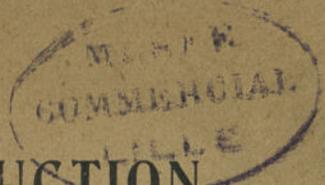


9
7°55H



LA CONSTRUCTION

DES

BOBINAGES ÉLECTRIQUES

AIDE-MÉMOIRE DU BOBINIER

PAR

C. CLÉMENT

ÉLECTRICIEN
CHEF DE BUREAU D'ÉTUDES

PARIS



92, RUE BONAPARTE (VI)

1923

Tous droits de reproduction, de traduction et d'adaptation réservés pour tous pays
Copr. by Dunod 1923.

2°/640 7Y. 1. 24
Paris 48

LA BAKÉLITE

SOCIÉTÉ ANONYME AU CAPITAL DE 1 400 000 FRANCS

USINES ET LABORATOIRES
à Montreuil (Seine)
à Brébières (P.-de-C.)

CODES { A. B. C. 5°
LIEBER
A. Z.

SIÈGE SOCIAL
3, Rue des Italiens
PARIS

TÉLÉPHONE: CENTRAL 39-29
ADRESSE TÉLÉGR.:
LABAKELIAL-PARIS

Fabrication de la Bakélite
par les procédés du Docteur BAEKELAND.

BAKÉLITE A. en morceaux, pour tous usages
dans l'industrie électrique.

VERNIS BAKÉLITE pour l'imprégnation des
enroulements électriques
dans les transformateurs, moteurs, etc...

VERNIS BAKÉLITE pour la fabrication du
papier bakérisé en tubes
ou en plaques et bois contreplaqués.

VERNIS BAKÉLITE pour métaux, laquage
de l'ébonite, etc...

POUDRES A MOULER à base de bakélite,
pour la fabrication
des pièces moulées pour l'appareillage électrique.

BAKÉLITE LIQUIDE pour la fabrication
des meules, le revê-
tement d'appareils destinés à l'industrie chimique.

Manufacture de Rubans, Tresses et Lacets

ALBERT GALLANT

Usines

ROUBAIX - BERNAY-DE-L'EURE - SAINT-ÉTIENNE

**RUBANS ISOLANTS POUR L'ÉLECTRICITÉ
JACONAS - SERGES - TUBULAIRES**

Provisoirement adresser la correspondance à Bernay-de-l'Eure.

Représentant M. J. COMEAU, 177, Avenue Gambetta, PARIS, XX^e.

Téléphone : ROQUETTE 11-84

R. G. Roubaix 10057.

TISSAGE DE RUBANS EN TOUS GENRES

== ÉTABLISSEMENTS ==

CAMILLE MASSELIN

Bernay-de-l'Eure

== Rubans pour l'Électricité ==

Serges — Jaconas — Tubulaires

Représentant M. Louis MACRÉ, 17, Rue de Sévigné, PARIS, IV^e.

Téléphone : ARCHIVES 24-85.

ÉTABLISSEMENTS INDUSTRIELS, de E. C. et ALEXANDRE

GRAMMONT

SOCIÉTÉ ANONYME AU CAPITAL DE 40 000 000 FRANCS

Siège social et Services commerciaux : 10, Rue d'Uzès, PARIS

Usines à : Pont-de-Cheruy, Crémieux, La Plaine-Chavanoz, Lyon

FILS et CABLES ÉLECTRIQUES nus et isolés
pour toutes TENSIONS et toutes APPLICATIONS

ÉTIRAGE - LAMINAGE - TRÉFILIERIE
LAMES pour COLLECTEURS

AGENCES à :

LYON - TOULOUSE - MARSEILLE - GRENOBLE - NANTES
BORDEAUX - LILLE - LIMOGES - NANCY - ALGER

POUR VOS BOBINAGES !!

EMPLOYEZ NOS MACHINES

VOUS ÉCONOMISEREZ DU TEMPS ET DE L'ARGENT

MATÉRIEL SÉCUR. SUPPRIMANT L'EMPLOI DES FORMES

Machines à bobiner et à gabarier les sections d'induits.

Enrubanneuses { pour sections d'induits,
pour petits inducteurs et autres petites bobines.

MACHINE CHAPMAN, POUR BOBINAGE AUTOMATIQUE DE PETITS INDUITS.

BOBINEUSES AUTOMATIQUES { pour galettes de T. S. F., en fils croisés (nids d'abeilles, fonds de panier).
pour bobines d'induction, en fils rangés (avec trame isolante en coton).
pour bobines de haute tension (avec papier entre couches).
LEESONA { pour grosses bobines d'induction (fil à fil, avec ou sans carcasse).

MATÉRIEL PEERLESS

Gros TOURS UNIVERSELS à contre-pointe, avec plateau formant tour en l'air,
spéciaux pour l'électricité.

FILS ÉMAILLÉS

BELDEN
Chicago (U. S. A.)

FILS DE RÉSISTANCE

ISOLANTS de toute nature (toiles, soies, papiers, etc.).

Télégrammes :

LEOMESINES-PARIS

L. MESSINESI

CONCESSIONNAIRE

125, Avenue des Champs-Élysées

PARIS-8^e

Téléphone :

ÉLYSÉES { 66-28
66-29

MANUFACTURE DE FILS ET CABLES
pour l'Électricité

R. ALLIOT, ROL & C^{ie}

BUREAUX ET MAGASINS :

38, Rue de Reuilly, 38 — PARIS (12^e)

ADRESSE TÉLÉGR. :
Racable-Paris



TÉLÉPHONE :
Diderot 06-43

FILS ET CABLES ISOLÉS pour Installations
FILS DE BOBINAGE SOUS SOIE ET COTON
CORDONS TÉLÉPHONIQUES, etc.

Usines à PARIS et BOHAIN (Aisne)

Registre du Commerce n° 33784-Seine.

AIMCO

REG. U.S. PAT. OFF.

Toutes machines pour la fabrication de fils sous émail,
coton, soie, ruban, caoutchouc et amiante.

Vernis et Emaux Isolants "SCHENECTADY"

Machines "ACE" pour l'enroulement
et le façonnage des induits de moteurs.

AMERICAN INSULATING MACHINERY
8, rue Auguste-Chabrières
= PARIS (XV^e) =
COMPANY



LA CONSTRUCTION DES BOBINAGES ÉLECTRIQUES

AIDE-MÉMOIRE DU BOBINIER

PRIX NET SANS MAJORATION

Broché : 16 francs; Reliure : 3 fr. 50 en sus.

E.-EI.

OUVRAGES CONSULTÉS :

- A. PAQUET et C. DOCQUIER. — *L'Électrotechnique exposée à l'aide des mathématiques élémentaires.*
- C. LEBOS. — *Cours élémentaire d'électricité industrielle.*
- P. JANET. — *Leçons d'électrotechnique générale.*
- E. ARNOLD. — *Les machines dynamos à courant continu.*
- H. HOBART. — *Les machines dynamos électriques à grandes vitesses*
- E. BAUDRAN. — *Transformateurs.*
-

N° Bib 388587/-165095

LA CONSTRUCTION
DES
BOBINAGES ÉLECTRIQUES

AIDE-MÉMOIRE DU BOBINIER

PAR

C. CLÉMENT

ÉLECTRICIEN
CHEF DE BUREAU D'ÉTUDES

PARIS



92, RUE BONAPARTE (VI)

1923

Tous droits de reproduction, de traduction et d'adaptation réservés pour tous pays
Copr. by Dunod 1923.



PRÉFACE

Cet ouvrage s'adresse aux praticiens, dessinateurs et bobiniers.

Dans un bureau d'études, on doit déterminer à l'avance l'encombrement, aussi exact que possible, pris par le bobinage. Cette détermination est nécessaire pour prévoir une place suffisante au montage de tous les organes, tout en ayant une machine aussi peu encombrante que possible.

A l'atelier où règne encore la routine, il serait utile que l'exécution des enroulements soit faite selon les règles de bobinage et que soit généralisé l'emploi des machines spéciales à confectionner les sections, et à les enrubanner.

La majorité des jeunes gens sortis des grandes écoles ne cherchent pas leur avenir dans la partie technique, pour laquelle cependant, ils ont reçu leur instruction. Ils s'orientent vers la partie commerciale ou administrative, qui leur permet d'arriver plus vite à une situation correspondant à leurs aspirations.

On est donc réduit à recruter le personnel des bureaux d'études parmi l'élite des écoles primaires, primaires supérieures ou professionnelles. Ces élèves dont l'instruction technique se limite à la géométrie, l'algèbre élémentaire et quelques notions de trigonométrie, sont obligés de se parfaire eux-mêmes dans la branche de l'industrie qu'ils ont choisie.

La littérature actuelle offre peu d'ouvrages où l'on ne rencontre pas de calcul différentiel et intégral. En électrotechnique spéciale-

ment toutes les publications sont au-dessus de la compréhension de la plupart des dessinateurs ; elles sont en outre d'une généralité telle, qu'elles ne répondent pas à l'emploi pratique dans un bureau d'études ou à l'atelier.

Les dimensions de fer et le bobinage sont calculées par l'ingénieur. C'est au dessinateur à déterminer les dimensions mécaniques des pièces, qui doivent être aussi simples que possible et d'un usinage facile. Mais encore faut-il que ce dernier puisse comprendre le fonctionnement d'une machine et la construction de la partie électrique. C'est le but que nous nous proposons d'atteindre en publiant ce livre.

Dans l'organisation moderne d'une usine, rien ne doit être laissé au hasard ni à l'improvisation, au point de vue enroulement comme au point de vue mécanique. L'exécution des bobinages doit être faite d'après des dessins et des schémas. Sur chaque fiche de constantes doit figurer l'indication de ces derniers.

Les schémas d'atelier sont la reproduction de ceux donnés dans cet ouvrage. Sur le dessin de bobinage on représente à une échelle convenable, l'encoche avec ses fils et les isolants à employer. C'est la seule façon d'éviter le perpétuel conflit entre l'atelier et l'étude, par principe un bobinier n'a jamais assez de place pour loger les conducteurs dans l'encoche.

Il faut que chacun soit bien pénétré qu'il est de l'intérêt de tous de suivre le progrès, c'est à cette seule condition qu'au point de vue économique nous pourrions lutter avantageusement contre la concurrence étrangère. Nous citerons un fait inouï que l'on a peine à croire. Dans une maison de constructions électriques où il existe deux ateliers bien distincts et que nous appellerons atelier n° 1 et atelier n° 2 ; les temps passés pour l'enroulement sur *gabarit* d'un moteur triphasé de 1 cheval à 1400 tours, 24 encoches au stator, ont été respectivement de 32 et de 5 heures. En comparant ces résultats on ne peut nier le fait d'une mauvaise volonté de la part de l'atelier n° 1 à exécuter ce genre d'enroulement, en exagérant volontairement le temps employé à l'exécuter.

Au moment où l'on parle de l'utilisation des chutes d'eau, on peut prévoir que d'ici peu, l'électricité sera distribuée partout. Les petits ateliers de réparation et de transformation du matériel électrique se multiplieront rapidement.

Un fermier achète d'occasion un moteur à courant continu à 110 volts, mais est branché sur une ligne à 220 volts ; un petit façonnier a un moteur triphasé à 25 périodes à transformer en un moteur triphasé à 50 périodes, etc. Des cas de ce genre se présentent et se présenteront de plus en plus nombreux. Il est nécessaire que le personnel de maîtrise de ces ateliers de réparations soit capable, sans secours extérieur, de modifier les caractéristiques d'une machine. Nous avons donné quelques exemples de ce genre, que nous avons exécutés.

Le moment paraît donc venu de mettre à la portée de tous ceux que l'électricité intéresse, un ouvrage essentiellement pratique répondant à de nombreuses applications.

C. C.

100000
100000
100000



NOTATIONS

A

AT = Ampères-tours totaux des inducteurs.
 a = Nombre de paires de circuits offerts au courant.
 a = Amplitude maximum d'une sinusoïde.
 α = Angle.

B

b = Nombre*de sections sur l'induit.
 b_p = Arc polaire.

C

C = Coefficient d'enroulement ou de bobinage courant alternatif.

D

D = Diamètre de l'induit.
 δ = Entrefer simple.

E

E = Différence de potentiel aux bornes d'une machine.
 $E = E_{\text{moy}}$ = Force électromotrice moyenne développée.
 E_{max} = Force électromotrice maximum.
 $E = E_{\text{eff}}$ = Force électromotrice efficace d'une machine à courant alternatif.
 $e = e_{\text{eff}}$ = Force électromotrice efficace par phase.
 e_1 = Force électromotrice efficace par phase du stator.
 e_2 = Force électromotrice efficace par phase du rotor.
 e = Epaisseur d'une fourche isolée augmentée du jeu dans les connexions en développantes.
 η = Rendement.

F

F = Force tangentielle due à la force centrifuge.
 f = Fréquence ou nombre de périodes par seconde.
 f = Force centrifuge élémentaire.

G

$g = 9,81$ = Accélération due à la pesanteur.
 γ = Conductivité ou conductibilité spécifique.

I

I = Intensité en ampères.
 $I = I_{\text{eff}}$ = Intensité efficace aux bornes d'une machine à courant alternatif.
 $i = i_{\text{eff}}$ = Intensité efficace par phase.
 i_1 = Intensité efficace par phase du stator.
 i_2 = Intensité efficace par phase du rotor.
 i_a = Courant d'excitation shunt.

K

K = Nombre de lames du collecteur.
 KW = Nombre de kilo-watts.
 KVA = Nombre de kilo-volts-ampères.
 k = Travail en kilogrammes par millimètre carré du fil des frettes.
 k = Coefficient de Kapp.
 k_1 = Coefficient servant à déterminer la longueur moyenne d'une spire pour courant alternatif.

L

L = Largeur du fer d'induit ou de stator.
 l = Longueur totale du fil des inducteurs shunt.
 l_m = Longueur moyenne d'une spire.
 λ = Longueur moyenne développée de l'embranchement d'une bobine.

M

m = Nombre de phases.
 m_1 = Nombre de phases du stator.
 m_2 = Nombre de phases du rotor.
 m_c = Pas dans le champ d'un enroulement à courant continu.

N

N = Nombre de fils actifs à la périphérie de l'armature d'une machine à courant continu.

N_1 = Nombre de fils en série concourant à la production de la force électromotrice dans un induit à courant continu.

N_1 = Nombre de fils actifs par phase du stator.

N_2 = Nombre de fils actifs par phase du rotor.

n = Nombre de tours par minute d'une machine à conduit continu.

n = Nombre de tours par minute au synchronisme (courant alternatif).

n_c = Nombre de tours par minute d'un moteur asynchrone.

n_s = Nombre total de spires des inducteurs shunt.

ν = Nombre de bobines chevauchant côte à côte dans un bobinage alternatif sur gabarit.

O

Ω = Ohm.

ω = Vitesse angulaire.

P

P = Puissance d'une machine en kilo-watts (courant continu), en kilo-volt-ampères (courant alternatif).

P = Poids total du cuivre sur l'induit.

Φ = Flux émanant d'un pôle en maxwells.

φ = Angle de décalage.

Q

q = Nombre entier quelconque (formule de couplage des enroulements imbriqués).

q = Nombre d'encoches par pôle et par phase.

q_1 = Nombre d'encoches par pôle et par phase au stator.

q_2 = Nombre d'encoches par pôle et par phase au rotor.

R

R = Résistance en ohms.

ρ = Résistivité ou résistance spécifique.

S

S = Section droite d'un bobinage à courant alternatif sur gabarit.

s = Section d'un conducteur en millimètres carrés.

s_1 = Surface d'une encoche.

σ = Coefficient de fuites d'un moteur asynchrone.

T

- T = Durée d'une période.
 τ = Pas polaire.
 θ = Température en degrés centigrades.

U

- u = Nombre de tours d'armature pour parcourir tout l'enroulement d'un bobinage en parallèle multiple ou en séries parallèles.

V

- v = Vitesse circonférentielle en mètres par seconde.

W

- w = Nombre total de spires sur l'induit.
 w_1 = Nombre total de spires en série concourant à la production de la force électromotrice (courant continu).
 w_1 = Nombre de spires en série par phase (courant alternatif primaire).
 w_2 = Nombre de spires en série par phase (courant alternatif secondaire).

Y

- y = Pas résultant.
 $y_1 - y_2$ = Pas composants.
 y_c = Pas du collecteur.

Z

- z = Nombre d'encoches sur l'induit.
 z_1 = Nombre d'encoches du stator.
 z_2 = Nombre d'encoches du rotor.
-

LA CONSTRUCTION DES BOBINAGES ÉLECTRIQUES



CHAPITRE I

COURANT ÉLECTRIQUE

1. **Courant électrique.** — Une spire tournant autour d'un axe dans un champ magnétique est le siège d'une force électromotrice variable. Partant de zéro, cette f. é. m. augmente dans un sens supposé positif jusqu'à un certain maximum, puis elle diminue jusqu'à zéro; elle change de sens et dans ce sens négatif, elle s'élève encore au même maximum que précédemment pour redescendre de nouveau à zéro après un tour complet de la spire.

Chaque phénomène complet dans les deux sens constitue une période (*fig. 1*).

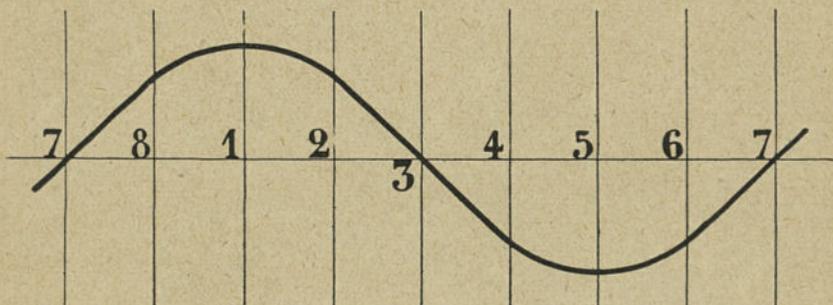


Fig. 1.

Une période correspond à un tour complet de la spire dans le cas d'un champ magnétique entretenu par 2 pôles.

On appelle fréquence f , le nombre de périodes par seconde ; dans une machine à deux pôles, la fréquence est donc égale au nombre de tours par seconde.

Si T est la durée d'une période, le nombre de périodes par seconde ou la fréquence pourra être exprimée par

$$\frac{1}{T}.$$

Pour $T = \frac{1}{20}$ de seconde, la fréquence serait :

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{\frac{1}{20}} = 20.$$

Dans une machine il se produira donc autant de périodes par tour qu'elle comprendra de paires de pôles et par seconde :

$$f = p \times \frac{n}{60}.$$

p = nombre de paires de pôles.

n = nombre de tours par minute.

2. Sens et variation de la force électromotrice induite dans une spire. — Pour se rendre compte de la production du courant dans une dynamo, nous considérons tout d'abord ce qui se passe dans une spire de l'enroulement.

Lorsqu'une spire formant un circuit fermé est traversée par un flux d'induction ; si ce flux vient à varier, soit qu'il augmente, soit qu'il diminue, un courant induit prend naissance dans la spire. Le courant ainsi développé dure aussi longtemps que la variation du flux inducteur et cesse en même temps que cette variation.

Considérons (*fig 2*) une spire enroulée sur l'armature en anneau, appelée aussi armature *Gramme*, tournant dans le sens des aiguilles d'une montre entre les pôles N et S. Le fer étant très perméable, on peut admettre que tout le flux émanant du pôle se partage également dans les deux branches formées par l'anneau.

Dans la position 1, la spire n'embrasse pas de lignes de force. Quand, entraînée par l'anneau, la spire se déplace de 1 à 3, elle embrasse un flux de plus en plus grand et cette variation de flux produit dans la spire une force électromotrice et un courant puisque le circuit est fermé. Ce courant a une direction telle que le flux qu'il produit s'oppose à la variation du flux inducteur qui est ici en accroissement.

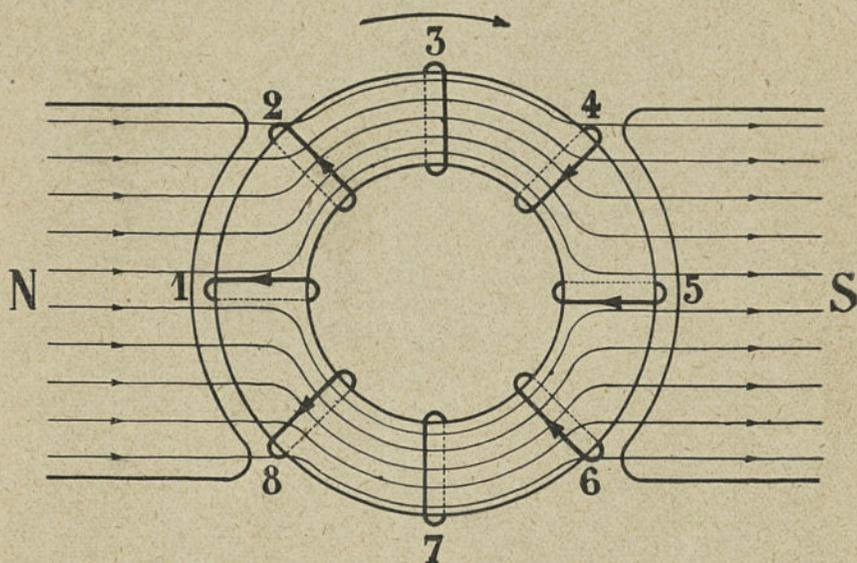


Fig. 2.

Le flux induit dans la spire sera donc dirigé de droite à gauche, opposé au flux inducteur et connaissant la règle du tire-bouchon de Maxwell¹, le sens du courant ira du centre vers l'extérieur.

Après la position 3, le flux diminue dans la bobine jusqu'en 5 et le flux induit dans la spire qui s'oppose à cette diminution est de même sens que le flux inducteur, la règle du tire-bouchon fait connaître que le courant va de l'extérieur vers le centre.

Dans le troisième quart de tour, de 5 à 7, la spire embrasse

1. Le courant ayant le sens de la rotation du manche d'un tire-bouchon, le sens des lignes de force est le même que celui de translation de la tige (fig. 24).

un flux croissant, le flux induit est donc opposé à cet accroissement et va de droite à gauche, le courant induit est donc également dirigé de l'extérieur vers le centre.

Enfin de 7 à 1, le flux inducteur diminue, le flux induit est positif et renforce le flux inducteur, le courant induit va du centre vers l'extérieur.

On abandonne de plus en plus l'anneau Gramme pour l'arma-

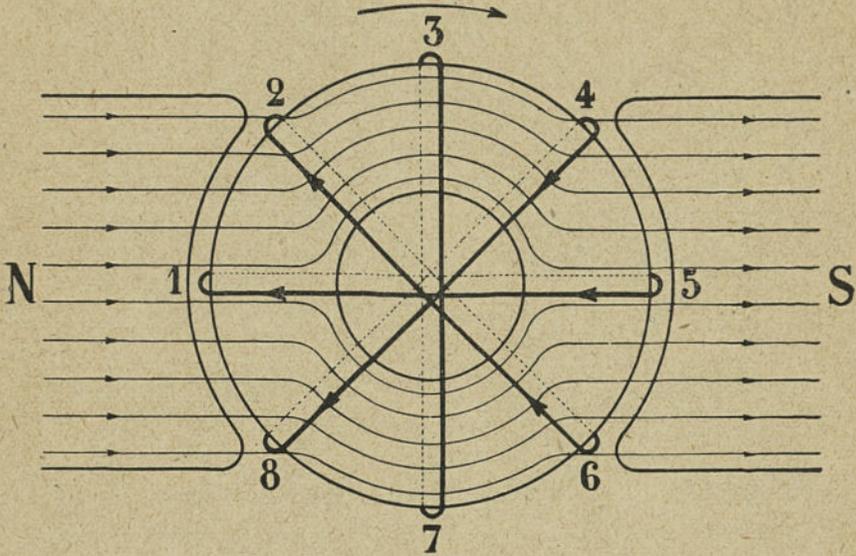


Fig. 3.

ture en *tambour* ou de *Siemens*, dans laquelle, le centre de rotation n'est plus situé en dehors de la spire mais au milieu de celle-ci (*fig. 3*). Dans ce cas, la spire tourne donc autour de l'axe de rotation.

Un raisonnement analogue au précédent montre les variations du flux inducteur et donne le sens des courants induits.

Soit par exemple, la spire 1-5 dans son premier quart de tour arrive en 3-7. Le flux embrassé est croissant, donc le flux induit est de sens opposé au flux principal et la règle du tire-bouchon indique que le courant va dans le sens de la flèche.

Dans la position 3-7, la spire embrassant le flux maximum

n'est parcourue par aucun courant, elle se trouve alors dans le plan neutre. Il en est de même dans l'induit en anneau.

3. Courant alternatif et courant redressé. — On a considéré jusqu'à présent, le courant induit développé à l'intérieur de la spire formant un circuit fermé. On recueille le courant ainsi produit, par l'intermédiaire de deux bagues calées sur l'arbre, en reliant respectivement à chacune de ces bagues, isolées entre elles et de l'arbre, les extrémités de la spire. Cette dernière ne constitue plus un circuit fermé. Dans ces conditions, il se développe dans la spire ouverte, une force électromotrice induite. Pour recueillir le courant, on place sur les bagues des balais ou frotteurs reliés à un circuit extérieur dans lequel circule le courant développé dans la spire.

Le courant ainsi recueilli est dit, *alternatif*. C'est un courant dont l'intensité est variable à chaque instant, suivant une fonction périodique ; la période étant l'intervalle du temps au bout duquel la fonction se reproduit en passant par les mêmes valeurs et dans le même ordre que précédemment (*fig. 1*).

Si au lieu de caler sur l'arbre deux bagues côte à côte, on met à la place deux demi-bagues isolées, l'une de l'autre, reliées respectivement à l'une des extrémités de la spire et disposées de manière que les isolants qui les sépare se trouvent sous les balais au moment où le courant induit change de sens, c'est-à-dire lorsque la spire passe par le point neutre. A cet instant précis, les balais abandonnent l'une des demi-bagues pour venir en contact avec l'autre.

Dans la position de la spire (*fig. 4*), le conducteur induit 3 se trouve à gauche du plan neutre et le courant suit le parcours 4, 3, 2, 1 demi-bague et balai *b*, circuit d'utilisation, balai et demi-bague *b'* pour revenir finalement à son point de départ.

Lorsque par suite du mouvement de rotation qui lui est imprimé, la spire arrive dans la position de la figure 5, le sens du courant est tel qu'il suit la partie 3-4 du conducteur, la demi-bague et le balai *b*, le circuit extérieur, le balai et la demi-bague *b'* et les parties 1, 2, 3, 4 de la spire.

Le courant dans le circuit extérieur n'a pas changé de sens, mais il y a eu entre la production de ces deux courants de même

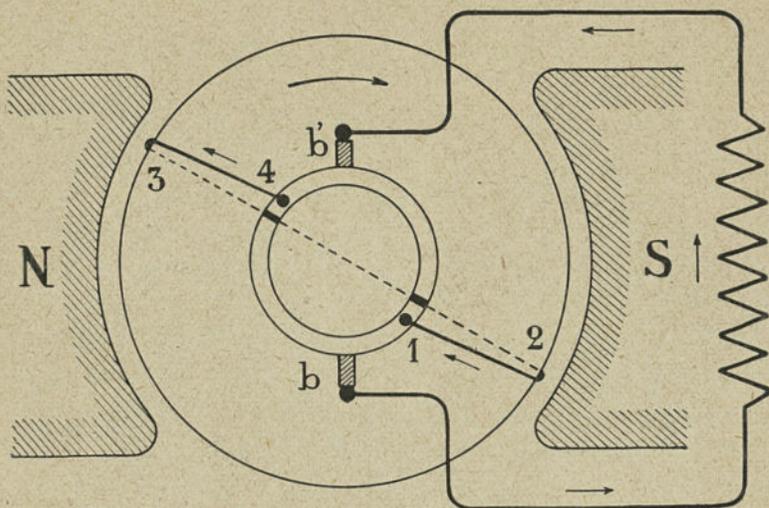


Fig. 4.

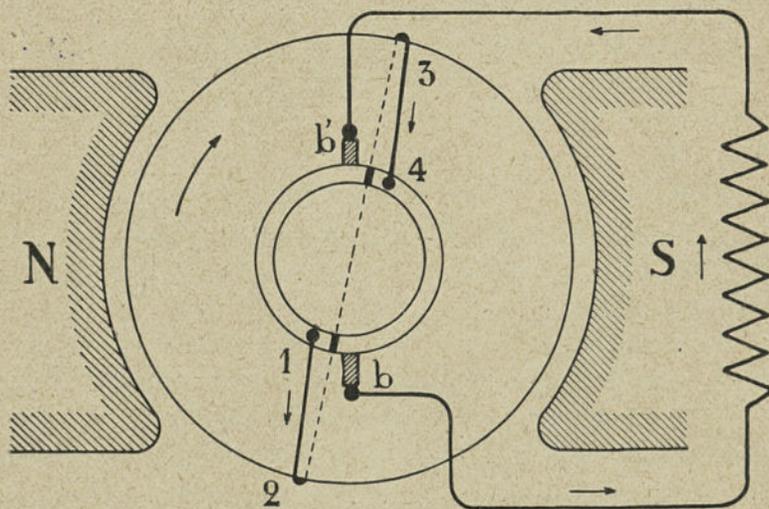


Fig. 5.

sens un moment où le courant a été nul, quand la spire a passé dans le plan de commutation qui est le plan neutre.

Le passage du balai d'une demi-bague à la suivante a permis ce redressement du courant, c'est cette opération qui s'appelle *commutation*.

Le courant dans la spire reste alternatif, mais il est de même sens dans le circuit extérieur. Une génératrice à courant continu se comporte donc comme un alternateur dans son circuit intérieur, et, c'est grâce au commutateur appelé communément *collecteur* que le courant est continu dans le circuit extérieur.

4. Courant continu. — La disposition ci-dessus, avec un collecteur à deux segments seulement, si elle réalise un courant de même sens dans le circuit extérieur, n'est cependant pas apte à la production d'un courant continu de tension et d'intensité constante; en raison de l'inversion du courant dans la spire, l'intensité varie entre zéro et une valeur maximum comme le montre la figure 6.

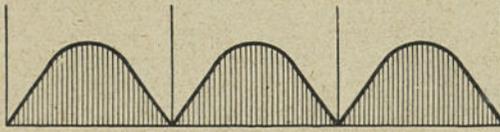


Fig. 6.



Pour obtenir un courant pratiquement continu il faut recourir à la multiplicité des lames du collecteur et en même temps répartir les conducteurs induits en un grand nombre de spires convenablement groupées.

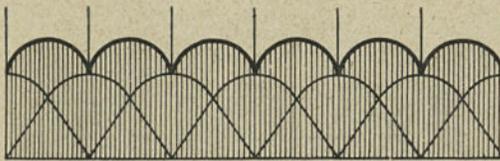


Fig. 7.

Montons en effet, deux paires de bobines à angles droits, l'une par rapport à l'autre sur l'anneau de fer, l'action successive de

ces bobines sera décalée d'un intervalle correspondant à un quart de tour et l'on obtiendra un courant dont l'intensité sera à chaque instant égale à la somme des ordonnées des sinusoides. Le courant ne s'annule plus comme dans le cas précédent, et ses oscillations quoique sensibles encore ont cependant des amplitudes beaucoup moindres. On pourra les diminuer autant que l'on voudra, en augmentant le nombre des bobines et celui des segments du collecteur.

La grandeur des oscillations exprimée en pour cent de la valeur moyenne du courant est donnée dans le tableau suivant, en fonction du nombre de lames du collecteur.

Nombre de lames du collecteur.. . . .	2	4	10	12	15	20	24	30	36	40	45	60	90
Amplitude des oscillations en %.. . . .	± 50	14	2,4	1,7	1,1	0,6	0,4	0,3	0,2	0,15	0,12	0,07	0,03

Sur ce tableau emprunté à Arnold on remarquera qu'avec 12 lames par paire de pôle, les oscillations sont inférieures à 2 pour 100.

5. Valeur de la force électromotrice induite. — Dans la spire radiale (anneau) comme dans la spire diamétrale (tambour), la seule portion du conducteur intéressante au point de vue variation de flux est la partie extérieure ou périphérique. Les fils internes dans l'anneau et les fils latéraux dans les deux cas jouent simplement le rôle de connexions et ne coupent pas le flux.

Dans tout ce qui va suivre on appellera :

N = Nombre de fils actifs à la périphérie de l'induit.

w = Nombre total de spires sur l'induit.

$N = w$, dans un induit en anneau.

$N = 2 w$, dans un induit en tambour.

Considérons un anneau bipolaire (*fig. 8*) comportant un

certain nombre de bobines à deux spires ; chaque commencement de bobine étant relié par une lame de collecteur à la fin de la

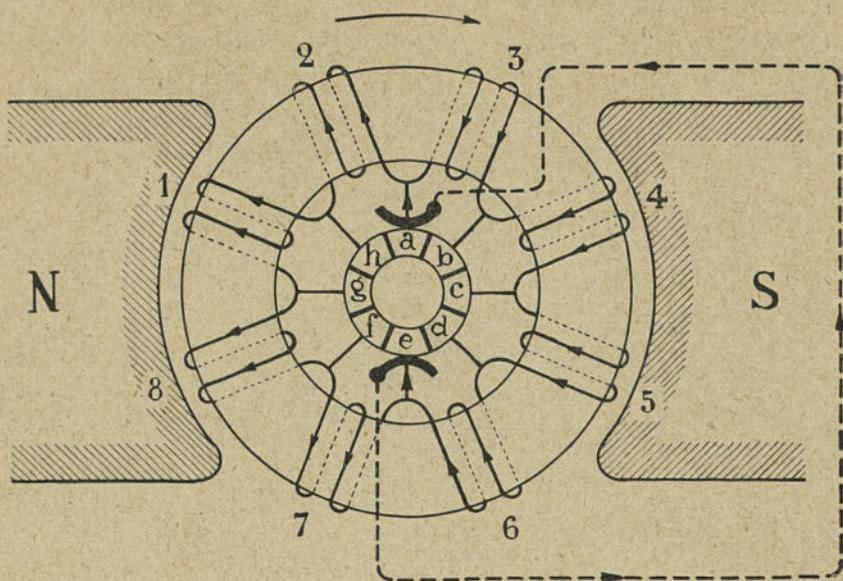


Fig. 8.

précédente. On a ce qu'on appelle un enroulement fermé. La marche de cet enroulement est la suivante :

$$a \left\{ \begin{array}{l} 2-h-1-g-8-f-7 \\ 3-b-4-c-5-d-6 \end{array} \right\} e.$$

Au balai négatif, le courant se bifurque dans deux directions qui viennent aboutir finalement au positif. Cette distribution du courant dans le bobinage est commune à tous les enroulements fermés ; il n'est pas possible de relier en série plus de la moitié des barres ou fils. Cette particularité est caractérisée par le schéma de la figure 9. La force électromotrice a pour valeur celle qui est donnée par un des groupes occupant la moitié de l'induit, l'autre moitié fournissant une f. é. m. de même valeur. Ces deux groupes forment deux circuits en parallèle ou deux dérivations de courant.

Pour déterminer la valeur de la f. é. m. moyenne développée dans un induit nous considérerons d'abord ce qui se passe dans une spire de l'enroulement, successivement dans un anneau et dans un tambour.

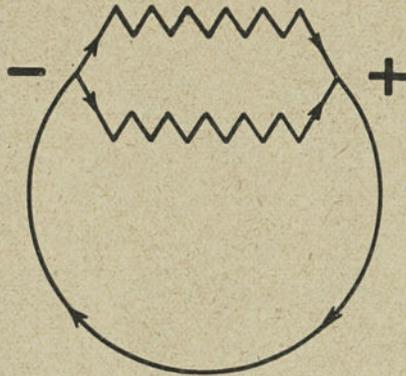


Fig. 9.

Induit en anneau. — Lorsque le conducteur 3 de la figure 2 a effectué une rotation de 180° , il est venu en 7. Le temps pendant lequel le flux a été coupé est égal à $\frac{T}{2}$, si T représente la durée d'un tour.

La force électromotrice induite dans le conducteur est d'après la règle de Faraday égale à :

$$\frac{\Phi}{\frac{T}{2}} \quad \text{ou} \quad \frac{2\Phi}{T}$$

Comme la spire fait $\frac{n}{60}$ tours par seconde on a :

$$\frac{n}{60} \times T = 1 \text{ seconde}$$

et la force électromotrice moyenne développée dans la spire entière est égale à :

$$\frac{2\Phi}{T} = \frac{2\Phi n}{60}$$

Dans une dynamo comportant w spires nous savons d'après ce qui a été dit que les $\frac{N}{2}$ conducteurs actifs situés d'un même côté du plan neutre et concourant à la production de la f. é. m. font partie des $\frac{w}{2}$ spires et l'on a :

$$\text{force électromotrice moyenne } E_{\text{moy.}} = \frac{N}{2} \times \frac{2\Phi n}{60} = \frac{N\Phi n}{60}.$$

Il faut remarquer que la f. é. m. produite dans un fil périphérique est donnée en chaque point de la rotation par l'ordonnée de la sinusoïde (*fig. 1*) se rapportant à ce point. On verra plus loin que la force électromotrice moyenne est égale à la force électromotrice maximum multipliée par 0,637.

Induit en tambour. — Pendant un demi-tour, le conducteur périphérique 3 (*fig. 3*) est venu en 7. Comme pour l'anneau, il a dans ce parcours coupé un flux Φ , et la force électromotrice développée dans ce fil est égale à :

$$\frac{2\Phi n}{60}.$$

Pendant le même temps, le conducteur 7 a coupé un flux de même valeur et a été également le siège d'une f. é. m. égale à $\frac{2\Phi n}{60}$. Ces deux forces électromotrices s'ajoutent et la f. é. m. totale est égale à :

$$\frac{4\Phi n}{60}.$$

Si l'on a $\frac{N}{2}$ spires enroulées sur le tambour et reliées en série on aura comme dans l'anneau $\frac{N}{4}$ spires donnant une f. é. m. constante et égale à celle de l'autre groupe de $\frac{N}{4}$ spires ; ces deux

ensembles étant réunis en quantité ou en parallèle. La force électromotrice développée dans ces $\frac{N}{4}$ spires sera la force électromotrice totale de l'induit et l'on a :

$$\text{f. é. m. } E_{\text{moy}} = \frac{4\Phi n}{60} \times \frac{N}{4} = \frac{N\Phi n}{60} \text{ en unités C. G. S.}$$

$$E = \frac{N \times \Phi \times n}{60 \times 10^8} \text{ en volts.}$$

6. Machines multipolaires. — Dans tout ce qui précède nous avons considéré une machine à deux pôles, autrement dit à une seule paire de pôles ; mais il s'en construit qui ont un nombre pair de pôles quelconque. On a ainsi des machines à 4, 6, 8, etc... pôles.

