *Elec. World* (N.-Y.), XIX, 216; *Elec. Review*, XXXI, 332.
- HORRY. — Rotating Magnetism obtained from the Alternating Current [Magnétisme tournant obtenu avec le courant alternatif]. *Elec. World* (N.-Y.), XIX, 243.
- HUTIN ET LEBLANC. — Alternate-current Dynamo-electric Motors [Moteurs dynamo-électriques à courants alternatifs]. *Industries*, XII, 48.
- KELLY (J.-F.). — Kinematics of the Rotary Field [Cinématique du champ tournant]. *Elec. World* (N.-Y.), XIX, 259.

1892. KELLY. — Alleged Superiority of the Three-phase Motor [Prétendue supériorité du moteur triphasé]. *Elec. World* (N.-Y.), xx, 36.
- KENNEDY (Rankine). — Electrical Distribution by Multiphase Currents [Distribution électrique par courants polyphasés]. *Elec. Review*, xxxi, 308.
- The Induction Motor : Who invented it? [Le moteur d'induction : qui l'a inventé?]. *Elec. Review*, xxxi, 515, 595.
- KOLLERT (J.). — Beitrage zur Theorie des Drehstromes [Contribution à la théorie du champ tournant]. *Elek. Zeitsch.*, xiii, 191.
- LEDEBOER. — Progrès de l'électricité en 1891 ; article contenant l'histoire des moteurs à champ tournant. *La Lum. élec.* XLIII, 7.
- LUCAS (F.). — Transformation des courants continus en alternatifs simples ou polyphasés. *La Lum. élec.*, XLVI, 274.
- MEISSNER. — Description de la transmission Lauffen-Francfort. *La Lum. élec.*, XLIV, 435, 617 ; *Elek. Zeitsch.*, xiii, 193.
- MILLER (Von) (O.). — Electricitätswerk Lauffen a. N.-Heilbronn [Installation électrique de Lauffen s. N.-Heilbronn]. R. Oldenbourg, Munich.
- The Three-phase System in Europe [Le système triphasé en Europe]. *Elec. World* (N.-Y.), xx, 143, 149.
- PATTEN (F.-J.). — Proposed System of Alternate Direct Current Transformation [Proposition d'un système de transformation de courant continu en courant alternatif]. *Elec. World* (N.-Y.), xix, 202 ; *L'Électricien*, II, 252.
- Self-starting and Self-exciting Synchronous Alternate Current Motors [Alterno-moteurs synchrones à auto-démarrage et à auto-excitation]. *Elec. World* (N.-Y.), xix, 226.
- RECHNIEWSKI (W.). — Distribution de l'énergie électrique. *L'Électricien* (2^e série), III, 21.
- Moteurs à champ tournant. *Ibid.*, 4.
- Traitement géométrique des problèmes des courants alternatifs. *Ibid.*, 401.
- Excitation des dynamos à courants polyphasés. *Ibid.*, 256.
- RECKENZAUN (A.). — Multiphase Transmission and Distribution of Energy [Transmission et distribution polyphasées de l'énergie]. *Elec. Review*, xxxi, 552, 599, 789.
- ROTTEN. — Schaltungsweise für elektrische Drehstromkraftmaschinen [Mode de couplage des machines à champ tournant]. *Elek. Zeitsch.*, xiii, 246.

1892. SAHULKA (J.). — Les moteurs à courants alternatifs à champ tournant. *La Lum. élec.*, XLVI, 224.
- Ueber Wechselstrommotoren mit magnetischem Drehfelde [Sur les moteurs à courants alternatifs à champ tournant]. *Zeitsch. für Elek.*, 1892, 5, 74, 118.
- Ueber die Feldstärke der Zweiphasenmotoren mit magnetischem Drehfelde [Sur l'intensité de champ des moteurs diphasés]. *Elek. Zeitsch.*, XIII, 119.
- SCHILLING (G.). — Ueber Drehstrommotoren [Les moteurs à champ tournant]. *Académie des Sciences de Vienne*, mai 1892.
- SCHMIDT (A.). — The Tesla Multiphase Current Motors [Les moteurs polyphasés de Tesla]. *Elec. Review*, xxx, 443.
- SCHUCKERT. — Moteur à champ magnétique tournant. Son emploi comme transformateur. *La Lum. élec.*, XLV, 23.
- SIEMENS ET HALSKE. — Dynamos and Motors [Dynamos et moteurs]. *Industries*, XIII, 312.
- STANLEY Wm.). — Alternate Current Motors [Moteurs à courants alternatifs]. *Nat. Elec. L. Ass.*, 1892, 161; *Elec. World* (N.-Y.), XIX, 157.
- STANLEY ET KELLY. — Alterno-moteurs à condensateurs. *L'Electricien* (2^e série), III, 228.
- STEINMETZ (C.-P.). — Frequency of Alternate and Polyphase Current Systems [Fréquence des systèmes alternatifs et polyphasés]. *Elec. World* N.-Y.), XX, 150.
- TESLA (Nikola). — The « Drehstrom » Patent [Le brevet du champ tournant]. *Elec. World* N.-Y.), XX, 222; voir également 209, 260, 324, 372.
- WAHLSTRÖM. — Transformation des courants polyphasés. *La Lum. élec.*, XLVI, 525.
- WEILER. — Ein Apparat für Wechsel- und Drehströme [Appareil pour courants alternatifs et polyphasés]. *Elek. Zeitsch.*, XIII, 138.
- WEINHOLD. — Drehstrom Lecture-apparatus [Appareil de démonstration pour courants polyphasés]. *Elek. Zeitsch.*, XIII, 300.
- WINAND P.-A.-N.). — Mechanical Illustration of Polyphased Currents [Illustration mécanique des courants polyphasés]. *Elec. World* (N.-Y.), XX, 310; *Journ. Franklin Inst.*, octobre 1892.
- YOREL. — Champ tournant créé par un courant continu. *L'Electricien* (2^e série), IV, 416.

1893. [Anon.]. — Application des courants triphasés à la manœuvre des ponts roulants. *L'Industrie élec.*, II, 259.
- [Anon.]. — Badt's Multiphase Railway and Lighting System [Système polyphasé de traction et d'éclairage polyphasés de Badt]. *Western Elec.*, XII, 62.
- [Anon.]. — Das Elektrizitätswerk Lauffen a. N.-Heilbronn [Installation électrique Lauffen s. N.-Heilbronn]. *Elek. Zeitsch.*, 1893, 18.
- [Anon.]. — Municipal Central Station at Erding [Station centrale municipale d'Erding]. *Elek. Zeitsch.*, 1893, fasc. 39.
- [Anon.]. — New Stanley Kelly Two-phase Motor System [Nouveau système de moteur diphasé de Stanley et Kelly]. *Elec. World* (N.-Y.), XXI, 323; *Elec. Review*, XXXII, 740.
- [Anon.]. — Recent progress in the Introduction of the Triphase System (Heilbronn, Novorossik, Hartford) [Progrès récents dans l'introduction du système polyphasé (Heilbronn, Novorossik, Hartford)]. *Elec. World* (N.-Y.), XXI, 45.
- ARNO (R.). — Rotatory Electric Field and the Rotations due to Electrostatic Hysteresis [Champ électrique tournant et rotations dues à l'hystérésis électrostatique]. *Electrician*, XXX, 516.
- Lauffen-Heilbronn Transmission [Transport de Lauffen-Heilbronn]. *Electrician*, XXX, 353.
- ARNOLD (E.). — Non-Synchronous Motors for ordinary Alternate Currents [Moteurs asynchrones pour courants alternatifs ordinaires]. *Elek. Zeitsch.*, XIV, 256.
- Long Distance Transmission of Power [Transport de l'énergie à grande distance]. *Elec. World* (N.-Y.), XXII, 58.
- BANTI (A.). — Experiments on Brown's Asynchronous Motors [Expériences sur les moteurs asynchrones de Brown]. *Elec. Review*, XXXIII, 667; XXXIV, 60, 114.
- BAST (DE). — L'alternomoteur asynchrone monophasé de Brown. *Bull. Ass. Ing. Electr.*, août 1893.
- BEHN-ESCHENBURG (H.). — Alternate Current Motors [Alternomoteurs]. *Elec. World* (N.-Y.), XXI, 353, 372, 424, 458.
- Theoretisches über asynchrone Wechselstrom Motoren [Etude théorique des alternomoteurs asynchrones]. *Elek. Zeitsch.*, 1893, 519.
- Regulirbarer Wechselstrommotor [Alternomoteur réglable]. *Elek. Zeitsch.*, XIV, 300.
- BLONDEL. — *La Lum. élec.*, décembre 1893.

1893. BLONDEL. — Mesure de la puissance des courants polyphasés. *La Lum. élec.*, XLVII, 139; *L'Electricien* (2^e série), v, 197.
- BOISSONAS (A. et J.). — Non-synchronous Motors [Moteurs asynchrones]. *La Lum. élec.*, 21 octobre 1893.
- BOUCHEROT. — Théorie des moteurs à champ tournant. *La Lum. élec.*, 28 octobre 1893.
- BRADLEY (C.-S.). — Long Distance Transmission of Power [Transport de l'énergie à grande distance]. *Nat. Elec. L. Ass.*, mars 1893.
- BROWN (C.-E.-L.). — Single-Phase Alternate Current Motors [Alternomoteurs simples]. *Elec. World*, XXI, 290, 358, 433; *Elek. Zeitsch.*, 1893, 81; *Electrician*, xxx, 358 et 636; *Elec. World* (N.-Y.), XXII, 58.
- Nicht Synchron laufender Motor für gewöhnlichen Wechselstrom System [Moteur à marche asynchrone pour système à courants alternatifs ordinaires]. *Elek. Zeitsch.*, xiv, 81.
- CHASSELOUP-LAUBAT (DE) (G.). — Notes sur les courants alternatifs polyphasés. *Mém. Soc. des Ing. civ.*, 1893, II, 168.
- DANIELSON (E.). — Reversibility of Three-Phase Motors with Inductive Winding [Réversibilité des moteurs triphasés à enroulement à self-induction]. *Elec. Review*, xxxii, 169; *Elec. World* (N.-Y.), XXI, 44.
- DERI. — Alternate Current Motors [Alternomoteurs]. *Zeitsch. für Elek.*, 1^{er} mars 1893; *Electrician*, xxx, 630.
- Starting Alternate Current Motors [Démarrage des alternomoteurs]. *La Lum. élec.*, 22 avril 1893.
- DOLIVO DOBROWOLSKI (VON). — Reply to Brown [Réponse à Brown]. *Elek. Zeitsch.*, xiv, 178, et 283 et 285.
- Les moteurs à champ tournant de la Société générale d'électricité de Berlin. *La Lum. élec.*, XLVIII, 328.
- Die neuesten Drehstrommotoren ohne Schleifkontakte der Allgem. Elek.-Ges. [Derniers moteurs à champ tournant sans collecteurs de l'Allgem. Elek.-Ges.]. *Elek. Zeitsch.*, xiv, 183.
- FARMAN. — Theory of Rotatory Field Motors [Théorie des moteurs à champ tournant]. *La Lum. élec.*, 18 novembre et 2 décembre 1893.
- FERRARIS (G.). — Un metodo per la trattazione dei vettori rotanti od alternativi ed una applicazione di esso ai motori elettrici a correnti alternate [Mode de traitement des vecteurs tournants ou alternatifs et son application aux alternomoteurs]. *Mémoires de l'Académie*