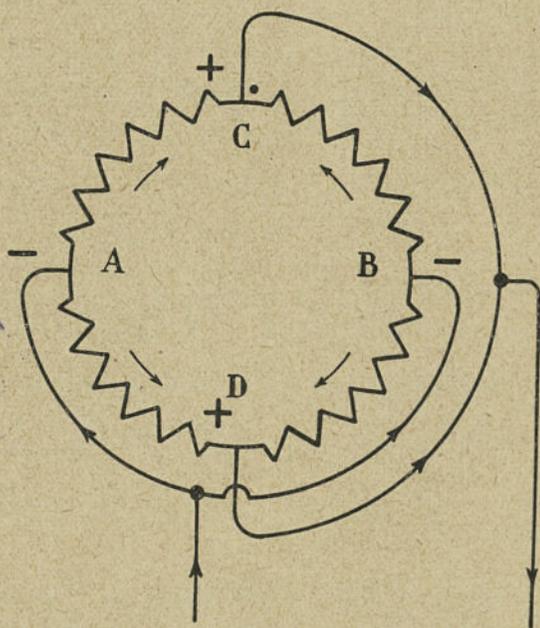


Fig. 10.

D'une façon générale dans les machines multipolaires, les mêmes phénomènes se reproduisent identiques à ce qui se passe

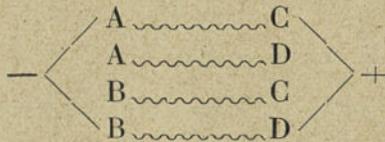
dans une machine bipolaire, et l'on a pour 4 pôles, 4 inversions de courant par tour au lieu de deux ; pour 6 pôles, 6 inversions, et ainsi de suite. Par analogie avec la machine bipolaire, on dit qu'il y a 360° magnétiques entre deux pôles successifs de même nom.

On peut donc se représenter l'induit d'une dynamo multipolaire composé d'autant de circuits qu'il y a de pôles. Tous les conducteurs du même circuit sont réunis en série, mais les circuits sont reliés en quantité.

La figure 10 représente schématiquement une machine à 4 pôles. Comme on le voit quatre lignes de balais sont nécessaires, et à chaque ligne correspond une dérivation de courant.

Comme il est montré plus loin, il n'est pas toujours nécessaire d'avoir autant de dérivations que de pôles car les machines multipolaires se prêtent à de nombreuses combinaisons d'enroulement, permettant de réduire le nombre de ces dérivations, celles-ci n'étant jamais inférieures à deux.

L'enroulement de la figure 10 comportant autant de lignes de balais que de pôles est dit : *enroulement en parallèle simple*. La marche de cet enroulement est la suivante :



La force électromotrice développée est égale à

$$E = \frac{N_1 \Phi n}{60} \times 10^{-8} \text{ volts.}$$

Expression qui donne la valeur de la f. é. m. moyenne pour les spires comprises dans un pas polaire, autrement dit entre deux pôles, nord et sud, voisins. L'intensité totale de la machine est égale à quatre fois l'intensité d'un circuit et $N_1 = \frac{N}{2p}$.



Dans l'enroulement en *série*, les spires sont réunies en deux groupes montés en quantité. Ici il n'y a que deux séries, composées de $\frac{N}{2}$ fils périphériques qui concourent à la production de la f. é. m. et l'on a en appelant p le nombre de paires de pôles

$$(1) \quad E = 2p \cdot \frac{n}{60} \Phi \times \frac{N}{2} \times 10^{-8} = p \cdot \frac{n}{60} \cdot N \cdot \Phi \cdot 10^{-8} \text{ volts.}$$

Le nombre de lignes de balais peut être réduit à deux.

Enfin il existe un troisième genre d'enroulement dit en *séries-parallèles* appelé ainsi parce qu'il participe des deux précédents ; c'est-à-dire que le nombre des dérivations du courant est inférieur, égal, ou supérieur au nombre de pôles, mais plus grand que deux. Si on appelle $2a$, le nombre de ces dérivations, le nombre de fils concourant à la production de la f. é. m. moyenne est :

$$\frac{N}{2a}$$

et la f. é. m. moyenne totale est donc :

$$E = 2p \cdot \frac{n}{60} \cdot \Phi \cdot \frac{N}{2a} \cdot 10^{-8} = \frac{p}{a} \cdot \frac{n}{60} \cdot N \cdot \Phi \cdot 10^{-8} \text{ volts.}$$

Cette formule est d'application générale. On a :

Pour un enroulement en parallèle simple.	$a = p$
Pour un enroulement en série.	$a = 1$
Pour un enroulement en séries-parallèles.	$a > 1$

1. Dans une dynamo de p paires de pôles, la force électromotrice induite dans un fil a pour valeur : $e_{\text{moy}} = 2p \frac{n}{60} \Phi$, en multipliant cette expression par $\frac{N}{2}$ on obtient

$$E = 2p \frac{n}{60} \Phi \frac{N}{2}$$

Dans un enroulement en parallèle simple, le nombre de fils en série entre deux balais est égal à $\frac{N}{2p}$ d'où

$$E = 2p \frac{n}{60} \Phi \frac{N}{2p} = \Phi N \frac{n}{60}$$

Partant de cette formule générale et en simplifiant suivant le genre de bobinage en remplaçant $\frac{p}{a}$ par leurs valeurs : $a = p$ ou $a = 1$ ou $a > 1$ on obtient les mêmes expressions que précédemment. Nous conserverons cependant la formule générale pour le courant continu :

$$E = \Phi \cdot N \cdot \frac{n}{60} \cdot \frac{p}{a} \cdot 10^{-8} \text{ volts.}$$

où :

Φ = Flux émanant d'un pôle en maxwells.

N = Nombre de fils actifs à la périphérie de l'induit.

n = Nombre de tours par minute.

p = Nombre de paires de pôles.

a = Nombre de paires de circuits offerts au courant.

7. Courant alternatif. Force électromotrice maximum. —

Nous avons vu qu'une spire tournant autour d'un axe dans un champ magnétique est le siège d'une force électromotrice variable. Si la vitesse est uniforme et le champ magnétique uniforme et constant, la force électromotrice développée est rigoureusement sinusoïdale.

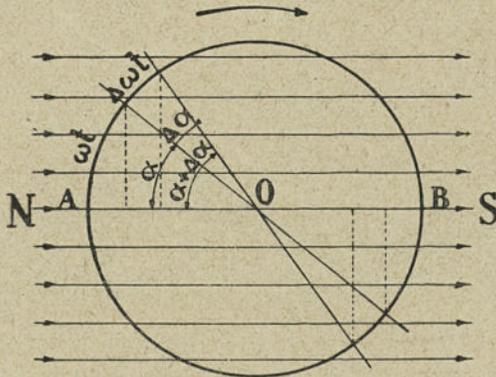


Fig. 11.

Soit une spire AB, tournant autour du centre O (fig. 11), dans le sens de la flèche et considérons un très faible accroisse-

ment Δz de l'angle z ; à cet accroissement de z , correspond un accroissement Δt du temps t . C'est-à-dire que la spire met un temps Δt pour se déplacer d'un angle Δz . Quand la spire fait un angle z , elle est traversée par un flux $\Phi_1 = \Phi \times \cos z$.

Pour un angle $(z + \Delta z)$ le flux embrassé sera égal à

$$\Phi_2 = \Phi \cos (z + \Delta z)$$

et la différence $\Phi_1 - \Phi_2$ ou la variation du flux pendant l'accroissement Δz de l'angle z aura pour expression :

$$\Phi_1 - \Phi_2 = \Phi \cos z - \Phi \cos (z + \Delta z) = \Phi [\cos z - \cos (z + \Delta z)]$$

mais $\cos a + b = \cos a \cos b - \sin a \sin b$ d'où

$$\cos (z + \Delta z) = \cos z \cos \Delta z - \sin z \sin \Delta z,$$

on obtient

$$\begin{aligned} \Phi_1 - \Phi_2 &= \Phi [\cos z - (\cos z \cos \Delta z - \sin z \sin \Delta z)] \\ &= \Phi (\cos z - \cos z \cos \Delta z + \sin z \sin \Delta z) \\ &= \Phi (\cos z - \cos z + \sin z \sin \Delta z). \end{aligned}$$

Equation obtenue en considérant que l'angle Δz , étant extrêmement petit son cosinus se confond avec le rayon et son sinus avec l'arc, on peut alors remplacer $\cos \Delta z$ par 1 et $\sin \Delta z$ par Δz d'où en simplifiant on a :

$$\Phi_1 - \Phi_2 = \Phi \sin z \times \Delta z.$$

D'autre part Δz est égal à la vitesse angulaire multipliée par le temps Δt pendant lequel l'angle z a grandi de Δz

$$\Delta z = \omega \Delta t.$$

On a donc pour la variation du flux :

$$\Phi_1 - \Phi_2 = \Phi \sin z \times \omega \Delta t = \omega \Phi \sin z \times \Delta t.$$

En divisant cette variation par le temps Δt de cette variation et par 10^8 on aura en volts, la force électromotrice de la spire faisant un angle z avec l'horizontale; ou à l'instant t :

$$e = \frac{\omega \Phi \sin z \times \Delta t}{10^8 \times \Delta t} = \frac{\omega \Phi \sin z}{10^8}$$

et dans un cadre de w spires :

$$E = \frac{\omega \Phi w \sin \alpha}{10^8},$$

et comme $\omega = \frac{2\pi n}{60}$ et $\frac{n}{60} = \frac{1}{T}$,

$$\omega = \frac{2\pi}{T},$$

$$E = \frac{2\pi}{T} \times \frac{\Phi w}{10^8} \times \sin \alpha = \frac{2\pi}{T} \times \frac{\Phi w}{10^8} \times \sin \omega t,$$

$$E = \frac{\omega \Phi w}{10^8} \sin \omega t.$$

La force électromotrice est donc maximum pour $\omega t = 1$.

Elle a pour expression :

$$E_{\max} = \frac{\omega \Phi w}{10^8}.$$

8. Force électromotrice moyenne et force électromotrice efficace. — Soit ABC (*fig. 12*) la courbe représentant la variation

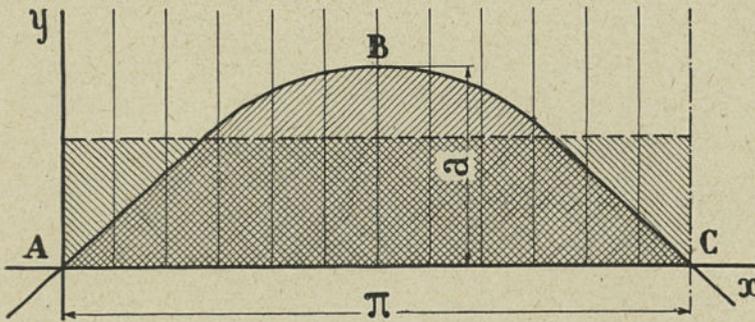


Fig. 12.

de la f. é. m. développée dans un circuit tournant dans un champ magnétique uniforme. Courbe dans laquelle, les ordonnées représentent les valeurs de la f. é. m. produite en chaque point du

parcours, et les abscisses, le développement de la circonférence décrite par le circuit. Cette courbe est sinusoïdale.

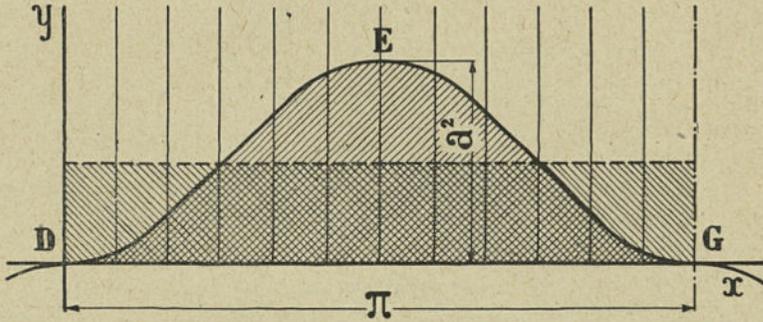


Fig. 13.

On appellera ordonnée moyenne, la moyenne de toutes les ordonnées positives, qui est égale et de signe contraire à la moyenne des ordonnées négatives.

La surface limitée par la courbe et l'axe des x est égale à $2a$, a étant l'amplitude de la courbe est égale à la f. é. m. maximum.

L'ordonnée moyenne sera donc égale à cette surface $2a$ divisée par le développement π .

$$\text{Ordonnée moyenne} = E_{\text{moy}} = \frac{2a}{\pi} = \frac{2}{\pi} a = 0,637a,$$

mais

$$a = E_{\text{max}} = \frac{\omega \Phi w}{10^8} = \frac{2\pi \cdot n \cdot \Phi \cdot w}{60 \times 10^8} = \frac{2\pi f \Phi w}{10^8}$$

dans une machine bipolaire $f = \frac{n}{60}$

finalement

$$E_{\text{moy}} = E_{\text{max}} \times \frac{2}{\pi} = \frac{2\pi \cdot f \cdot \Phi \cdot w}{10^8} \times \frac{2}{\pi} = \frac{4f\Phi w}{10^8}$$

formule donnant la valeur de la f. é. m. moyenne en fonction de la fréquence.

Les instruments de mesure sont pour la plupart fondés sur les

effets thermiques ou électromagnétiques, lesquels sont proportionnels au carré de l'intensité du courant qui les traverse.

L'aiguille a donc des déplacements en rapport avec le carré de l'intensité, quoique la graduation soit faite en volts et en ampères.

Pour la mesure des courants alternatifs, l'aiguille de l'instrument ne peut indiquer à chaque instant la valeur RI^2 , cette aiguille indique donc une moyenne de valeurs toujours de même sens, car pour la partie négative des f. é. m. et des courants on a un produit EI ou RI^2 qui est positif (moins \times par moins donne plus).

Comme l'aiguille indique des intensités exprimées en ampères ou des f. e. m. exprimées en volts, la graduation donne donc la racine carrée du moyen carré de ces valeurs I ou E .

Cette racine carrée du moyen carré est appelée f. é. m. efficace ou intensité efficace selon qu'il s'agit d'un voltmètre ou d'un ampèremètre. Cette valeur efficace est donc la moyenne de toutes les valeurs qu'enregistrerait un instrument pendant une demi-période, si cet instrument pouvait indiquer les valeurs instantanées.

Soit la courbe DEG (*fig. 13*), où les ordonnées ont pour valeur le carré des ordonnées correspondantes de la courbe de la figure 12. Ici la surface limitée par la courbe et l'axe des x est égale à $1,57 a^2$, a conservant la même signification que précédemment. L'ordonnée moyenne sera égale au quotient de cette surface par le développement de la demi-circonférence π .

$$\text{Ordonnée moyenne} = \frac{1,57a^2}{\pi} = \frac{1,57}{3,14} a^2 = 0,5 a^2 = \frac{a^2}{2}.$$

La valeur efficace est donc égale à la racine carrée de cette ordonnée moyenne.

$$E_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{a^2}{2}} = \frac{a}{\sqrt{2}} = 0,707 a$$

mais

$$a = E_{\text{max}} = \frac{2\pi \cdot f \cdot \Phi \cdot w}{10^8} \quad \text{d'où} \quad E_{\text{eff}} = \frac{0,707 \cdot 2\pi \cdot f \cdot \Phi \cdot w}{10^8}$$

$$E_{\text{eff}} = \frac{4,44 \cdot f \cdot \Phi \cdot w}{10^8} \text{ volts,}$$

formule donnant la valeur de la f. é. m. efficace en fonction de la fréquence.

Remarque I. — Reprenons la formule générale de la f. é. m. moyenne d'un dynamo à courant continu.

$$E_{\text{moy}} = \Phi \cdot N \cdot \frac{n}{60} \cdot \frac{p}{a} \cdot 10^{-8}$$

et cherchons l'expression qui donnerait la valeur de la f. é. m. en fonction du nombre de cycles ou périodes, le nombre de ces dernières est égal à :

$$f = \frac{p \cdot n}{60}$$

Si N est le nombre de fils actifs dans un enroulement en tambour, le nombre de spires est égal à : $w = \frac{N}{2}$. Le nombre de dérivations offertes au courant est égal à $2a$, d'où le nombre de spires en série concourant à la production de la f. é. m. est égal à :

$$w_1 = \frac{N}{2 \times 2a} = \frac{N}{4a} \quad \text{d'où} \quad a = \frac{N}{4w_1}$$

En remplaçant $\frac{p \cdot n}{60}$ par f et a par sa valeur on obtient pour la valeur de la f. é. m. en fonction de la fréquence

$$E_{\text{moy}} = \Phi \cdot N \cdot f \cdot \frac{4w_1}{N} \cdot 10^{-8} = \frac{4f \cdot \Phi \cdot w_1}{10^8}$$

Remarque II. — Cette notion de la valeur efficace ne s'applique pas seulement à la sinusoïde, mais à toutes les courbes représentant des valeurs alternatives, même si elles s'écartent fortement de la sinusoïde, cas qui se présente dans un grand nombre de machines.

9. Facteur de forme. — On appelle ainsi, le rapport $\frac{E_{\text{eff}}}{E_{\text{moy}}}$.

Pour une force électromotrice ou un flux sinusoïdal, le facteur de forme est égal à :

$$\frac{0,707}{0,637} = 1,11.$$

Le facteur de forme est évidemment le même pour toutes les courbes semblables, mais varie pour chaque courbe différente.

Le calcul intégral donne directement la valeur des ordonnées moyennes et efficaces pour les courbes usuelles. Mais on peut tourner la difficulté créée par l'emploi des mathématiques supérieures en opérant comme nous l'avons fait pour la sinusoïde, tracer la courbe, faire la surface comprise entre la courbe et l'axe des x . Le quotient de cette surface par l'abscisse sera égal à l'ordonnée moyenne. On trace de même la courbe, des ordonnées élevées au carré et la racine carrée de l'ordonnée moyenne sera l'ordonnée efficace.

10. Puissance d'un courant. — Considérons une génératrice à *courant continu*. Soit E , en volts, la tension aux bornes de cette machine et I en ampères l'intensité du courant débité. Nous calculerons très simplement la puissance fournie par cette génératrice en faisant le produit EI qui nous donnera la valeur cherchée en watts :

$$P = E \times I = \text{watts}^{(1)} \quad \text{ou} \quad \frac{EI}{1000} = \text{KW}.$$

Maintenant considérons une génératrice à *courant alternatif*. La puissance effective n'est plus égale au produit EI comme pour le courant continu. Cette puissance est égale au produit de EI par un facteur que l'on appelle *facteur de puissance*. La valeur de ce facteur est inférieure ou au plus égale à 1.

Dans un courant alternatif, le courant I passe par ses valeurs maxima et par ses valeurs nulles, après ou avant que la tension E a elle-même passé par ses valeurs maxima ou nulles.

1. Rappelons qu'un 1 cheval-vapeur vaut 736 watts et que 1000 watts valent 1 kilowatt.

Alors que dans le courant continu, la tension est en *phase* avec l'intensité, dans le courant alternatif, cette dernière grandeur est en retard, ou en avance, sur la tension, c'est-à-dire *décalée* en arrière ou en avant de cette tension.

Ce phénomène est dû aux propriétés du circuit parcouru par le courant. L'intensité est en retard sur la tension s'il se trouve une self-induction (moteurs, lampes) dans le circuit. Au contraire la tension est en retard sur l'intensité si c'est une capacité (condensateur) au lieu d'une self. Les conclusions sont d'ailleurs les mêmes dans les deux cas.

Le facteur de puissance détermine précisément la valeur de ce décalage. Pour l'exprimer en chiffres on se sert de la représentation vectorielle¹ des fonctions sinusoïdales.

Considérons un point E (fig. 14) tournant autour de O avec

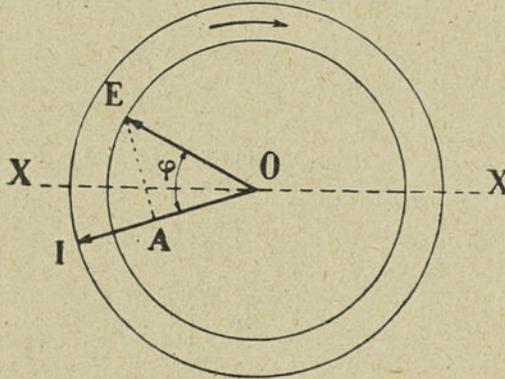


Fig. 14.

une vitesse angulaire uniforme telle qu'il accomplisse un tour complet durant une période. La distance OE représentant l'amplitude ou valeur maximum de la force électromotrice. La longueur

1. Les quantités physiques sont *scalaires* ou *vectérielles*. Par exemple pour caractériser et mesurer une force, on dit qu'elle est égale à x kilogrammes ; c'est une quantité *scalaire* définie par sa grandeur seulement.

Si sur une droite ayant la direction de la force et une flèche en indiquant le sens, on représente la valeur de cette force à une échelle donnée, on a ce qu'on appelle une quantité *vectérielle* ou simplement *vecteur*. Cette quantité est représentée par sa grandeur, sa direction et son sens.

de la perpendiculaire abaissée à chaque instant de l'extrémité du vecteur sur XX' donnera la valeur de la tension à cet instant (voir paragraphe 8).

L'intensité I peut être représentée par un vecteur OI (*fig. 14*). Ce vecteur tournera avec la même vitesse ω que OE puisque les périodes de la tension et de l'intensité ont la même durée. Mais tout en tournant à la même vitesse les vecteurs OE et OI font entre eux un certain angle φ .

La tension utile est à chaque instant, la composante de la tension E en phase avec l'intensité I . C'est donc la tension OA ou la projection de E sur OI qui produit le travail et on a :

$$OA = OE \times \cos \varphi.$$

Au lieu de représenter la tension et l'intensité par des vecteurs égaux aux valeurs maxima des sinusoides, on peut les égaler aux valeurs efficaces, E_{eff} et I_{eff} de ces fonctions, valeurs qui sont celles données par les appareils de mesure et qui par leur produit donnent la même puissance moyenne que la somme des produits instantanés des valeurs de la tension et de l'intensité. On a alors :

$$P = OA_{\text{eff}} \times I_{\text{eff}} = E_{\text{eff}} \times I_{\text{eff}} \times \cos \varphi.$$

On a donné au produit $E.I. 10^{-3}$ le nom de kilo-volts-ampères.

C'est sous cette dénomination que l'on désigne la puissance *apparente* d'une génératrice à courant alternatif. Tandis que la puissance en K. V. A. reste constante pour une même machine, la puissance *réelle* est proportionnelle au cosinus de l'angle de décalage. Cet angle φ impossible à déterminer à l'avance est d'ailleurs très variable.

Un alternateur de 400 K. V. A. fonctionnant sans décalage produira une puissance de 400 kilowatts, si cette même machine alimente un réseau dont le décalage est de 60° , on a :

$$\cos \varphi = \cos 60^\circ = 0,5.$$

La puissance réelle sera égale à $400 \times 0,5 = 200$ kilowatts.

Ces chiffres font ressortir l'énorme importance que prend le facteur de puissance dans une installation à courant alternatif.

On comprend tous les efforts faits pour relever le $\cos. \varphi$ de ces réseaux, et par suite diminuer les immobilisations, de matériel électrique, résultantes d'un fonctionnement avec un faible facteur de puissance.

Plusieurs courants alternatifs simples d'égale période mais en discordance de phase constituent ce qu'on appelle des *courants alternatifs polyphasés* ou simplement *courants polyphasés*.

Nous ne nous occuperons ici que des courants biphasés (deux courants décalés de $1/4$ de période ou de 90°) et des courants triphasés (trois courants décalés de $1/3$ de période ou de 120°).

La puissance apparente d'un tel courant est égale à m fois la puissance apparente de l'un des courants simples constituant le courant polyphasé :

$$m \times e_{\text{eff}} \times i_{\text{eff}}$$

où

m = Nombre de phases.

e_{eff} = F. é. m. efficace par phase.

i_{eff} = Intensité efficace par phase.

Si les circuits d'alimentation ne présentent, ni self-induction, ni induction mutuelle, ni capacité, la puissance réelle est égale à la puissance apparente.

Lorsque le courant est également décalé sur la f. é. m. dans les deux ou les trois circuits, la puissance réelle est le produit de la puissance apparente par le $\cos. \varphi$, en appelant ainsi comme précédemment le décalage du courant sur la f. é. m. dans chacun des circuits. Il vient

$$P^1 = m \times e_{\text{eff}} \times i_{\text{eff}} \times \cos \varphi = \text{watts,}$$

$$P = \frac{m \times e_{\text{eff}} \times i_{\text{eff}} \times \cos \varphi}{1\ 000} = \text{KW.}$$

1. Voir chapitre VI, fig. 179 et 180 pour le triphasé.



CHAPITRE II

MACHINES A COURANT CONTINU

11. **Champ magnétique.** — Les phénomènes d'induction que nous venons d'étudier sont liés à l'existence d'un champ magnétique qui peut être produit par un aimant, Magnéto (*fig. 15*), ou par un électro-aimant, Dynamo (*fig. 16*).

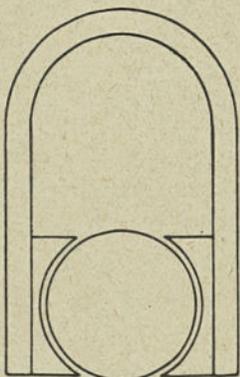


Fig. 15.

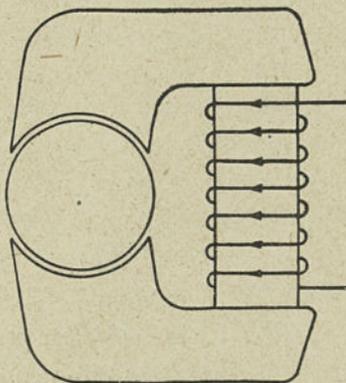


Fig. 16.

Dans le cas d'un aimant, l'intensité du champ est fonction de la nature du métal employé et ne peut dépasser une certaine limite.

On réalise donc ce champ magnétique que l'on a intérêt à rendre aussi intense que possible, à l'aide d'électro-aimants. Ces derniers présentent l'avantage de pouvoir faire varier l'intensité du champ par les variations du courant qui parcourt les bobines. Lorsque le courant n'existe plus, le champ magnétique est nul ou

très voisin de zéro ; il ne s'annule pas toujours complètement pour les fers employés dans la construction des machines électriques, ce qui reste est appelé *magnétisme rémanent*. Le champ magnétique varie donc de zéro jusqu'à une valeur limite qui correspond à l'état de saturation du métal.

Le champ magnétique est donc l'ensemble des flux émanants des pôles des électro-aimants, constituant ce que l'on appelle le système inducteur.

12. Dynamos à courant continu. — Toutes les machines dynamos électriques comprennent comme organes essentiels :

1° Un système inducteur constitué par des électro-aimants et comportant un nombre pair de pôles. A un pôle quelconque doit toujours suivre un pôle de nom contraire.

2° Un induit ou armature, placé dans le champ produit par l'inducteur ; c'est dans l'induit que prennent naissance les courants développés par induction.

L'Induit est constitué par des disques de fer doux sur lesquels sont enroulées les spires constituant un circuit fermé sur lui-même par l'intermédiaire du collecteur, des balais et du circuit extérieur ou circuit d'utilisation.

La construction des machines à courant continu est la même pour les génératrices et les moteurs, étant donné le caractère de réversibilité que présente ces machines.

Une génératrice est définie par la force électromotrice développée et par l'intensité du courant que les conducteurs de son enroulement induit peuvent supporter sans échauffement anormal. Il suffit donc que ces conducteurs soient d'une section suffisante pour l'intensité du courant et que le collecteur et les balais soient prévus en conséquence.

13. Inducteurs. — Les inducteurs se composent des noyaux polaires et de la culasse. Les dimensions de la machine et la construction de l'armature dépendent du nombre et de la disposition des pôles.

On emploie pour les inducteurs des matériaux doués d'une

grande perméabilité magnétique, tels que l'acier coulé, la tôle de fer doux et la fonte. La perméabilité de l'acier coulé sensiblement double de celle de la fonte permet de donner aux noyaux polaires faits avec ce métal une section plus faible et de réaliser une économie de cuivre pour l'excitation.

Les traités d'électricité décrivent de nombreux types d'inducteurs qui tendent à disparaître pour faire place à un type unique à culasse annulaire (*fig. 24 et 26*).

Les noyaux peuvent être fondus d'une seule pièce avec la carcasse, ou rapportés. Ils peuvent être massifs ou lamellés, ils peuvent être munis ou non de pièces polaires. Ces dernières sont elles-mêmes massives ou lamellées.

Pour les pôles massifs avec pièces polaires rapportées c'est la forme circulaire qui, correspondant à égalité de section, à la moindre longueur de fil d'excitation, est la plus avantageuse.

Les tôles ont l'inconvénient de ne pas se prêter à la réalisation de cette forme de section, elles offrent par contre l'avantage de fournir par elles-mêmes des épanouissements feuilletés ; ce qui est précieux pour les machines à larges rainures d'armature. Dans ce cas on doit donner au noyau une forme carrée pour diminuer à l'extrême le poids de cuivre des inducteurs.

La carcasse, les noyaux, les entrefers séparant l'armature des pièces polaires constituent pour chaque machine un circuit magnétique complexe. Le calcul des ampères-tours nécessaires pour entretenir un certain flux Φ sortirait du cadre de cet ouvrage. Nous supposons donc connu ce nombre total des ampères-tours pour les p circuits de la machine.

En appelant :

E = différence de potentiel en volts appliquée aux bornes de l'excitation,

R = résistance des bobines en Ω ,

i_a = Courant d'excitation en ampères = $\frac{E}{R}$,

θ = température des enroulements en degrés centigrades

l = longueur totale du fil en centimètres,

s = Section du fil en millimètres carrés.

La résistance des électros est égale à

$$({}^1) R = \frac{(1 + 0,004 \theta) \times l}{57 \times 100 \times s}$$

et

$$i_d = \frac{E}{R} = \frac{E \times 57 \times 100 \times s}{(1 + 0,004 \theta) \times l} \text{ en ampères,}$$

si d'autre part on appelle :

n_s = nombre total de spires des inducteurs,

l_m = longueur moyenne d'une spire,

on aura

$$l = l_m \times n_s \quad \text{et} \quad \text{Ampères-tours} = i_d \times n_s.$$

1. La résistance d'un conducteur de l centimètres de longueur et d'une section de s centimètres carrés, est représentée par la formule générale :

$$R = \frac{\rho l a}{s} = \frac{l a}{\gamma s}$$

dans laquelle a est le coefficient de température, ρ et γ des coefficients dépendant de la nature du métal employé. Ces deux coefficients sont liés par la formule $\rho = \frac{1}{\gamma}$ qui mesure la résistance d'un conducteur ayant l'unité de longueur et l'unité de section. ρ s'appelle *résistance spécifique* ou *résistivité*. $\gamma = \frac{1}{\rho}$ qui est l'inverse de la *résistance spécifique* s'appelle *conductivité* ou *conductibilité spécifique*.

L'unité pratique de la résistance est l'*Ohm international*. Un *ohm* est la résistance offerte à un courant électrique constant par une colonne de mercure à 0° C. de 106^{cm},3 de longueur et de 0^{cm2},01 de section. Un *microhm* est égal à $\frac{1}{1\,000\,000}$ d'ohm.

L'unité pratique de la résistivité est 1 *microhm-centimètre* ; la conductivité n'a pas d'unité.

$$\text{Mercure. — } 1 \text{ ohm} = \rho \times \frac{106,3}{0,01} \times 10^{-6}.$$

$$\rho = 94,07 \text{ microhms-centimètre et } \gamma = \frac{1}{\rho} = 0,01063.$$

Cuivre. — Pour le cuivre *pur* recuit à 0° C on a d'après Mathiessen $\rho = 1,593$ *microhm-centimètre* et $\gamma = 0,628$.

Pour le cuivre électrolytique recuit de commerce à 0° C, $\rho = 1,65$ *microhm-centimètre* et $\gamma = 0,608$. Par rapport au mercure la conductivité du cuivre commercial est

$$\frac{0,608}{0,01063} = 57.$$

La température ambiante moyenne étant de 15° C il est souvent commode de rappor-

En remplaçant les lettres par leurs valeurs on obtient

$$AT = \frac{E \times 57 \times 100 \times s \times n_s}{(1 + 0,004 \theta) \times l_m \times n_s}$$

et

$$s = \frac{AT \times (1 + 0,004 \theta) \times l_m}{57 \times 100 \times E}$$

On voit par cette dernière formule que la section du fil est directement proportionnelle à la longueur moyenne d'une spire, les autres valeurs restant constantes. Pour diminuer le poids du cuivre inducteur, il faut rendre minimum cette longueur moyenne.

Les figures ci-après 17 de 1 à 6 représentent quelques sections usuelles de noyaux ayant tous la même surface, 100 centimètres carrés; la spire moyenne est représentée en trait mixte, elle est supposée être à 25 millimètres du noyau dans tous les cas.

Les numéros 1, 2, 3 sont massifs, les numéros 4, 5, 6 sont lamellés. Pour les noyaux coulés on voit que la section circulaire est avantageuse sur les sections oblongues, le n° 2 étant un carré entre deux demi-cercles et le n° 3, deux carrés entre deux demi-cercles. Pour les noyaux feuilletés la section 4 carrée est celle qui convient le mieux pour une construction économique, le n° 5 est

ter les résistances à cette température; si d'un autre côté on mesure les longueurs en mètres et les sections en millimètres, la formule de résistance pour le cuivre commercial devient :

$$R = \frac{l \times (l + 0,06)}{60,8 \times s} = \frac{l}{57 \times s} \text{ à } 15^\circ \text{ C.}$$

Le coefficient de température a entre 0 et 100° C est 0,004 par degré.

Dans la formule ci-dessus 57 représente la conductibilité du cuivre par rapport au mercure; en effet une colonne de mercure de l mètres de longueur et de s millimètres carrés de section à 0° C aurait une résistance de :

$$R_{\text{mercure}} = \frac{l}{1,063s} \text{ à } 0^\circ \text{ C.}$$

La conductibilité du cuivre commercial étant 57 fois plus grande que celle du mercure, la résistance d'une même colonne en cuivre mais à 15° C serait :

$$R_{\text{cuivre}} = \frac{R_{\text{mercure}} \times 1,06}{57} = \frac{l \times 1,06}{1,063 \times 57 \times s} = \frac{l}{57s}$$

Les échantillons de cuivre dont la résistivité serait supérieure à 1,65 microhm-centimètres à 0° C (1,75 microhm à 15°) ou dont la conductibilité par rapport au mercure serait inférieure à 57 sont à refuser comme inaptes aux applications électrotechniques.

un rectangle dont les côtés sont dans le rapport de 1 à 1,5 et pour le n° 6 le rapport est 1 à 2.

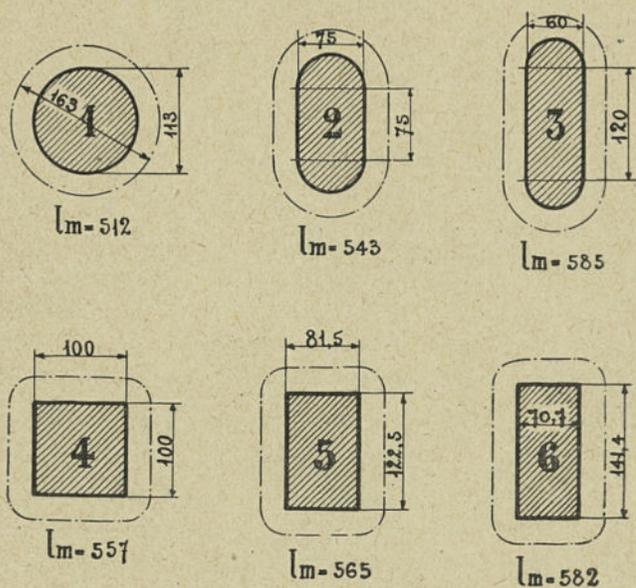


Fig. 17.

14. Bobines inductrices. — La confection des bobines inductrices ne présente aucune difficulté. L'enroulement se fait sur des carcasses en matières isolantes que l'on monte sur les noyaux polaires (*fig. 18*). On fait aussi les bobines sans carcasse en les entourant simplement de ruban ou de ficelle, en les fixant avec un bon isolement sur les noyaux inducteurs eux-mêmes (*fig. 19*). L'épaisseur de l'isolant est réglée par la tension du courant d'excitation.

Le fil employé pour le bobinage des inducteurs est recouvert d'un guipage simple ou double, simple à la condition de passer au vernis chaque couche de la bobine. Le commencement et la fin de la bobine sont munis d'une connexion permettant la liaison des électros entre eux.

Les grosses bobines se font en plusieurs galettes superposées, laissant entre elles un espace libre servant de canal de ventilation

(fig. 20); de ce fait on augmente considérablement la surface de refroidissement de la bobine.

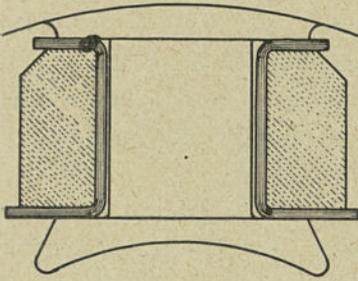


Fig. 18.

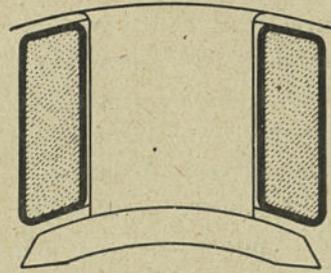


Fig. 19.

La source d'énergie nécessaire à l'alimentation des inducteurs d'une dynamo peut être prise en dehors de la machine (autre

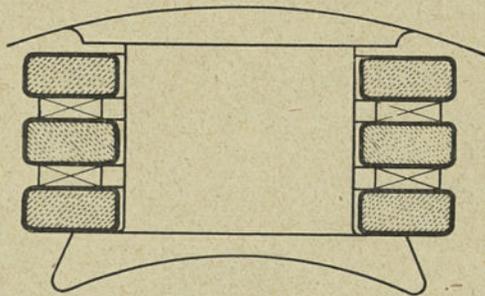


Fig. 20.

machine dite excitatrice, batterie d'accumulateurs); dans ce cas l'excitation est dite séparée ou indépendante, elle n'est plus employée que dans certains cas particuliers.

On utilise aujourd'hui des dynamos dites *auto-excitatrices*, ce qui veut dire que les inducteurs sont alimentés par le courant que produit la dynamo elle-même. Dans ce cas avant de mettre une machine en service, il est nécessaire de l'aimanter, en l'excitant séparément ou en la faisant tourner en moteur. Après la suppression de cette action magnétisante, les inducteurs conservent un peu de magnétisme, ce que nous avons appelé magnétisme réma-

ment, qui permet ensuite à la machine de s'exciter elle-même, grâce à cette excitation résiduelle.

Dans les machines auto-excitatrices, le mode de couplage du circuit inducteur avec le circuit induit peut être réalisé de trois manières différentes ; de là, la classification suivante :

1° l'excitation *shunt* ou en dérivation, ainsi appelée parce qu'une petite partie seulement du courant produit dans l'induit, passe dans les électros ;

2° l'excitation *série*, où tout le courant de l'induit passe dans le fil inducteur, autrement dit, l'induit, les inducteurs et le circuit extérieur sont en série ou en tension ;

3° l'excitation *compound* qui comprend un enroulement en dérivation et un enroulement série.

On adopte pour chaque machine, dynamo ou moteur, le genre d'excitation qui lui convient le mieux pour l'usage auquel on la destine ; chacun de ces trois modes d'excitation ayant un but et des avantages déterminés.