- démie royale des Sciences de Turin*, série II, tome XLIV, 3 décembre 1893.
1893. FERRARIS. — Traduction anglaise du mémoire ci-dessus. *Electrician*, XXXIII, 110, 129, 152, 184.
- FORBES (G.). — The Electrical Transmission of Power from Niagara Falls [Transport électrique de l'énergie des chutes du Niagara]. *Journ. Inst. Elec. Eng.*, XXII, 484.
- FRÖLICH (O.). — Ueber die Messung der Arbeit des Drehstromes [Mesure de la puissance du courant polyphasé]. *Elek. Zeitsch.*, XIV, 574.
- GOERGES (H.). — Débit spécifique des induits à courants continus et à courants alternatifs simples ou polyphasés. *La Lum. élec.*, XLVII, 133.
- Regulation of Three-phase System [Régulation d'un système triphasé]. *Elec. World* (N.-Y.), XXI, 123.
- GUILBERT. — Moteur à courants alternatifs d'Oerlikon. *La Lum. élec.*, XLVIII, 366.
- Moteurs à courants alternatifs de MM. Hutin et Leblanc. *Ibid.*, 451.
- GUTMANN (L.). — Rotatory Magnetic Field and Multiphase Alternate Current Distribution [Champ magnétique tournant et distribution par courants polyphasés]. *Elec. World* (N.-Y.), XXI, 276.
- HOSPITALIER (E.). — Conditions de fonctionnement des courants triphasés. *L'Industrie électrique*, II, 12.
- Moteurs de l'Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft. *Ibid.*, II, 214.
- Moteurs d'Oerlikon. *Ibid.*, 280.
- HUTIN ET LEBLANC. — Transformation des courants alternatifs en courants continus. *La Lum. élec.*, XLVII, 51.
- A propos du nouveau moteur de M. Brown. *La Lum. élec.*, XLVII, 371; *Electrician*, XXX, 503.
- JACQUIN. — Transport et distribution de l'énergie électrique par les courants polyphasés à Heilbronn. *La Lum. élec.*, XLVIII, 301, 370.
- KENNEDY (R.). — The New System of Alternating Current and Transformer Distribution [Nouveau système de distribution par courants alternatifs et transformateurs]. *Elec. Review*, XXXII, 444, 463, 524, 580, 608, 635, 661.
- KINGDON (J.-A.). — Hysteresis Theory of Brown's Alternate Current Motor [Théorie de l'hystérésis de l'alternomoteur de Brown]. *Electrician*, XXX, 604 et aussi 663.
- KOLBEN (E.). — Design of Alternating Current Motors [Etude d'exécu-

- tion des alterno-moteurs]. *Elec. World* (N.-Y.), xxii, 284; *Electrician*, xxxi, 590, 618.
1893. KORDA (D.). — Multiplication du nombre des périodes des courants sinusoïdaux. *La Lum. élec.*, XLVIII, 343.
- Mesure des différences de phases de deux courants sinusoïdaux. *L'Industrie élec.*, II, 218.
- Verdoppelung der Periodenzahl und das Messen der Phasendifferenz von Wechselströmen [Multiplication du nombre des périodes et mesure des différences de phases des courants alternatifs]. *Elek. Zeitsch.*, XIV, 329.
- KRATZERT. — Système à courants triphasés. *La Lum. élec.*, XLVIII, 428.
- KRATZKART. — New Multiphase System [Nouveau système polyphasé]. *Elek. Zeitsch.*, 12 mai 1893.
- MASCART (E.). — Moteurs à courants alternatifs. *Bull. Soc. Internat. des Elec.*, 1893, x, 343.
- OLIVETTI (C.). — Starting Synchronous Motors [Démarrage des moteurs synchrones]. *Elec. Review*, xxxii, 553.
- PULUJ (J.). — Messapparat für Phasendifferenz von Wechselströmen, etc. [Appareil de mesure pour la différence de phases des courants alternatifs, etc.]. *Elek. Zeitsch.*, XIV, 686.
- RECHNIEWSKI (W.). — Enroulements des machines électriques. *L'Electricien* (2^e série), v. 21.
- RECKENZAUN (A.). — Brown's Non-synchronous Motor for Ordinary Alternate Currents [Moteur asynchrone de Brown pour courants alternatifs ordinaires]. *Elec. Review.*, xxxii, 95.
- RIES and SCOTT. — Some Recent Developments in Alternate Current Motors [Quelques développements récents dans les alterno-moteurs]. *Elec. Review.*, xxxiii, 583.
- RUSSEL (A.). — Rotatory Magnetic Fields [Champs magnétiques tournants]. *Elec. Review.*, xxxii, 652.
- Alternating Currents and Rotatory Fields [Courants alternatifs et champs tournants]. *Electrician*, xxx, 651, 7 avril 1893.
- SAULKA (J.). — Theorie der Thomsonschen (Brownschen) Motoren für gewöhnlichen Wechselstrom [Théorie des moteurs Thomson (Brown) pour courants alternatifs ordinaires]. *Elek. Zeitsch.*, 1893, 391.
- SNELL (A.-T.). — Distribution of Power by Alternate Currents [Distribution de l'énergie par courants alternatifs]. *Elec. Engineer*, 1893.

1893. SNELL. — Distribution of Power by Alternate Current Motors (Distribution de l'énergie électrique par alterno-moteurs). *Inst. Elec. Eng.*, xxii, 280.
- THOMSON (E.). — Single-phase Alternating Motors [Alterno-moteurs ordinaires]. *Elec. World* (N.-Y.), xxi, 228, 314.
- WAHLSTRÖM. — Rotatory Field from Single-Phase Current [Champ tournant par courants alternatifs ordinaires]. *Elec. World* (N.-Y.), xxi, 360.
1894. [Anon.]. — Duncan's Alternate Current Meter [Compteur alternatif de Duncan]. *Elec. Review* (N.-Y.), 19 septembre 1894.
- [Anon.]. — Imhoff's New System for Distribution [Nouveau système de distribution d'Imhoff]. *L'Ecl. élec.*, i, 688; *Elek. Zeitsch.*, xv, 638.
- [Anon.]. — Polymorphe Generatoren und Transformatoren [Générateurs et transformateurs polymorphiques]. *Elek. Zeitsch.*, xv, 307.
- [Anon.]. — Stanley and Kelly's Alternating Current System [Système à courants alternatifs de Stanley et Kelly]. *Elec. Review* (N.-Y.), xxiv, 285.
- [Anon.]. — Stanley Elec. M. Co. Two-Phased System for Lighting and Power [Système diaphasé d'éclairage et de puissance mécanique de la Stanley Elec. M. Co]. *Elec. World* (N.-Y.), xxxiii, 815.
- [Anon.]. — The First Three-Phase Transmission Plant in the United States (Redlands) [Première installation de transport par courants triphasés aux États-Unis (Redlands)]. *Elec. Review*, xxxiv, 171.
- [Anon.]. — The General Electric Co's Three-Phased Apparatus [Les appareils triphasés de la General Electric Co]. *Ibid.*, xxii, 581.
- [Anon.]. — Three-Phase Plant at Concord [Installation triphasée à Concord]. *Elec. World* (N.-Y.), 1894, 364.
- [Anon.]. — Three-Phase Transformer [Transformateur triphasé]. *Ibid.*, 426.
- [Anon.]. — Three-Phase Transmission Plant in America (Taft) [Installation de transport triphasé en Amérique (Taft)]. *Ibid.*, 593.
- ARNO (R.). — Experiments on Brown's Alternate Current Motor [Expériences sur l'alterno-moteur de Brown]. *L'Eletricista*, iii, n° 7.
- Retardation of the Polarisation in Dielectrics [Retard dans la polarisation des diélectriques]. *Electrician*, xxxiv, 327.

1894. BATHURST (F.). — Switzerland as the Present Electrical Centre of Europe [La Suisse, centre électrique actuel de l'Europe]. *Elec. World* (N.-Y.), xxiii, 731, 765, 797, 829, 859.
- BEHN-ESCHENBURG. — Theory of Alternate Current Motors [Théorie des alterno-moteurs]. *Elek. Zeitsch.*, 29 mars et 17 mai 1894.
- Polyphase from Single Phase [Courant alternatif simple transformé en polyphasé]. *Elek. Zeitsch.*, janvier 1894.
- Vermehrung der Zahl der Erregerphasen zur Erzeugung rotirender magnetischer Felder [Multiplication du nombre de phases d'un générateur pour la production des champs tournants]. *Elek. Zeitsch.*, xv, 35.
- BELL (L.). — Practical Properties of Polyphase Apparatus [Propriétés pratiques des appareils polyphasés]. *Amer. Inst. Elec. Engineers*, 1894, n° 2; *Elec. World* (N.-Y.), xxxiii, 334, 367, 400.
- Some Facts about Polyphase Motors [Quelques faits relatifs aux moteurs polyphasés]. *Amer. Inst. Elec. Engineers*, 1894, n° 11.
- The Saving of Copper in Three-Wire Three-Phase System [Economie de cuivre dans le système triphasé à trois fils]. *Elec. Review*, xxxiv, 141; *Elec. World* (N.-Y.), xxiii, 111.
- BLONDEL (A.). — Inductance des lignes aériennes pour courants alternatifs. *L'Écl. élec.*, 1, 393.
- BOUCHEROT. — Transmission de la puissance. *La Lum. élec.*, 19 mai 1894.
- Distribution de force et éclairage par courants polyphasés aux ateliers Weyher et Richemond. *Bull. Soc. Int. des Elec.*, décembre 1894.
- DERI (M.). — Herstellung eines Drehfeldes durch Einphasen-Wechselströme [Transformation de courants alternatifs simples en triphasés]. *Zeitsch. für Elektr.*, xii, 377; *Elek. Zeitsch.*, xv, 353; *Elec. World* (N.-Y.), xxiv, 82.
- DUNCAN (L.). — Experiments on Two-Phase Motors [Expériences sur des moteurs diphasés]. *Amer. Inst. Elec. Engineers*, 1894, n° 11.
- DUNCAN (J.-D.-E.). — Proof of Two-Wattmeter Method of Measuring Three-Phase Power [Vérification de la méthode de mesure de la puissance triphasée par les deux wattmètres]. *Elec. World* (N.-Y.), xxiii, 763.
- ESSON (W.-B.). — Monophase Motors [Alterno-moteurs simples]. *Elec. World* (N.-Y.), xxxv, 317.
- THOMPSON. — Courants polyphasés.

1894. FERRARIS (G.). — Sur un alterno-moteur synchrone. *Actes de l'Ac. roy. de Turin*, xxix, 1^{er} avril 1894; *Electrician*, xxxiii, 101.
- FRIESE (R.-M.). — Die Vorgänge im Gleichstromanker bei Entnahme von Wechsel und Mehrphasenströmen [Application de l'induit à courant continu à la production de courants alternatifs et polyphasés]. *Elek. Zeitsch.*, xv, 101.
- Alternate Currents from Continuous Currents [Transformation des courants continus en courants alternatifs]. *Elec. World* (N.-Y.), xxiii, 373, 468, 515.
- GOERGES (H.). — Ueber das Anlassen der Elektromotoren, speciell der Drehstrommotoren [Démarrage des électromoteurs et notamment des moteurs à champ tournant]. *Elek. Zeitsch.*, xv, 644.
- GUTMANN (L.). — On the Production of Rotatory Magnetic Fields by a Single Alternating Current [Production de champs tournants par un courant alternatif ordinaire]. *Amer. Inst. Elec. Engineers*, 1894, n° 12.
- HEYLAND (A.). — Ein graphisches Verfahren zur Verausberechnung von Transformatoren und Mehrphasenmotoren [Procédé graphique pour le calcul des transformateurs et des moteurs polyphasés]. *Elek. Zeitsch.*, xv, 561.
- HOSPITALIER. — Générateurs et transformateurs polymorphiques. *Soc. française de Physique*, 18 mai, 203.
- HUTIN ET LEBLANC. — Transformation réciproque des courants continus en courants alternatifs, etc. *L'Electricien*, 21 avril 1894.
- JACQUIN (Ch.). — Transmission de force motrice par courants polyphasés aux ateliers du Jura-Simplon. *La Lum. élec.*, lii, 10, 73.
- JÜLLIG (Max.). — Ueber die Gestalt der Kraftlinien eines magnetischen Drehfeldes [Sur la configuration des lignes de force d'un champ magnétique tournant]. *Académie des Sciences de Vienne*, juillet 1894.
- KENNEDY (Rankine). — Alternate Current Motors [Alterno-moteurs]. *Elec. Review.*, xxxv, 156, 318, 651.
- KOLBEN (E.). — Asynchrone Wechselstrommotoren für hohe Spannung [Moteurs asynchrones pour haute tension]. *Elek. Zeitsch.*, xv, 597.
- LAHMEYER (W.). — Regelung von Drehstromanlagen, etc. [Régulation des installations à courants polyphasés, etc.]. *Ibid.*, xv, 675.
- LUNT (A.-D.). — Measurement of the Power of Polyphased Current [Mesure de la puissance d'un courant polyphasé]. *Elec. World* (N.-Y.), xxiii, 771, 804, 832.

1894. MOLER and BEDELL. — An Optical Phase Indicator and Synchronizer [Indicateur optique de phase et synchroniseur]. *Amer. Inst. Elec. Engineers*, 1894, n° 10.
- PATTEN F.-J.). — Who invented the rotatory Field Motor and Biphasé System of Power Distribution ? [Quel est l'inventeur du moteur à champ tournant et de la distribution de la puissance par courants diphasés ?]. *Elec. World* (N.-Y.), xxiii, 283.
- POTIER (A.). — Sur les moteurs à induit fermé sur lui-même. *Bull. Soc. Internat. des Élec.*, mai 1894.
- PUPIN (M.-I.). — Resonance Analysis of Alternating and Polyphase Currents [Analyse de résonance des courants alternatifs et polyphasés]. *Amer. Inst. Elec. Engineers*, 1894, n° 10.
- REBER (S.). — Theory of Two and Three-Phase Motors (Théorie des moteurs di- et triphasés). *Ibid.*, n° 10.
- SCOTT (C.-F.). — Polyphase Transmission [Transmission polyphasée]. *Nat. Elec. L. Assoc.*, 1^{er} mars 1894 ; *Elec. World* (N.-Y.), xxiii, 358, 393.
- STEINMETZ (C.-P.). — Discussion of the Reber's Theory [Discussion de la théorie de Reber]. *Amer. Inst. Elec. Engineers*, 1894, n° 10.
- Multiphase Motors [Moteurs polyphasés]. *Elek. Zeitsch.*, 25 janvier 1894.
- STUART-SMITH. — Instrument for Measuring Phase Difference [Appareil pour la mesure de la différence de phase]. *Elec. World* (N.-Y.), xxiii, 172.
1895. [Anon.]. — Niagara To-day [Le Niagara actuel]. *Elec. Eng.* (N.-Y.), 15 janvier 1895.
- [Anon.]. — The Monocyclic System [Système monocyclique]. *Elec. World* N.-Y. , xxv, 182 ; *L'Écl. élec.*, iii, 152.
- [Anon.]. — Trial of a Tesla Motor [Epreuve d'un moteur Tesla]. *Electricity* (E. U.), viii, 15 mai 1895.
- BAST (DE). — Discours inaugural [Discours d'inauguration]. Théorie des moteurs polyphasés asynchrones. *Bull. Assoc. des Ingénieurs Électriciens*, vi, 30, mars 1895.
- BELL (L.). — The Monocyclic System [Le système monocyclique]. *Nat. Elec. L. Assoc.*, février 1895 ; *Elec. Review* (N.-Y.), xxvi, 120.
- BRAGSTAD. — Untersuchung eines Drehfeldes [Exploration d'un champ tournant]. *Elek. Zeitsch.*, xvi, 112.

1895. CAHEN (H.). — Zur rechnerischen Bestimmung der Mehrphasen Motoren [Détermination des moteurs polyphasés par le calcul]. *Elek. Zeitsch.*, xvi, 52.
- DUNCAN (L.). — Multiphase Motors and Power Transmission [Moteurs polyphasés et transport de l'énergie]. *Rapport officiel des séances du Congrès électrique de Chicago*, 1893, 411.
- EBORALL (A.-C.). — Single-phase Alternate-current Motors [Alternomoteurs simples]. *Elec. Review*, xxxvi, 722, 738, 789.
- FISCHER (L.). — Berechnung von Mehrphasenstromanlagen [Calcul des installations polyphasées]. *Elek. Zeitsch.*, 1895, livraisons 6 et 7.
- GOERGES (H.). — Vergleichende Betrachtungen über die Wirtschaftlichkeit des Einphasen und des Mehrphasenstromes [Economie relative des courants alternatifs simples et polyphasés]. *Elek. Zeitsch.*, 1895, livraison, 3.
- JANET (P.). — Méthode d'inscription électro-chimique des courants alternatifs. *Bull. de la Soc. Internat. des Elect.*, janvier 1895.
- JULIUS and STEELS. — Transport d'énergie par courants polyphasés des carrières de M. Wincqz, à Soignies. *Bull. Assoc. des Ing. Elec.*, mars et avril 1895.
- LEGRAND (L.). — Calcul d'un moteur asynchrone à champ magnétique tournant. *L'Ecl. élec.*, 19 janvier 1895.
- MERSON (R.-D.). — Output of Polyphase Generators [Puissance des générateurs polyphasés]. *Elec. World (N.-Y.)*, xxv, 684.
- PERRY (N.-W.). — The Tesla Two-phase System [Système diphasé de Tesla]. *Electricity (E. U.)*, viii, 169, 185.
- SCOTT (C.-F.). — On Tesla Polyphase System [Sur le système polyphasé de Tesla]. *Rapport officiel des séances du Congrès électrique de Chicago*, 1893, 417.
- STEINMETZ. — On Complex Quantities [Sur les quantités complexes] (Théorie mathématique appliquée aux systèmes polyphasés). *Ibid.*, 68.
- WEINHOLD (A.). — Elektrizitätswerk der Stadt Chemnitz [Installation électrique de Chemnitz]. *Elek. Zeitsch.*, 1895, livraison 1; *Electrician*, xxxiv, 464.
- WHITWELL (A.). — Theory of Three-phase Generators [Théorie des générateurs triphasés]. *Elec. Review*, xxxvi, 768.