Dans les machines compound, l'enroulement série ou gros fil peut être appliqué sur l'enroulement shunt, fil fin, comme sur la figure 21, ou former deux enroulements indépendants (fig. 22 et 23). La construction distincte de deux bobines facilite le mon-

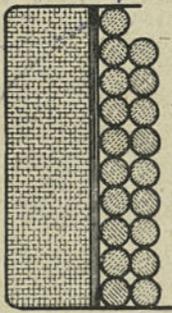


Fig. 21.

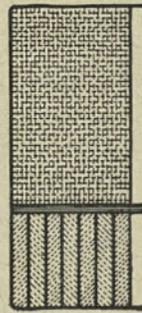


Fig. 22.



Fig. 23.

tage et le démontage des bobines en même temps que cette disposition est plus favorable au refroidissement de l'ensemble.

Les bobines d'un enroulement shunt sont généralement con-

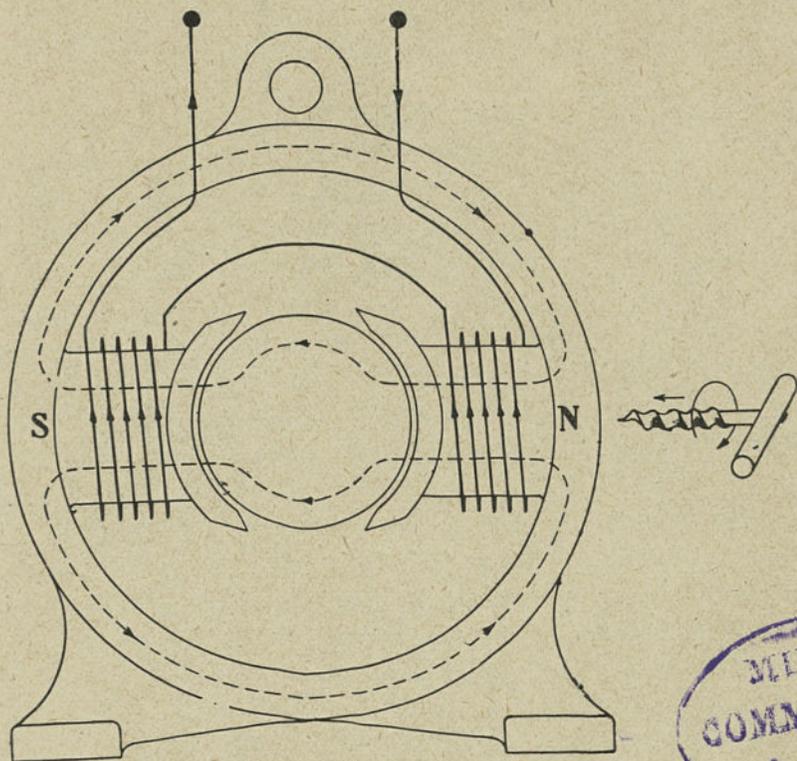


Fig. 24. — Enroulement inducteur bipolaire.

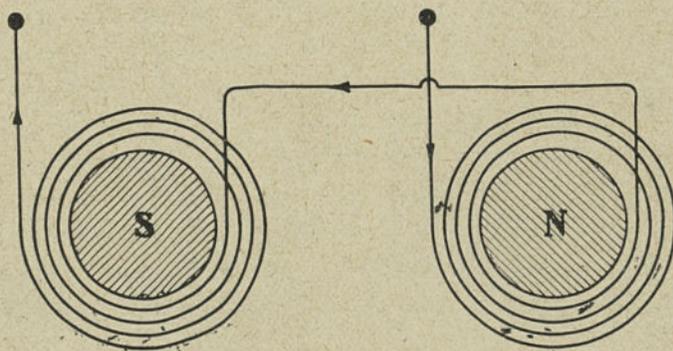


Fig. 25. — Schéma développé de la fig. 24.

CLÉMENT. Bobinages.

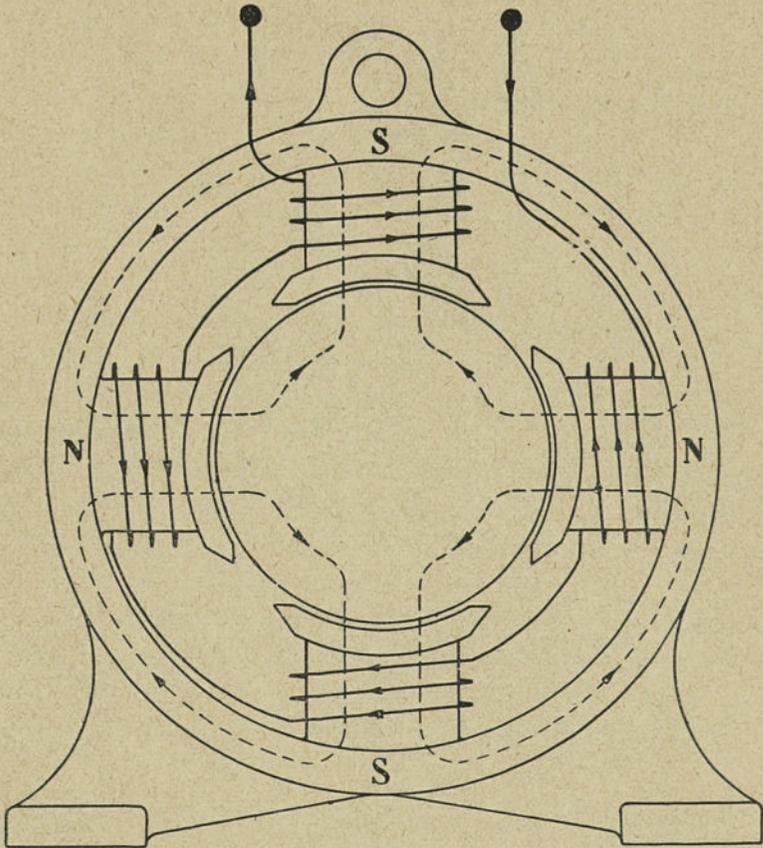


Fig. 26. — Enroulement inducteur tétrapolaire.

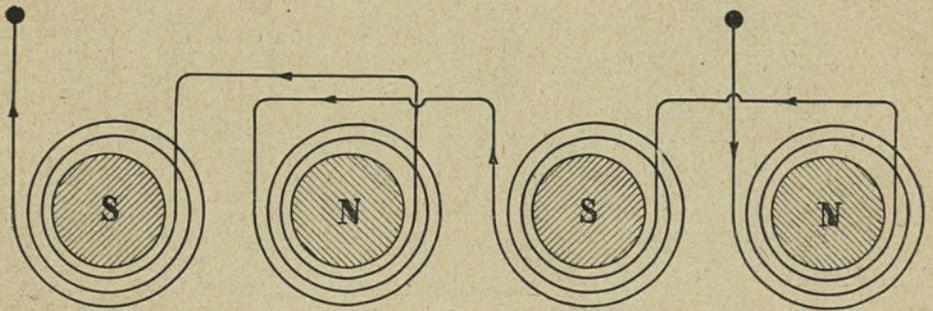


Fig. 27. — Schéma développé de la fig. 26.

nectées entre elles en série, mais en raison des fortes intensités auxquelles on peut avoir affaire, les bobines d'un enroulement série doivent parfois être groupées en parallèle.

15. Pôles auxiliaires ou de commutation. — Ces dernières années, les besoins toujours croissants de l'industrie, les avantages que présente la commande directe de certains appareils et l'utilisation de tensions de plus en plus élevées, ont amené les constructeurs à exécuter des moteurs à très grandes vitesses. Ces machines peuvent travailler sans étincelles aux balais à toutes les charges, avec un calage fixe qui, pour les moteurs devant fonctionner dans les deux sens, se trouve être le calage au point neutre. Dans ce cas les difficultés dues à la commutation n'ont pu être surmontées que grâce à l'emploi de *pôles de commutation*, appelés aussi *pôles auxiliaires*.

Ces derniers sont placés entre les pôles principaux dans l'axe de la (ou des) ligne neutre et ayant pour une dynamo le signe des pôles principaux qui les suivent dans le sens de la marche.

Ces pôles portent un enroulement traversé par tout ou partie du courant principal, et sont étudiés de manière à fournir une force magnétomotrice qui croît, ainsi que cela doit avoir lieu, avec le débit de la machine. Cette force magnétomotrice doit être suffisante pour annuler l'effet des ampères-tours antagonistes de l'induit et pour produire un champ capable de neutraliser la tension de réactance engendrée par les spires en court-circuit sous les balais (La tension de réactance dans une bobine court-circuitée est produite par le champ résultant du renversement du courant).

Les pôles de commutation sont d'autant plus indispensables que la tension, la vitesse et la puissance sont élevées, car les difficultés créées par la commutation augmentent considérablement si l'un de ces facteurs et à plus forte raison si les trois simultanément atteignent une valeur élevée. On arrive à une limite au delà de laquelle, il est impossible de maintenir la tension de réactance⁽¹⁾ suffisamment basse sans munir la machine de pôles auxiliaires.

1. Certains constructeurs admettent 3 volts comme maximum, au-dessus de cette tension les machines sont munies de pôles auxiliaires.

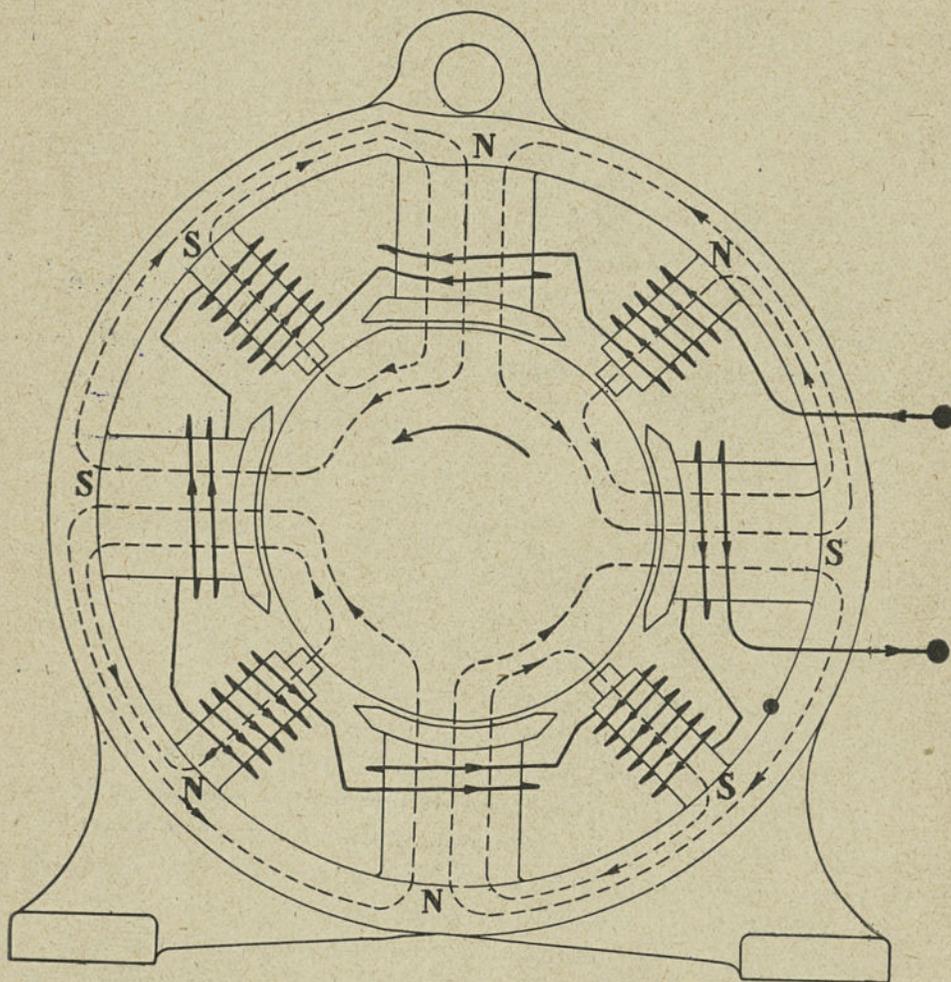


Fig. 28. — Enroulement inducteur compound avec pôles de commutation.

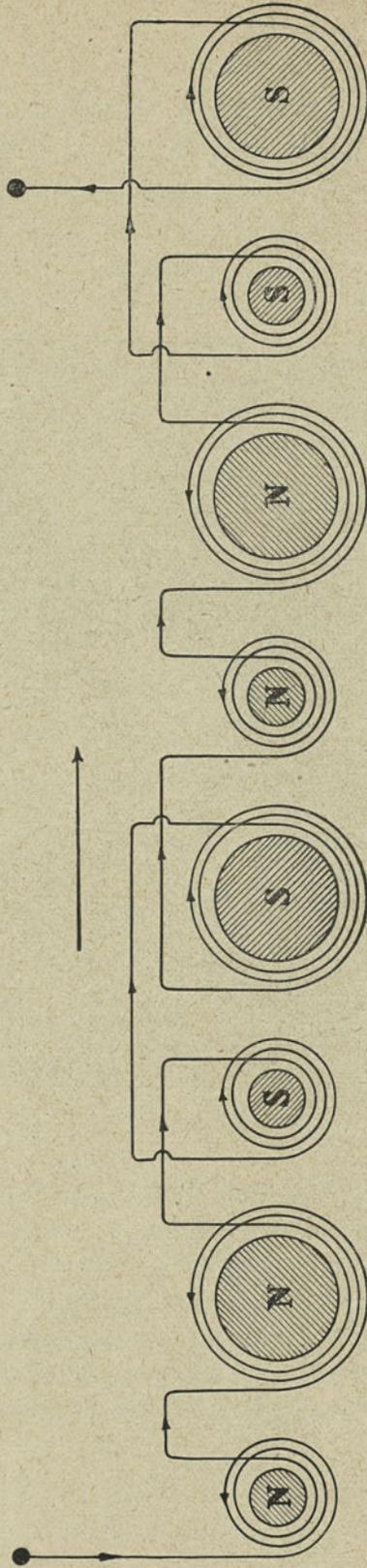


Fig. 29. — Schéma développé de la fig. 28.



16. **Confection des bobines.** — Pour l'enroulement des bobines en fil rond, il existe des tours spéciaux à bobiner d'un emploi très simple.

On peut les classer en trois catégories :

1° Tours sans guide-fil ;

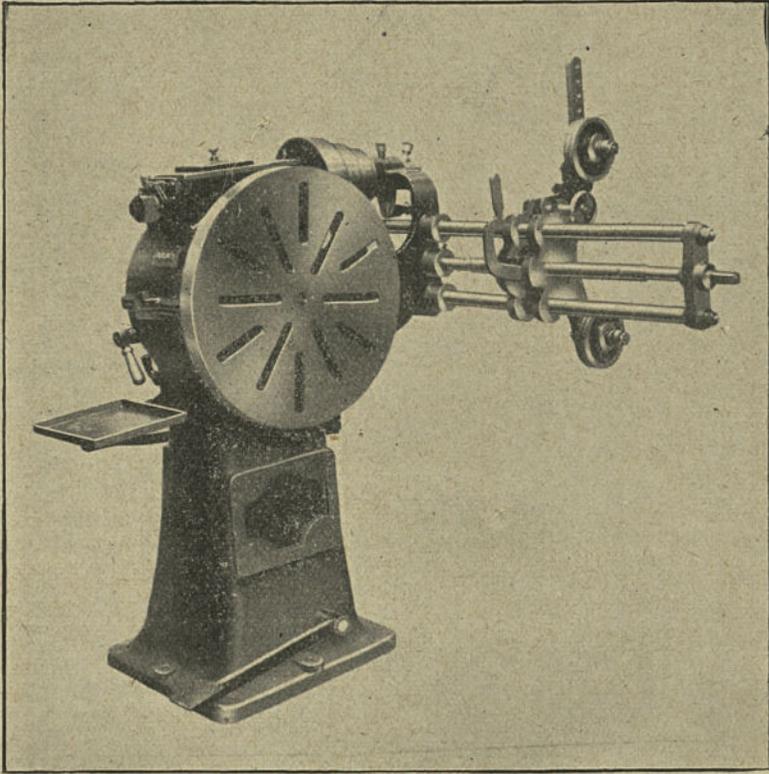


Fig. 30. — *Tour semi-automatique M. A. X. E. I. Neuilly.*

2° Tours avec guidage semi-automatique du fil ;

3° Tours entièrement automatiques.

Dans le tour semi-automatique (*fig. 30*) le renversement du sens de guidage du fil est provoqué par un levier à main. Cette disposition permet le rangement parfait du fil sur des formes même irrégulières et dont les joues ne sont pas bien parallèles. C'est le type le mieux approprié aux fabrications diverses. Le gui-

dage du fil permet à un opérateur non spécialisé, de bobiner à des vitesses bien plus élevées qu'avec un tour sans guide.

Le tendeur mobile qui rattrape automatiquement le mou du fil venant du dévidoir, compense les variations de longueur du fil

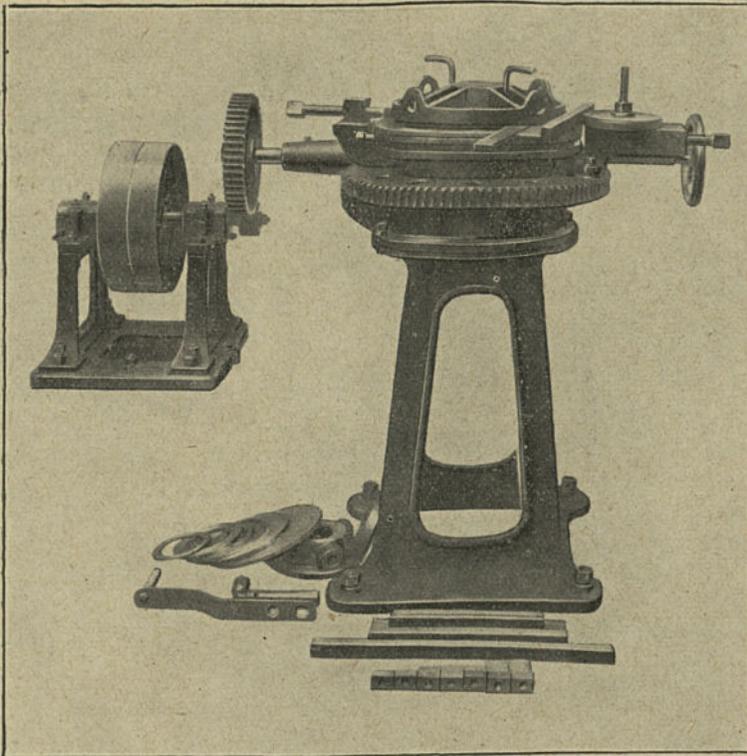


Fig. 31. — *Machine à enrouter le cuivre sur champ, suivant forme circulaire M. A. X. E. I.*

dans la confection des bobines rectangulaires et permet d'obtenir des côtés droits (et non pas bombés).

En général les tours automatiques conviennent pour la confection des bobines identiques, en grandes séries. Dans ce cas, il est nécessaire que les carcasses ou les formes soient bien régulières avec des joues parallèles, le rangement avec va-et-vient automatique n'étant possible qu'à cette condition.

Toutes ces machines sont munies d'un compteur de tour et se font pour commande électrique ou par courroie.

Pour l'enroulement des bobines-série de puissantes machines, on arrive à une section de fil telle que l'on est obligé de prendre du fil rectangulaire que l'on enroule à plat ou sur champ.

La figure 31 représente une machine à enrouler le cuivre sur champ, mais seulement suivant forme circulaire. Il existe également des machines permettant d'enrouler du cuivre méplat suivant tous profils. Ce dernier genre d'appareil est d'un emploi assez restreint et ne se rencontre pas chez les constructeurs de petit matériel, ni dans les ateliers de réparations.

Dans ces derniers surtout l'ingéniosité et l'initiative personnelles jouent un grand rôle dans les installations de fortune, nous avons exécuté avec un tour ordinaire et sans outillage spécial des bobines pour électros-série (1), en cuivre méplat de $32^{\text{mm}} \times 3^{\text{mm}}, 2$. Les dimensions du mandrin rectangulaire d'enroulement étaient de $350^{\text{mm}} \times 155^{\text{mm}}$.

Généralement les bobines d'une machine sont toutes enroulées dans le même sens, comme il est représenté sur les figures 24 à 29. Il importe que les pôles qui se suivent soient de noms contraires. Les connexions entre bobines doivent être faites de telle façon que le courant qui les parcourt soit de même sens pour les pôles de même nom et de sens contraire pour les pôles de noms différents.

17. Armatures. — Une spire ou bobine peut occuper, par rapport à l'axe de rotation trois positions différentes, d'après lesquelles on distingue trois types principaux d'armatures.

1° Armatures en anneau (*fig. 2*).

2° Armatures en tambour (*fig. 3*).

3° Armature en disque (*fig. 32*).

Les armatures en disque étant actuellement presque abandon-

1. Machines de 48 kilowatts, 240 volts, 200 ampères, 380 tours. Compound dont on voit le schéma des inducteurs sur la fig. 28. Les bobines des pôles auxiliaires exécutés dans les mêmes conditions et avec le même cuivre étaient enroulées sur un mandrin rond d'un diamètre de 67 millimètres.

nées et les armatures en anneau n'ayant plus aujourd'hui qu'un intérêt historique, nous traiterons plus spécialement les armatures en tambour.

18. Genres d'enroulements. — On classe les enroulements en trois groupes principaux savoir :

- 1° Les enroulements hélicoïdaux (*fig. 33*).
- 2° Les enroulements bouclés ou imbriqués (*fig. 34*).
- 3° Les enroulements ondulés (*fig. 35*).

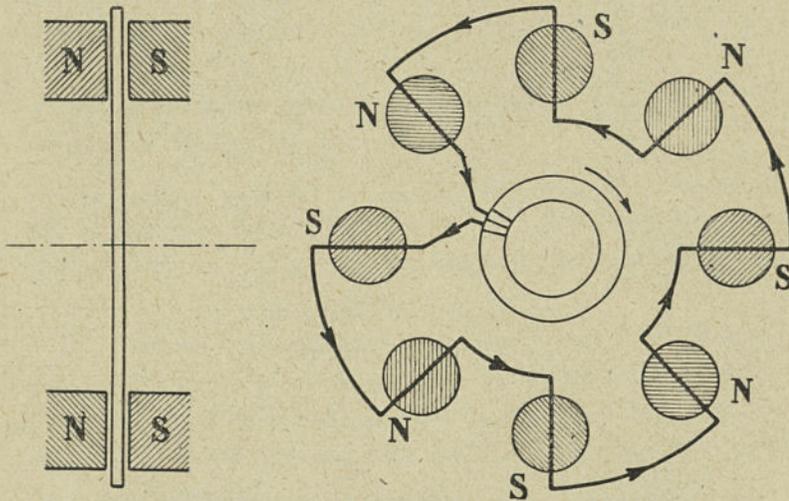


Fig. 32.

L'enroulement hélicoïdal n'est applicable qu'à l'armature en anneau, par contre les deux autres genres s'emploient indifféremment pour les armatures en anneau, en tambour ou en disque.

Un enroulement fermé est celui dans lequel on peut parcourir tout le bobinage et revenir au point de départ, chaque fin de bobine étant réunie avec le commencement de la suivante à une lame du collecteur.

Section d'enroulement. — On distingue sous le nom de *section*, les fils d'armature placés entre 2 lames de collecteur rencontrés consécutivement dans le parcours de l'enroulement.

La section peut se composer de plusieurs spires, la plus simple est la spire unique que l'on ne rencontre guère que dans les

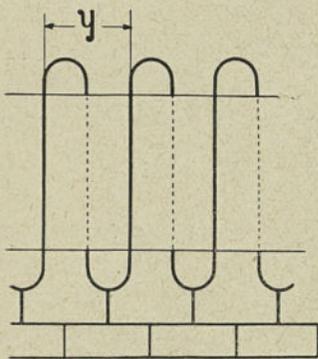


Fig. 33. — $m_c = y$

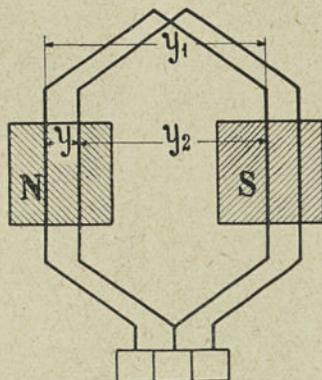


Fig. 34. — $y = y_1 - y_2 m_c = y$

enroulements en barres. Si l'induit comporte b sections de chacune w spires en série, on aura :

$$N = 2bw \text{ pour un tambour.}$$

$$N = bw \text{ pour un anneau.}$$

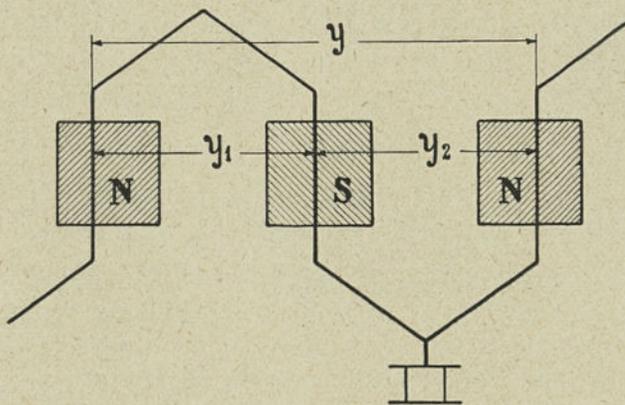


Fig. 35. — $y = y_1 + y_2 m_c = 1.$

Le nombre de sections est égal au nombre de lames du collecteur.

Pas d'enroulement. — On appelle ainsi le nombre de barres

rencontrées sur la périphérie de l'armature, quand en partant d'une lame de collecteur on arrive à la prochaine autre lame c'est-à-dire quand on a parcouru une section entière. Le pas d'enroulement y d'un bobinage se compose de plusieurs pas élémentaires dont le nombre est égal à celui des côtés de bobine soumis à l'induction et on a :

$$y = y_1 \pm y_2 \pm y_3 \dots \pm y_n.$$

Pas dans le champ. — Chaque élément de l'enroulement occupe par rapport au champ une position différente, la distance qui les sépare est plus grande ou plus petite que le pas polaire, selon que l'on avance ou que l'on recule dans le champ en parcourant l'enroulement, c'est ce déplacement qui constitue le pas dans le champ et que l'on désigne par m_c .

Pas polaire. — C'est le nombre de paires de pôles embrassés par un élément; il y a intérêt à le réduire le plus possible pour diminuer les longueurs des connexions entre fils actifs.

19. Bobinage en hélice. — Les fils de cet enroulement sont tous connectés en série, de manière à constituer une hélice fermée sur elle-même. Cet enroulement se poursuit toujours dans le même sens et on a parcouru toutes les spires quand en le suivant on a effectué une seule fois le tour complet de l'induit.

Comme un pôle nord succède toujours à un pôle sud et réciproquement, il y a inversion de courant entre deux pôles, ce qui oblige à placer une ligne de balais à chacune de ces positions pour lesquelles le courant d'armature se dédouble en deux courants de sens inverse (*fig. 10*).

Il en résulte qu'avec l'enroulement hélicoïdal on a autant de branches de courant que de pôles. Il est donc applicable à un nombre quelconque de pôles à condition que le nombre de lignes de balais soit augmenté en conséquence (*fig. 36*).

Les bobines voisines se suivent dans le schéma, on aura pour ce genre de bobinage :

$$y = \pm 1.$$

Le pas dans le champ est égal au pas d'enroulement : $m_c = y$.
Le pas polaire est égal à zéro.

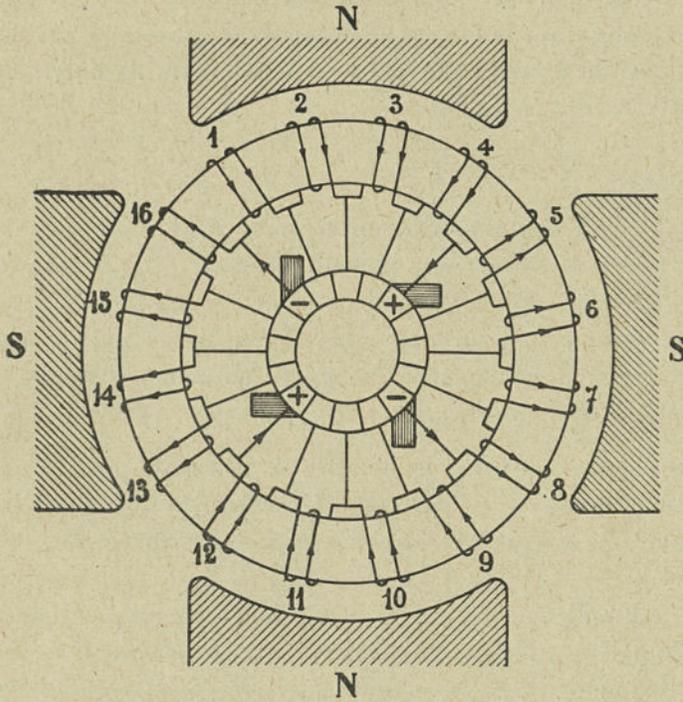


Fig. 36. — Enroulement hélicoïdal. $p = 2$ $a = p$ $m_c = y = 1$

20. Enroulement parallèle multiple en hélice. — Lorsqu'il s'agit d'exécuter un induit capable de produire un courant de grande intensité sous une faible tension, l'enroulement ordinaire en hélice conduit à l'emploi d'un petit nombre de barres de forte section et à un collecteur comportant si peu de lames qu'un bon fonctionnement de la machine ne saurait être obtenu. On peut augmenter le nombre des conducteurs et celui des segments à l'aide d'un enroulement en parallèle multiple. On réalise ce bobinage en posant $y = \pm u$ avec $u > 1$ mais entier. Le nombre de paires de circuits offerts au courant est up .

Si dans la liaison des bobines, on en saute régulièrement une sur deux en connectant par exemple les bobines 1 — 3 — 5..., etc.,

on ne reliera ainsi en faisant un tour complet que la moitié du nombre total des bobines, et il faudra effectuer un second tour en reliant les bobines 2 — 4 — 6..., etc., pour parcourir l'enroulement entier.

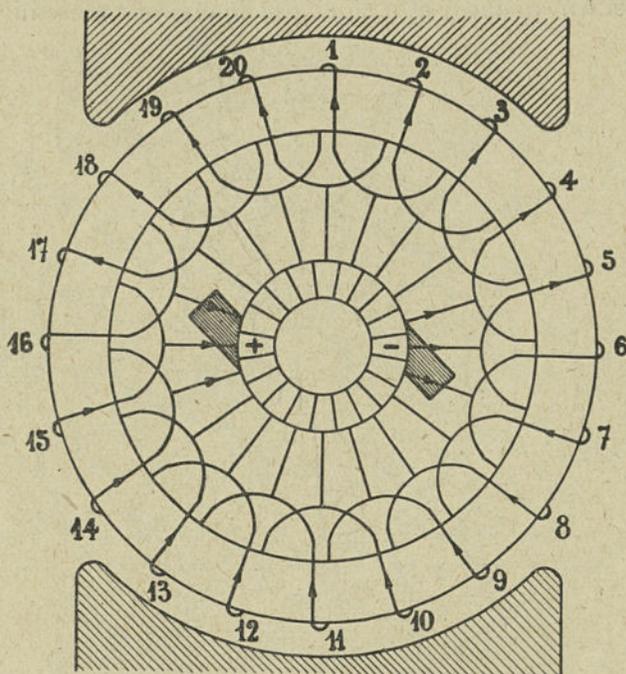


Fig. 37. — Enroulement hélicoïdal fermé double bipolaire.

$$p = 1, \quad \gamma = m_c = 2, \quad a = 2p = 2.$$

Si le nombre b de bobines est pair, on revient après un premier tour à la bobine de départ, l'enroulement se ferme sur lui-même après avoir parcouru les bobines de rang impair. Les bobines paires peuvent être reliées de même en un second enroulement semblable, absolument indépendant du premier. On obtient ce qu'on appelle un *enroulement fermé double* (fig. 37).

Si au contraire le nombre de bobines est impair, on ne revient pas, après le premier tour à la bobine 1, il faut ici encore effectuer deux tours pour parcourir toutes les bobines, mais les deux enroulements se font suite bout à bout sans interruption. C'est un *enroulement fermé simple* (fig. 38).

Un enroulement fermé simple est tout indiqué pour les machines à courants intenses, sous faible tension et se comporte mieux que ceux qui sont constitués par plusieurs bobinages séparés, car il ne saurait s'y produire aucune inégalité. On obtient un tel enroulement quand y et b n'ont pas de diviseur commun.

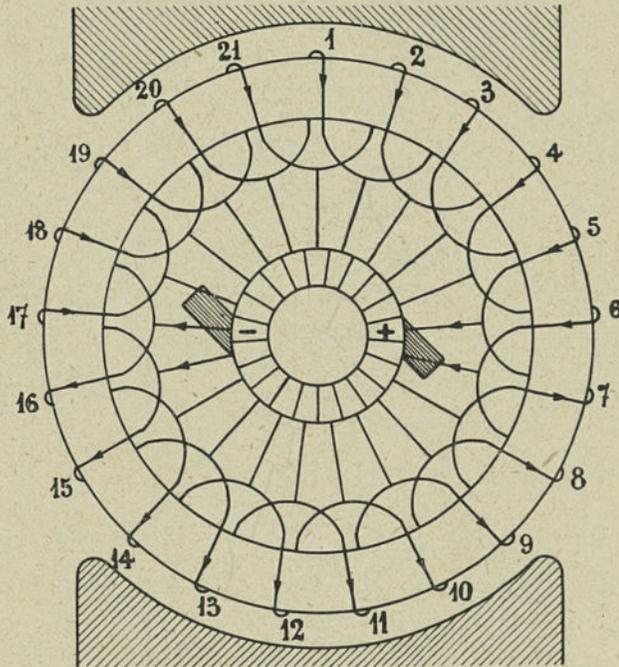


Fig. 38. — Enroulement hélicoïdal fermé simple bipolaire.
 $p = 1$, $y = m_c = 2$, $a = 2p = 2$.

Dans le cas d'un enroulement fermé double il est indispensable que les balais portent sur trois lamès consécutives de collecteur.

La force électromotrice induite dans un bobinage en parallèle multiple est u fois plus petite qu'avec un enroulement ordinaire où $u = 1$.

21. Enroulement bouclé ou imbriqué. — Une section d'enroulement imbriqué se compose de deux fils au moins qui viennent se placer respectivement dans le champ d'action de pôles de noms contraires. Les spires chevauchent et tout en progressant, cheminent tantôt en avant, tantôt en arrière en formant une boucle (*fig. 39*).

Le pas de l'enroulement est la composante de deux pas élémentaires y_1 et y_2 de sens contraires et inégaux :

$$y = y_1 - y_2 = \pm 2.$$

Le pas dans le champ est égal au pas d'enroulement

$$m_c = y = \pm 2.$$

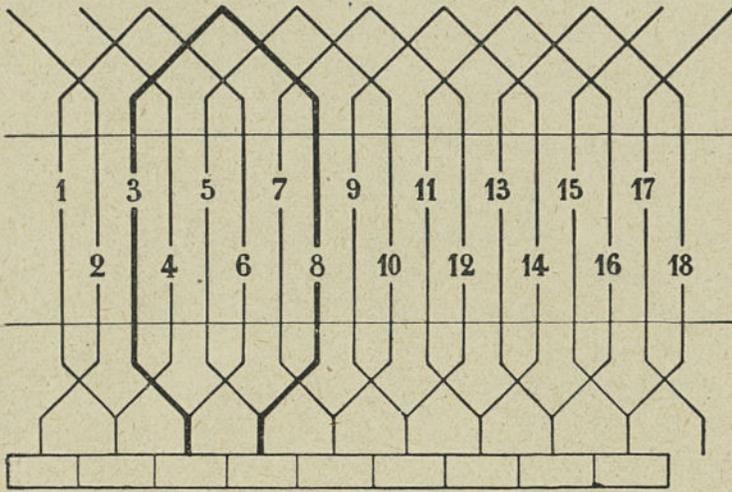


Fig. 39. — Enroulement bouclé.

$$p = 2, \quad y = m_c = 2, \quad a = p, \quad y_1 = \frac{18 + 2}{4} = 5, \quad y_2 = 5 - 2 = 3, \quad y_c = 1.$$

Le pas polaire est égal à zéro.

L'écartement des deux côtés de bobine doit être sensiblement égal à celui des pôles, les pas composants doivent être très peu différents de :

$$\frac{2b}{2p} = \frac{b}{p}$$

$2b$ étant le nombre des côtés de bobine répartis à la périphérie de l'armature.

y_1 et y_2 devant être des nombres entiers impairs, on posera pour $N = 2b$

$$y_1 = \frac{N \pm q}{2p} \quad \text{et} \quad y_2 = \frac{N \pm q}{2p} \pm 2$$

q est un nombre entier quelconque choisi à volonté de manière à rendre divisible par $2p$ le numérateur ci-dessus. Cette quantité q est une mesure de l'écart entre le pas polaire et le pas élémentaire y_2 .

Cet enroulement imbriqué où $a = p$ est dit en *parallèle simple*.

Au lieu de relier consécutivement les sections voisines, on peut en sauter régulièrement une ou plusieurs de manière à effectuer u tours de l'armature pour parcourir tout l'enroulement, c'est-à-dire autant de tours qu'on aura sauté de sections chaque fois.

Partant d'une lame de collecteur et après avoir parcouru une bobine, on arrivera à u lames en avant ou en arrière de la lame de départ. On aura toujours :

$$y = m_c = y_1 - y_2 = 2u.$$

Pour la simplicité des schémas nous admettrons que chaque bobine comporte une spire unique à deux côtés induits par bobine dans les armatures en tambour; on a alors $N = 2b$. Au point de vue du numérotage, les bobines à spires multiples se comportent comme une spire simple.

$$y_1 = \frac{N \pm q}{2p}, \quad y_2 = \frac{N \pm q}{2p} \pm 2u.$$

Le nombre des branches du courant est évidemment égal à $2p$ fois le nombre de tours de l'armature effectués quand on parcourt le bobinage c'est-à-dire égal à $2pu$

d'où $2a = 2pu$ et $u = \frac{a}{p}$.

ce qui donne définitivement pour les enroulements imbriqués :

$$y_1 - y_2 = 2u = \frac{2a}{p},$$

$$y_1 = \frac{N \pm q}{2p}, \quad y_2 = \frac{N \pm q}{2p} \pm \frac{2a}{p}, \quad y_c = \frac{y_1 - y_2}{2} = \pm \frac{a}{p}.$$

y_c étant le pas du collecteur.

Lorsque $a = up$, l'enroulement est dit en *parallèle multiple*. Pour le cas particulier où $a = 2p$ l'enroulement est désigné fréquemment sous le nom de *parallèle double* (fig. 40). Cet enroulement peut d'ailleurs être fermé simple ou multiple.

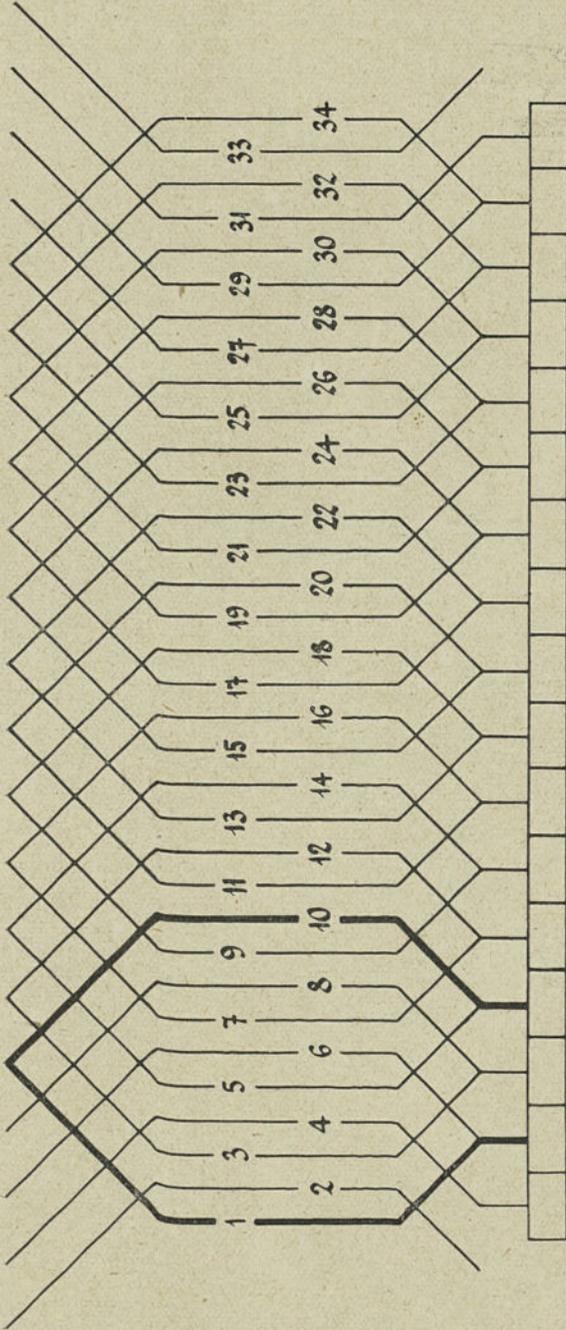


Fig. 40. — Enroulement bouclé.

$$p = 2, \quad \gamma = m_c = 4, \quad a = 2p = 4, \quad \gamma_1 = \frac{34 - 2}{4} = 9, \quad \gamma_2 = 9 - 4 = 5.$$

CLÉMENT. Bobinages.

22. Enroulement bipolaire en tambour en parallèle. — L'enroulement en parallèle est le seul employé dans les machines bipolaires. Comme on vient de le voir il peut être simple ou multiple. Dans les enroulements en tambour usuels on a : $K = b$ et $N = 2b$

$K =$ Nombre de lames du collecteur.

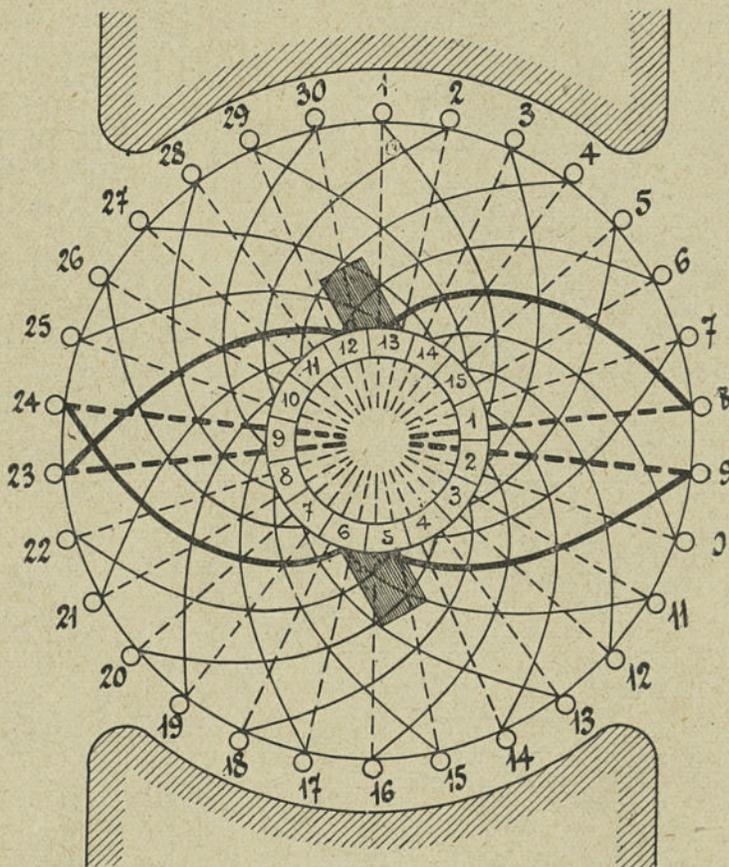


Fig. 41.

Comme K et b sont des nombres entiers, N est toujours pair. On voit dans la figure 41 un enroulement en tambour bipolaire avec :

$$N = 30, \quad p = 1, \quad q = 0, \quad K = 15, \quad a = 1,$$

$$y_1 = \frac{30}{2} = 15, \quad y_2 = \frac{30}{2} - 2 = 13, \quad y_c = 1.$$

Les deux branches du courant sont pour la position instantanée de l'armature.

$\left. \begin{array}{l} 12 \\ 13 \end{array} \right\} \begin{array}{l} 6-21-4-19-2-17-30-15-28-13-26-11 \\ 25-10-27-12-29-14-1-16-3-18-5-20-7-22 \end{array} \right\} \begin{array}{l} 6 \\ 5 \end{array}$

Les sections 8 et 23 et 9-24 sont en court-circuit.

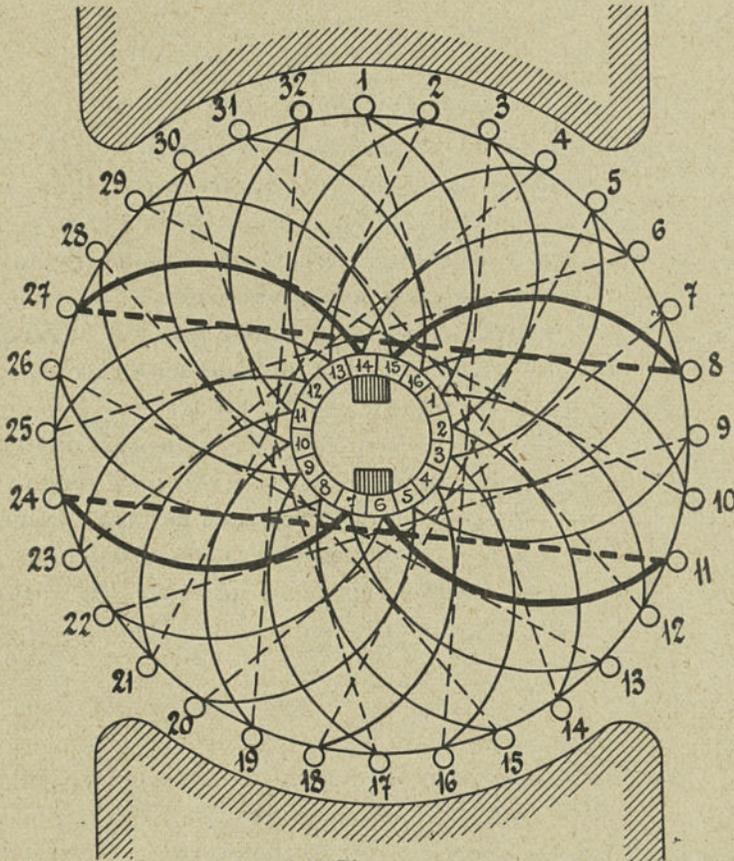


Fig. 42.

Cet enroulement pour lequel $q=0$ est désigné sous le nom d'*enroulement diamétral*; il n'est pas applicable si $\frac{N}{2}$ est pair parce que y_1 et y_2 seraient alors pairs.

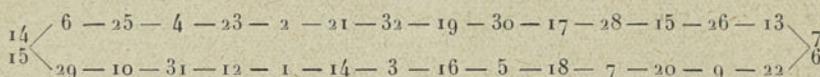
Si l'on attribue à q une valeur entière déterminée, avec le signe moins, les pas élémentaires deviennent plus petits que le pas polaire,

l'enroulement ainsi obtenu est dit à *pas raccourci* ou à *corde* (fig. 42).

On a dans ce cas : $N = 32$, $p = a = 1$, $q = -6$, $K = 16$

$$y_1 = \frac{32 - 6}{2} = 13, \quad y_2 = \frac{32 - 6}{2} - 2 = 11.$$

Les deux branches du courant se répartissent de la manière suivante



Les bobines 8-27 et 11-24 sont en court-circuit.

L'encombrement de l'enroulement à pas raccourci est plus faible que l'enroulement diamétral, en même temps que la réduction des connexions extérieures détermine une certaine économie de cuivre.

Le raccourcissement du pas a pour conséquence de diminuer la réaction d'induit, mais il ne peut être poussé trop loin et la corde ne doit pas être plus petite que celle qui sous-tend l'arc polaire.

Armatures rainées ou dentées. — La plupart des armatures actuelles sont rainées, elles présentent en effet dans ces conditions de grands avantages sur les armatures lisses (voir paragraphe 29).

Lorsque plusieurs bobines sont logées dans la même rainure, il y a intérêt à ce que le nombre de bobines soit divisible par le nombre z de rainures; il arrive cependant qu'on ne peut réaliser cette condition, l'une des rainures contient alors moins de côtés induits que les autres.

L'enroulement d'une armature dentée peut être effectué à la main ou avec sections gabariées.

Le bobinage à la main tend de plus en plus à disparaître, on ne l'emploie plus guère que pour les machines bipolaires et encore pour ces dernières, un grand nombre de constructeurs ont recours aux enroulements sur gabarit.

La figure 43 représente schématiquement une armature dentée bipolaire enroulée à la main.

Le bobinage est simplement amorcé et on a représenté quatre bobines seulement; il se fait dans l'ordre du numérotage romain des bobines. On remarquera que ces dernières ne suivent pas le numérotage des encoches, mais chaque fois on saute un certain

nombre d'encoches afin de laisser libre les sorties des bobines intermédiaires et obtenir un enroulement plus régulier. Du côté opposé au collecteur, les fils forment une masse appelée *chignon* dont le principal inconvénient est de placer l'un près de l'autre des paquets de fils à des potentiels très différents. De plus il faut une certaine habileté professionnelle pour obtenir un chignon tournant rond.

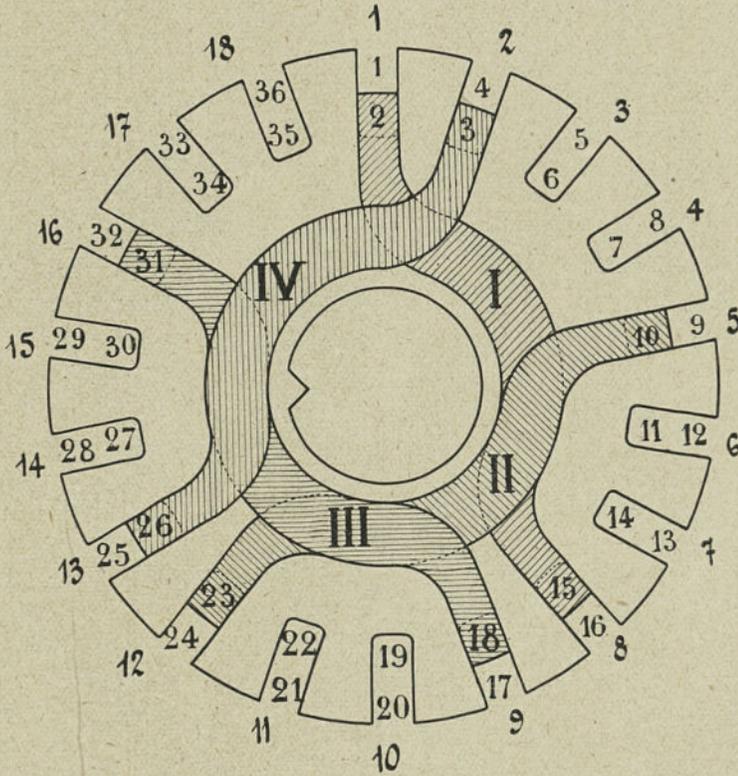


Fig. 43.

L'enroulement sur gabarit qui ne demande pas une main-d'œuvre bien spécialisée offre les avantages suivants : préparation rapide et économique des sections ; les longueurs de spires et la position des bobines sur l'armature sont identiques, remplacement facile d'une section détériorée, enfin il se refroidit mieux que l'enroulement à la main.

On fait couramment aujourd'hui ce qu'on appelle l'*enroulement*

en manteau où les têtes des bobines sont sur la même [surface cylindrique que les côtés induits. Les calibres de ce genre s'établissent facilement (voir paragraphe 33).

La figure 44 représente le montage d'une section sur forme pour la même armature dentée de la figure 43.

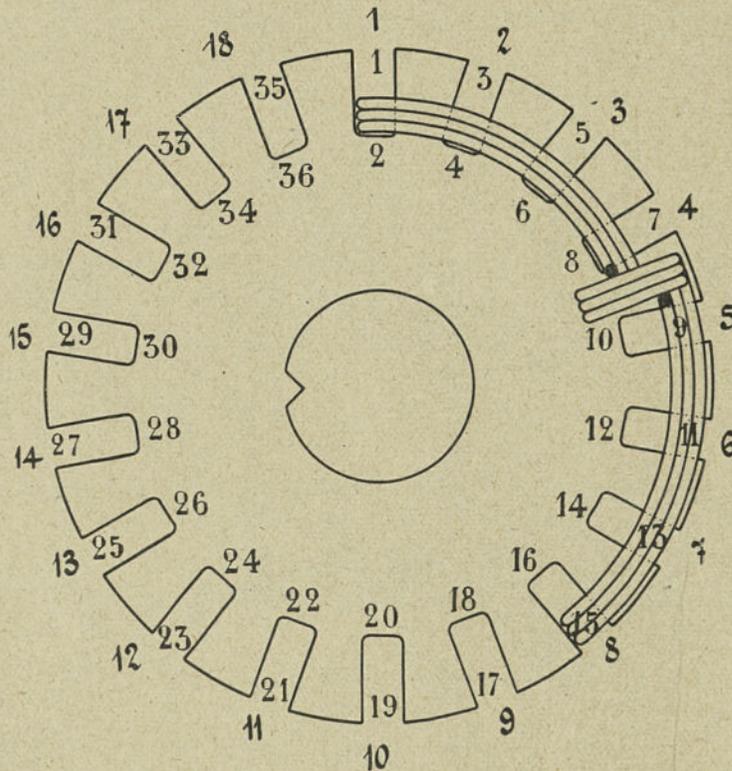


Fig. 44.

Avec le bobinage sur gabarit un côté de section situé extérieurement dans une rainure est toujours relié à un autre côté situé au fond d'une autre encoche et inversement.

Afin de pouvoir appliquer aux bobinages les formules générales de couplage, il faut adopter un ordre de numérotage déterminé.

Pour les bobinages faits directement à la main, on doit numérotter les bobines comme l'indique la figure 43, pour les bobinages sur forme le numérotage doit se faire dans l'ordre des figures 44 et 45.

23. Enroulement multipolaire en tambour à couplage en parallèle. — La figure 45 représente un enroulement pour une machine à 4 pôles. Les quatre branches de courant sont indiquées

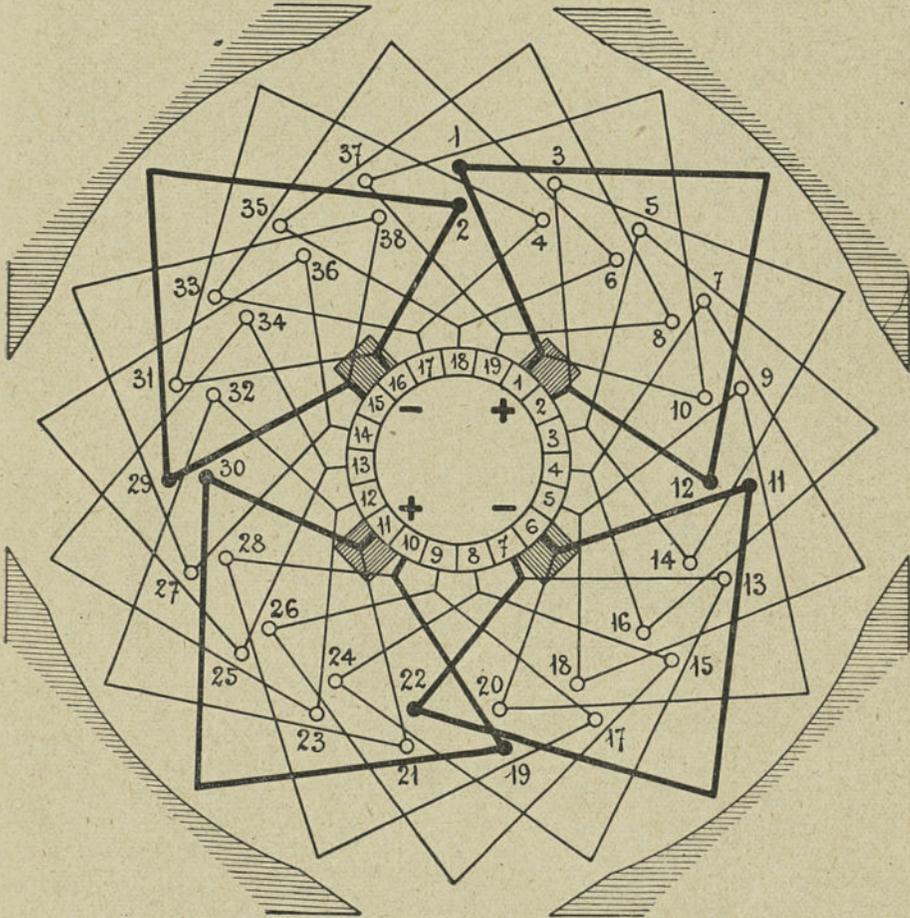


Fig. 45. — Enroulement bouclé tétrapolaire.

$$N = 38, \quad q = 2, \quad p = a = 2, \quad y_1 = \frac{38 - 2}{4} + 2 = 11, \quad y_2 = 9, \quad y_c = 1.$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{lame 16} - 31 - 4 - 33 - 6 - 35 - 8 - 37 - 10 - \text{lame 1} \\ \text{lame 15} - 38 - 27 - 36 - 25 - 34 - 23 - 32 - 21 - \text{lame 11} \end{array} \right\} +$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{lame 6} - 20 - 9 - 18 - 7 - 16 - 5 - 14 - 3 - \text{lame 2} \\ \text{lame 7} - 13 - 24 - 15 - 26 - 17 - 28 - \text{lame 10} \end{array} \right\} +$$

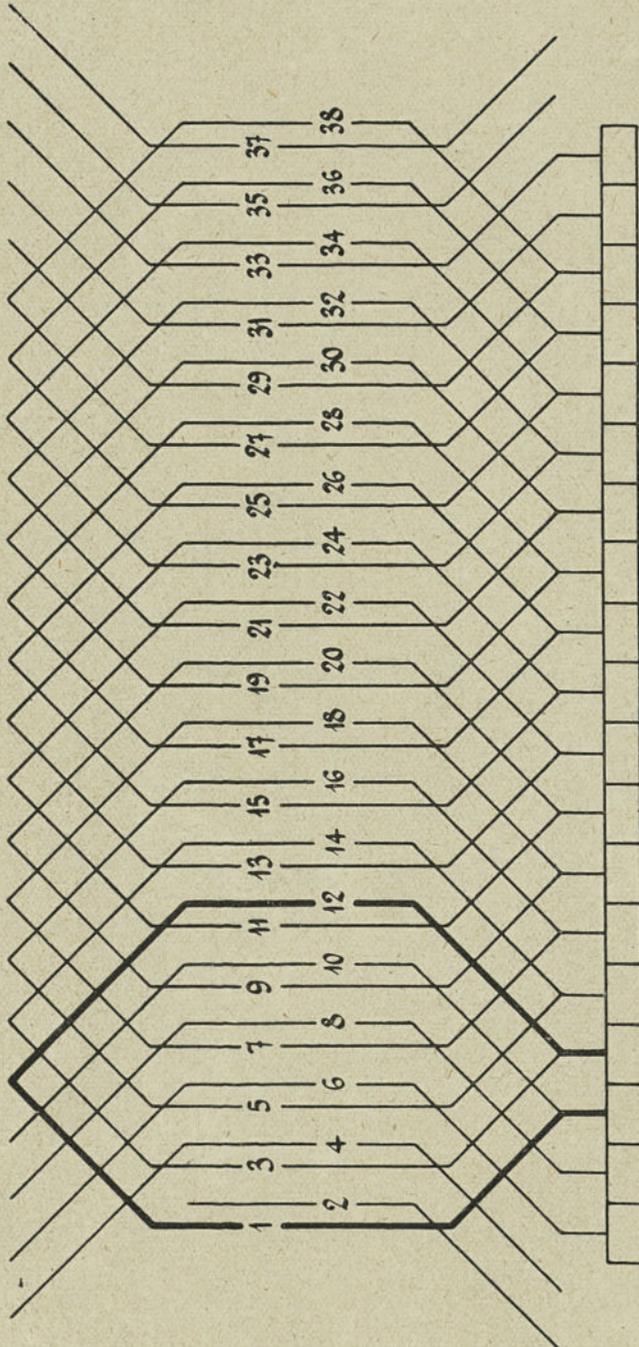


Fig. 46. — Enroulement bouclé. $p = a = 2$, $\gamma = 2$, $\gamma_1 = 11$, $\gamma_2 = 9$, $\gamma_c = 1$.

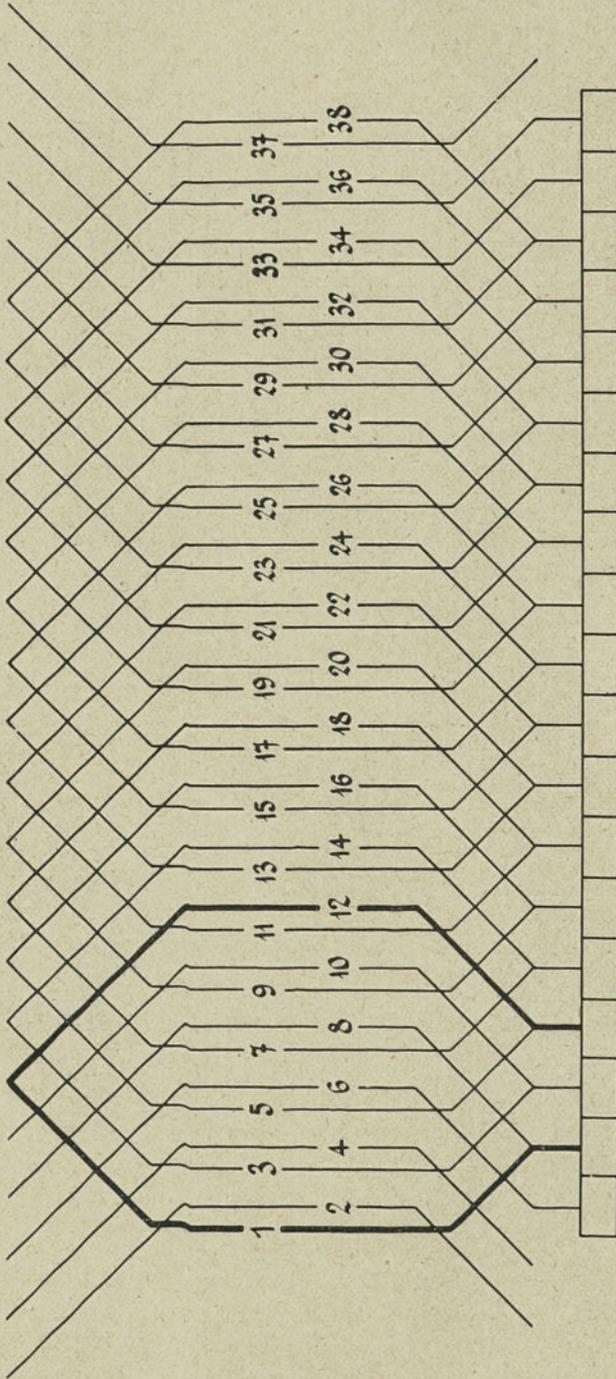


Fig. 47. — Enroulement bouclé.

$$p=2, N=38, a=4, q=-10, y_1 = \frac{38-10}{4} + 4 = 11, y_2=7, y_c=2.$$

au bas de la figure. Les bobines 1-12, 11-22, 19-30 et 29-2 sont en court-circuit.

La figure 46 représente le même bobinage mais développé. Si l'on veut avec cet induit obtenir un débit en ampères, deux fois plus grand, on fera les connexions comme l'indique le schéma de la figure 47, où l'on a un enroulement en parallèle double fermé simple car N n'est pas divisible par y , la force électromotrice développée dans l'armature sera moitié moindre.

Dans tous les schémas développés de cet ouvrage, les traits longs représentent les côtés de bobines situés en haut des encoches, et les traits courts, les côtés de bobines du fond des encoches. Il est évident que l'on peut adopter la convention contraire.

Il est facile maintenant de tracer les schémas pour un nombre de pôles quelconque avec enroulements en parallèle, simple ou multiple.

Les armatures multipolaires à couplage en parallèle multiple ont l'inconvénient de favoriser le développement exagéré de forts courants internes lorsque les champs sont dissymétriques. On substitue avantageusement à ces enroulements autant qu'il est possible, les enroulements en séries parallèles d'Arnold.

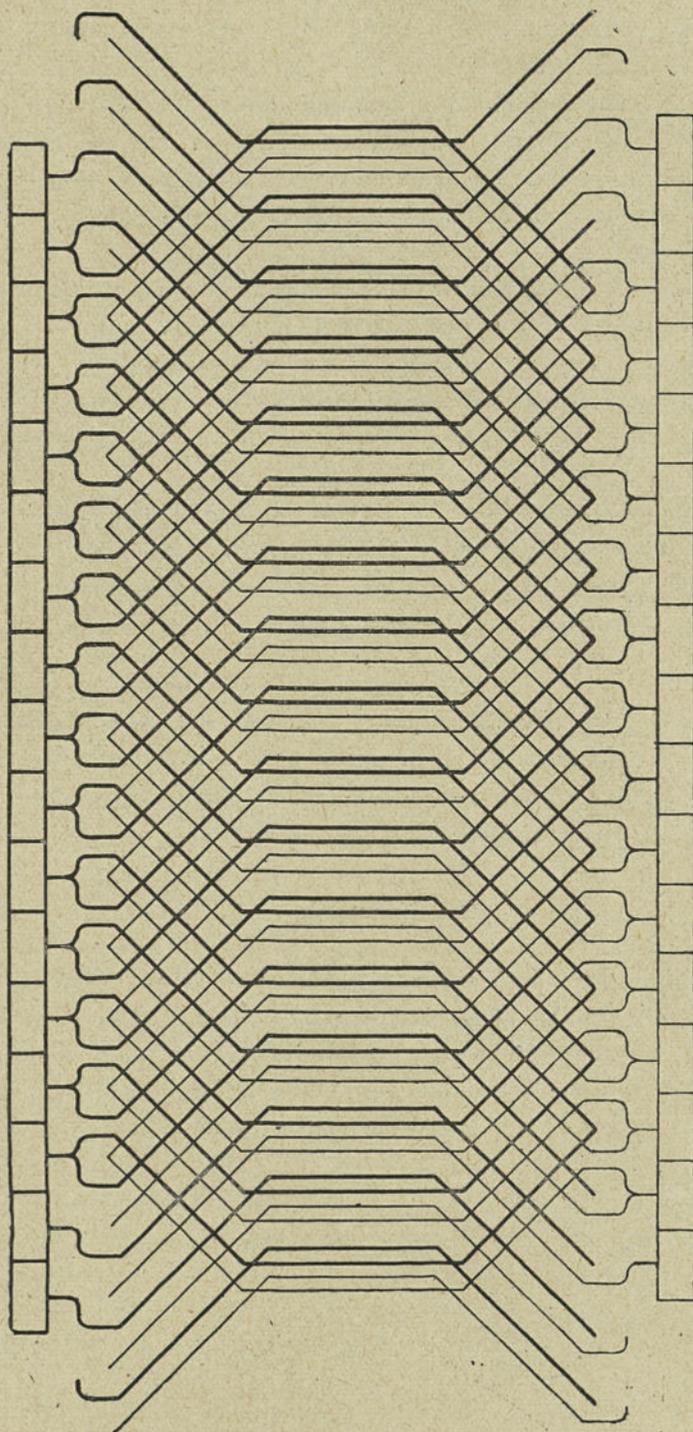
24. Armature en tambour à deux collecteurs. — Lorsque l'intensité qui doit passer par chaque ligne de balais dépasse certaines limites, on arrive à des longueurs exagérées de collecteur.

Pour les machines à grand débit, on peut augmenter le nombre de pôles ou adopter deux collecteurs se montant de part et d'autre de l'induit. C'est le cas des dynamos de faible tension pour galvanoplastie, les deux collecteurs se couplent en quantité.

La force électromotrice de la machine est égale à la différence de potentiel existant entre deux balais de noms contraires d'un collecteur et l'intensité est égale à la somme des intensités des deux collecteurs. Il est très difficile dans ce cas d'équilibrer la charge, également sur les deux collecteurs.

Ces derniers temps, les besoins toujours plus grands de la télégraphie sans fil ont amené les constructeurs à faire des machines de petite puissance à très haut voltage, 1 000 et 2 000 volts. Pour

Collecteur I



Collecteur II

Fig. 48.

raison de commutation, on est obligé de donner aux collecteurs de ces machines, un grand nombre de lames, ce qui en augmente le diamètre. On est amené ici comme dans le cas précédent à mettre deux collecteurs que l'on couple en série, la force électromotrice de la machine est égale au double de la force électromotrice de chaque bobinage et l'intensité totale est celle recueillie par collecteur.

La figure 48 représente un schéma de ce genre à deux enroulements indépendants, reliés chacun à un collecteur. Pour ce faire, on numérote séparément chaque bobinage qui se comporte comme un enroulement en parallèle. Celui-ci peut être simple ou multiple suivant le cas et reste soumis aux mêmes formules de couplage.

25. Enroulement ondulé. — L'enroulement ondulé diffère de l'enroulement imbriqué en ce que les deux pas élémentaires y_1 et y_2 sont de même signe, on progresse toujours dans le même sens (*fig.* 49), et on a :

$$y = y_1 + y_2.$$

Le pas y est approximativement égal au double du pas polaire, car il faut déplacer légèrement dans le champ chaque bobine par rapport à la précédente, d'où il résulte que le pas y doit être supérieur ou inférieur au double du pas polaire :

$$y = \frac{N}{p} \pm m_c.$$

Cette différence entre le pas de l'enroulement et le double pas polaire donne donc le déplacement dans le champ, plus ce déplacement sera faible moindre sera le nombre de branches du courant. Le plus petit déplacement sera égal à ± 2 .

Les pas élémentaires y_1 et y_2 ont une valeur voisine du pas polaire :

$$y_1 = \frac{N \pm q}{2p} \pm \frac{m_c}{2}, \quad y_2 = \frac{N \pm q}{2p} \pm \frac{m_c}{2},$$

$$y = \frac{N}{p} \pm m_c$$

q ayant comme dans l'enroulement imbriqué une valeur telle que y_1 et y_2 soient des nombres entiers impairs.

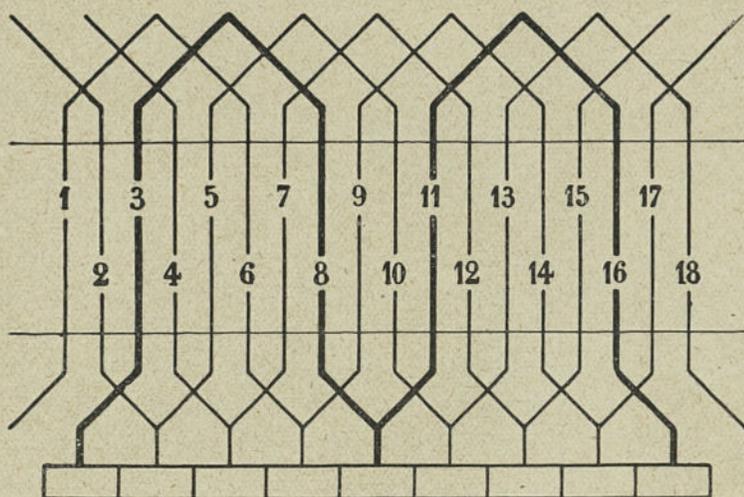


Fig. 49. Enroulement ondulé.

Si après avoir parcouru une fois la périphérie de l'armature, on arrive à la lame de collecteur voisine de celle d'où l'on est parti, à chaque tour, on se déplace dans le champ et suivant un sens déterminé de deux côtés induits. C'est l'enroulement en *série*, il n'est applicable qu'aux machines multipolaires et n'est possible qu'avec l'enroulement ondulé. Le nombre de circuits offerts au courant est égal à deux, le nombre des lignes de balais peut également être réduit à deux mais on peut toujours l'augmenter jusqu'à $2p$ et

$$y = y_1 + y_2 = \frac{N \pm 2}{p}$$

Si après avoir parcouru une première fois la périphérie de l'armature, nous n'arrivons plus à la lame de collecteur voisine de celle de départ, mais à deux lames en avant ou en arrière, on se déplacera dans le champ de quatre côtés induits.

En continuant à suivre l'enroulement quand nous nous serons déplacé dans le champ de deux fois le pas polaire, nous n'aurons

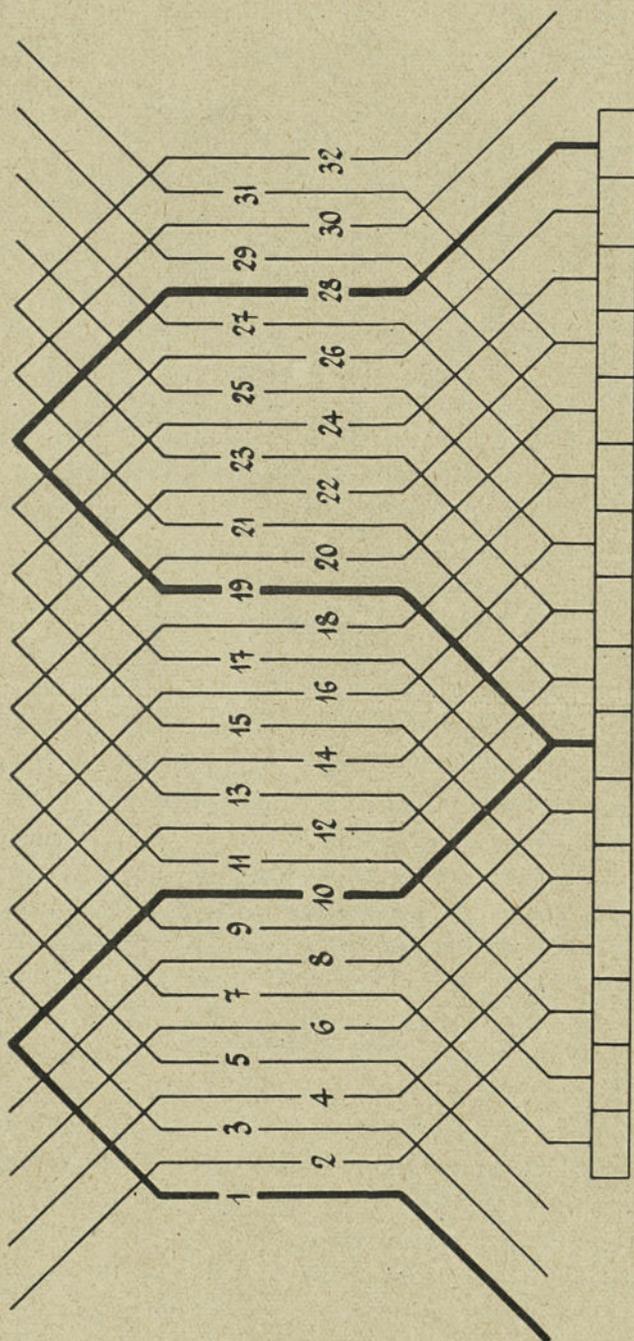


Fig. 50. — Enroulement ondulé.

$$p=2, a=2, y=y_1+y_2=\frac{3a+4}{2}=18, y_1=y_2=9.$$

encore parcouru que la moitié des bobines, car nous aurons constamment sauté une lame de collecteur et avec elle une bobine.

Comme dans les bobinages en hélice et imbriqué, l'enroulement peut se fermer sur lui-même et l'on peut avec les sections restantes constituer un second enroulement semblable au premier, il sera fermé double, ou bien l'enroulement ne se fermera que quand on aura de nouveau progressé dans le champ de deux pas polaires, il sera fermé simple. Dans les deux cas, on obtiendra deux fois autant de branches de courant que dans l'enroulement en série vu précédemment.

Il faut donc d'une façon générale progresser de u fois dans le champ de deux pas polaire pour parcourir toutes les bobines c'est-à-dire autant de fois qu'il y a de lames en avant ou en arrière de la lame de départ après un premier tour de la périphérie.

Le nombre de circuits du courant sera égal à $2u$, on a :

$$y = y_1 + y_2 = \frac{N \pm 2a}{p} \quad \text{et} \quad 2a = 2u$$

a étant plus grand que 1 est un nombre entier quelconque.

Cet enroulement est dit en *séries parallèles*, il est fermé simple quand y_c et K sont premiers entre eux. Le schéma de la figure 50 représente un enroulement en séries parallèles fermé simple.

26. Enroulement en série. — On a :

$$y = y_1 + y_2 = \frac{N \pm 2}{p}$$

Il faut donc choisir N de telle sorte que $\frac{N \pm 2}{p}$ soit un nombre entier pair. y_1 et y_2 peuvent d'ailleurs être égaux ou inégaux, si l'un augmente, l'autre diminue puisque leur somme doit rester constante.

Il y a intérêt à leur donner des valeurs se rapprochant aussi près que possible de l'égalité et on choisira de préférence $y_1 - y_2 = 0$ ou $y_1 - y_2 = \pm 2$.