ABRÉVIATIONS

- Amer. Inst. Elec. Engineers.* = American Institute of Electrical Engineers.
Ann. Chim. Phys. = Annales de Physique et de Chimie.
Bull. Ass. Ing.-Elec. . . . = Bulletin de la Société des Ingénieurs-Electriciens.
Bull. Soc. Internationale des Electriciens. = Bulletin de la Société Internationale des Electriciens.
Edin. Philos. Journal. . . = Edinburgh's Philosophical Journal.
Elec. Eng. (Lond.) = Electrical Engineer (Londres).
Elec. Eng. (N.-Y.) = Electrical Engineer (New-York).
Elec. Review. = Electrical Review.
Elec. World. = Electrical World.
Elek. Anz. = Elektrotechnischer Anzeiger.
Elek. Zeitschrift. = Elektrotechnische Zeitschrift.
Journ. Franklin Inst. . . . = Journal of the Franklin Institute.
Journ. Inst. Elect. Eng. . . = Journal of the Institute of Electrical Engineers.
Mech. World. = Mechanical World.
Mém. Soc. des Ing. civils. = Mémoires de la Société des Ingénieurs civils.
Nat. Elec. L. Ass. = National Electric Light Association.
Off. Ausstellung. = Offizielle Ausstellung. . .
Philos. Magazine. = Philosophical Magazine.
Philos. Trans. Roy. Soc. . = Philosophical Transactions of the Royal Society.
Physik. Gesellschaft. . . . = Physikalische Gesellschaft.
Pogg. Ann. = Poggendorff's Annalen.
Proc. Physical Soc. = Proceedings of the Physical Society.
Proc. Roy. Institution. . . = Proceedings of the Royal Institution.
Program der kgl. bayer. . . . = Programm der königlichen bayerischen. . .
Western. Elec. = Western Electrician.
Zeitsch. für Elek. = Zeitschrift für Elektrotechnik.
Zeitsch. Phys. Chem. Unterr. = Zeitschrift des Physikalischen und Chemischen Unterrichts.
-

INDEX ALPHABÉTIQUE

Cet ouvrage contient de nombreux renvois à des notes en bas de pages. A défaut de ces notes, l'Appendice bibliographique permet de recourir aux sources originales. En outre, pour la facilité des recherches, cet Index contient les noms d'auteurs alors même qu'il n'y est fait allusion qu'au point de vue bibliographique.

A

- ALLGEMEINE ELEKTRICITÄTS - GESELLSCHAFT, Générateurs à réluctance variable, 249.
— Moteurs, Rendement, 232.
— Transport de Francfort, 118, 119.
Alternateur (*voir* Générateur).
— simple ou ordinaire, 2.
Alternatifs, Champs magnétiques — combinés, 66
— — Expériences sur les Courants, 2.
— — transformés en courants continus, 207.
— Vecteurs, 68, 183.
Alternativités, 8.
Alterno-moteurs, 193.
AMPÈRE, Expériences sur le disque tournant, 81.
Amplitude, 9.
Amplitude de décalage (*voir* Décalage).
Anneau Gramme, Transformateur en, 205.
- ARAGO [F.], Rotations d', 78, 258.
Armature (*voir* Induit et Organe ou Élément mobile).
ARNO [R.], 263, 272.
— Brevet sur l'hystérésis électrostatique, 268.
— Epreuves de rendement, 235.
ARNOLD [E.], 164, 257, 268.
ARON [D^r H.], Compteur polyphasé, 214, 250, 264.
— Mesure de la puissance, 264.
Asynchronisme et synchronisme, 126, 232.
ATKINSON, Moteurs, 197.
Auto-démarrage des moteurs synchrones, 193.
Auto-transformateur, 211, 250.
Avantages des générateurs polyphasés, 24.
AYRTON [W.-E.], 261.

B

- BABBAGE ET HERSCHEL, Expériences sur les rotations magnétiques, 80, 238.

- BACELLI, Expériences sur les rotations magnétiques, 81.
- BADT [F.-D.], Projet de traction par courants polyphasés, 268.
- Bagues de contact pour insertion de résistances, 143.
- BAILY [Walter], Premier moteur d'induction, 95, 258.
- Baltimore, Station de, 254.
- BANTI [A.], 257, 264, 268.
- BARLOW, Expériences sur la boussole, 79.
- BAST [de], Théorie des alterno-moteurs simples, 180, 261, 268, 275.
- BATHURST [F.], 273.
- BEDELL [F.], 274.
— ET RYAN, 194.
- BEHN-ESCHENBURG, 264, 268, 273.
- BELL [D^r Louis], 273, 275.
— sur la Constance de la vitesse angulaire, 229.
— sur le Couple au démarrage, 225.
— sur le Poids des moteurs, 236.
- Bellegarde, Générateurs de, 42, 252.
- BIELMAYR, 258.
- Bilbao, Installation de, 210.
- BLAKESLEY [T.-H.], « Courants électriques alternatifs », 11.
- BLONDEL [A.], 194, 268, 269, 273.
- BLATHY [O.], 264.
- Bobine pour production d'un champ tournant, 91.
- Bobines de réaction, 18, 211, 250.
— — polyphasées, 211.
— Imbrication des, 41.
— Largeur des, 26, 28.
- Bockenheim, Installation de, 249.
- BOIS-REYMOND [A. du], 260, 261, 264.
- BOISSONNAS [A. et J.], 268.
- BOREL, Moteur, 102.
- BOUCHEROT, 244, 269, 273.
— Epreuves de rendement, 236.
- BOYS [C. VERNON-] (*voir aussi* GUTHRIE ET BOYS), 259.
- BRADLEY [C.-S.], 269.
— Brevets, 103, 104.
— Fonctionnement polyphasé, 104.
— Moteurs, 104.
— Transformateur, 209.
- BRAGSTAD, 275.
- BRAUN, 264.
- Bremgarten, Générateurs de, 42.
- BROWN [C.-E.-L.], 261, 264, 269.
— Alterno-moteurs simples, 179.
— Conducteurs noyés, 36.
— Dispositif de démarrage, 228.
— Etude des générateurs de Lauffen, 30.
— — d'installation du Niagara, 44.
— Expériences pour l'étude de construction des moteurs, 134-137.
— Montage des bobines, 33.
— Organe mobile, 134.
— Rendement de ses moteurs, 235.
— Machines type « Cloche », 42.
— Etude des générateurs de Hochfelden, 42, 239.
- BROWN, BOVERT ET C^{ie}, Alternateurs, 39.
— Moteurs, 239 et suiv.
- Buda-Pesth, Installation de, 210, 251.
- BUSQUET ET RODET, 58, 258.
- C
- Cadran, Diagramme en, 9, 15, 27, 30, 53.
- Cage d'écureuil, 115, 133, 134, 139.
- CAHEN [H.], 276.
- Capacité, 16.
— son Emploi à la création de Discordance de phases, 16, 178, 198.
- Caractéristique d'un alterno-moteur, 161.
— — simple, 185.
- Chaleur développée dans l'organe fixe, 172.
— — — mobile, 170.

- Champ électrique tournant**, 268.
 — magnétique initial, 149, 156, 166, 171, 181.
 — — Combinaison de, 66.
 — — Progression du, 147.
 — — Rotation du, 79,
 — tournant elliptiquement dans un alerno-moteur simple, 190.
Champs magnétiques tournants, 23, 66 et suiv., 78.
 — — Expériences sur les, 86.
 — — alternatifs combinés, 66.
 — — — Expériences sur les, 173.
CHASSELOUP-LAUBAT [de], 269.
Chemnitz, Station de, 269.
CHESNEY (*voir* STANLEY-KELLY).
CHRISTIE, Expériences sur les rotations magnétiques, 80.
Circuits d'un organe mobile, 139.
 — indépendants de l'organe mobile, 140.
 — primaire et secondaire, 125, 127.
 « Cloche », Type de Machine, 42.
COERPER, Moteur, 103.
 — Organe mobile, 139.
COLLADON, Expériences sur les rotations magnétiques, 81.
Combinaisons de Champs magnétiques, 66.
 — de Courants polyphasés, 56.
 — de Forces électromotrices, 52.
 — scalaires, 77.
 — polyphasées, 49.
Commutateur pour imitation de courants triphasés, 89, 90.
Compteurs pour courants polyphasés, 214.
Concord, Installation de, 254.
Condensateur électrolytique, 178, 228.
Condensateurs, Leur emploi pour Démarrage, 198.
Conducteurs d'un moteur, Longueur des, 216 et suiv.
 — d'un organe mobile, 132, 139.
Conducteurs en série, 140.
 — noyés dans le fer, 36.
Constance de la Vitesse angulaire, 229.
 — du Flux magnétique, 154.
Couple mécanique ou moteur, 154, 168 et suiv.
 — — et Glissement, 160.
 — — au démarrage, 159, 225.
 — — d'un alerno-moteur simple, 183, 184, 190.
 — — représenté par l'aire d'un triangle, 157.
Courant tournant elliptiquement dans un alerno-moteur ordinaire, 190.
Courants alternatifs, 2.
 — — simples, 2.
 — — Leur transformation en courants continus, 207.
 — continus, Leur transformation en courants alternatifs, 207.
 — dans l'organe fixe, 171, 173, 215.
 — — mobile, 132, 167 et suiv., 221.
 — — — d'un alerno-moteur simple, 186, 187.
 — de Foucault, 84.
 — diphasés (*voir* Diphasés).
 — parasites, 78, 83, 132.
 — triphasés (*voir* Triphasés).
 — de puissance nulle, 19.
Création d'une différence de phase, 100, 111, 177, 199, 226.
Cuivre, Economie de — par les systèmes polyphasés, 61.

D

DANIELSON, Expériences sur générateurs asynchrones, 47, 269.

- DE BAST (*voir* BAST).
 Décalage, 12, 13, 15, 52, 177, 192.
 — de flux résultant, 157.
 Démarrage automatique des moteurs synchrones, 493.
 — des alterno-moteurs, 177, 223, 226.
 — — simples, 171, 226.
 — — Couple au, 159.
 — — Dispositifs de, 227, 228.
 — — Insertion de résistances pour, 143, 160, 162, 198.
 DEPOELE [Van], 260.
 DEPREZ [Marcel], Combinaison de deux champs magnétiques, 69.
 — Recherches de, 98, 259.
 DERI [Max], 269, 273.
 Développement d'enroulement, 7.
 Développement des moteurs polyphasés (*voir* Genève).
 Diagramme de rendement des moteurs, 153.
 — de Zeuner, 11.
 — encadran, 9, 15, 27, 30, 53.
 DIEUDONNÉ, 264.
 Différence de phase, 13, 21, 23, 254.
 DIIHLMANN, 264.
 Diphasé, Générateur, 22.
 Diphasée, Station, de Baltimore, 255.
 Diphasées, Enroulement de bobines, 146.
 Diphasés, Systèmes, Modes de connexions, 49 et suiv.
 — — à trois fils, 51, 58.
 — Transformateurs, 200, 202.
 Disques de noyaux, 36, 132.
 Distribution par courants polyphasés, 246.
 Division de phases (*voir* Création de discordance de phases).
 DOLIVO DOBROWOLSKI [M. von], 261, 262, 263, 265, 269, 271, 272.
 DOLIVO DOBROWOLSKI, Lampes triphasées, 61.
 — Moteurs, 113, 122.
 — Organe mobile, 139.
 — Puissance comparative de machines, 24.
 — Recherches, 115.
 — sur la Variation du champ, 150.
 Drehstrom [Courant tournant] (*voir* Champ tournant), 71, 115.
 Dublin, Tramways, 210.
 DU BOIS-REYMOND (*voir* BOIS-REYMOND).
 DUNCAN [D' Louis], 164, 239, 262, 273, 276.
 — [J.-D.-E.], 273.
 — [T.], Compteur polyphasé, 214.
 — — Moteur, 198.
- E
- EBERT, Construction de la ligne Laufen-Francfort, 121.
 EBORALL [A.-C.], 276.
 Economie de cuivre, 61.
 Effort sur le fer et sur le cuivre, 37.
 — sur l'organe mobile, 132.
 Egalisation des circuits triphasés, 250.
 Eléments fixe et mobile (*voir* Organes).
 ENNIS, 265.
 Enroulement de générateurs, 49.
 — développé, 7.
 — d'organe fixe, 145.
 — — mobile, 139, 221.
 — entambour de l'organe fixe, 145, 146.
 — hélicoïdal, 6.
 — imbriqué, 7.
 — ondulé, 7.
 — primaire d'un moteur, 125, 127.
 — secondaire, 125, 127.
 Enroulements indépendants, 50.
 Epaisseur radiale du fer de l'organe fixe, 151.

- Essai de moteurs, 219.
 Esson [W.-B.], 273.
 Etoile (*voir* Montage).
 Etude de moteurs, 215.
 Exemples de transmissions polyphasées, 93.
 Expériences sur les champs magnétiques tournants, 86.
- F**
- FARADAY, Découverte des courants d'induction, 2, 258.
 — Recherches sur la rotation magnétique, 80, 82, 84, 258.
 FARMAN, 263, 269.
 FERRANTI-WRIGHT, Moteur, 196.
 FERRARIS [G.], Recherches, 99, 163, 259, 269, 270, 274.
 — Théorie des alterno-moteurs ordinaires, 180.
 FISCHER [L.], 276.
 FLEMING [J.-A.], 11, 176, 177.
 Flux magnétique résultant, 152, 156, 166.
 — — Constance du, 154.
 — — Densité de — dans les moteurs (*voir* Induction).
 — — Phase de, 201.
 FONVIELLE ET LONTIN, Disque de cuivre à rotation constante, 86, 259.
 FORBES [G.], Plan d'utilisation des chutes du Niagara, 44.
 — Transport de l'énergie du Niagara, 270.
 Force contre électromotrice, 164, 173, 191, 215.
 — — dans un alterno-moteur simple, 191.
 Force électromotrice efficace, 12.
 — — dans les bobines d'alternateurs, 26, 29.
- Force magnétomotrice des bobines, 147.
 Forces électromotrices dans l'organe mobile, 132, 140, 154.
 FOUCAULT, Courants de, 84.
 — Expériences sur un disque tournant, 84.
 Francfort, Exposition de, 116.
 — — Lauffen, Transport d'énergie entre, 30, 119.
 Fréquence, Nombre de pôles et Vitesse angulaire, 131, 217.
 FRIESE, 274.
 FRÖLICH [O.], 270.
- G**
- GAMBEY, Observation sur la boussole, 79.
 GANZ, Moteurs, 199.
 GENERAL ELECTRIC Co [E.-U.], Générateurs asynchrones, 47.
 Générateur, 2, 19.
 — élémentaire à courants alternatifs simples, 2.
 — Westinghouse à courants alternatifs simples, 4.
 Générateurs polyphasés, 19.
 — — à arbre vertical, 41.
 — — à réluctance variable 39, 197, 249.
 — — asynchrones, 47.
 — — Brown, 30, 39, 42, 47.
 — — Brush-Morley, 39.
 — — de Bellegarde, 42.
 — — de Bremgarten, 42.
 — — d'Hochfelden, 42.
 — — de Lauffen, 30.
 — — de Schönenwerd, 41.
 — — de Strasbourg, 47.
 — — du Niagara, 44.
 — — Gordon, 21.
 — — Gramme, 20.
 — — Lontin, 20.
 — — Oerlikon, 37, 38, 42.

- Générateurs polyphasés, Stanley, 39.
 — Type « Cloche », 42.
 — Westinghouse, 4, 38, 44.
 — Wynne, 22.
- Genèse des moteurs polyphasés, 95.
- GERALDY [F.], 262.
- Glissage, 153.
- Glissement, 153.
- GOERGES [H.], 24, 65, 262, 265, 270, 274, 276.
 — Cuivre employé par les divers systèmes, 65.
 — Egalisation de tensions, 250.
 — Puissance relative des machines, 24.
- GOOLDEN ET C^o, Moteur, 197.
- GORDON [J.-E.-H.], Alternateur diphasé, 21.
- GRAMME, Alternateur, 20.
 — Transformateur en anneau, 205.
- Groupement des conducteurs dans un organe mobile, 139 et suiv.
- Grues, Moteurs pour, 224, 239.
- GUILBERT, 270.
- GUTHRIE ET BOYS, 259.
 — Recherches sur les aimants tournants, 85.
- GUTMANN [L.], 261, 262, 270, 274.
- H
- HASELWANDER, Moteurs, 112.
- HEATHER, 265.
- Heilbronn, Eclairage électrique d', 30, 246.
- HEINRICHS, 262.
- HÉLIOS C^{ie}, Alterno-moteur simple, 180.
 — Moteurs, 103, 126.
 — Transformateurs, 209.
- Hellsjön, Installation d', 251.
- HERING [Carl], 262, 265.
- HERTZ [H.], Recherches sur les sphères tournantes, 83, 259.
- HERSCHEL (*voir* BABBAGE ET HERSCHEL).
 HEYLAND, 274.
- Hochfelden, Installation d', 42, 239.
- HOLZ [O.], 265.
 « Homologues », 140.
- HOPKINSON [John], 194.
- HORRY, 265.
- HOSPITALIER [E.], Professeur, 257, 262, 270, 274.
 — Machines polymorphiques, 210.
- HUTIN ET LEBLANC, 164, 262, 265, 270, 274.
 — Théorie de l'alternomoteur simple, 183.
 — Transformateur, 209.
- Hystérésis électrostatique, 108, 270.
 — Loi de l', 151.
- I
- Illustration mécanique de la transmission polyphasée, 93.
- IMHOFF, 254.
- Impédance, 16.
- Inductance, 3, 13.
- Inducteur, 19, 32.
 — (*voir* Organe fixe), 125.
- Induction dans les moteurs, 151.
 — maxima, 151.
- Induit (*voir* Organe mobile), 125.
 — fermé, 133.
- Intensité efficace, 12.
- J
- JACQUIN, 270, 271.
- JANET, 276.
- JOCHMANN, 83, 258.
- JULIUS, 276.
- JÜLLIG, 274.
- K
- KAPP [Gisbert], 257, 262.
 — « Machines à courants alternatifs », 11.

- KAPP [Gisbert], Rendement d'installation des moteurs, 229, 231, 237.
 — Théorie des moteurs, 156, 159.
 KELLY (*voir* STANLEY ET KELLY), 263, 266, 267.
 KENNEDY [Rankine], 260, 262, 265, 266, 270, 274.
 — Alterno-moteur, 260.
 KINGDON, 270.
 KITTLER, Expériences sur le transport Lauffen-Francfort, 123.
 Killwangen, Installation de, 239.
 KOLBEN [Emile], 270, 274.
 — Couple au démarrage, 224.
 — Tableaux de rendements, 230, 231.
 KOLLERT, 266.
 KORDA [D.], Transformateur, 206, 271.
 KRATZERT, 271.
 KRATZKART, 271.
- L
- LAHMEYER [W.], 274.
 — et C^{ie}, Machines, 117, 209, 249.
 Lampes à trois fils, 61.
 — Groupement de, 58.
 LANGDON-DAVIES, Moteur, 199.
 Largeur d'une bobine, 26, 28.
 — Coefficient de, 28, 29.
 Lauffen-Francfort, Transmission de, 119.
 — Générateurs triphasés de, 30.
 — Installation de, 246.
 LEBLANC (*voir* HUTIN ET LEBLANC).
 LEDEBOER, 266.
 LEGRAND [L.], 276.
 LEROUX, Expériences sur un disque de cuivre, 85.
 LINDLEY [W.-H.], Expériences sur le transport Lauffen-Francfort, 123.
 LONTIN, 20, 259.
 LUCAS [F.], 266.
- LUNT, 274.
- M
- « Magnétisme de rotation », 79.
 Manivelle, Mécanisme de la, 69, 183.
 MARSH, Expériences sur la boussole, 79.
 MARTIN [T.-C.], 112, 257.
 MASCART [E.], 271.
 MATTEUCCI, Expériences sur les rotations magnétiques, 83, 84.
 MAXWELL, Loi des courants périodiques, 16.
 MAY [O.], 262.
 MEISSNER, 266.
 MERSUON [R.-D.], 276.
 Mesure de la différence de phase, 270, 275.
 — de la puissance polyphasée, 212.
 MILLER [Oskar von], 246, 249, 266.
 — Montage de l'installation Lauffen-Francfort, 119.
 Modèle de transmission polyphasée, 93.
 MOLER, 274.
 Montage en étoile, Puissance dans le, 212, 214.
 — en triangle, Puissance dans le, 212, 213.
 Montages en étoile, 49.
 — en triangle, 49.
 MORDEY [W.-M.], Alterno-moteurs, 198.
 — Moteurs synchrones, 194.
 Moteur synchrone, 19.
 — — ou asynchrone, 232.
 — considéré comme transformateur tournant, 123.
 — Etude de construction, 215.
 — Rendement, 229.
 Moteurs, Alterno- divers, 193.
 — — polyphasés synchrones, 193.
 — — pour grues, 224, 239.
 — — simples, 163, 174.