Le pas du collecteur est égal à :

$$y_c = \frac{y_1 + y_2}{2} = \frac{K \pm 1}{p}$$

Nous avons vu qu'on peut réduire à deux le nombre de lignes de balais (*fig. 51*), mais il faut donner à ces balais une section

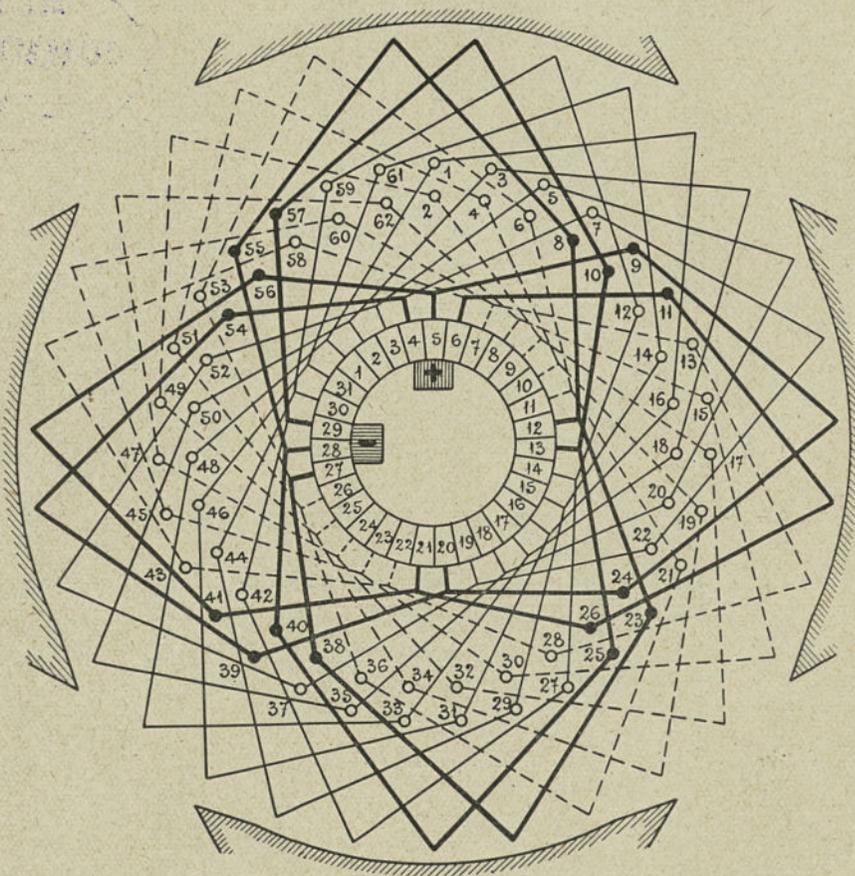


Fig. 51. — Enroulement en série.

$$p=2, \quad a=1, \quad N=62, \quad K=31, \quad y_1+y_2=\frac{62-2}{2}=30, \quad y_1=y_2=15, \quad y_c=15.$$

$$+ \left\{ \begin{array}{l} \text{lame 6-58-43-28-13-60-45-30-15-62-47-32-17-2-40-34-19-4-51-36-21-6-53-lame 27} \\ \text{lame 4-7-22-37-52-5-20-35-50-3-18-33-48-1-16-31-46-61-14-29-44-59-12-27-42-lame 29} \end{array} \right\} -$$

suffisante pour recueillir toute l'intensité de la machine, ce qui en général conduit à une plus grande longueur du collecteur qui est alors d'un prix de revient plus élevé. Cependant lorsqu'on emploie $2p$ lignes de balais, le danger de surcharge de l'une d'elles est

d'autant plus grand que p est lui-même plus grand, on ne peut d'aucune façon remédier à cet inconvénient et par suite les balais

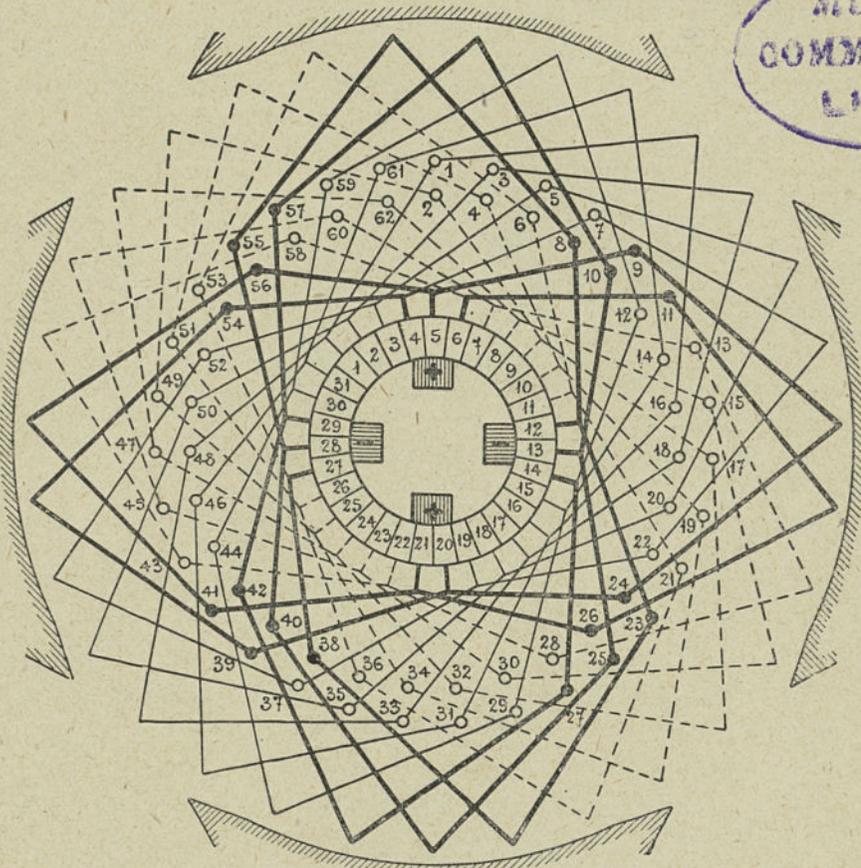


Fig. 52. — Enroulement en série.

$$p=2, \quad a=1, \quad N=62, \quad K=31, \quad y_1=y_2=\frac{62-2}{2}=30, \quad y_1=y_2=15, \quad y_c=15.$$

+ { lame 6-58-43-28-13-60-45-30-15-62-47-32-17-2-49-34-19-4-51-36-21-6-53-lame 27 }
 + { lame 4-7-22-37-52-5-20-35-50-3-18-33-48-1-16-31-46-61-14-29-44-59-12-lame 14 } -

doivent être plus largement calculés que dans le cas d'un enroulement à couplage en parallèle.

La figure 52 représente l'enroulement de la figure 51 mais avec $2p$ lignes de balais, on voit pour l'instant considéré qu'il

ne passe aucun courant par le balai + des lames 20 et 21.

Dans le cas où une bobine n'est plus formée par une spire unique, mais par un certain nombre de spires en série, on numérote les côtés de bobines. On considère tout le faisceau formé d'autant de fils qu'il y a de spires par bobine, comme un fil unique (*fig. 54*).

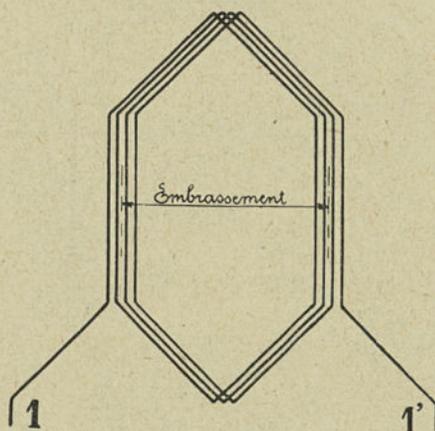


Fig. 53.

Une autre méthode consiste à numérotter les commencements de bobines par 1, 2, 3, etc., et leurs fins par 1', 2', 3', etc., comme sur la figure 53.

Dans ce cas on donne l'embrassement d'une bobine et le pas du collecteur γ_c .

Les figures 54 et 55 ci-dessous représentent une armature en tambour avec enroulement en série à plusieurs spires par bobine.

21 encoches, 21 lames au collecteur, 21 bobines à 2 côtés induits, $21 \times 2 = 42$ faisceaux en tout, 4 spires par bobine.

Nombre total de fils actifs $= 21 \times 4 \times 2 = 168$. Embrassement 5 dents.

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 = \frac{42 - 2}{2} = 20,$$

$$\gamma_1 = 11, \quad \gamma_2 = 9, \quad \gamma_c = \frac{21 - 1}{2} = 10,$$

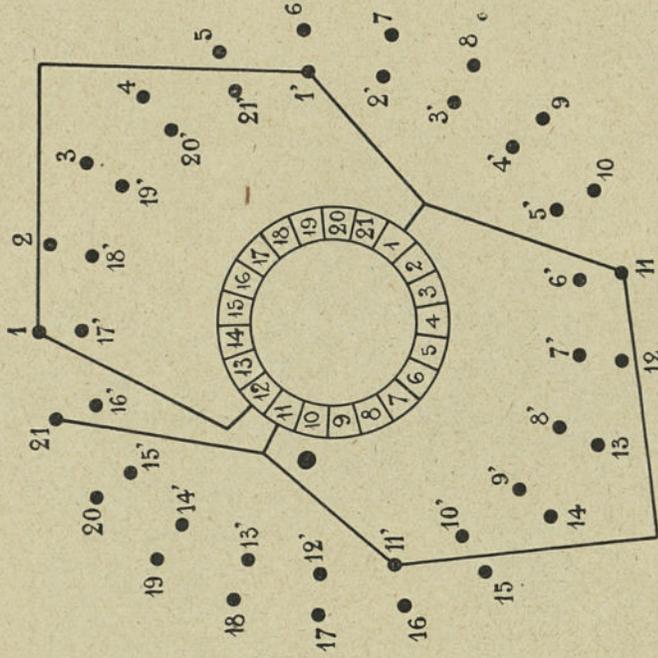


Fig. 55.

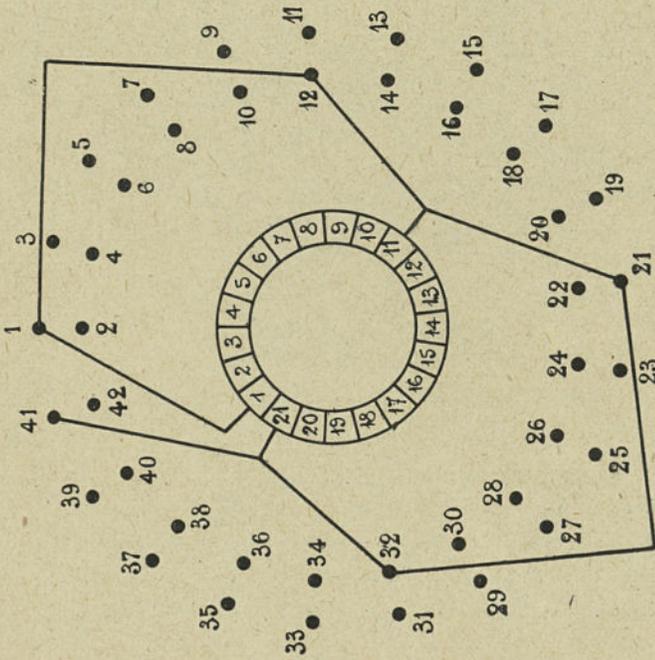


Fig. 54.

Dans le schéma de la figure 55 on relie la fin de la bobine 1 au commencement de la bobine $1 + 10 = 11$ à la lame 1 par exemple, la fin de la bobine 11 sera reliée au commencement de la bobine $11 + 10 = 21$ à la lame $1 + 10 = 11$ et ainsi de suite. On obtient un schéma identique à celui de la figure 54.

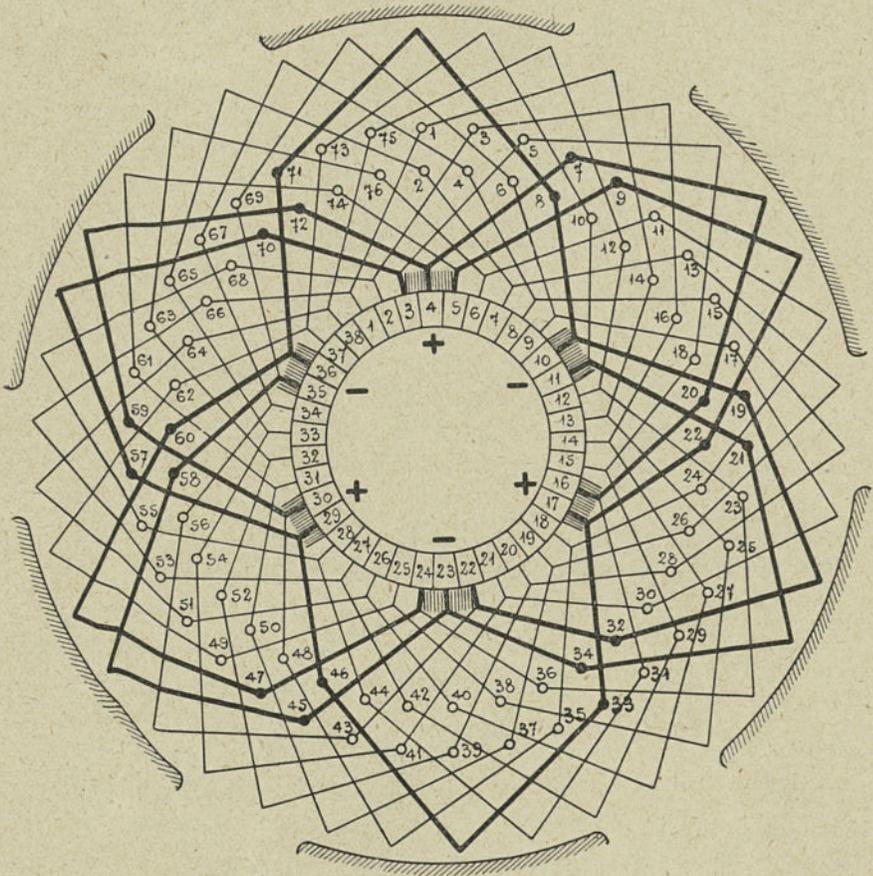


Fig. 56. — Enroulement en séries-parallèles $a < p$.

$$p = 3, \quad a = 2, \quad N = 76, \quad K = 38, \quad y_1 + y_2 = \frac{76 - 4}{3} = 24,$$

$$y_1 = 13, \quad y_2 = 11, \quad y_c = 12.$$

- + lame 3-5-18-29-42-53-66-1-14-25-38-49-62-73-10-lame 11
- + lame 5-74-61-50-37-26-13-2-65-54-41-30-17-6-69-lame 35
- + lame 30-18-35-24-11-76-63-52-39-28-15-4-67-56-43-lame 22
- + lame 16-31-44-55-68-3-16-27-40-51-64-75-12-23-36-lame 24

27. **Enroulement en séries parallèles.** — Tandis que les enroulements en parallèle multiple sont constitués par l'association en quantité de plusieurs enroulements en parallèle simple, les enroulements en séries parallèles sont formés par l'association en parallèle de plusieurs enroulements en série

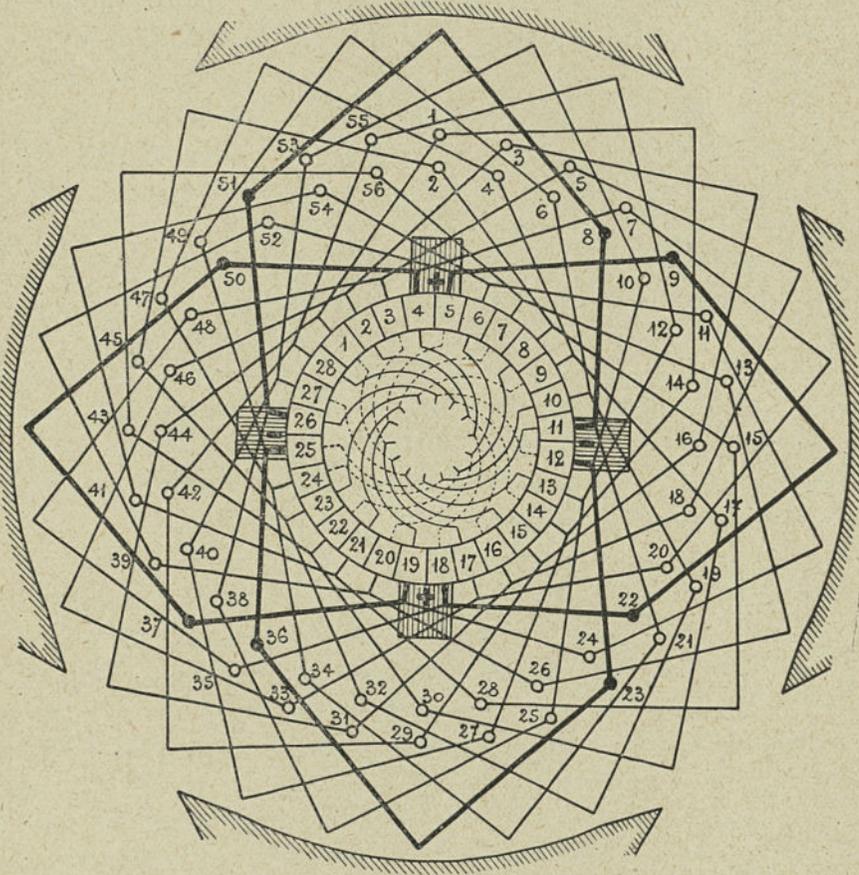


Fig. 57. — Enroulement en séries-parallèles $a=p$.

$$p=a=2, N=56, K=28, y_1+y_2=\frac{56-4}{2}=26, y_1=y_2=13, y_c=13.$$

$$\begin{array}{l}
 + \left\{ \begin{array}{l} \text{lame } 4-7-20-33-46-3-16-29-42-55-12-25-38-\text{lame } 26 \\ \text{lame } 5-52-39-26-13-56-43-30-17-4-47-34-21-\text{lame } 11 \end{array} \right\} - \\
 + \left\{ \begin{array}{l} \text{lame } 19-24-11-54-41-28-15-2-45-32-19-6-49-\text{lame } 25 \\ \text{lame } 18-35-48-5-18-31-44-1-14-27-40-53-10-\text{lame } 12 \end{array} \right\} -
 \end{array}$$

Le bobinage en séries parallèles est tout indiqué quand l'intensité par branche d'enroulement imbriqué est trop petite ou que cette intensité devient trop grande dans le cas d'un enroulement en série. On a alors le choix du nombre de branches de courant qui sera supérieur à deux et inférieur à $2p$.

Quand on est obligé de faire $a > p$, on a le choix entre un bobinage en parallèle multiple ou le couplage en séries parallèles. Ce dernier est beaucoup moins sensible aux dissymétries de la carcasse (excentrage de l'armature, inégale intensité des pôles), défauts qui prennent de l'importance avec les enroulements imbriqués, tandis que leur influence se répartit sur l'ensemble de l'armature dans le cas des enroulements ondulés.

L'enroulement en séries parallèles permet donc de faire varier indépendamment du nombre de pôles, le nombre de dérivations de courant entre les valeurs 2 et $2p$, tout en répartissant les éléments de chacun des circuits sous tous les pôles de façon que le bon fonctionnement de la machine ne soit pas influencé par l'inégalité magnétique des pôles. De plus l'enroulement en séries-parallèles est susceptible de remplacer les bobinages multiples en quantité en faisant $a > p$.

La généralisation du travail en série et l'emploi des poinçons multiples ont amené les constructeurs, désireux de réduire l'outillage, à n'avoir pour une machine donnée, qu'un genre de tôles d'armature qui sert en général pour toutes les tensions. Dans ce cas l'emploi judicieux des enroulements en série et en séries-parallèles suivant le cas permet de réduire au minimum les sections de cuivre à approvisionner.

Ci-dessous on trouvera deux tableaux pour machines construites. On verra par ces exemples combien il est facile de simplifier la construction et l'approvisionnement en cuivre, même fer d'armature que l'on peut préparer en série, même outillage et même gabarit.

Les figures 56, 57 et 58 représentent différents schémas d'enroulements en séries parallèles pour $a < p$, $a = p$ et $a > p$.

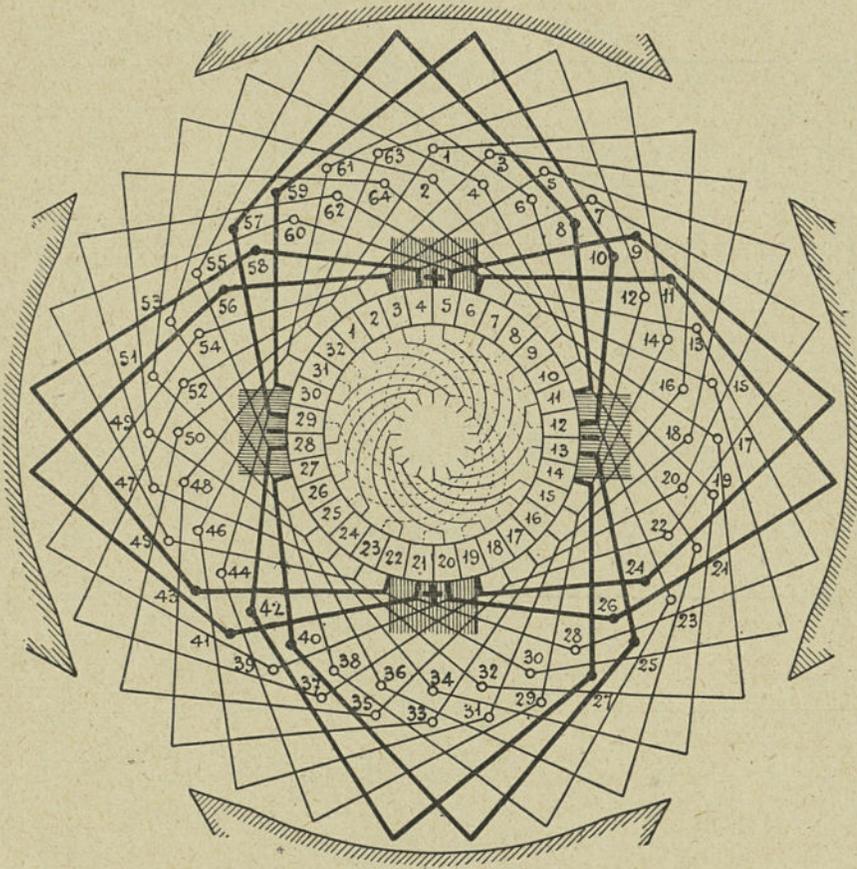
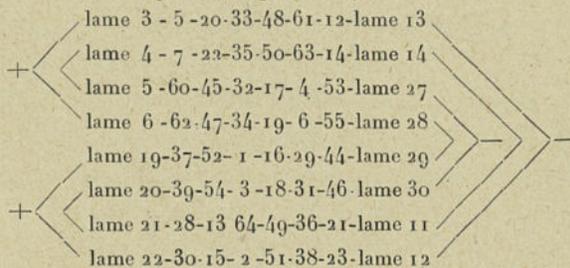


Fig. 58. — Enroulement en séries-parallèles $a > p$.

$$p = 2, \quad a = 4, \quad N = 64, \quad K = 32, \quad y_1 + y_2 = \frac{64 - 8}{2} = 28,$$

$$y_1 = 15, \quad y_2 = 13, \quad y_c = 14.$$



DYNAMO DE 34 KW A 4 POLES

VOLTS	AMPÈRES	NOMBRE D'ENCOCHES	NOMBRE DE FILS N	SPIRES PAR BOBINE	NOMBRE DE LAMES K	NOMBRE DE FILS PAR ENCOCHE	DIMENSIONS DU FIL NU	a	GENRE D'ENROULEMENT	y
85	400	38 encoches de 15 × 29	228	1	114	6	1,4 × 10 (2 fils 11)	2	séries parallèles	112
120	285		304	1	152	8	2 × 10	2	—	150
170	200		226	1	113	36 × 6 2 × 5	1,4 × 10 (2 fils 11)	1	série	112
240	142		302	1	151	36 × 8 2 × 7	2 × 10	1	—	150
340	100		454	1	227	36 × 12 2 × 11	1,4 × 10	1	—	226

DYNAMO DE 48 KW A 4 POLES

VOLTS	AMPÈRES	NOMBRE D'ENCOCHES	NOMBRE DE FILS N	SPIRES PAR BOBINE	NOMBRE DE LAMES K	NOMBRE DE FILS PAR ENCOCHE	DIMENSIONS DU FIL NU	a	GENRE D'ENROULEMENT	y
85	565	46 encoches de 13,5 × 32	184	1	92	4	2 × 12 (2 fils 11)	2	séries parallèles	90
120	400		276	1	138	6	1,4 × 12 (2 fils 11)	2	—	136
170	285		368	1	184	8	2 × 12	2	—	182
240	200		274	1	137	44 × 6 2 × 5	1,4 × 12 (2 fils 11)	1	série	136
340	142		366	1	183	44 × 8 2 × 7	2 × 12	1	—	182
480	100		550	1	275	44 × 12 2 × 11	1,4 × 12	1	—	274

28. Connexions équipotentiellles. — Dans une armature parfaitement symétrique, tant au point de vue magnétique qu'électrique, nous pouvons relier entre elles les lames de collecteur qui restent constamment les unes par rapport aux autres au même potentiel, ces connexions ne seront le siège d'aucun courant. Mais si par suite de la dissymétrie de flux, les forces électromotrices induites dans les diverses branches de l'armature sont différentes, les courants de circulation trouvent passage par ces connexions, d'où il résulte moins d'étincelles aux balais et moins d'échauffement.

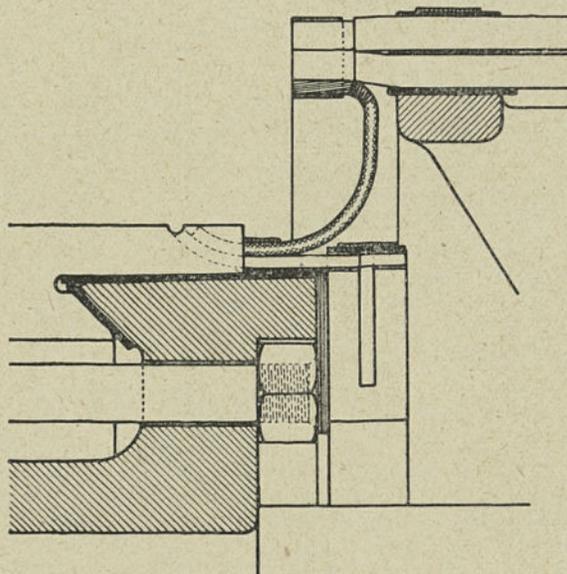


Fig. 59.

En pratique il est très difficile de construire des machines à grand nombre de pôles qui soient parfaitement symétriques au point de vue magnétique.

Les enroulements ondulés sont beaucoup moins sensibles que les enroulements hélicoïdaux et imbriqués aux dissymétries magnétiques. L'emploi des connexions équipotentiellles est donc à recommander sans réserves pour les machines à grand nombre de pôles et à enroulement en parallèle et en séries-parallèles.

ENROULEMENTS EN TAMBOUR

ENROULEMENT	GENRE	NOMBRE DE PAIRES de circuits a	COURANT PAR CIRCUIT i_a	NOMBRE DE PAIRES de pôles embrassées par un élément	PAS RÉSULTANT $y = y_1 \pm y_2$
Parallèle simple.	Bouclé.	p	$\frac{1}{2p}$	0	$y = y_1 - y_2$ $y = \pm 2$
Parallèle multiple.	Bouclé.	ap $u > 1$	$\frac{1}{2ap}$	0	$y = y_1 - y_2$ $y = \pm 2u$
Série.	Ondulé.	1	$\frac{1}{2}$	1	$y = y_1 + y_2$ $y = \frac{N \pm 2}{p}$
Séries parallèles.	Ondulé.	> 1	$\frac{1}{2a}$	1	$y = y_1 + y_2$ $y = \frac{N \pm 2a}{p}$

NOTA. — Pour connaître le nombre de circuits d'une armature à courant continu, extrémités d'une bobine pour les enroulements bouclés et par 2 le nombre de micas séparant enroulements ondulés.

A COURANT CONTINU

PAS COMPOSANTS y_1 et y_2	PAS DU COLLECTEUR y_c	OBSERVATIONS
$y_1 = \frac{N \pm q}{2p}$ $y_2 = \frac{N \pm q \pm 2}{2p}$	$y_c = \pm 1$	y_1 et y_2 impairs. q = nombre entier quelconque choisi de manière que y_1 et y_2 soient entiers.
$y_1 = \frac{N \pm q}{2p}$ $y_2 = \frac{N \pm q \pm \frac{2a}{p}}{2p}$	$y_c = \pm a$	y_1 et y_2 impairs. Ces enroulements peuvent être fermés simple ou multiple : ils sont fermés simple quand N et y ou quand K et y_c sont premiers entre eux. L'enroulement est symétrique quand $K : p$ est un nombre entier. Connexions équipotentielles.
$y_1 = y_2$ ou $y_1 - y_2 = \pm 2$	$y_c = \frac{K \pm 1}{p}$ $= \frac{y_1 + y_2}{2}$	y_1 et y_2 impairs. Cet enroulement n'est applicable qu'aux machines multipolaires. K et y_c doivent être premiers entre eux.
$y_1 = y_2$ ou $y_1 - y_2 = \pm 2$	$y_c = \frac{K \pm a}{p}$ $= \frac{y_1 + y_2}{2}$	y_1 et y_2 impairs. Cet enroulement peut être fermé simple ou multiple ; il est fermé simple quand N et y ou quand K et y_c sont premiers entre eux. Connexions équipotentielles.

il suffit de multiplier par $2p$ le nombre de micas séparant les lames aboutissant aux lames de départ et d'arrivée quand on a parcouru un tour de périphérie pour les

Il n'est d'ailleurs pas nécessaire de munir de semblables connexions toutes les lames, on peut ne les relier qu'à raison d'une sur deux, trois, quatre, cinq, six et même plus sans nuire à l'action particulièrement avantageuse de ces connexions équipotentielles.

Dans toute machine à courant continu, il est de la plus haute importance que les forces électromotrices induites et les résistances des différentes branches d'armature soient respectivement égales entre elles. Il y a donc lieu de réaliser des enroulements aussi symétriques que possible, on obtient un enroulement symétrique quand le nombre de côtés induits est divisible par $2a$ ou quand K est divisible par a .

Les enroulements sur gabarit donnent des sections d'une similitude parfaite comme longueur de fil et sont en tous points préférables aux enroulements à la main.

Les connexions équipotentielles sont généralement constituées par des lames de cuivre cintrées en développante de cercle et montées en arrière du collecteur (*fig. 59*).

29. Induit rainé en tambour. — L'enroulement en tambour exige en général moins de longueur de fil que l'induit en anneau équivalent, son principal inconvénient est d'avoir toute la tension de la machine entre deux bobines voisines et de nécessiter le démontage d'une partie de l'induit dans le cas de détérioration d'une section. Ces divers inconvénients ont été beaucoup atténués par l'emploi des induits dentés et la confection des bobines sur forme.

On dispose dans des encoches régulièrement distribuées à la périphérie de l'armature, des sections rigides de forme convenable. On loge dans chaque encoche, un, deux ou un nombre pair de côtés de bobines, chaque bobine a l'un de ses côtés dans la partie inférieure d'une encoche, l'autre côté à la partie supérieure d'une autre encoche¹.

Ce système d'armature présente les principaux avantages suivants :

L'entrefer peut être aussi réduit que le permet la réaction de

1. Excepté le cas où il se trouve un seul côté de bobine par entaille, le nombre de ams est alors moitié du nombre d'encoches.

l'induit et les conditions mécaniques de fonctionnement. On peut de ce fait réaliser une notable économie du cuivre inducteur.

Les fils d'armature au point de vue magnétique sont protégés par les dents qui agissent comme écrans, d'où diminution des courants de Foucault dans les conducteurs de grande section.

On réalise un bon entraînement et une fixité absolue des fils, enfin le refroidissement est favorisé par la surface rayonnante des dents.

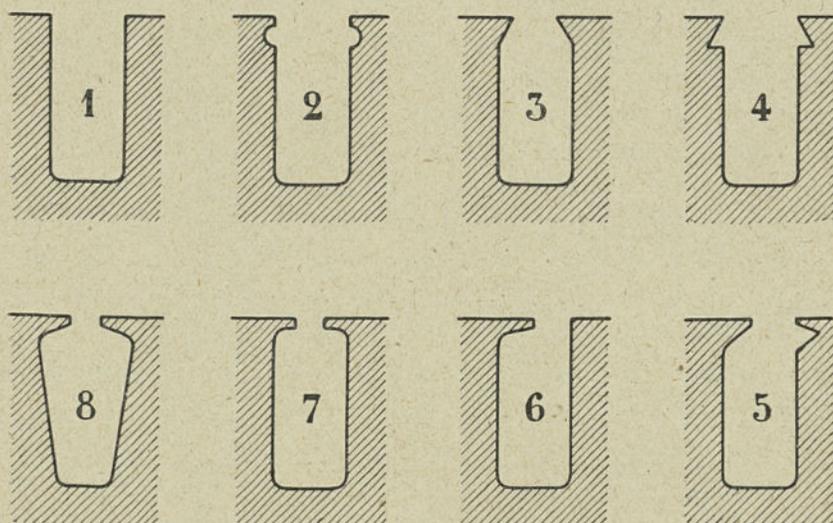


Fig. 60.

Les rainures sont ouvertes ou partiellement fermées. Les premières se poinçonnent dans chaque disque individuel, ou fraisées après montage, les autres ne peuvent être que poinçonnées.

La rainure ouverte offre l'avantage de permettre l'introduction et l'isolement facile des bobines, aussi est-elle la plus commune (*fig. 60*, n^{os} 1, 2, 4).

Les rainures à demi fermées réalisent de leur côté un mode de fixation avantageux de l'enroulement (*fig. 60*, n^{os} 3, 5, 6, 7, 8) et permettent l'emploi de pôles massifs.

Les formes 2, 3, 4, 5 sont prévues pour recevoir des cales de fermeture en bois dur.

30. Isolement de l'enroulement des armatures dentées. —

L'enroulement peut être isolé suivant deux méthodes principales : ou bien les rainures étant elles-mêmes isolées, les conducteurs simplement guipés ou enroulés de ruban y sont placés ; ou bien les bobines ou sections sont complètement isolées avant leur mise en place dans les rainures et sont introduites dans les encoches nues ou garnies d'une feuille de papier *leathéroïd* ou de *presspahn*. Ce dernier genre n'est applicable qu'aux enroulements sur gabarit et aux rainures ouvertes. C'est de tous les genres d'isolement celui qui est le meilleur. L'isolement de chaque bobine étant fait individuellement, peut se vérifier facilement avant la mise en place. L'isolement varie suivant la tension aux bornes que doit développer la machine. Chaque maison de construction a ses procédés d'isolement basés sur sa propre expérience.

L'étude approfondie des propriétés des matières isolantes employées est de la plus haute importance. Il ne suffit pas pour arriver à une grande sécurité de prendre pour l'isolement une forte partie de l'espace disponible dans l'encoche, il faut plutôt chercher à obtenir ce résultat par un choix approprié des isolements et une bonne exécution des bobinages.

Comme isolement pour les rainures on emploie principalement le *presspahn*, le papier huilé, le calicot vernis, la toile huilée, la micanite. Les épaisseurs courantes totales de l'isolement pour des enroulements en lames et différentes tensions sont données dans le tableau ci-dessous.

NOMBRE DE BARRES COTE A COTE DANS UNE RAINURE	1	2	3	4	5
	Tension aux bornes 125 volts.	1,2	1,8	2,4	3,0
— 250 —	1,8	2,4	3,0	3,6	4,2
— 550 —	2,0	2,6	3,2	3,8	4,4
— 750 —	2,4	3,0	3,6	4,2	4,8

On trouve souvent sur des machines construites des épaisseurs moindres, les modes d'isollements sont nombreux et différents

d'un constructeur à un autre et peuvent même être variés et sans esprit de suite dans la même maison quand la méthode d'isolement n'est pas étudiée convenablement mais laissée à la bonne volonté du bobinier.

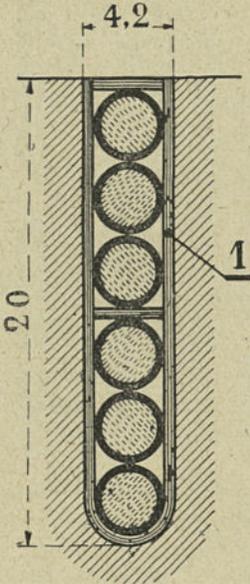


Fig. 61. — Bobinage à la main.
Dynamo de 3,6 kw.
80 volts.
6 fils par encoche.
Diamètre fil nu = 26/10.
Isolement du fil. 2 × coton.
1. Presspahn ép^r 5/10.

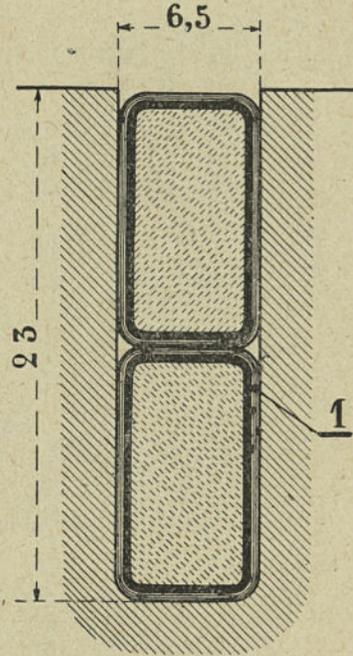


Fig. 62. — Bobinage sur gabarit.
Dynamo de 36 kw.
120 volts.
2 barres par encoche.
Barre nue 5 × 10 millimètres.
Barre isolée 6,1 × 10,6.
1. 3/10 ruban de coton.

Parmi les combinaisons possibles nous donnons (*fig. 61 à fig. 65*) quelques exemples qui ont donné de bons résultats pratiques et qui peuvent servir de base à l'étude des armatures dentées.

31. Fils d'armature et isolement des fils d'armature. — Les différentes manières d'exécuter l'enroulement, la bonne utilisation

de l'espace disponible obligent le constructeur à adopter, suivant le cas, différentes formes de section pour les conducteurs d'armature.

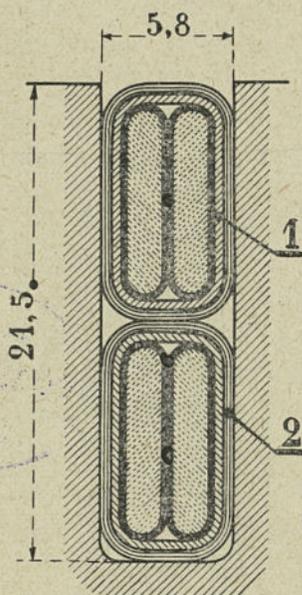


Fig. 63. — Bobinage sur gabarit.

Dynamo de 24 kw.
240 volts.
4 barres par encoche.
Barre nue de $1,6 \times 8,5$.
Barre isolée de $2,1 \times 9$.
1. 3/10 papier japonais.
2. 3/10 ruban de coton.

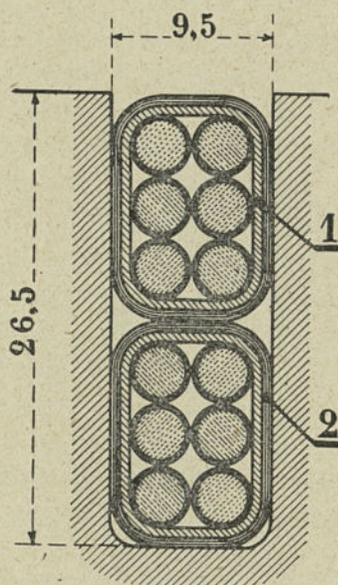


Fig. 64. — Bobinage sur gabarit.

Dynamo de 34 kw.
480 volts.
 2×6 fils par encoche
Diamètre du fil nu 34/10.
Isolement. 1 guipage. 1 tresse.
1. 4/10 toile huilée.
2. 3/10 ruban de coton.

Comme fils d'armature, on emploie généralement du fil de cuivre électrolytique convenablement recuit après étirage.

La section ronde est la plus indiquée et la plus utilisée pour les enroulements comportant plusieurs spires par bobine. Avec cette section, il faut moins de soins et de travail qu'avec des conducteurs rectangulaires dont l'isolement plus délicat souffre davantage,

Les fils de plus de 4 millimètres de diamètre étant d'un bobinage difficile, on les remplace souvent par deux fils en parallèle.

Dès que la section d'un conducteur dépasse 20 à 25 millimètres carrés, il est préférable de remplacer l'enroulement en fil par l'enroulement en barre.

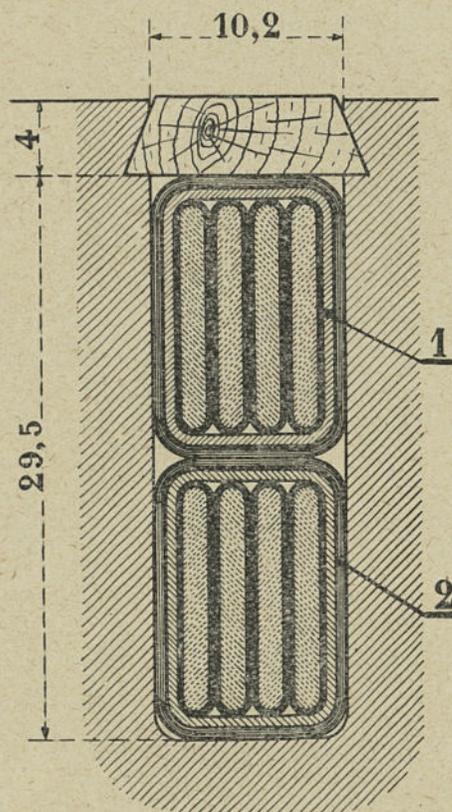


Fig. 65. — Bobinage sur gabarit.

Dynamo de 68 kw.

680 volts.

2×4 barres par encoche.

Barre nue de $1,4 \times 12$.

Barre isolée de $1,9 \times 12,5$.

1. micanite souple 5/10.

2. ruban de coton 3/10.

En disposant de gros conducteurs massifs sur la périphérie de l'induit, on risque de favoriser beaucoup la formation de cou-

rants de Foucault dans ces barres et de donner lieu à des échauffements exagérés. Ces courants peuvent être fortement réduits en formant le conducteur de plusieurs barres réunies les unes aux autres aux extrémités seulement (*fig. 66*). La faible couche d'oxyde qui recouvre les lames composant le conducteur suffit à empêcher la formation des courants parasites.



Fig. 66.

Il est nécessaire de donner aux fils d'armature un isolement individuel convenable et de soigner le bon isolement des bobines entre elles.

Les fils d'induit sont convenablement guipés de coton, une ou deux fois, ou garnis d'un guipage et d'une tresse.

Le guipage double est le plus employé. Le guipage avec tresse étant réservé pour les tensions élevées ou en vue des efforts mécaniques auxquels doivent être soumis les fils, comme dans les moteurs de traction et dans les armatures bobinées à la main. Pour les conducteurs méplats, il faut tenir compte de ce que le guipage ne s'applique pas rigoureusement sur les côtés larges, l'isolement de ce fait est porté jusqu'à $1/10^e$ de plus que sur les côtés étroits (Arnold).

Les conducteurs de forte section, carrés ou rectangulaires, avec angles arrondis, sont mis nus sur gabarit à la forme des sections ; l'isolement se fait ensuite avec du ruban de papier japonais, du ruban de coton dit Jaconas, ou de la toile huilée que l'on enroule à recouvrement en hélice autour des barres.

Le rapport de la section du cuivre logé dans une rainure à la section totale de celle-ci donne une mesure de la bonne utilisation de l'espace disponible. On le désigne sous le nom de facteur de remplissage ou d'utilisation de la rainure. Il dépend de la tension, de la vitesse angulaire et de la puissance de la machine, et par suite de la forme des dents, de la forme et de la section du fil, du nombre de conducteurs par encoche, des essais d'isolement que la machine doit supporter, enfin du choix de l'isolant et de l'habitité avec lequel il est employé.

La figure 67 reproduit deux courbes de M. Hobart, courbes

donnant le facteur d'utilisation des rainures de moteurs jusqu'à 100 chevaux, pour des tensions comprises entre 100 et 600 volts.

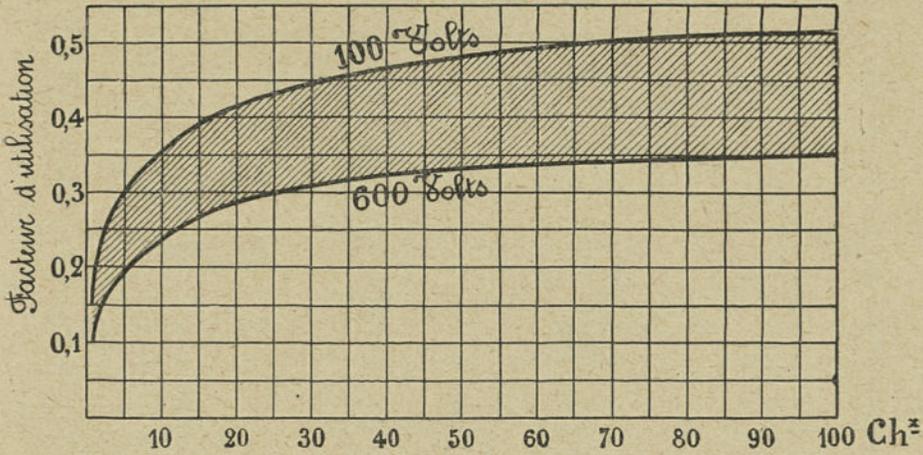


Fig. 67.

On choisira le nombre d'encoches assez grand de sorte que dans le vide interpolaire, il se trouve toujours au moins 3 ou 4 encoches. On place les conducteurs dans ces dernières à raison de 1, 2, 4, 6, 8, etc. par encoche.

Le nombre de fils calculé doit être arrondi soit en dessus soit en dessous à une valeur telle que la formule du couplage que l'on a choisi soit satisfaite.

RÉSISTANCE DES FILS DE CUIVRE ÉLECTROLYTIQUE RECUIT
 EN OHMS LÉGAUX A 15 DEGRÉS CENTIGRADES
 AVEC 98 POUR 100 DE CONDUCTIBILITÉ

DIAMÈTRE EN MILLIMÈTRES	SECTION EN MILLIMÈTRES CARRÉS	POIDS EN KILOGRAMMES par kilomètre.	RÉSISTANCE EN OHMS PAR KILOMÈTRE
0,10	0,0079	0,0699	2209,9
0,15	0,0177	0,1573	980,8
0,20	0,0314	0,2796	552,86
0,25	0,0491	0,4369	353,57
0,30	0,0707	0,6291	245,54
0,35	0,0962	0,8563	180,46
0,40	0,1257	1,1184	138,10
0,45	0,1590	1,4151	109,15
0,50	0,1964	1,7479	88,397
0,55	0,2376	2,1145	73,060
0,60	0,2827	2,5164	61,385
0,65	0,3318	2,9533	52,320
0,70	0,3849	3,4256	45,100
0,75	0,4418	3,9319	39,293
0,80	0,5027	4,4736	34,530
0,85	0,5674	5,0503	30,595
0,90	0,6362	5,6621	27,282
0,95	0,7088	6,3085	24,492
1,00	0,7854	6,9900	22,099
1,05	0,8659	7,7065	20,048
1,10	0,9503	8,4580	18,263
1,15	1,0387	9,2443	16,713
1,20	1,1310	10,066	15,346
1,25	1,2272	10,922	14,146
1,30	1,3273	11,813	13,075
1,35	1,4314	12,739	12,127
1,40	1,5394	13,700	11,274
1,45	1,6513	14,697	10,512
1,50	1,7671	15,728	9,821
1,55	1,8869	16,794	9,200
1,60	2,0106	17,895	8,6325
1,65	2,1382	19,030	8,118
1,70	2,2698	20,201	7,6467
1,75	2,4053	21,407	7,2173
1,80	2,5447	22,648	6,8207
1,85	2,6880	23,923	6,4583
1,90	2,8353	25,234	6,1211
1,95	2,9865	26,579	5,8128
2,00	3,1416	27,960	5,5247
2,05	3,3006	29,376	5,2596

DIAMÈTRE EN MILLIMÈTRES	SECTION EN MILLIMÈTRES CARRÉS	POIDS EN KILOGRAMMES par kilomètre.	RÉSISTANCE EN OHMS PAR KILOMÈTRE
2,10	3,4636	30,826	5,0111
2,15	3,6305	32,311	4,7817
2,20	3,8013	33,832	4,5659
2,25	3,9761	35,387	4,3660
2,30	4,1548	36,977	4,1775
2,35	4,3374	38,602	4,0023
2,40	4,5239	40,263	3,8366
2,45	4,7144	41,958	3,6823
2,50	4,9087	43,688	3,5359
2,55	5,1071	45,453	3,3991
2,60	5,3093	47,253	3,2690
2,65	5,5155	49,087	3,1474
2,70	5,7256	50,957	3,0314
2,75	5,9396	52,879	2,9227
2,80	6,1575	54,802	2,8187
2,85	6,3794	56,777	2,7214
2,90	6,6052	58,786	2,6277
2,95	6,8349	60,831	2,5378
3,00	7,0686	62,910	2,4498
3,05	7,3062	65,025	2,3760
3,10	7,5477	67,174	2,2905
3,15	7,7931	69,358	2,2276
3,20	8,0425	71,578	2,1581
3,25	8,2958	73,832	2,0926
3,30	8,5530	76,122	2,0292
3,35	8,8141	78,445	1,9694
3,40	9,0792	80,805	1,9117
3,45	9,3482	83,198	1,8570
3,50	9,6211	85,628	1,8039
3,55	9,8980	88,092	1,7521
3,60	10,179	90,591	1,6953
3,65	10,463	93,125	1,6591
3,70	10,752	95,694	1,6142
3,75	11,045	98,297	1,5717
3,80	11,341	100,94	1,5304
3,85	11,642	103,61	1,4911
3,90	11,946	106,32	1,4529
3,95	12,254	109,06	1,4166
4,00	12,566	111,84	1,3812
4,05	12,882	114,64	1,3475
4,10	13,203	117,50	1,3146
4,15	13,527	120,39	1,2830
4,20	13,854	123,30	1,2528
4,25	14,186	126,26	1,2237
4,30	14,522	129,24	1,1951

DIAMÈTRE EN MILLIMÈTRES	SECTION EN MILLIMÈTRES CARRÉS	POIDS EN KILOGRAMMES par kilomètre.	RÉSISTANCE EN OHMS PAR KILOMÈTRE
4,35	14,862	132,27	1,1680
4,40	15,205	135,32	1,1414
4,45	15,553	138,42	1,1161
4,50	15,904	141,55	1,0912
4,55	16,260	144,71	1,0676
4,60	16,619	147,91	1,0443
4,70	17,349	154,41	0,99510
4,80	18,096	161,05	0,95917
4,90	18,857	167,83	0,92041
5,00	19,635	174,75	0,88397
5,10	20,428	181,81	0,84964
5,20	21,237	189,01	0,81539
5,30	22,062	196,35	0,78672
5,40	22,902	203,83	0,75786
5,50	23,758	211,45	0,73054
5,60	24,630	219,21	0,70469
5,70	25,518	227,11	0,68018
5,80	26,421	235,14	0,65715
5,90	27,340	243,32	0,63484
6,00	28,274	251,64	0,61387
6,10	29,225	260,10	0,59325
6,20	30,191	268,70	0,57490
6,30	31,172	277,43	0,55679
6,40	32,170	286,31	0,53952
6,50	33,183	295,33	0,52305
6,60	34,212	304,49	0,50731
6,70	35,257	313,78	0,49229
6,80	36,317	323,22	0,47792
6,90	37,393	332,80	0,46417
7,00	38,485	342,51	0,45100
7,10	39,592	352,37	0,43838
7,20	40,715	362,36	0,42629
7,30	41,854	372,50	0,41470
7,40	43,008	382,78	0,40346
7,50	44,179	393,19	0,39287
7,60	45,365	403,74	0,38260
7,70	46,566	414,44	0,37273
7,80	47,784	425,27	0,36323
7,90	49,017	436,25	0,35410
8,00	50,265	447,36	0,34530
8,10	51,530	458,62	0,33682
8,20	52,810	470,01	0,32865
8,30	54,106	481,54	0,32079
8,40	55,418	493,22	0,31319
8,50	56,745	505,03	0,30587

DIAMÈTRE EN MILLIMÈTRES	SECTION EN MILLIMÈTRES CARRÉS	POIDS EN KILOGRAMMES par kilomètre.	RÉSISTANCE EN OHMS PAR KILOMÈTRE
8,60	58,088	516,98	0,29880
8,70	59,447	529,08	0,29197
8,80	60,821	541,31	0,28537
8,90	62,211	553,68	0,27899
9,00	63,617	566,19	0,27282
9,10	65,039	578,85	0,26686
9,20	66,476	591,64	0,26109
9,30	67,929	604,57	0,25551
9,40	69,398	617,64	0,25010
9,50	70,882	630,85	0,24486
9,60	72,382	644,20	0,23990
9,70	73,898	657,69	0,23487
9,80	75,430	671,32	0,23009
9,90	76,977	685,09	0,22548
10,00	78,540	699,00	0,22099

AUGMENTATION DU DIAMÈTRE DÛ A L'ISOLEMENT DES FILS

DIAMÈTRE DU FIL NU	2 COUCHES SOIE	1 COUCHE SOIE	2 COUCHES COTON	1 COUCHE COTON 1 TRESSE
Jusqu'à 0,15	0,08	»	»	»
0,18 à 0,20	0,10	»	»	»
0,22 à 0,50	0,12	»	»	»
0,25 à 0,38	»	0,12	»	»
0,40 à 0,95	»	0,15	»	»
1,00 à 2,00	»	0,18	»	»
0,25 à 0,65	»	»	0,20	»
0,70 à 1,90	»	»	0,25	»
2,00 à 2,90	»	»	0,30	»
3,00 et au-dessus	»	»	0,35	»
3,00 à 5,00	»	»	»	0,50
Au-dessus de 5,00	»	»	»	0,70

32. Enroulement en manteau. — Nous avons vu au paragraphe 22 que l'on emploie couramment l'enroulement en manteau (*fig.* 70 à 73) où les têtes de bobines sont sur la même surface cylindrique que les côtés induits. Une section se compose nécessairement de deux éléments, l'un *haut* situé extérieurement dans une encoche, l'autre *bas* au fond d'une autre encoche. L'espace compris entre ces deux encoches se nomme l'*embrassement* de la bobine et se mesure par le nombre de dents compris entre ses côtés induits.

Ce genre d'exécution des induits permet une excellente ventilation, le montage en est facile et l'armature bobinée offre un aspect élégant. Son inconvénient est d'allonger l'armature suivant l'axe surtout pour les machines à petit nombre de pôles.

Les sections en fils ronds se composant de plusieurs spires en série sont forcément constituées d'une seule pièce (*fig.* 53) mais quand il s'agit de fil méplat, on peut faire les sections en une ou plusieurs pièces, qu'on raccorde en les soudant aux extrémités à l'aide d'une boucle faite d'une lame recourbée ou d'un bout de tube aplati. Le plus souvent, les sections en fil plat ne comportent qu'une spire qui se fait d'une seule longueur de barre.

Pour déterminer l'encombrement pris par un bobinage en manteau, il faut connaître l'angle α qui doit être aussi grand que possible pour diminuer la longueur moyenne de la spire, mais cependant tel que les bobines puissent se placer les unes à côté des autres en laissant entre elles un certain jeu, 0,5 à 0,7 millimètre (*fig.* 69).

Le dessin (*fig.* 68 et 69) représente le bobinage d'une dynamo de 17 kilowatts, 120 volts, 142 ampères. Enroulement ondulé série.

$$p = 2, \quad a = 1, \quad N = 166, \quad y = y_1 + y_2 = \frac{166 - 2}{2} = 82,$$

$$y_1 = y_2 = 41, \quad 83 \text{ lames,} \quad 28 \text{ encoches.}$$

Pour satisfaire à la formule du couplage on est obligé de répartir inégalement les fils dans les encoches et on a :

$$\begin{array}{r}
 26 \text{ encoches à } 6 \text{ barres} = 156 \\
 2 \text{ encoches à } 5 \text{ barres} = \underline{10} \\
 \text{Total} \quad \quad \quad 166
 \end{array}$$

Barre nue de $2,2 \times 8,5$, isolée $2,7 \times 9$.

Le tracé de la vue en bout (*fig. 68*) permet de connaître les rayons R et R' et par suite les longueurs développées, basses et hautes, à la partie inférieure de la bobine; ces longueurs étant respectivement égales à :

$$\frac{2 \times 96 \times \pi \times 3,5^{(1)}}{28} = 75 \text{ millimètres pour le bas,}$$

et à

$$\frac{2 \times 108 \times \pi \times 3,5}{28} = 85 \text{ millimètres pour le haut.}$$

Les connexions qui sont situées sur le cylindre le plus petit de rayon R déterminent la valeur de l'angle α . Pour tracer graphiquement cet angle, il suffit de décrire du point O comme centre, un arc de cercle de rayon r . Ce dernier étant égal au rayon intérieur de cintrage des barres, augmenté d'autant d'épaisseurs de groupes de barres et de jeux qu'il y a d'encoches comprises entre la première entaille et le centre O (*fig. 69*).

Admettons 0,7 millimètre comme jeu minimum entre chaque groupe. Chacun de ces derniers aura une épaisseur totale de $2,7 \times 3 = 8,1$ millimètres, avec le jeu $8,1 + 0,7 = 8,8$ millimètres. Le rayon r sera égal à

$$r = 5 + (3 \times 8,8) \cong 32 \text{ millimètres.}$$

Partant du cercle intérieur de cintrage des barres de l'encoche 1 la tangente au cercle de rayon r donnera la valeur de l'angle α .

La spire développée une fois tracée, on mesure sur le dessin avec un compas ou un curvimètre, la longueur de cette spire.

1. 3, 5 dents c'est-à-dire le demi-embrassement de la bobine.

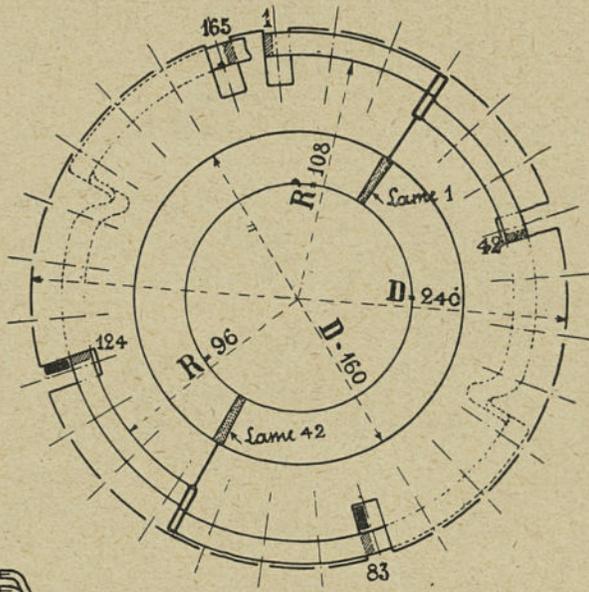


Fig. 68.

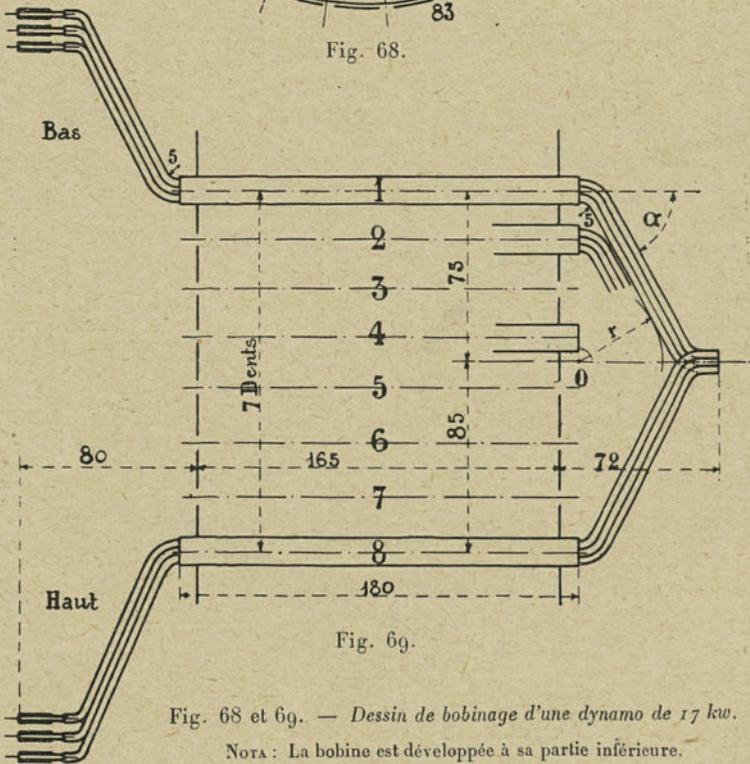


Fig. 69.

Fig. 68 et 69. — Dessin de bobinage d'une dynamo de 17 kw.

Nota : La bobine est développée à sa partie inférieure.

Dans une première étude on peut prendre approximativement pour un enroulement en manteau comme longueur moyenne d'une spire en centimètre

$$l_m = 2(L + 1,4r + 3)$$

Pour les petites machines bobinées à la main on a

$$l_m = 2(L + 1,25D + 2,5);$$

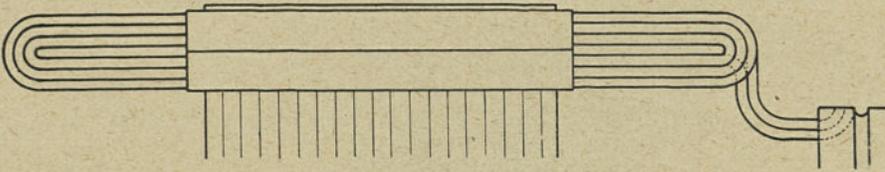


Fig. 70.

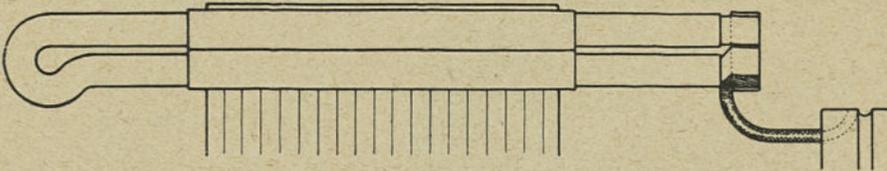


Fig. 71.

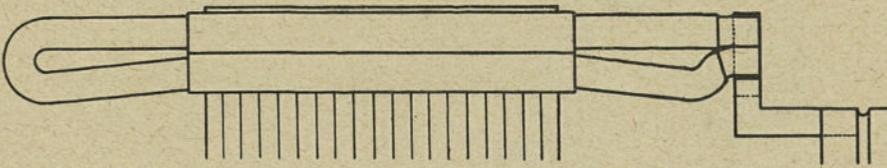


Fig. 72.

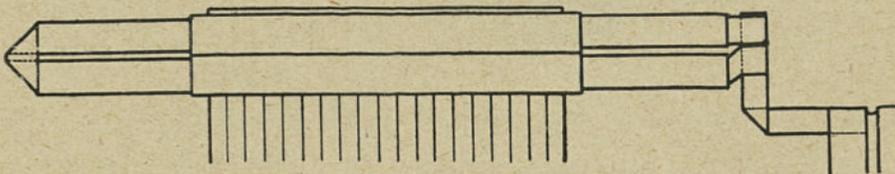


Fig. 73.

D = diamètre de l'induit en centimètres.

L = longueur du fer entre flasque en centimètres.

$$\tau = \text{pas polaire en centimètres} = \frac{\pi D}{2p}$$

Les figures 70 à 73 représentent les formes les plus usuelles des enroulements en manteau pour conducteurs en fils ronds ou méplats.

La confection du genre de la figure 73 est toute désignée dans l'emploi de fil rectangulaire de très faible épaisseur par rapport à sa hauteur, dimensions qui ne permettent pas le cintrage sur champ.

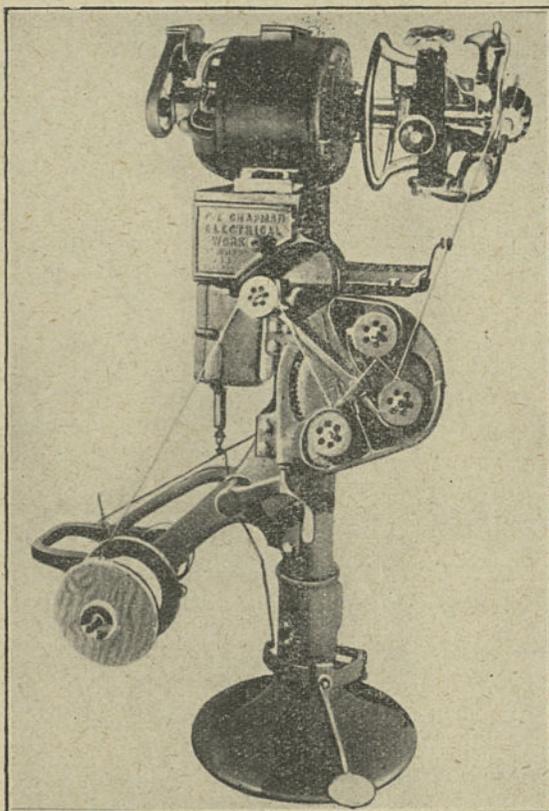


Fig. 74. — Bobineuse automatique d'induit en tambour, pour machines bipolaires (Chapman).

33. Confection des enroulements.

— On substitue de plus en plus les bobinages sur gabarits aux bobinages à la main. Pour les petits moteurs bipolaires dont les connexions terminales forment un chignon, on construit maintenant des machines à bobiner qui remplacent avantageusement le travail à la main.

La figure 74 représente un appareil de ce genre appelé *bobineuse*

neuse automatique d'induit en tambour pour machines bipolaires¹.

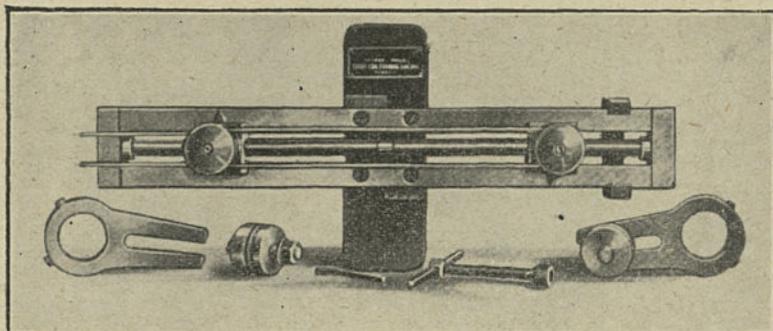


Fig. 75. — Appareil à bobiner pour la confection des navettes (Séguir).

Pour les armatures bipolaires ou multipolaires avec enroulement sur gabarit on construit également des appareils d'un emploi simple et économique.

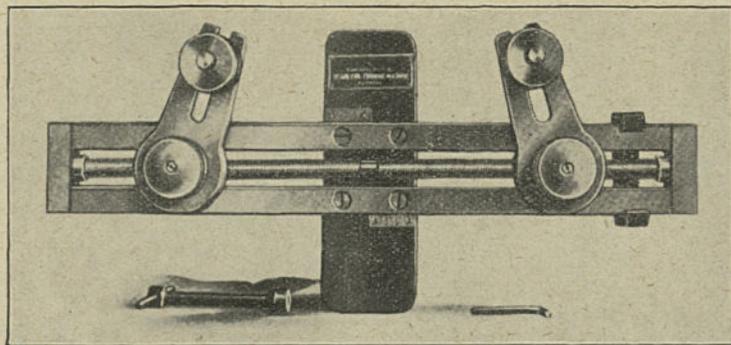


Fig. 76. — Appareil à bobiner pour la confection des bobines rectangulaires ou trapézoïdales (Séguir).

La figure 75 représente une machine pour la confection des navettes en fils ronds. Au moyen du montage de la figure 76, on obtient en modifiant la position des branches et des tourillons des

1. L'emploi des machines à bobiner a conduit les américains à faire, dans les encoches à demi-fermées, des fentes plus larges qu'on ne les fait généralement en Europe.

bobines de formes trapézoïdales convenant parfaitement aux bobinages pour courants alternatifs.

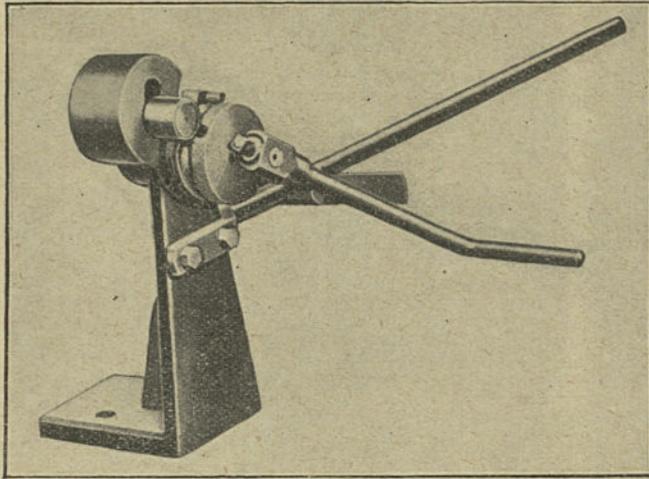


Fig. 77. — Machine à plier les barres (Séguir).

Lorsqu'il s'agit d'enroulements en barres, ces dernières sont

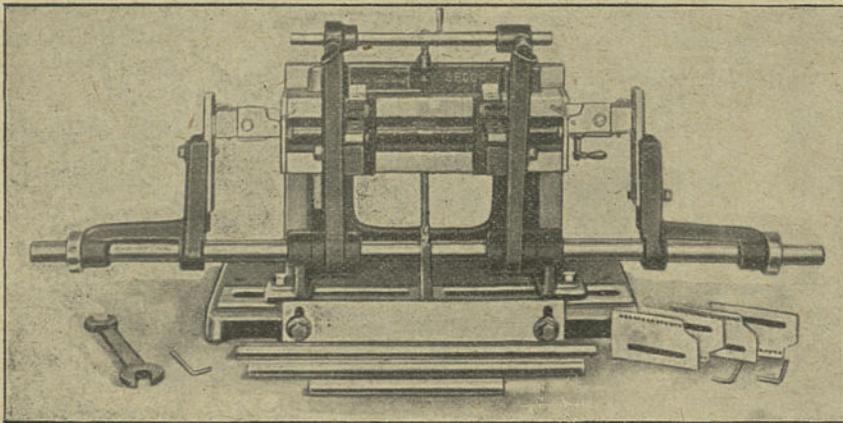


Fig. 78. — Machine à gabarier (Séguir).

pliées en U sur la machine de la figure 77 avec une production moyenne de 60 bobines par heure.

La machine de la figure 78 sert à ouvrir et à gabarier les bobines obtenues au moyen de l'une ou de l'autre des deux machines des figures 75 ou 77.

Il est aisé de se faire une idée de l'économie réalisée par ces machines en songeant aux frais considérables que nécessitent avec les procédés actuellement en usage, l'établissement des gabarits individuels nécessaires pour une série de machines électriques.

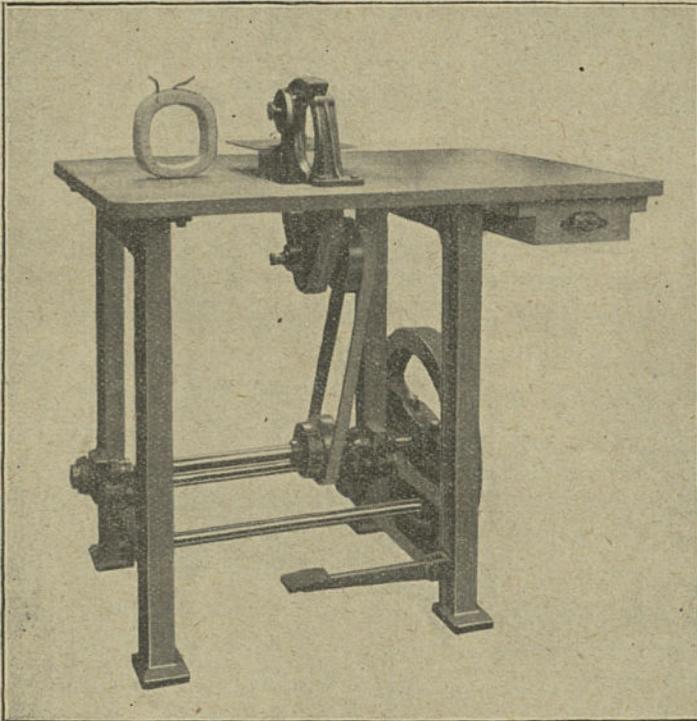


Fig. 79. — Machine à enrubanner M. A. X. E. I.

Nous devons ces photographies et ces renseignements à l'amabilité de M. Messinesi, administrateur des entreprises Somerville.

Les bobines une fois mises à la forme doivent être isolées au ruban de papier japonais ou au ruban jaconas. On voit (*fig. 79*) une machine à enrubanner construite par la Manufacture de machines auxiliaires pour l'électricité.

34. Vernis et imprégnation. — Les isolants tels que le coton, le papier, la toile, etc., employés dans la construction des bobinages électriques sont toujours enduits de vernis, laques, huile, bakelite, etc.

La plupart des maisons ont pour enduire les matières brutes, des procédés particuliers qui consistent à opérer, par *application au pinceau*, par *immersion* ou par *imprégnation*.

On peut vernir le fil avant la confection des bobines, ou attendre que les sections et électros soient bobinés et enrubannés. Dans ce dernier cas, on procède généralement par immersion ou par imprégnation. Les vernis doivent alors pénétrer à l'intérieur de toutes les parties à isoler.

Avant le vernissage, il est recommandé de sécher à fond les bobines, soit dans un séchoir soit dans une étuve à vide. Ce séchage a pour but d'enlever toute trace d'humidité et de faciliter l'application des vernis qui sont mieux absorbés par les surfaces sèches et encore chaudes.

Après le bain on soumet les fils ou bobines à la température élevée d'une étuve pour activer la volatilisation des solvants du vernis. La durée de ce séchage est de 6 à 12 heures à une température comprise entre 80 et 90° C.

Depuis quelques années se généralise le procédé dit par imprégnation.

Toute opération d'imprégnation doit être précédée d'un étuvage dans le vide. L'injection du vernis sous le vide ou à la pression, se fait ensuite facilement dans les enroulements vides d'air et exempts d'humidité. On distingue trois différentes sortes d'imprégnation : au *vernis liquide*, au *compound*, à la *bakélite*.

L'imprégnation au vernis liquide comprend en principe :

- 1° 1 réservoir à vernis ;
- 2° 1 étuve de séchage et d'imprégnation ;
- 3° 1 pompe à vide transformable en compresseur par la manœuvre d'une robinetterie spéciale ;
- 4° 1 condenseur par surface avec dispositif pour la récupération des solvants volatils du vernis.

Après introduction des pièces électriques dans l'étuve, on fait



le vide et l'on chauffe pendant 2 à 4 heures. On ouvre ensuite le robinet réunissant le fond de l'étuve avec la cuve à vernis, le vide établi fait monter le vernis qui doit recouvrir complètement les pièces à isoler.

Le vide est alors détruit et on envoie de l'air comprimé sous une pression de 1 à 2 kilogrammes pendant une heure environ. Cette opération doit être conduite assez lentement pour que les pièces aient le temps de s'égoutter.

Il y a intérêt à chauffer ensuite modérément, de façon que le solvant du vernis s'évapore et que les bobinages puissent être retirés de l'étuve sans que l'on gâche du vernis par égouttage.

Chez la plupart des constructeurs, l'opération est alors considérée comme terminée et les pièces sont retirées et placées dans un séchoir ou complètement séchées dans l'étuve d'imprégnation. Ce mode a l'inconvénient d'immobiliser l'étuve pour une opération pouvant être aussi bien faite dans un séchoir quelconque. Toutefois nous signalons que la durée de l'opération sera plus longue au séchoir.

Le *compoundage* a pour but d'augmenter le coefficient de sécurité, surtout dans les machines à courant alternatif et les moteurs de traction.

Il consiste à réunir en un seul bloc les fils d'une section ou d'une bobine. En supprimant les contacts du coton avec l'air, le compoundage empêche l'action nuisible de l'ozone qui se dégage habituellement entre les fils dans les machines à courant alternatif (les bobines fonctionnant comme condensateurs), l'ozone présente en effet l'inconvénient, au bout d'un certain temps, de faire tomber les cotons en poussière en entraînant les vernis.

Les compounds sont des composés organiques solides à froid qui s'emploient entre 100 et 110° pour le commencement du ramollissement et 140 à 150° pour l'imprégnation.

L'installation est la même que la précédente sauf en ce qui concerne le réservoir à vernis qui est remplacé par un réservoir à compound.

On commence par chauffer la cuve dans laquelle se trouve le

compound et l'on place les bobines à injecter dans l'étuve où l'on fait le vide. Quand le compound est liquide et l'étuvage à sec terminé on ouvre le robinet entre les deux cuves. Le vide préalablement établi dans l'étuve fait monter le compound qui doit immerger complètement les bobines. Mettre le compresseur en route et maintenir la pression pendant 2 ou 3 heures.

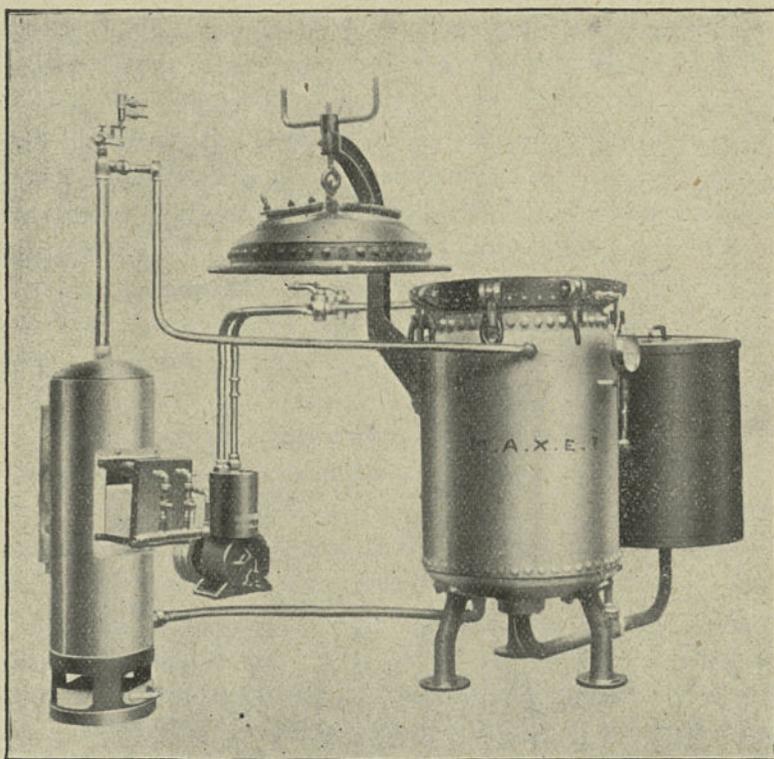


Fig. 80. — Stand d'impregnation au vernis liquide (M. A. X. E. I.).