- Moteurs, Alterno-simples, Courants dans l'organe mobile, 186, 187.
- — Démarrage, 177, 226.
 - synchrones, Auto-démarrage, 193.
 - Démarrage des, 223.
 - Poids des, 236, 237.
 - Qualités des, 223.
 - Structure des, 125.
 - Théorie analytique des, 166.
 - Théorie des, 152, 166.
 - Types modernes d', 238.
 - Vitesse angulaire des, 216, 229.
 - de l'Allgemeine Elek.-Ges., 244.
 - Atkinson, 197.
 - Baily, 95.
 - Borel, 102.
 - Bradley, 103.
 - Brown, Boveri et C^{ie}, 179, 239.
 - Coerper, 103.
 - Deprez, 98.
 - Dobrowolski, 115, 122.
 - Duncan, 198.
 - Ferranti et Wright, 196.
 - Ferraris, 99.
 - Ganz et C^{ie}, 199.
 - Haselwander, 112.
 - Hélios, 180.
 - Langdon-Davies, 199.
 - Mordey, 198.
 - Oerlikon, 178, 232, 234, 238.
 - Shallenberger, 196.
 - Tesla, 104 et suiv.
 - Thomson (EI), 195.
 - Wenström, 114.
 - Westinghouse, 245.
- N
- Niagara, Générateurs du, 44.
- NOBILI, Recherches sur les rotations magnétiques, 81.
- Noyaux des transformateurs polyphasés, 201, 203, 204.
- Disques de, 36, 132.
- O
- OERLIKON, Alterno-moteur simple, 178.
- Dispositif de démarrage, 224, 227.
 - Générateur triphasé, 37, 38, 42.
 - Liste des stations installées par, 251, 252.
 - Machines d', 118, 119.
- Œuf tournant dans un champ magnétique, 92.
- OLIVETTI, 271.
- Organe fixe, Définition, 127.
- Epaisseur radiale, 151.
 - Etude, 135, 215.
 - Structure, 127, 145.
 - mobile expérimental, 135.
 - — Définition, 127.
 - — Enroulement, 139.
 - — Etude, 215.
 - — Formes diverses, 137.
 - — Structure, 127, 132.
- P
- PACCAUD ET BOREL, Compteur, 102.
- Pantin, Installation de, 236, 244.
- PATTEN, 259, 260, 266, 275.
- « Parapluie », Type de machine en, (voir « Cloche »), 42.
- Pas, 7.
- polaire, 7.
- Période, 8.
- Périodicité (voir Fréquence).
- PERRIN, 262.
- PERRY [N.-W.], 276.
- Perte de puissance dans l'organe
- — fixe, 155.
 - — mobile, 153.
- Phase, 9, 21.

- Phase, Création de discordance de
100, 111, 177, 199, 226.
— Différence de, 222, 223.
— — des courants d'organes
fixe et mobile, 157,
159, 160, 172.
— — Mesure de la, 270, 275.
— Transformation de, 204.
Phases de courants combinés, 36.
— intermédiaires, 116.
PICOU [R.-V.], 194, 258.
Pittsfield, Installation de, 251.
Poids de moteurs, 236, 237.
POISSON, sur le Magnétisme de rota-
tion, 80.
Pôles, Nombre de — sur un moteur,
217.
Polyphasés, Générateurs, 19.
— Systèmes —, Modes de con-
nexions des, 49 et suiv.
Ponemah, Installation de, 195.
POTIER [A.], 275.
— Théorie des moteurs, 166.
PRÉVOST, Expériences sur les rota-
tions magnétiques, 81.
Primaire et secondaire, Circuits,
125, 127.
Progression du champ, 147.
Propriétés des champs magnétiques
tournants, 78.
Puissance apparente, 18.
— polyphasée, 212.
— vraie, 18.
PULJ J., 271.
PUPIN M.-I., 262, 275.
- Q
- Quadrature, 23.
Qualités mécaniques des moteurs,
223.
Quart de période, 22.
- R
- Réaction, 13, 15.
— Bobines de, 18, 211, 250.
- REBER, 163, 275.
RECHNIEWSKI, 262, 266, 271.
RECKENZAUN [A.], 266, 271.
Régulation des circuits triphasés,
247, 250.
Réductance variable, Générateurs à,
39, 197, 249.
Rendement de l'installation de Lauf-
fen, 35, 36.
— de l'organe mobile, 153, 171.
— — — Diagramme
de, 155.
— des moteurs, 229.
— du transport Lauffen-Franc-
fort, 122, 123.
Répulsion d'un conducteur dans un
champ alternatif, 170.
Résistance dans l'organe mobile,
Effet de la, 223.
— — Introduction de,
143, 160, 224.
Résistances liquides, 224, 250.
Résultant, Flux magnétique, 132,
156, 166.
Résultante de plusieurs champs ma-
gnétiques, 66.
Retard (*voir* Décalage).
— de polarisation, 196.
Retour commun, Emploi du, 203.
RHODES, 194.
RIES, 271.
Richard [G.], 260.
RODET ET BUSQUET, 58, 258.
Rotation d'un conducteur dans un
champ alternatif, 176, 177.
— d'un œuf dans un champ ma-
gnétique, 92.
— elliptique, 70.
Rotor (*voir* Organe mobile).
ROTTEN, 266.
RUSSELL, 271.
RYAN (*voir* BEDELL ET RYAN).
- S
- SAHULKA [Dr J.], 163, 258, 262, 263,
266, 271.

- Saint-Etienne, Installation de, 239, 252.
- Scalaire, Valeur —, ou relative, 77.
- SHALLENBERGER, Compteur polyphasé, 214.
- Moteur, 197.
- SCHILLING, 267.
- Schlussanker (Induit fermé), 133.
- SCHMIDT [A.], 267.
- Schönenwerd, Installation de, 41, 243.
- SCHUCKERT, 267.
- SCHUCKERT ET C^{ie}, Machines, 117.
- Transformateurs, 204, 209.
- SCOTT [C.-F.], 271, 275, 276.
- Transformateur di-et triphasé, 205.
- Secondaire, Enroulement — d'un moteur, 125.
- Secondaires, Bobines — d'un transformateur, 200, 204.
- SEEBECK, Recherches sur les rotations magnétiques, 81.
- Self-induction, Effet de la, 3.
- Emploi de la — pour création de discordance de phases, 100, 111, 172.
- SELLERS [Coleman], Générateurs du Niagara, 44.
- Sens des courants induits, 5, 132.
- Série, Conducteurs en, 140.
- SIEMENS ET HALSKE, 267.
- Machines de Francfort, 118.
- Station de Chemnitz, 248.
- Transformateurs, 202.
- Sinusoidal, Flux, 150.
- Sinusoïde, 8 à 14.
- Courbe s'écartant d'une, 75.
- Sinusoïdes, Combinaisons de, 77.
- SMITH [Willoughby], 259.
- Recherches sur les disques métalliques tournants, 85.
- SNELL [A.-T.], 258, 271, 272.
- STANLEY, 263, 267.
- STANLEY, Générateur diphasé, 39.
- STANLEY-KELLY, Moteurs, 197, 267.
- Stations centrales à courants polyphasés, 246.
- Stator (*voir* Organe fixe).
- STEELS, 276.
- STEINMETZ [C.-P.], 194, 267, 275, 276.
- sur l'Hystérésis, 151.
- Système monocyclique, 251.
- Théorie des moteurs, 163.
- STORT, 263.
- Strasbourg, Station de, 249.
- STUART-SMITH, 275.
- STURGEON [W.], Expérience sur un disque tournant, 80, 83, 258.
- SWINBURNE, [J.], 259.
- Synchrone, Moteur, 19, 193.
- et Moteur asynchrone, 232.
- Synchrones, Moteurs polyphasés, 193.
- Synchronisme et asynchronisme, 126, 232.
- Système déphasé à trois fils, 254.
- monocyclique, 251.

T

- TESLA [Nikola], 259, 260, 263, 267.
- Brevets, 104, 112.
- Epreuves, 236.
- Etudes d'organes mobiles, 137, 138.
- Moteurs de la Westinghouse C^o, 245.
- Recherches, 104 et suiv.
- Transformateur, 209.
- Théorie analytique des moteurs, 166.
- de l'alternomoteur simple, 180.
- de l'expérience de Thomson, 176.
- des moteurs polyphasés, 152, 166.
- THOMPSON [S.-P.] 2, 194, 205, 254.

THOMSON [Elihu], 259, 260, 272.
 — Expérience de, 175.
 — Moteur de, 177, 193.
 THOMSON [S.], 260.
 Tramways de Dublin, 210.
 Transformateur, 209.
 . — . à anneau Gramme, 205.
 — decourant alternatif simple en di- ou triphasé, 206.
 — de courant continu en triphasé, 89.
 — de courant tri- en diphasé, 204, 205.
 — de Dobrowolski, 116.
 — tournant, 207.
 — — , Moteur résumé en, 125, 154, 156.
 Transformation de courant continu en alternatif, 207.
 Triangle (*voir* Montage).
 Triphasé, Economie de cuivre dans le système, 61.
 Triphasée, Puissance, 213.
 Triphasés, Générateurs, 24, 30, 246.
 — Systèmes, Modes de connexions, 49.
 . — Transformateurs, 200.
 Trois fils, Système à — avec différence de phase, 253.
 Trous dans les disques de noyaux, 36, 40, 131, 135, 220.
 Turbines pour raffineries, 245.

V

Variation du champ magnétique, 149, 150.
 Vecteurs alternatifs et tournants, 183.
 — Système des, 76.

Vecteurs tournant en sens inverses, 185.
 Verticaux, Générateurs, 41.
 Vitesse angulaire, 152.
 — — Constance de la, 229.
 — — d'un moteur, 216.
 — périphérique, tangentielle ou linéaire, 216.

W

WAHLSTRÖM, 267, 272.
 WALKER [G.-T.], 176.
 Wangen, Installation de, 239.
 Wattmètres, 214.
 WEBER [H.-F.], Rapport sur le transport Lauffen-Francfort, 120, 122.
 WEILER, 267.
 WEINHOLD [A.], Appareil de cours, 267, 276.
 WENSTRÖM, 251.
 — Moteurs, 114.
 WESTINGHOUSE, Alternateur simple, 4.
 — — diphasé, 38, 255.
 WESTON [A.-H.], 263.
 WEYHER ET RICHEMOND, Installation, 236, 244.
 WHITWELL [A.], 276.
 WILSON, Moteur, 114.
 WINAND, 267.
 WRIGHT ET FERRANTI, Moteur, 196.
 WRIGHTMAN [M.-J.], 260.
 WYNNE [Frank], Système polyphasé, 22.

Y

YOREL, 267.

Z

ZEUNER, Diagramme de, 11.
 ZICKERMANN [F.], 263.

ERRATA

PAGES	LIGNES	DU	AU LIEU DE	LIRE
30	22	haut	+ 20 P.OQ cos φ	+ 2 OP. OQ cos φ
59	6	—	(Fig. 63),	(Fig. 63)
111	8	—	Tesla, n'a pas	Tesla n'a pas
120	Fig. 103		FRANKFORT	FRANCFORT
141	1	—	voisin	correspondant
197, 214, 288		diverses	Shallenberger	Schallenberger
219	24	—	(cm)	(cm)
233	1	bas	c'est comme si l'on soutenait	ce serait vouloir soutenir
269	3	haut	BOISSONAS	BOISSONNAS
280	6	bas	268	269
287	1	—	266	267
	partout		Dobrowolski	Dobrowolsky

CATALOGUE DE LIVRES
SUR
L'ÉLECTRICITÉ ET LES MACHINES

PUBLIÉS PAR
LA LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE, BAUDRY ET C^{ie}
15, RUE DES SAINTS-PÈRES, A PARIS

Le catalogue complet est envoyé franco sur demande.

ÉLECTRICITÉ

Accumulateur voltaïque (L').

Traité élémentaire de l'accumulateur voltaïque, par ÉMILE REYNIER.
1 volume grand in-8° avec 62 gravures dans le texte et un portrait de
M. Gaston Planté. 6 fr.

Accumulateurs électriques.

Étude sur les accumulateurs Peyrusson. Ce mémoire a paru dans la
livraison d'octobre 1893 du *Portefeuille des Machines*. Prix de la livraison.
2 fr.

Accumulateurs électriques.

Recherches théoriques et pratiques sur les accumulateurs électriques,
par RENÉ TAMINE. 1 volume grand in-8° avec gravures dans le texte. 7 fr. 50

Aide-mémoire de poche de l'électricien.

Aide-mémoire de poche de l'électricien ; guide pratique à l'usage des
ingénieurs, monteurs, amateurs électriciens, etc., par PH. PICARD et
A. DAVID, ingénieurs des arts et manufactures. 1 petit volume, format
oblong de 0^m,125 — 0^m,08, relié en maroquin, tranches dorées. . 5 fr.

Année électrique (L').

L'année électrique, ou Exposé annuel des travaux scientifiques, des
inventions et des principales applications de l'électricité à l'industrie et
aux arts, par PH. DELAHAYE. 8 volumes in-12 (1885 à 1892) : Prix de
chaque volume. 3 fr. 50

C^hemins de fer et tramways électriques.

N. B. — Les études suivantes ont paru dans le *Portefeuille des
Machines* et se vendent avec les livraisons qui les renferment au prix de
2 fr. la livraison.

Tramcar électrique fonctionnant par accumulateurs. Livraison d'octobre 1888.	2 fr.
Tramway électrique de Clermont-Ferrand, système Thury, avec 1 planche. Livraison de novembre 1890.	2 fr.
Tramway électrique de Marseille, avec 1 planche. Livraison de novembre 1893.	2 fr.
Chemin de fer électrique du Salève. Livraison de décembre 1894.	2 fr.
Chemin de fer électro-funiculaire de Burgenstock. Livraisons de juin et juillet 1895.	4 fr.
Etude sur les tramways électriques. Livraisons d'octobre, de novembre 1895 et de janvier 1896.	6 fr.

Contrôle des installations électriques.

Contrôle des installations électriques au point de vue de la sécurité. Le courant électrique, production et distribution de l'énergie, mesures, effets dangereux des courants, contrôle à l'usine, contrôle du réseau, des installations intérieures et des installations spéciales, résultats d'exploitation, règlements français et étrangers, par A. MONMERQUÉ, ingénieur en chef des ponts et chaussées, ancien ingénieur des services de la première section des travaux de Paris et du secteur municipal d'électricité, précédé d'une préface de M. HIPPOLYTE FONTAINE, président honoraire de la chambre syndicale des électriciens. 1 volume in-8°, avec de nombreuses figures dans le texte, relié. 10 fr.

Courants alternatifs d'électricité (Les).

Les courants alternatifs d'électricité, par T. H. BLAKESLEY, professeur au Royal Naval College de Greenwich, traduit sur la 3^e édition anglaise et augmenté d'un appendice, par W. C. RECHNIEWSKI. 1 volume in-12, avec figures dans le texte, relié. 7 fr. 50.

Courants triphasés.

Applications et avantages des machines électriques à courants triphasés. Ce mémoire a paru dans la livraison de décembre 1895 du *Portefeuille des machines*. Prix de la livraison 2 fr.

Éclairage à Paris (L').

L'éclairage à Paris. Etude technique des divers modes d'éclairage employés à Paris sur la voie publique, dans les promenades et jardins, dans les monuments, les gares, les théâtres, les grands magasins, etc., et dans les maisons particulières. — Gaz, électricité, pétrole, huiles, etc.; usines et stations centrales, canalisations et appareils d'éclairage; organisation administrative et commerciale, rapports des compagnies avec la ville; traités et conventions; calcul de l'éclairage des voies publiques; prix de revient, par HENRI MARÉCHAL, ingénieur des ponts et chaussées et du service municipal de la ville de Paris. 1 volume grand in-8°, avec 221 figures dans le texte, relié. 20 fr.

Éclairage électrique.

Éclairage à l'électricité. Renseignements pratiques par HIPPOLYTE FONTAINE. 3^e édition entièrement refondue. 1 volume grand in-8^o, avec 326 figures dans le texte *Épuisé.*

Éclairage électrique.

Éclairage électrique de l'Exposition universelle de 1889. Monographie des travaux exécutés par le syndicat international des électriciens, par HIPPOLYTE FONTAINE. 1 volume in-4^o avec 29 planches tirées à part et 32 gravures dans le texte, relié. 25 fr.

Éclairage électrique.

Manuel pratique d'éclairage électrique pour installations particulières, maisons d'habitation, usines, salles de réunion, etc., par EMILE CAHEN, ingénieur des ateliers de construction des manufactures de l'Etat, 2^e édition. 1 vol. in-12 avec de nombreuses figures dans le texte, relié. . . 7 fr. 50

Éclairage électrique.

N. B. — Les mémoires ci-dessous ont paru dans le *Portefeuille des machines* et se vendent avec la livraison qui les renferme, au prix de 2 fr. la livraison.

Locomotive électrique de Gramme destinée à l'éclairage à distance pour la défense des places, avec 1 planche. Livraison de juillet 1878. 2 fr.

Éclairage électrique de la Gran Plaza de Toros du Bois de Boulogne à Paris, avec 1 planche. Livraison de mars 1891 2 fr.

Usine municipale d'électricité des Halles centrales à Paris, avec 3 planches. Livraisons de juillet et d'août 1891 4 fr.

Éclairage électrique de Saint-Pancras, station de Regent's Park, à Londres, avec 1 planche. Livraison de septembre 1892 2 fr.

Éclairage électrique.

Etude pratique sur l'éclairage électrique des gares de chemins de fer, ports, usines, chantiers et établissements industriels par GEORGES DUMONT, avec la collaboration de GUSTAVE BAIGNIÈRES. 1 volume grand in-8^o, avec 2 planches. 5 fr.

Électricité.

Manuel élémentaire d'électricité, par FLEEMING JENKIN, professeur à l'Université d'Edimbourg; traduit de l'anglais par N. DE TÉDESCO. 1 volume in-12, avec 32 gravures 2 fr.

Électricité industrielle.

Traité pratique d'électricité industrielle. Unités et mesures; piles et machines électriques; éclairage électrique; transmission électrique de la force; galvanoplastie et électro-métallurgie; téléphonie, par E. CADAT et L. DUBOST. 5^e édition. 1 volume grand in-8^o, avec 257 gravures dans le texte, relié 16 fr. 50

Électrolyse.

Électrolyse ; renseignements pratiques sur le nickelage, le cuivrage, la dorure, l'argenture, l'affinage des métaux et le traitement des minerais au moyen de l'électricité, par HIPPOLYTE FONTAINE. 2^e édition. 1 volume grand in-8°, avec gravures dans le texte, relié. 15 fr.

Électrolyse.

Étude sur le raffinage électrolytique du cuivre noir, par HUGON. 1 brochure grand in-8° 1 fr. 50

Machines dynamo-électriques.

Traité théorique et pratique des machines dynamo-électriques, par R.-V. PICOU, ingénieur des arts et manufactures. 1 volume grand in-8°, avec 198 figurés dans le texte. 12 fr. 50

Machines dynamo-électriques.

Dynamo-volant, système Patin (120 000 watts) accouplée sur un moteur Boyer, avec 2 planches. Ce mémoire a paru dans la livraison d'août 1893 du *Portefeuille des machines*. Prix de la livraison. 2 fr.

Machines dynamo-électriques.

Traité théorique et pratique des machines dynamo-électriques, par SILVANUS THOMPSON, traduit par E. BOISTEL. 2^e édition. 1 volume grand in-8° avec 558 gravures dans le texte, relié. 30 fr.

Machines dynamo-électriques.

La machine dynamo-électrique, par FRÆLICH, traduit de l'allemand par E. BOISTEL. 1 volume grand in-8° avec 62 figures dans le texte . . 10 fr.

Manuel pratique de l'électricien.

Manuel pratique de l'électricien. Guide pour le montage et l'entretien des installations électriques, par E. CADIAT. 2^e édition. 1 volume in-12 avec 229 figures dans le texte, relié. 7 fr. 50

Moteurs électriques à champ magnétique tournant (Les).

Les moteurs électriques à champ magnétique tournant, par R.-V. PICOU, *Supplément au Traité des machines dynamo-électriques du même auteur*. 1 brochure grand in-8° avec figures dans le texte 1 fr. 50

Pile électrique.

Traité élémentaire de la pile électrique, par ALFRED NIAUDET, 3^e édition revue par HIPPOLYTE FONTAINE et suivie d'une notice sur les accumulateurs par E. HOSPITALIER. 1 volume grand in-8°, avec gravures dans le texte. 7 fr. 50

Problèmes sur l'électricité.