Au bout de ce temps l'impregnation est terminée, on peut ouvrir le robinet entre les deux cuves, en laissant la pression sur le liquide jusqu'à ce qu'il soit chassé dans le réservoir. Laisser les bobines s'égoutter, les retirer encore chaudes et les mettre bien à plat pour les laisser refroidir à l'air.

La bakélite est une résine synthétique à base de formol et de

phénol. La résine de bakélite dite A est soluble dans les alcools et peut être aussi facilement injectée que les vernis ordinaires.

Si on la chauffe, elle subit successivement deux transformations : 1° bakélite B, solide et dure mais se ramollissant à chaud et devient plastique ; 2° bakélite C, solide, dure et infusible. Elle a la consistance du bois et résiste à l'action de la plupart des dissolvants, son pouvoir diélectrique est égal à celui des laques. Ces précieuses qualités en font un isolant incomparable.

La bakélite injectée et transformée dans la structure intime du bobinage constitue un isolant très supérieur à tous les guipages. Ceux-ci peuvent alors être considérés comme des isolants mécaniques provisoires.

La transformation de la bakélite A en bakélite B et C n'exige pas plus de temps ni de manipulations que les imprégnations aux vernis et aux compounds. Les enroulements séchés demeurent dans l'étuve. On ouvre la vanne de tuyauterie reliant cette dernière avec la cuve de bakélite. Le vide fait passer la bakélite dans l'étuve où elle immerge les enroulements.

On cesse le vide et on établit une pression de 4 à 5 kilogrammes sans chauffer.

Après avoir chassé complètement la bakélite dans sa cuve au moyen de l'air comprimé, on sèche en chauffant légèrement pendant 2 heures environ.

Les enroulements imprégnés de bakélite sont ensuite retirés et portés au bakéliseur, qui est analogue à l'étuve à vide, mais que l'on porte à une température de 135° environ en y maintenant une pression de 6 kilogrammes. Cette opération a une durée de deux à quatre heures suivant la nature du bobinage.

Pour obtenir un bel aspect laqué, on pourra enduire au pinceau les bobines avant de les porter à l'étuve de cuisson.

35. Équilibrage des armatures. — Les induits des dynamos à courant continu, les rotors des moteurs asynchrones tournent le plus souvent à des vitesses angulaires élevées et il est absolument indispensable de les équilibrer avec soin.

Il est recommandable de faire cette opération sur les armatures

avant d'y placer le bobinage et de le vérifier à nouveau une fois l'enroulement terminé.

La méthode la plus simple appelée *équilibrage statique* consiste à faire reposer l'arbre supportant l'armature sur deux règles horizontales. Si le centre de gravité du système est bien situé dans l'axe de l'arbre, l'induit est en équilibre dans toutes ses positions. Lorsque l'armature abandonnée à elle-même revient toujours à la même situation il faut corriger ce défaut.

Si l'induit est nu, on peut enlever de la matière, en des points déterminés par l'essai, en perçant des trous dans les flasques d'assemblage des tôles.

Après le bobinage de l'armature, on ne peut guère compenser le balourd existant qu'en rapportant des cales. Une méthode américaine consiste à chasser entre le bobinage et les becs des dents, dans les armatures à encoches demi fermées, des petites masselottes formées d'un fil de cuivre aplati et de longueur appropriée.

Lorsqu'on a à équilibrer des pièces tournant à des vitesses périphériques considérables (turbo-dynamos), l'opération devient délicate et on est alors obligé d'employer l'*équilibrage dynamique*.

Cette méthode consiste à approcher un crayon de l'armature en rotation, ce qui laisse sur celle-ci une trace indiquant le léger excentrage de l'arbre résultant de la force centrifuge agissant sur le balourd. Il est à remarquer que la trace laissée par le crayon ne coïncide pas avec la position du balourd, elle est toujours décalée sur celle-ci d'un certain angle variable avec la vitesse de rotation. Pour corriger l'erreur due à cet angle inconnu, on fait tourner la pièce à la même vitesse dans les deux sens ; d'où deux traces de crayon, le balourd se trouve alors au milieu des deux traces et par suite le contrepoids doit être placé au point diamétralement opposé.

L'équilibrage dynamique n'est donc applicable que si l'on dispose d'un matériel spécial pouvant entraîner la pièce à équilibrer à différentes vitesses et dans les deux sens.

36. Frettes d'induit. — Après achèvement complet du bobinage de l'armature, ou du rotor, il est nécessaire de les garantir

contre les effets de la force centrifuge. A cet effet on recourt à un frettage qui s'effectue par l'enroulement d'un fil fortement tendu par un passage entre galets. On isole ces frettes au moyen de presspahn, de mica, de toile, etc.

La largeur d'une frette simple quand elle se trouve placée dans le champ magnétique ne doit pas dépasser 12 millimètres. L'isolant doit déborder la frette de 3 millimètres de chaque côté.

Calcul des frettes. — Il est difficile d'évaluer d'une façon rigoureuse l'effort que les frettes doivent supporter. Cet effort est égal à la résultante des forces partielles développées par chaque conducteur.

Appelons :

N = le nombre de conducteurs périphériques sur l'induit.

l = longueur d'un conducteur en centimètres.

s = section d'un conducteur en centimètres carrés.

P = poids total du cuivre de l'induit en kilogrammes.

D = diamètre de l'induit en mètres.

n = nombre de tours par minute.

v = vitesse circonférentielle en mètres par seconde.

$g = 9,81$, accélération due à la pesanteur.

$8,9$ = densité du cuivre.

On a

$$P = \frac{N \times l \times s \times 8,9}{1000} = \text{kgs} \quad \text{et} \quad v = \frac{\pi D n}{60}$$

On peut admettre que les conducteurs sont uniformément répartis sur la périphérie de l'armature. Dans ce cas le poids de cuivre par unité de longueur ds sera $\frac{P}{\pi D}$ et la force centrifuge développée par ce poids élémentaire est égale à :

$$f = \frac{P}{\pi D g} \times \frac{v^2}{r}$$

Soit AA' le plan suivant lequel la frette tend à se briser.

La force centrifuge élémentaire f normale à la circonférence

peut se décomposer en deux autres forces, l'une parallèle au plan, l'autre perpendiculaire à ce plan. La composante parallèle à AA' est directement opposée et égale à la composante d'une seconde force élémentaire, symétrique à la première et située du même côté du plan AA'. Ces deux composantes de sens contraires s'annulent.

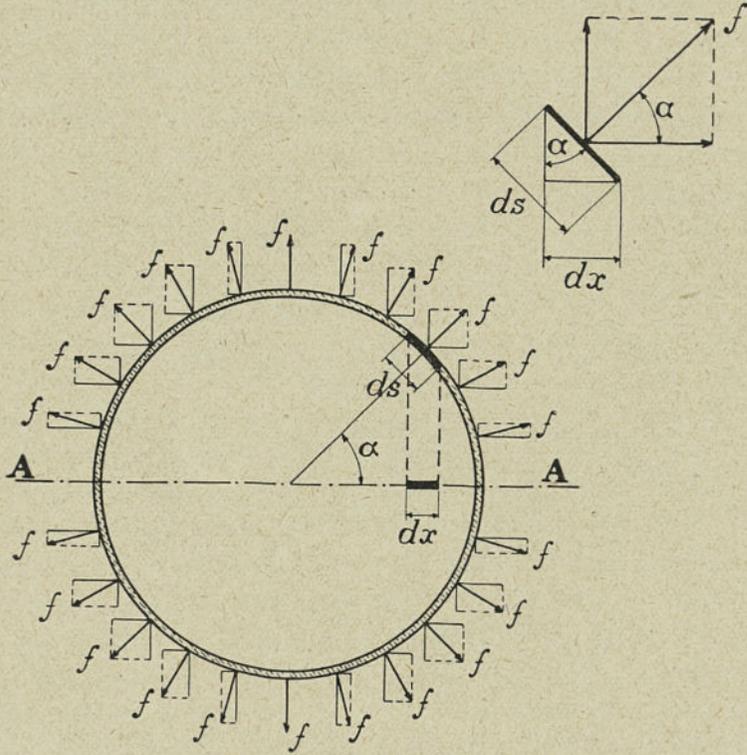


Fig. 81.

La composante perpendiculaire à AA' a pour valeur $f \sin \alpha ds = dx$. Cette composante concourt à rompre la frette.

Mais dx est la projection de ds sur AA' et la somme des projections de toutes les forces élémentaires ds est égale à $2r$, d'où la force tangentielle totale

$$= \frac{P}{\pi Dg} \times \frac{v^2}{r} \times 2r = \frac{P}{\pi Dg} \times v^2 \times 2.$$

Pour avoir la section simple de la frette il faut diviser cette force par deux pour tenir compte de la section de frette en A' et

$$F = \frac{P}{\pi D g} \times v^2.$$

En remplaçant P par sa valeur on a :

$$F = \frac{N \times l \times s \times 8.9}{1\ 000 \times g \times D \times \pi} \times v^2 = \frac{N \times l \times s}{3\ 460 D} \times v^2 = \text{kilogs.}$$

La longueur du fil intervenant dans le calcul ne comprend naturellement que la partie soumise à la force centrifuge. Dans certains cas il faut donc déduire de la longueur du fil, la partie supportée par un des éléments de l'armature même (encoches fermées, cales).

Dans le calcul des frettes il est bon de compter sur une vitesse périphérique correspondante à un emballement de 20 à 25 pour 100 supérieure à la vitesse normale.

Si l'on désigne par k l'effort admissible en kilogrammes par millimètre carré pour le fil de la frette, la section totale de cette dernière sera égale à :

$$\frac{F}{k} = \frac{N \times l \times s}{3\ 460 \times D \times k} \times v^2 = \frac{P v^2}{30,8 \times D \times k}.$$

Les charges de rupture en kilogrammes par millimètre carré pour diverses sortes de fil sont indiquées dans le tableau ci-dessous :

Acier au nickel.	250 kg/mm ² .
Acier fondu au creuset.	120 —
Métal Delta.	98 —
Bronze silicieux.	75 —

On admet généralement 8 et même 10 comme coefficient de sécurité.

Le diamètre du fil varie entre 0^{mm},5 et 2 millimètres.

Le frettage en fil n'est plus pratique au delà de 2 millimètres de diamètre et n'est plus employé pour les turbos-dynamos dont

les vitesses périphériques atteignent 100 à 120 mètres par seconde.

Dans ces dernières machines on fait généralement usage d'encoques fermées, ou demi fermées dans lesquelles les enroulements sont retenus par des cales en queue d'aronde. Les connexions terminales exigent des précautions particulières. On emploie des calottes métalliques enveloppant complètement les extrémités du bobinage. Les matériaux employés pour la fabrication de ces enveloppes doivent être très homogènes et forgés plutôt que coulés. On se sert d'aciers spéciaux ayant une résistance à la rupture de 85 à 95 kilogrammes par millimètre carré. Pour diminuer les fuites magnétiques on cherche maintenant à constituer les calottes en acier amagnétique, car avec les efforts que ces frettes ont à supporter, l'emploi de bronzes de très bonne qualité n'est plus admissible.

CHAPITRE III

GÉNÉRATRICES A COURANT ALTERNATIF

37. **Génératrices à courant alternatif.** — Ces machines sont appelées par abréviation « *Alternateurs* » pour les distinguer des génératrices à courant continu désignées sous le nom de « *Dynamos* ».

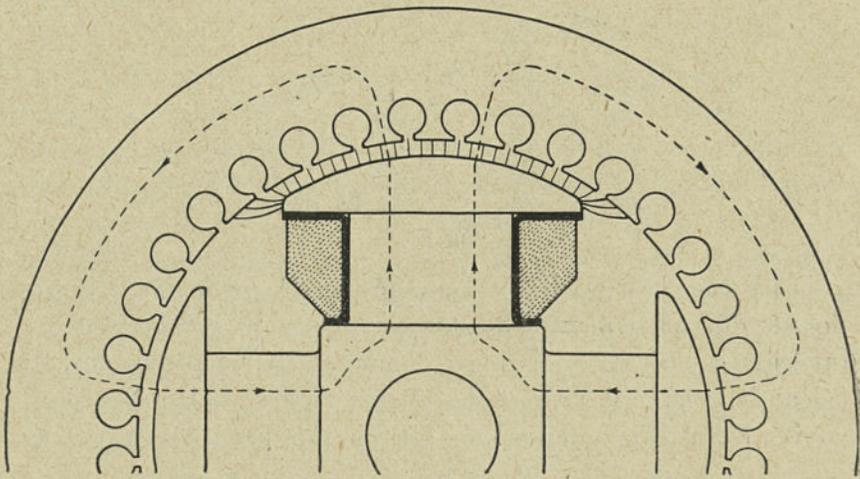


Fig. 82.

La forme à peu près universellement adoptée est la suivante : les inducteurs mobiles sont constitués par des noyaux entourés chacun d'un bobinage et terminés par des pièces polaires (*fig. 82*) ; l'induit est fixe avec encoches de différentes formes (*fig. 83*).

C'est en sorte une machine constituée comme une dynamo à excitation indépendante dont les inducteurs seraient mobiles et l'induit fixe. Ces alternateurs sont dits à *flux alterné*, une bobine induite quelconque est traversée par un flux variant de $+\Phi$ à $-\Phi$ en passant par toutes les valeurs intermédiaires et nous avons vu chapitre 1 que la force électromotrice ainsi développée dans la bobine est rigoureusement sinusoïdale à condition que la vitesse et le flux soient uniformes.

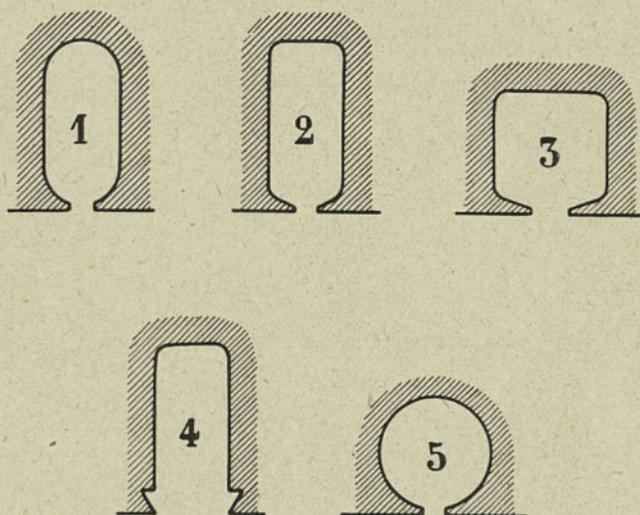


Fig. 83.

Dans une dynamo la f. é. m. développée pour une vitesse donnée dépend seulement du flux par pôle et du nombre de conducteurs en série par voie d'enroulement. Dans un alternateur, le calcul de la force électromotrice efficace n'offre pas la même simplicité, il faut faire intervenir ici, le nombre d'encoches par pôle et par phase et le rapport $\frac{\text{Arc polaire}}{\text{Pas polaire}}$.

Soit un alternateur de $2p$ pôles tournant à $n : 60$ tours par seconde et comportant N_1 conducteurs en série par phase, la force électromotrice moyenne développée dans une phase sera :

$$E_{\text{moy}} = 2p \times \frac{n}{60} \times N_1 \times \Phi \times 10^{-8} \text{ volts,}$$

ou en fonction de la fréquence $f = \frac{P \times n}{60}$ on a :

$$E_{\text{moy}} = 2 \times f \times \Phi \times N_1 \times 10^{-8} \text{ volts,}$$

Mais dans un alternateur comme dans tout appareil à courant alternatif, il ne faut pas considérer la f. é. m. moyenne, mais la f. é. m. efficace, cette dernière est égale au produit de la valeur moyenne par le rapport $\frac{E_{\text{eff}}}{E_{\text{moy}}}$ que l'on appelle facteur de forme.

Si la f. é. m. a une allure sinusoïdale, nous avons vu que le facteur de forme est égal à $\frac{0,707}{0,637} = 1,11$; de la formule précédente on tire $E_{\text{eff}} = 2,22 \times f \times \Phi \times N_1 \times 10^{-8}$ volts, formule applicable dans le cas particulier d'un champ sinusoïdal et d'un enroulement réparti dans 1 encoche par pôle et par phase.

D'une manière générale on peut écrire :

$$E_{\text{eff}} = \text{facteur de forme} \times \text{coefficient de bobinage} \times 2 \times f \times N_1 \times 10^{-8} \text{ volts.}$$

Le bobinage à 1 seul trou par pôle et par phase n'est pas employé, il conduit à des encoches énormes et la f. é. m. engendrée s'éloigne beaucoup trop de la sinusoïde, aussi emploie-t-on des bobines à plusieurs trous par pôle et par phase. Il est évident que le flux total par pôle est embrassé en totalité par toutes les spires d'une même phase, lorsque les conducteurs sont réunis dans une seule entaille par pôle et par phase, si ces conducteurs sont placés dans plusieurs entailles, il faut introduire dans la formule un *coefficient d'enroulement ou de bobinage* qui sera toujours plus petit que 1 et qui ira en diminuant au fur et à mesure que le nombre d'entailles par pôle et par phase augmentera.

Ce coefficient que nous désignerons par la lettre C tend vers les limites 0,827 pour un enroulement monophasé dont le bobinage occupe les 66 pour 100 du pas polaire ; 0,900 pour un biphasé dont l'enroulement occupe 50 pour 100 du pas polaire et 0,955 pour un triphasé dont l'enroulement occupe 33 pour 100 du pas polaire. Nous verrons plus loin au chapitre *Moteurs Asynchrones* la manière de calculer ce coefficient.

Quoique les constructeurs s'efforcent de produire un champ de forme sinusoïdale, celui-ci n'est pas toujours obtenu et il est d'autant plus difficile à réaliser que le rapport $\frac{\text{Arc polaire}}{\text{Pas polaire}}$ est plus petit.

Le facteur de forme varie suivant la forme de la courbe du champ, qui, dans les alternateurs est fonction de ce rapport $\frac{b_p}{\tau}$.

$$b_p = \text{arc polaire.}$$

$$\tau = \text{pas polaire.}$$

Nous allons chercher comment va varier le facteur de forme en donnant à $\frac{b_p}{\tau}$ des valeurs successives égales à 1, 0,75, 0,66, 0,50, 0,33, 0,25. Nous admettrons pour plus de simplicité que dans les cas considérés, la force électromotrice maximum aura toujours la même valeur égale à 1, nous admettrons également que tout le flux passe directement des inducteurs dans le fer induit sans tenir compte de l'épanouissement des lignes de force aux extrémités des pièces polaires (*fig.* 84 à 87).

Les courbes de champ ainsi obtenues sont des rectangles ayant tous comme ordonnée maximum 1 et comme abscisses correspondantes, τ , 0,75 τ (*fig.* 84), 0,66 τ (*fig.* 85), 0,5 τ (*fig.* 86), 0,33 τ (*fig.* 87), 0,25 τ . Les ordonnées moyennes sont donc respectivement égales à

$$\frac{\tau}{\tau} = 1, \quad \frac{0,75\tau}{\tau} = 0,75, \quad \frac{0,66\tau}{\tau} = 0,66, \text{ etc.}$$

Comme l'ordonnée maximum est égale à 1, le carré sera aussi égal à 1 et l'ordonnée efficace sera égale à la racine carrée de l'ordonnée moyenne, c'est-à-dire dans les cas précédents successivement égales à $\sqrt{1} = 1$, $\sqrt{0,75} = 0,866$, $\sqrt{0,66} = 0,812$, etc., etc.

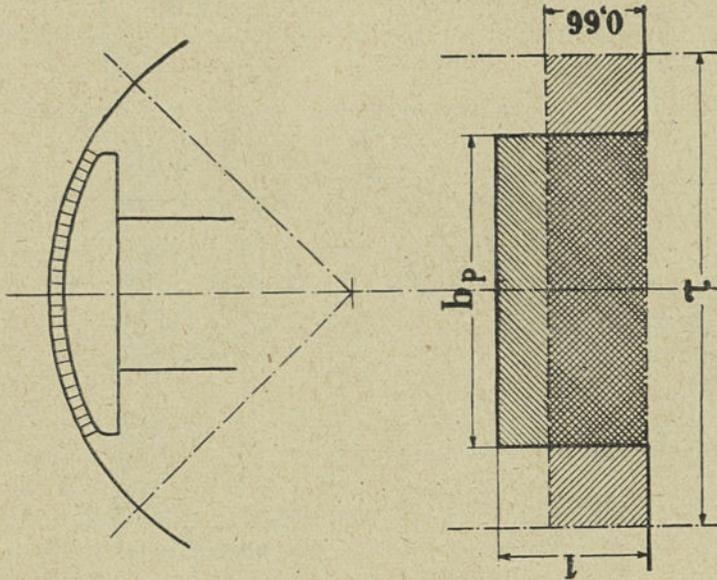


Fig. 85.

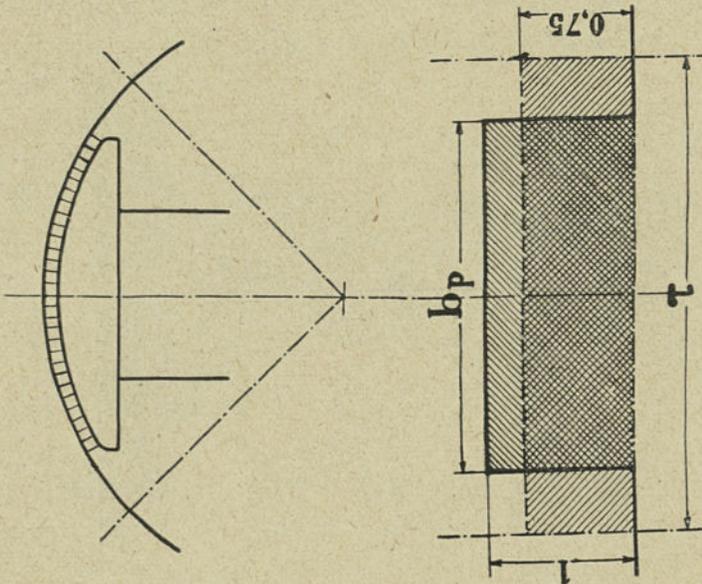


Fig. 84.

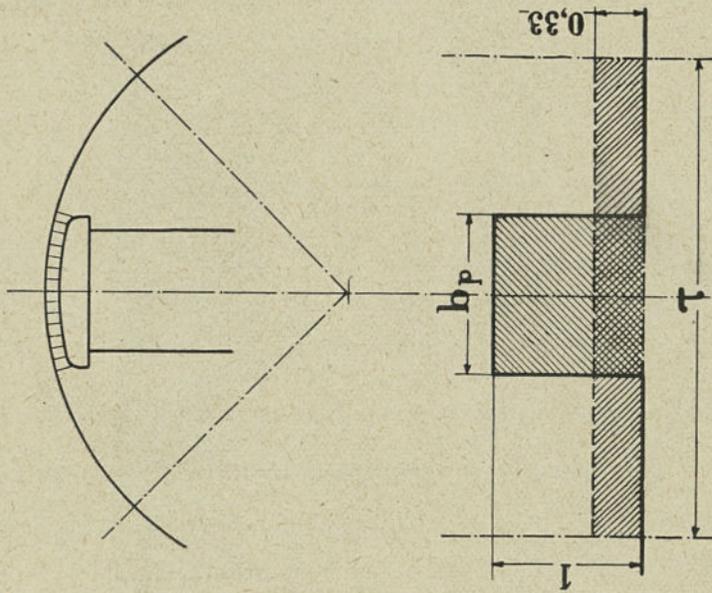


Fig. 87.

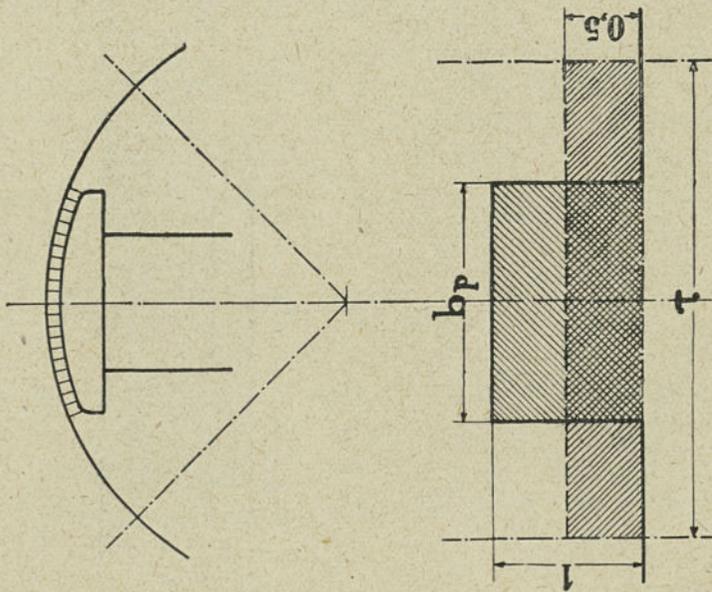


Fig. 86.

On peut maintenant dresser le tableau ci-dessous et déduire le facteur de forme pour les différentes valeurs du rapport $\frac{b_p}{\tau}$.

$\frac{b_p}{\tau}$	CHAMP MAXIMUM	CHAMP MOYEN	CHAMP EFFICACE	* FACTEUR DE FORME $\frac{\text{champ eff}}{\text{champ moy}}$
1	1	1,0	1,0	1,0
0,75	1	0,75	0,866	1,153
0,66	1	0,66	0,812	1,230
0,50	1	0,50	0,707	1,414
0,33	1	0,33	0,574	1,739
0,25	1	0,25	0,500	2,000

On voit par ces exemples que le facteur de forme peut varier dans des proportions assez considérables, près du simple au double quand $\frac{b_p}{\tau}$ passe de 0,75 à 0,25.

Nous obtenons ici pour le facteur de forme des valeurs un peu élevées, cela provient de ce que nous n'avons pas tenu compte des lignes de force qui s'épanouissent en dehors des pièces polaires ce qui donne une forme de champ représentée par la figure 88, tandis que nous avons calculé le tableau ci-dessus avec une forme de champ rectangulaire (fig. 84 à 87).

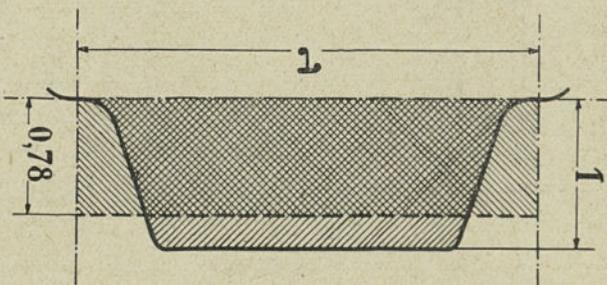


Fig. 88.

Si, reprenant la formule de la force électromotrice efficace, nous écrivons :

$$E_{\text{eff}} = k \times f \times \Phi \times N_1 \times 10^{-8} \text{ volts,}$$

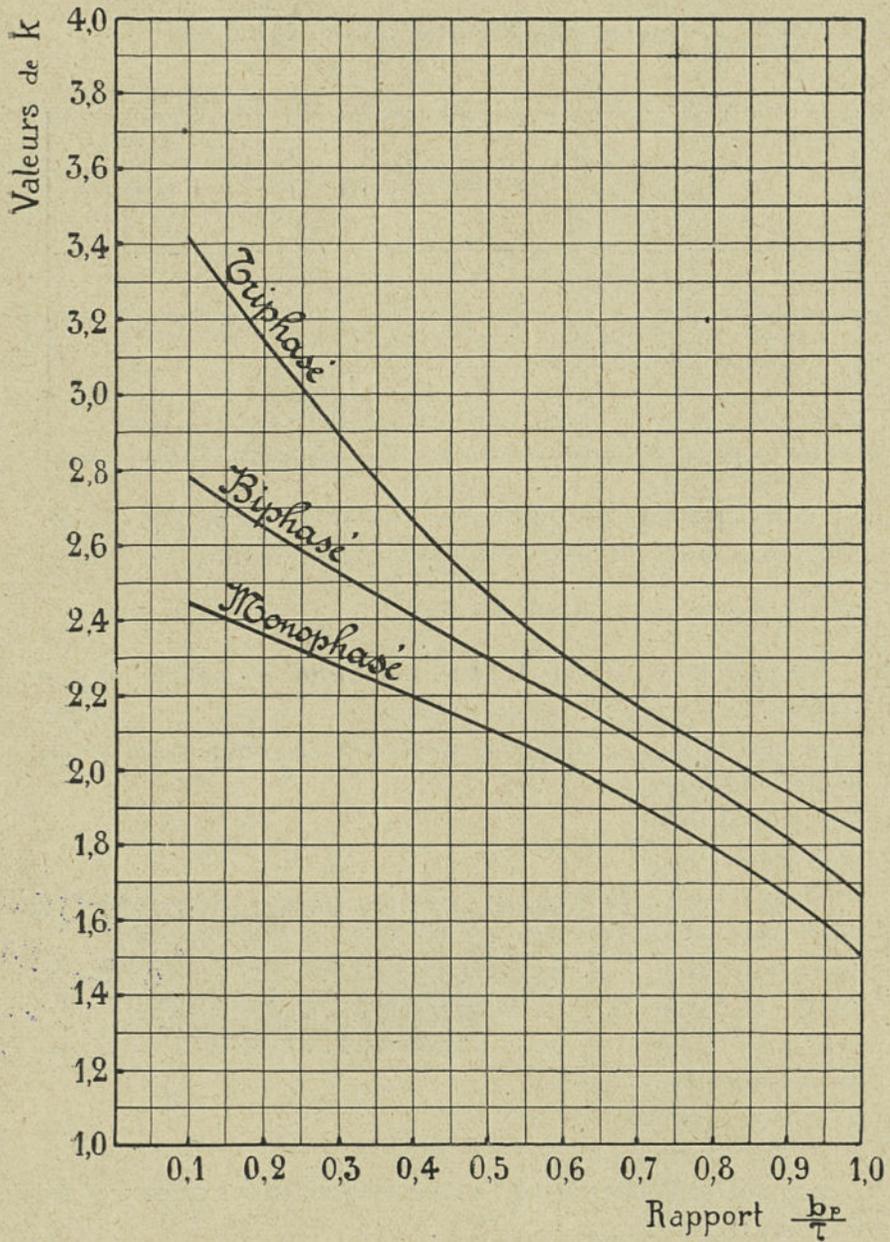


Fig. 89.

où k est un coefficient connu sous le nom de *coefficient de Kapp* et est égal à :

$$2 \times \text{facteur de forme} \times \text{coefficient de bobinage.}$$

On a donc tracé des courbes, dont nous donnons ici la reproduction (*fig. 89*), pour des alternateurs mono, bi et triphasé en fonction du rapport $\frac{b_p}{\tau}$.

38. Enroulements induits des alternateurs. — Dans les enroulements à courant alternatif on désigne généralement sous le nom de bobine, l'ensemble des spires par pôle appartenant à la même phase quelle que soit le nombre des spires. Cette bobine peut avoir ses conducteurs réunis dans une seule encoche de chaque côté ou distribués de part et d'autre dans deux, trois, quatre entailles ou plus.

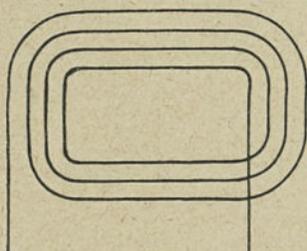


Fig. 90.

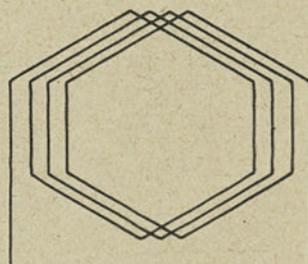


Fig. 91.

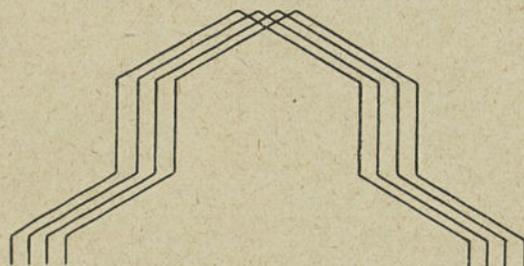


Fig. 92.

Si de chaque côté de la bobine, les conducteurs sont réunis dans une seule encoche, la bobine sera dite simple ; dans deux



entailles, la bobine sera dite double ; dans trois entailles, la bobine triple, etc.

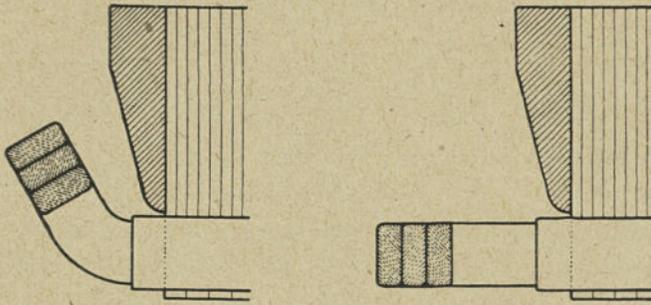


Fig. 93.

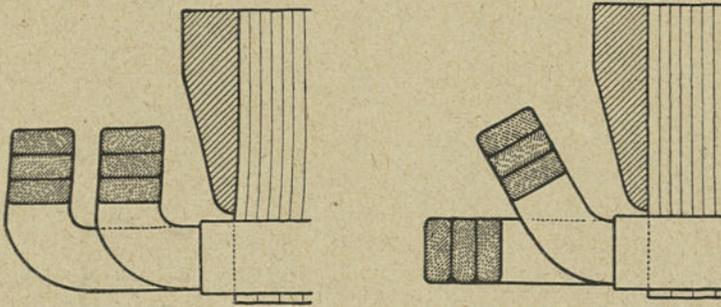


Fig. 94.

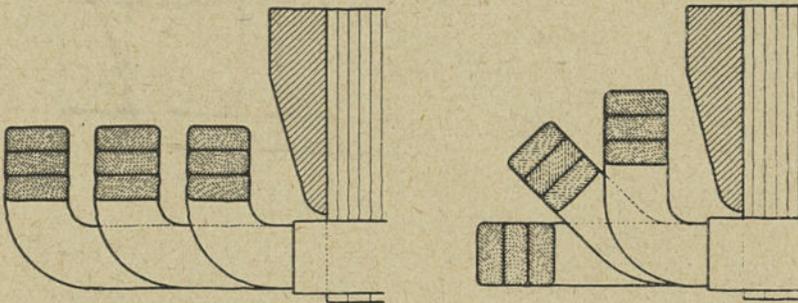


Fig. 95.

La figure 90 représente un enroulement en spirale à bobine quadruple et la figure 91 une bobine équivalente à enroulement

imbriqué. Dans le premier, les différents paquets formant la bobine n'ont pas le même embrassement ; dans l'enroulement imbriqué, le pas des conducteurs est pareil pour chaque paire formée par deux paquets reliés entre eux.

Dans l'enroulement en spirale, il y a une bobine par phase et par paire de pôles ; dans l'enroulement imbriqué ordinaire, il y a une bobine par pôle et par phase.

L'enroulement ondulé peut être progressif ou rétrograde ; ce dernier genre oblige que le nombre de conducteurs par encoche soit deux ou un multiple de deux. On utilise la moitié des conducteurs en parcourant l'enroulement dans un sens et l'autre moitié en le parcourant en sens inverse.

Les têtes de bobines peuvent être réparties dans un, deux ou trois plans, les enroulements monophasés sont exécutés dans un plan (*fig. 93*). Les biphasés dans deux plans (*fig. 94*) et les triphasés dans deux ou trois plans (*fig. 94* et *95*), les bobines sont droites ou relevées.

Primitivement, les enroulements des machines à courant alternatif (génératrices et moteurs asynchrones) étaient bobinés à la main. Les encoches une fois isolées, étaient garnies avec un nombre d'aiguilles égal au nombre de conducteurs par encoche. Ces aiguilles étaient constituées par des fils ronds en cuivre nu de diamètre égal ou très légèrement supérieur au diamètre du conducteur isolé.

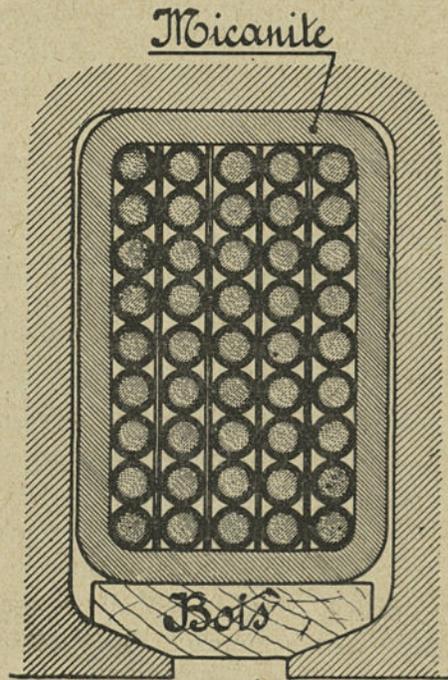


Fig. 96.

Le bobinier et un aide placés respectivement de chaque côté de la machine confectionnaient la bobine en sortant à chaque aller retour, une aiguille qui était remplacée, par un conducteur. Pour éviter les soudures on fait un paquet d'une seule longueur de fil, ce qui oblige à tirer à chaque tour un fil d'autant plus grand qu'il y a plus de spires par bobine. On comprend combien ce genre d'exécution est coûteux, aussi n'est-il plus guère employé que pour les machines à haute tension où il faut isoler chaque couche de fil entre elles (*fig. 96*).

Ici on a également essayé le bobinage sur gabarit d'où les enroulements imbriqués qui n'exigent qu'une seule forme pour toutes les bobines.

Les enroulements en fil méplat se font ordinairement ondulés, avec les têtes de bobines en manteau comme dans le courant continu. On peut aussi faire les connexions entre fils actifs par des fourches en développante de cercle.

Les bobines ou sections d'un alternateur se distinguent en bobines longues ou bobines courtes.

La bobine longue a une longueur égale à environ un pas polaire, tandis que la bobine courte est égale ou presque égale à celle d'une pièce polaire. On peut comparer ce dernier enroulement, à l'enroulement à corde des dynamos, tandis que celui de la bobine longue est comparable à l'enroulement diamétral.

Dans la bobine longue, la f. é. m. développée dans chaque conducteur actif d'une phase s'ajoute, dans les bobines courtes, les f. é. m. développées dans les conducteurs actifs d'une même bobine, sont à certains moments de sens opposés.

Dans l'enroulement à bobines longues (*fig. 97*), il y a une bobine par phase et par paire de pôles, dans l'enroulement à bobines courtes (*fig. 98*), il y a une bobine par phase et par pôle.

La bobine courte a l'inconvénient de nécessiter environ 30 pour 100 de spires de plus qu'avec la bobine longue, pour obtenir la même f. é. m. Aussi ce genre de bobinage est-il aujourd'hui complètement abandonné. Nous ne nous occuperons donc que des enroulements à bobines longues.

Dans un alternateur on a par paire de pôles :

Une bobine pour un monophasé.

Deux bobines pour un biphasé.

Trois bobines pour un triphasé.

Lorsqu'on a un nombre impair de bobines, trois pour deux pôles ou neuf pour six pôles, il y a une bobine *tordue* du fait que le premier côté de cette bobine se trouve sur un plan et que le deuxième côté est sur l'autre plan du bobinage (*fig. 107*).