Problèmes sur l'électricité. Recueil gradué comprenant toutes les parties de la science électrique, par le D^r ROBERT WEBER, professeur à l'Académie de Neuchâtel. 2^e édition. 1 volume in-12, avec figures dans le texte. . 6 fr.

Télégraphie électrique.

Traité de télégraphie électrique. — Production du courant électrique. — Organes de réception. — Premiers appareils. — Appareils Morse. — Appareils accessoires. — Installation des postes. — Propriétés électriques des lignes. — Lois de la propagation du courant. — Essais électriques, recherches des dérangements. — Appareils de translation, de décharge et de compensation. — Description des principaux appareils et des différents systèmes de transmission. — Etablissement des lignes aériennes, souterraines et sous-marines, par H. THOMAS, ingénieur des télégraphes. 1 volume grand in-8° avec 702 figures dans le texte, relié 25 fr.

Télégraphie pneumatique.

Télégraphie pneumatique. Installation de la Bourse de Paris, avec 2 planches. Ce mémoire a paru dans la livraison d'avril 1877 du *Porte-feuille des machines*. Prix de la livraison 2 fr.

Télégraphie sous-marine.

Traité de télégraphie sous-marine. — Historique. — Composition et fabrication des câbles télégraphiques. — Immersion et réparation des câbles sous-marins. — Essais électriques. — Recherche des défauts. — Transmissions des signaux. — Exploitation des lignes sous-marines, par WUNSCHENDORFF, ingénieur des télégraphes. 1 volume grand in-8°, avec 460 gravures dans le texte 40 fr.

Téléphone (Le).

Le Téléphone, par WILLIAM-HENRI PREECE, électricien en chef du *British Post-Office*, et JULIUS MAIER, docteur ès-sciences physiques. 1 volume grand in-8° avec 290 gravures dans le texte 15 fr.

Théorie de l'électricité.

Théorie de l'électricité. Exposé des phénomènes électriques et magnétiques fondé uniquement sur l'expérience et le raisonnement, par A. VASCHY, ingénieur des télégraphes, examinateur d'entrée à l'Ecole polytechnique. 1 volume grand in-8°, avec 74 figures dans le texte, relié. 20 fr.

Traité d'électricité et de magnétisme.

Traité d'électricité et de magnétisme. Théorie et applications, instruments et méthode de mesure électrique. Cours professé à l'école supérieure de télégraphie, par A. VASCHY, ingénieur des télégraphes, examinateur d'entrée à l'Ecole polytechnique. 2 volumes grand in-8° avec de nombreuses figures dans le texte 25 fr.

Traité pratique d'électricité.

Traité pratique d'électricité à l'usage des ingénieurs et constructeurs. Théorie mécanique du magnétisme et de l'électricité, mesures électriques, piles, accumulateurs et machines électrostatiques, machines dynamo-électriques génératrices, transport, distribution et transformation de l'énergie électrique, utilisation de l'énergie électrique, par FÉLIX LUCAS, ingénieur en chef des ponts et chaussées, administrateur des chemins de fer de l'Etat. 1 volume grand in-8° avec 278 figures dans le texte. 15 fr.

Tirage des mines par l'électricité.

Le tirage des mines par l'électricité, par PAUL-F. CHALON, ingénieur des arts et manufactures. 1 volume in-18 jésus, avec 90 figures dans le texte, relié 7 fr. 50

Voltamètres régulateurs (Les).

Les voltamètres-régulateurs zinc-plomb. Renseignements pratiques sur l'emploi de ces appareils, leur combinaison avec les dynamos et les circuits d'éclairage, par ÉMILE REYNIER. 1 brochure in-8° avec gravures et schémas d'installation 1 fr. 25

MÉCANIQUE ET MACHINES

A B C du chauffeur (L').

L'A B C du chauffeur, par HENRI MATHIEU, contrôleur des mines, officier de l'instruction publique, avec une introduction par C. WALCKENAEER, ingénieur des mines. 1 volume format 0^m,15 × 0^m,10, avec 66 figures dans le texte, relié. 3 fr.

Aide-mémoire de l'ingénieur.

Aide-mémoire de l'ingénieur. Mathématiques, mécanique, physique et chimie, résistance des matériaux, statique des constructions, éléments des machines, machines motrices, constructions navales, chemins de fer, machines-outils, machines élévatoires, technologie, métallurgie du fer, constructions civiles, législation industrielle. Troisième édition française du Manuel de la Société « Hütte », par PHILIPPE HUGUENIN. 1 beau volume contenant plus de 1200 pages, avec 500 figures dans le texte, solidement relié en maroquin. 15 fr.

Air comprimé.

Traité élémentaire de l'air comprimé, par JOSEPH COSTA, ingénieur civil, ancien élève de l'École polytechnique. 1 volume grand in-8°, avec 20 figures dans le texte. 5 fr.

Chaudières à vapeur.

Traité pratique des chaudières à vapeur employées dans les manufactures, par DENFER, chef des travaux graphiques à l'École centrale des arts et manufactures. 1 volume grand in-4°, accompagné de 81 planches cotées et en couleur. 50 fr.

Construction des machines à vapeur.

Traité pratique de la construction des machines à vapeur fixes et marines. Résumé des connaissances actuellement acquises sur les machines à vapeur, considérations relatives au type de machine et aux proportions à adopter, détermination des dimensions et des proportions des principaux organes, étude et construction de ces organes, par MAURICE DEMOULIN, ingénieur des arts et manufactures. 1 volume grand in-8°, avec 483 figures dans le texte, relié. 20 fr.

Essais de machines et de chaudières à vapeur.

Manuel pratique des essais de machines et chaudières à vapeur, par ROBERT H. THURSTON, directeur du « Sibley College » Cornell University, ancien président de l'« American Society of Mechanical Engineers », ancien ingénieur de la marine aux Etats-Unis, traduit de l'anglais par AUGUSTE ROUSSEL, ancien élève de l'Ecole polytechnique et de l'Ecole nationale supérieure des mines. 1 volume grand in-8°, avec de nombreuses figures dans le texte, relié 25 fr.

Locomotives.

La machine-locomotive. Manuel pratique donnant la description des organes et du fonctionnement de la locomotive, à l'usage des mécaniciens et des chauffeurs, par SAUVAGE, ingénieur en chef adjoint du Matériel et de la Traction de la C^{ie} de l'Est. 1 volume in-8°, avec 284 figures dans le texte, relié. 5 fr.

Machines à vapeur.

Traité théorique et pratique des machines à vapeur au point de vue de la distribution. — Méthode générale des gabarits, permettant d'établir des épures approchées ou exactes de tous les types de machines. — Etude méthodique des principales distributions au double point de vue de leur fonctionnement et de leur construction, par COSTE et MANIQUET. 2^e édition. 1 volume grand in-8° contenant 53 figures intercalées dans le texte et 1 atlas grand in-4° de 46 planches de dessins exactement réduits à l'échelle et cotés 25 fr.

Machines-outils.

Traité des machines-outils. Tours, alésoirs, raboteuses, mortaiseuses, étaux-limeurs, raineuses, perceuses, fraiseuses, machines à tailler les roues, meules, taraudeuses, machines à vis, machines spéciales, machines combinées, petit outillage, par GUSTAVE RICHARD, ingénieur civil des mines, membre honoraire du Conseil et agent général de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale. 2 volumes grand in-4°, avec plus de 6 000 figures dans le texte, reliés. 150 fr.

Manuel du chauffeur-mécanicien.

Manuel du chauffeur-mécanicien et du propriétaire d'appareils à vapeur, par HENRI MATHIEU, contrôleur des mines, inspecteur des appareils à vapeur de la Seine, professeur au syndicat général des chauffeurs-mécaniciens. 1 volume grand in-8°, avec 409 figures dans le texte. 16 fr.

Mécanique appliquée.

Cours élémentaire de mécanique appliquée, à l'usage des écoles primaires supérieures, des écoles professionnelles, des écoles d'apprentissage, des écoles industrielles, des cours techniques et des ouvriers, par BOCQUET, ingénieur, directeur de l'Ecole Diderot. 2^e édition. 1 volume in-12, relié. 5 fr.

Moteurs à gaz.

Traité théorique et pratique des moteurs à gaz, gaz de houille, gaz pauvres, air carburé (pétroles), et de leurs applications diverses à l'industrie, la locomotion et la navigation, contenant des détails sur l'installation et l'entretien des moteurs à gaz et suivi d'un tableau résumé de l'industrie du pétrole, par GUSTAVE CHAUVEAU, ingénieur civil, lauréat de la Société technique de l'industrie du gaz en France. 1 volume grand in-8°. avec de nombreuses gravures dans le texte 15 fr.

Physique.

Physique, par GABRIEL, ingénieur en chef des ponts et chaussées, professeur de physique à la Faculté de médecine et à l'École nationale des ponts et chaussées. 2 volumes grand in-8°, avec de nombreuses gravures dans le texte. 20 fr.

Portefeuille des Machines.

Portefeuille économique des machines, de l'outillage et du matériel, relatifs à la construction, à l'industrie, aux chemins de fer, aux routes, aux mines, à la navigation, à l'électricité, etc., contenant un choix des objets les plus intéressants des expositions industrielles; fondé par OPPERMANN. 12 livraisons par an formant un beau volume de 50 à 60 planches et 200 colonnes de texte. Abonnements : Paris, 15 fr. — Départements et Belgique, 18 fr. — Union postale 20 fr.

Prix de l'année parue, reliée 20 fr.

La 3^e série a commencé à paraître en 1876.

Traité de la machine à vapeur.

Traité de la machine à vapeur. Description des principaux types et théorie; étude, construction, conduite et applications, par ROBERT-H. THURSTON, directeur du « Sibley College » Cornell University, ancien président de l'« American Society of Mechanical Engineers », traduit de l'anglais et annoté par MAURICE DEMOULIN. 2 volumes grand in-8°, avec de nombreuses figures dans le texte, relié. 60 fr.

Traité des chaudières à vapeur.

Traité des chaudières à vapeur. Etude sur la vaporisation dans les appareils industriels, par CHARLES BELLENS, ingénieur. 1 volume grand in-8°, avec 215 figures dans le texte. 20 fr.