Cependant dans le but de donner plus de symétrie à l'enroulement et de diminuer l'encombrement pris par les têtes des bobines, on dédouble ces bobines chaque fois qu'il est possible ; on a alors ce que l'on appelle l'enroulement par pôle, c'est-à-dire autant de demi-bobines que de pôles.

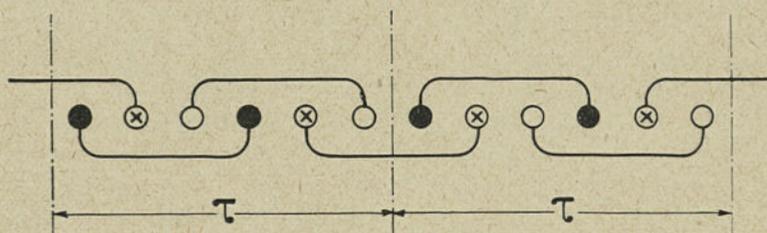


Fig. 97. — Bobine longue triphasée.

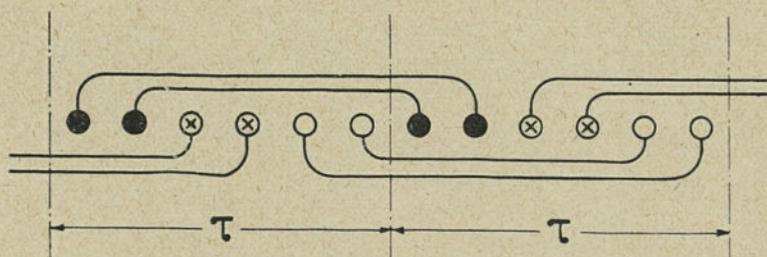


Fig. 98. — Bobine courte triphasée.

Dans un alternateur monophasé, on laisse 33 pour 100 des trous inoccupés car les conducteurs qu'on y placerait augmenteraient la résistance ohmique de l'enroulement sans apporter un supplément appréciable de force électromotrice. Il résulte de cela que la puissance d'un alternateur monophasé est d'environ 33

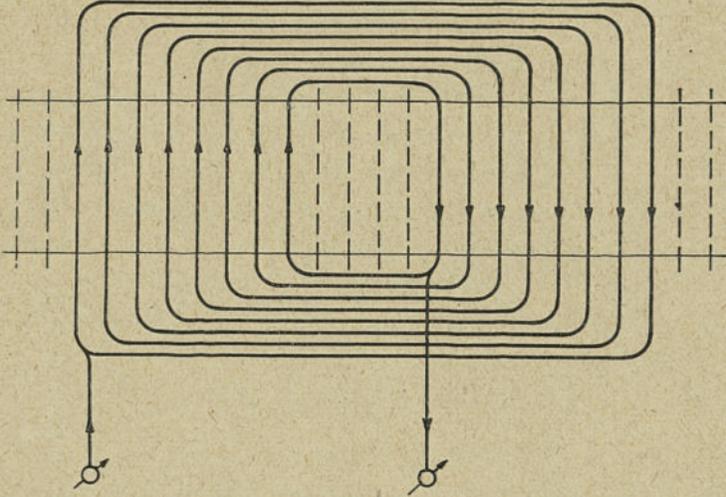


Fig. 99. — *Enroulement monophasé.* — 2 pôles — 24 encoches. — 1 bobine.

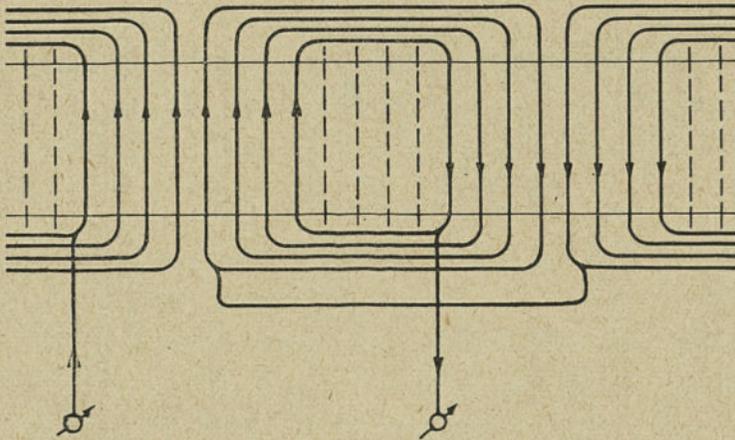


Fig. 100. — *Enroulement monophasé* — 2 pôles — 24 encoches — 2 demi-bobines.

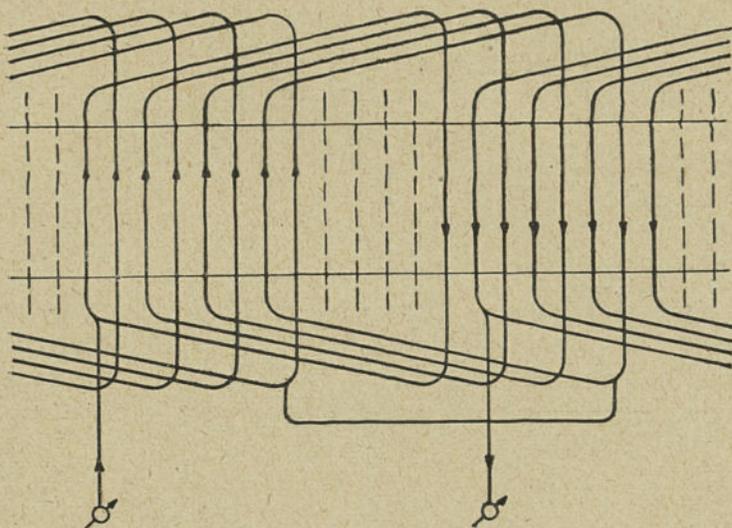


Fig. 101. — *Enroulement monophasé sur gabarit.* — 2 pôles — 24 encoches
8 bobines — embrassement 12 dents.

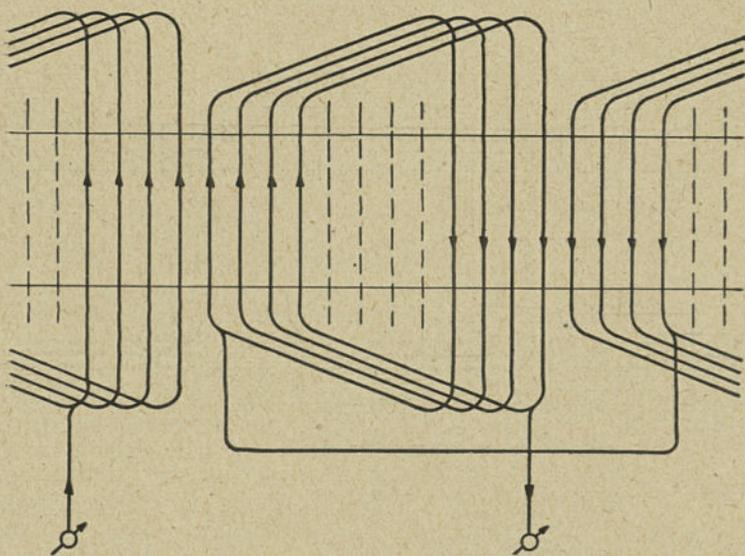


Fig. 102. — *Enroulement monophasé sur gabarit.* — 2 pôles — 24 encoches
8 bobines — embrassement 8 dents.

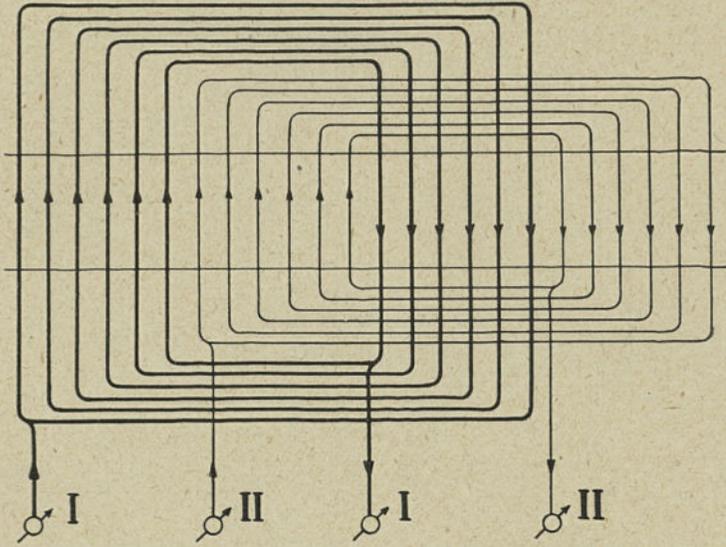


Fig. 103. — Enroulement biphasé. — 2 pôles — 24 encoches — 2 bobines.

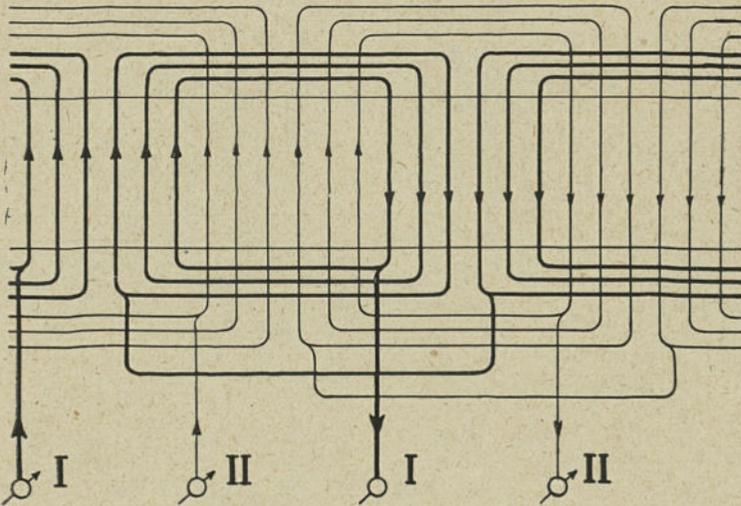


Fig. 104. — Enroulement biphasé. — 2 pôles — 24 encoches — 4 demi-bobines.

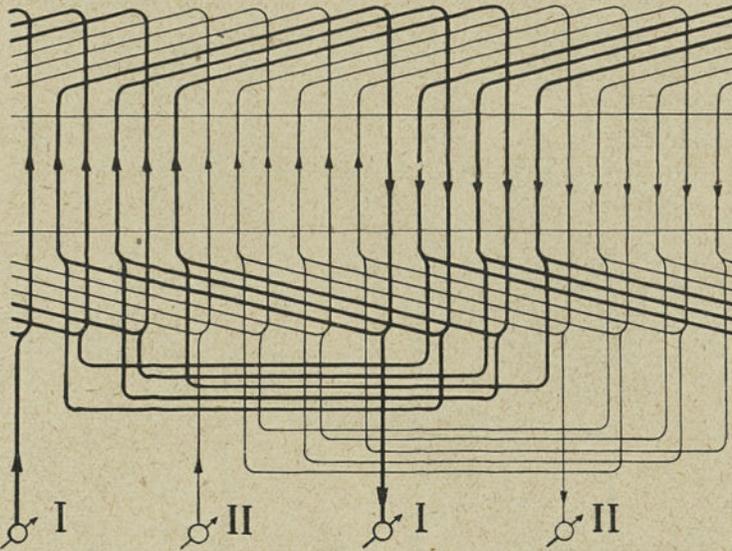


Fig. 105. — Enroulement biphasé sur gabarit. — 2 pôles — 24 encoches — 12 bobines embrassement 11 dents.

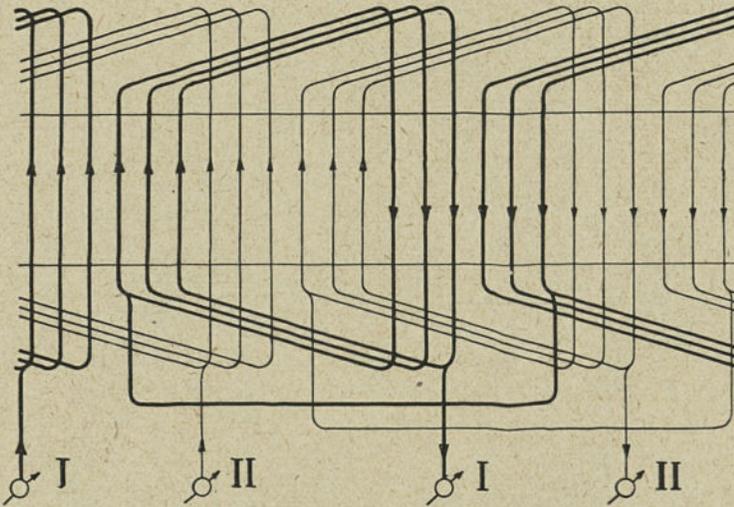


Fig. 106. — Enroulement biphasé sur gabarit. — 2 pôles — 24 encoches — 12 bobines embrassement 9 dents.

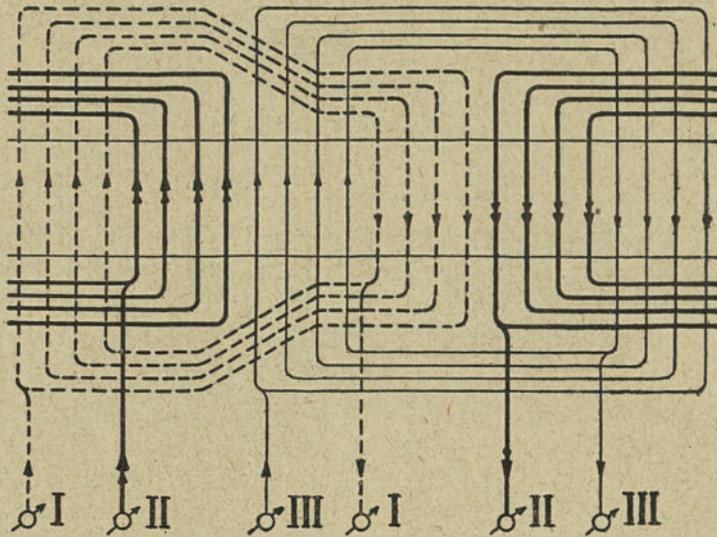


Fig. 107. — Enroulement triphasé. — 2 pôles — 24 encoches — 3 bobines.

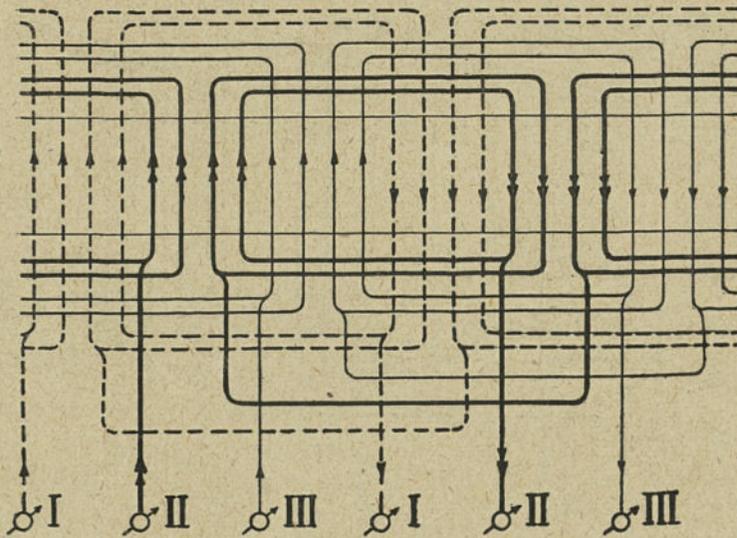


Fig. 108. — Enroulement triphasé. — 2 pôles — 24 encoches — 6 demi-bobines.

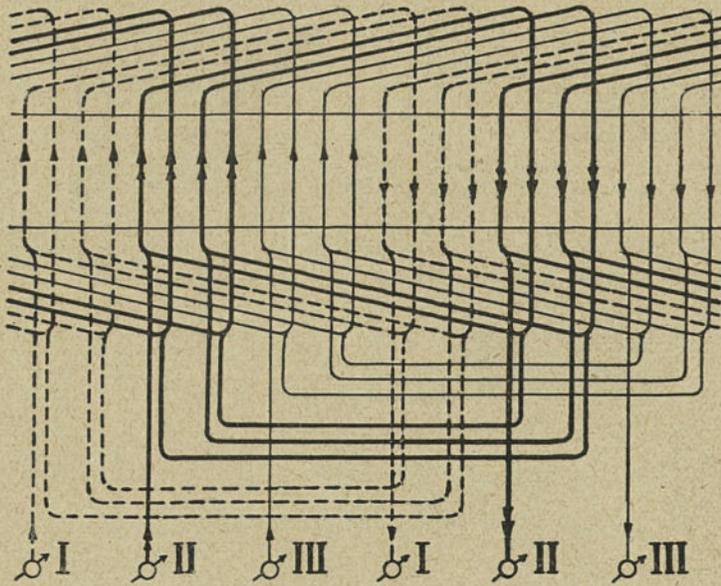


Fig. 109. — Enroulement triphasé sur gabarit. — 2 pôles — 24 encoches — 12 bobines embrassement 11 dents.

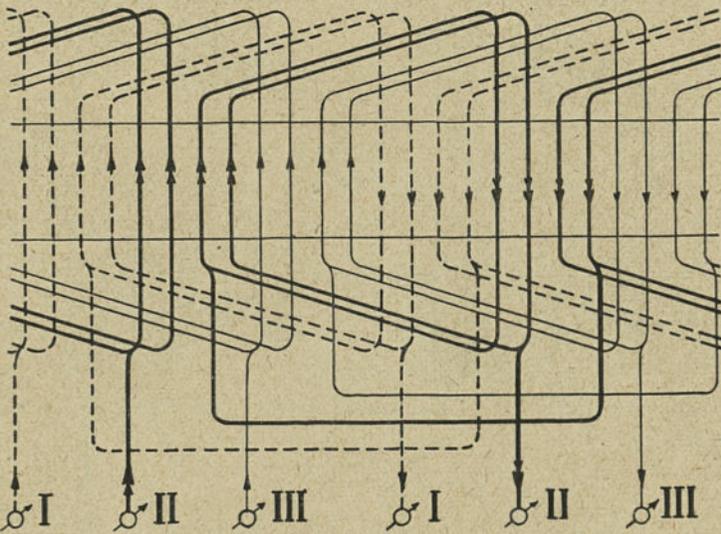


Fig. 110. — Enroulement triphasé sur gabarit. — 2 pôles — 24 encoches — 12 bobines embrassement 10 dents.

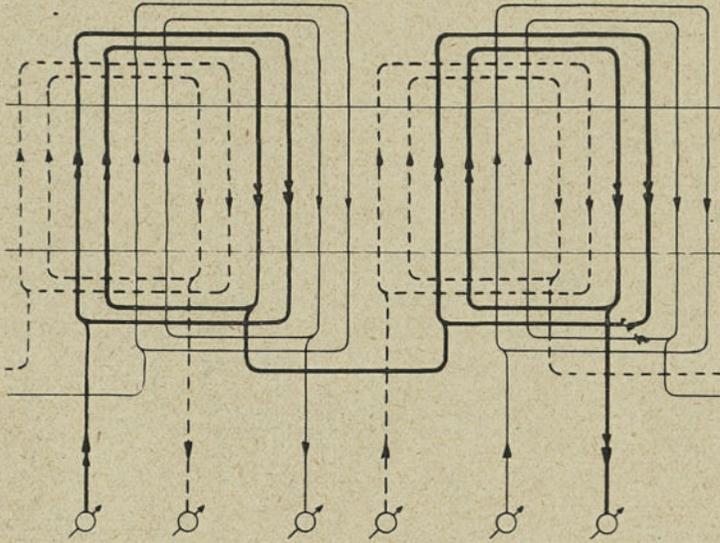


Fig. 111.

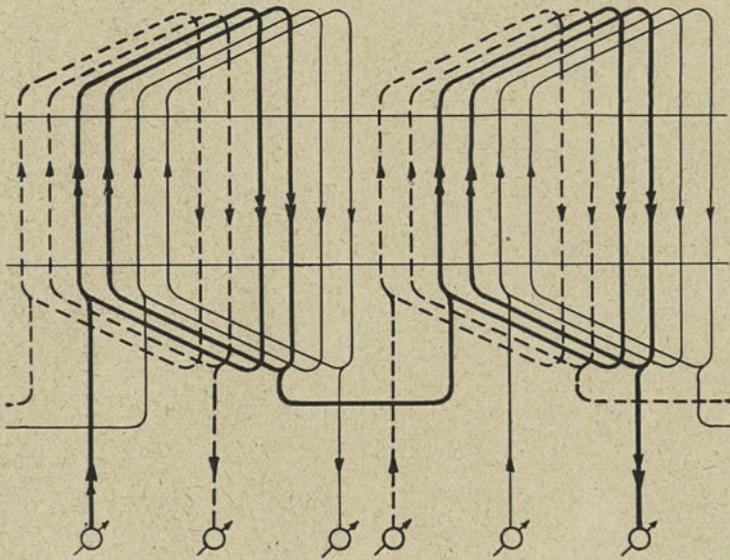


Fig. 112.

pour 100 plus faible que s'il comportait un enroulement polyphasé.

Nous représentons fig. 99 à 112 un stator d'alternateur à deux pôles et 24 encoches, bobiné successivement en mono-, bi et triphasé.

La figure 99 montre un enroulement monophasé à une bobine et la figure 100 un enroulement équivalent à deux demi-bobines.

On a ici $\frac{24 \times 2}{3} \times \frac{1}{2 \times 1} = 8$ encoches par pôle et par phase.

Les têtes des bobines se répartissent sur un seul plan.

La figure 103 représente un enroulement biphasé avec deux bobines, la figure 105 un enroulement en quatre demi-bobines.

Le nombre d'encoches par pôle et par phase est égal à $\frac{24}{2 \times 2} = 6$.

Les têtes des bobines se répartissent sur deux plans.

Sur la figure 107 on voit un enroulement triphasé à trois bobines et la figure 108 montre le même enroulement à 6 demi-bobines, mais tandis que dans le premier cas les têtes de bobines s'étagent sur deux plans, dans le deuxième cas il est nécessaire de les répartir sur trois plans.

Dans les turbo-alternateurs et en général pour les induits à petit nombre de pôles et à grandes bobines, il est important de fixer solidement les têtes des bobines, celles-ci pouvant être soumises à des attractions électro-dynamiques considérables.

Les schémas des figures 111 et 112 présentent l'avantage dans les stators en plusieurs pièces de ne pas couper le bobinage.

Les enroulements des induits d'alternateurs et des stators de moteurs asynchrones sont identiques. Tous les schémas que nous donnons sont donc applicables à l'une ou à l'autre de ces machines et nous verrons au chapitre iv la manière de les tracer.

CHAPITRE IV

MOTEURS ASYNCHRONES

39. **Moteurs asynchrones.** — La formule :

$$E_{\text{eff}} = 2,22 \times f \times \Phi \times N_1 \times 10^{-8} \text{ volts}$$

est également applicable aux moteurs asynchrones dans le cas particulier d'un champ sinusoïdal et d'un enroulement à une encoche par pôle et par phase.

Ici le rapport $\frac{\text{Arc polaire}}{\text{Pas polaire}}$ est égal à 1 et quelle que soit la forme du champ, le facteur de forme ne varie plus dans les mêmes proportions que dans les alternateurs, mais comme dans ces derniers, l'enroulement est partagé dans plusieurs encoches par pôle et par phase, il faut introduire dans la formule le même coefficient de bobinage que nous avons appelé C et on a :

$$E_{\text{eff}} = 2,22 \times C \times f \times \Phi \times N_1 \times 10^{-8} \text{ volts.}$$

40. **Coefficient d'enroulement.** — Il est rare de rencontrer des moteurs ayant des bobines logées dans plus de 6 et moins de 2 paires de trous. Plus la bobine sera divisée, plus le champ qu'elle produira se rapprochera de la sinusoïde, cependant un grand nombre d'entailles augmente le prix de revient du moteur, en main-d'œuvre et en matière.

Appelons :

m = nombre de phases,

p = nombre de paires de pôles,

q = nombre d'encoches par pôle et par phase,
 z = nombre total d'encoches.

Dans tout ce qui va suivre nous considérons une machine à 2 pôles et nous allons chercher la valeur du coefficient C pour un nombre variable de q encoches par pôle et par phase. Ces valeurs seront exactes pour n'importe quel nombre de pôles du moteur puisque dans toutes les machines électriques, le pas polaire τ est égal à π électrique.

Pour $p = 1$ on a $z = 2mq$.

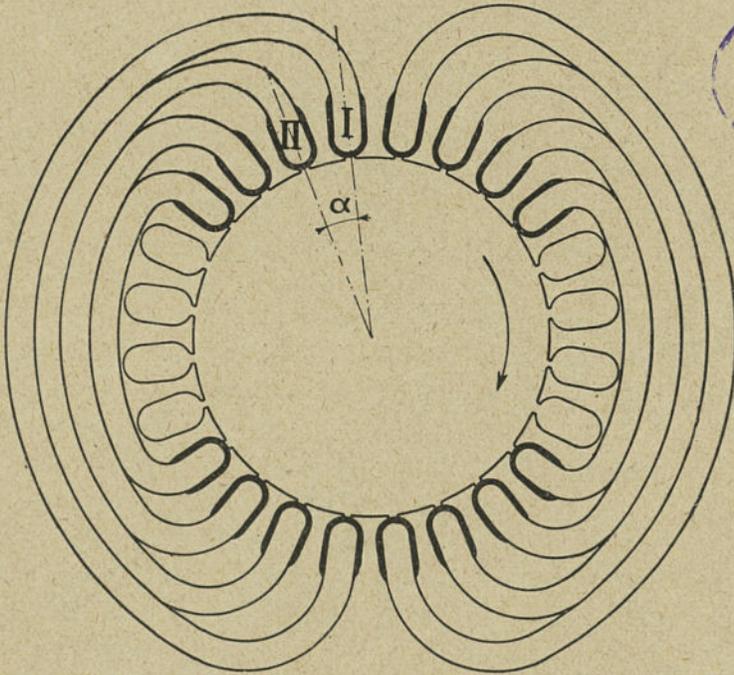


Fig. 113. — Moteur monophasé. — $p = 1$, $q = 8$, $m = 1$, $z = 24$.

Le flux par pôle est embrassé en totalité par les spires d'une même phase lorsque les conducteurs sont logés dans une encoche par pôle et par phase et dans ce cas $C = 1$.

Considérons un moteur monophasé (fig. 113). Ici le bobinage principal occupe les $2/3$ du nombre total d'encoches, l'autre $1/3$ étant réservé à un bobinage auxiliaire qui sert pour le démarrage

du moteur et qui est mis hors circuit lorsque ce dernier est lancé. C'est d'ailleurs cette mauvaise utilisation du pas polaire pour le bobinage principal qui réduit de 33 pour 100 la puissance d'un moteur lorsqu'il porte un enroulement monophasé au lieu d'un enroulement polyphasé, on a alors $z = 3q$.

Admettons que la f. é. m. qui parcourt le bobinage de ce moteur est sinusoïdale, le champ produit sera également sinusoïdal.

Désignons par 1 la f. é. m. instantanée induite dans les conducteurs de l'encoche I, au même instant, la f. é. m. induite dans les conducteurs de l'encoche II sera décalée de $\frac{1}{24}$ de période et et a pour valeur $\cos \frac{2\pi}{24} = \cos \frac{360}{24}$.

$$\frac{360}{24} = \alpha = 15^\circ, \quad \cos 15^\circ = 0.965.$$

Autrement dit, la f. é. m. résultante est composée de q f. é. m.

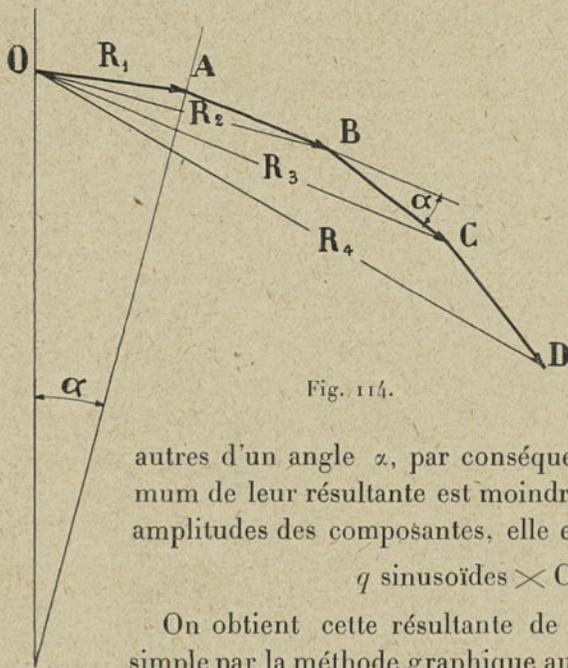


Fig. 114.

partielles. Si toutes ces sinusoïdes avaient la même amplitude à un instant donné, leur valeur totale serait q fois la valeur de l'une d'elles, mais elles sont décalées les unes par rapport aux

autres d'un angle α , par conséquent la valeur maximum de leur résultante est moindre que la somme des amplitudes des composantes, elle est égale à

$$q \text{ sinusoïdes} \times C.$$

On obtient cette résultante de la manière la plus simple par la méthode graphique au moyen du triangle des forces en représentant ces sinusoïdes par des vecteurs. Nous

formerons une ligne polygonale régulière OABCD dont les côtés sont égaux à l'amplitude maximum de la sinusoïde composante et les angles α égaux à l'angle au centre limité par les axes de deux encoches successives (*fig. 114*).

Les diagonales R_1, R_2, R_3, R_4 représentent les résultantes pour $q = 1, 2, 3, 4$.

Prenons $q = 4$, si l'on fait la somme des composantes on a

$$OA + AB + BC + CD = q \times OA = q \text{ sinusoïdes,}$$

d'où

$$C = \frac{R_4}{q \text{ sinusoïdes}}$$

On peut calculer ce rapport pour un nombre quelconque d'encoches et pour un tel genre de bobinage dont un côté de l'enroulement occupera une certaine portion du pas polaire.

Dans un cercle représentant un stator, inscrivons deux polygones ; le premier qui aura autant de côtés qu'il y a d'encoches s'appellera polygone des encoches et se rapprochera d'autant plus de la circonférence que le nombre d'encoches sera plus grand ; le deuxième polygone aura un nombre de côté en fonction du pour 100 du pas polaire occupé par un côté de l'enroulement. On aura donc dans ce cas :

3 côtés pour un monophasé dont un côté du bobinage occupe 66 pour 100 du pas polaire ;

4 côtés pour un biphasé (50 pour 100 du pas polaire) ;

6 côtés pour un triphasé (33 pour 100 du pas polaire).

Ce deuxième polygone s'appellera polygone de l'enroulement ou du bobinage.

D'après ce qui vient d'être dit il est évident que le facteur C est égal à :

$$\frac{\text{côté du polygone du bobinage}}{q \times \text{côté du polygone des encoches}}$$

Le côté du polygone du bobinage est la résultante :

$$= 2R \sin \frac{\pi}{2m}$$

Le côté du polygone des encoches est une composante :

$$= 2R \sin \frac{\pi}{2mq},$$

$$\text{Somme des composantes} = q \times 2R \sin \frac{\pi}{2mq},$$

$$\text{Coefficient } C = \frac{2R \sin \frac{\pi}{2m}}{q \times 2R \sin \frac{\pi}{2mq}} = \frac{\sin \frac{\pi}{2m}}{q \sin \frac{\pi}{2mq}} \text{ formule générale.}$$

En remplaçant m par sa valeur on obtient les équations suivantes (*fig. 115-116-117*) en apportant la correction pour le monophasé à 120° .

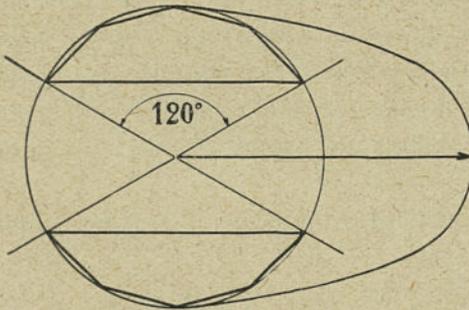


Fig. 115. — Monophasé (120°)

$$C = \frac{\sin \frac{180}{3}}{q \sin \frac{\pi}{3q}} = \frac{0,866}{q \sin \frac{\pi}{3q}}$$

Fig. 116. — Biphasé (90°)

$$C = \frac{\sin \frac{180}{4}}{q \sin \frac{\pi}{4q}} = \frac{0,707}{q \sin \frac{\pi}{4q}}$$

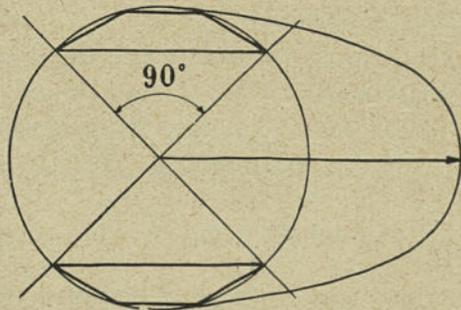
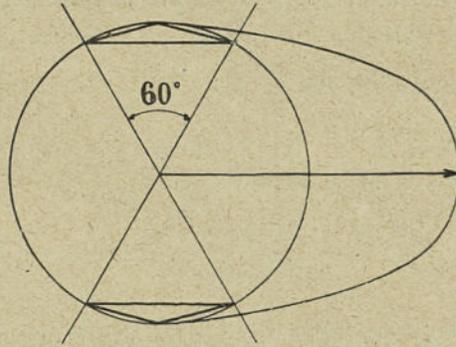


Fig. 117. — Triphasé (60°)

$$C = \frac{\sin \frac{180}{6}}{q \sin \frac{\pi}{6q}} = \frac{0,500}{q \sin \frac{\pi}{6q}}$$



Si, dans une génératrice ou un moteur à courant alternatif monophasé, le bobinage occupait tout le pas polaire on aurait :

$$\text{monophasé (180°) : } C = \frac{\sin \frac{180}{2}}{q \sin \frac{\pi}{2q}} = \frac{1}{q \sin \frac{\pi}{2q}}$$

A l'aide des formules précédentes on peut calculer le tableau suivant :

NOMBRE D'ENCOCHES	MONOPHASÉ 180°	MONOPHASÉ 120°	BIPHASÉ 90°	TRIPHASÉ 60°
q	$C = \frac{1}{q \sin \frac{\pi}{2q}}$	$C = \frac{0,866}{q \sin \frac{\pi}{3q}}$	$C = \frac{0,707}{q \sin \frac{\pi}{4q}}$	$C = \frac{0,500}{q \sin \frac{\pi}{6q}}$
1	1,000	1,000	1,000	1,000
2	0,707	0,866	0,924	0,966
3	0,666	0,844	0,911	0,960
4	0,653	0,837	0,906	0,958
5	0,647	0,833	0,904	0,957
6	0,643	0,832	0,903	0,956
7	0,642	0,831	0,902	0,955
8	0,641	0,830	0,902	0,955
9	0,640	0,829	0,901	0,955
10	0,639	0,829	0,901	0,955
11	0,639	0,828	0,901	0,955
12	0,638	0,828	0,901	0,955
∞	0,637	0,827	0,900	0,955

Un alternateur monophasé dans lequel on aurait rempli toutes les encoches aura donc son nombre de spires augmenté dans la proportion de $\frac{3}{2}$ mais, dans ce cas, le coefficient du bobinage devient 0,637 au lieu de 0,827, ce qui élève la f. é. m. développée dans la proportion de

$$1 \text{ à } \frac{1 \times 3 \times 0,637}{2 \times 0,827} = 1,15 \text{ c'est-à-dire } 15 \text{ pour } 100$$

pour une augmentation du poids de cuivre de 50 pour 100, ce qui n'est pas économique.

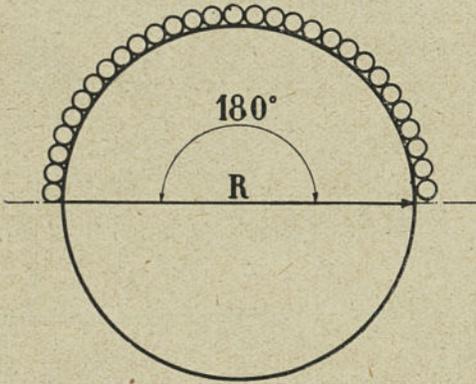


Fig. 118.

Proportion en pour 100 du pas polaire occupé par un côté de bobine = 100 pour 100.

$$\text{Corde} = 2, \quad \text{arc} = \pi,$$

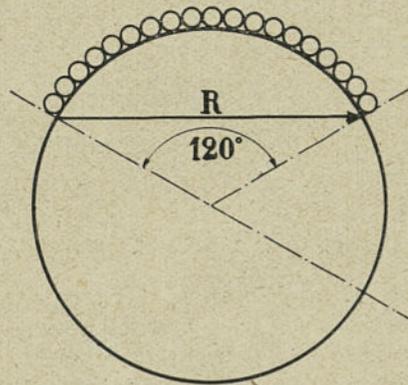
$$C = \frac{2}{\pi} = 0,637.$$

Fig. 119.

Proportion en pour 100 du pas polaire occupé par un côté de bobine = 66 pour 100.

$$\text{corde} = \sqrt{3}, \quad \text{arc} = \frac{2\pi}{3},$$

$$C = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} = 0,827.$$



Le coefficient d'enroulement tend vers une valeur limite qui est atteinte lorsque le bobinage est uniformément réparti sur la circonférence du stator (fig. 118 à 121).

Fig. 120.

Proportion en pour 100 du pas polaire occupé par un côté de bobine = 50 pour 100.

$$\text{corde} = \sqrt{2}, \quad \text{arc} = \frac{\pi}{2},$$

$$C = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} = 0,900.$$

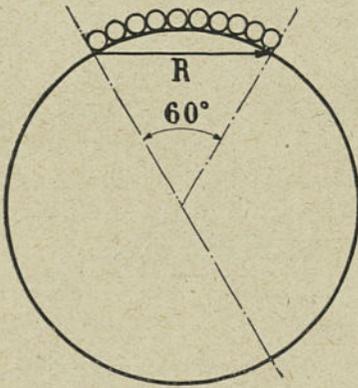
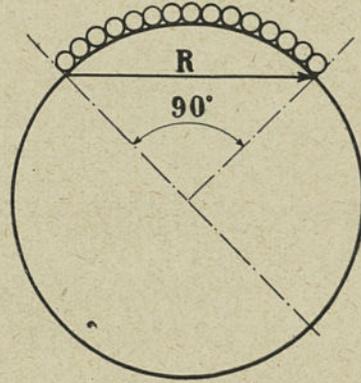


Fig. 121.

Proportion en pour 100 du pas polaire occupé par un côté de bobine = 33 pour 100.

$$\text{corde} = 1, \quad \text{arc} = \frac{\pi}{3},$$

$$C = \frac{3}{\pi} = 0,955.$$

La courbe de la figure 122 donne ces valeurs limites en fonction du pourcentage du pas polaire occupé par un côté de l'enroulement.

Dans un moteur asynchrone, ce coefficient de bobinage est applicable au rotor comme au stator. On affectera les lettres représentant le nombre de phases, le nombre d'encoches, etc. de

l'indice 1 ou 2 selon qu'il s'agit d'un stator (primaire) ou d'un rotor (secondaire).

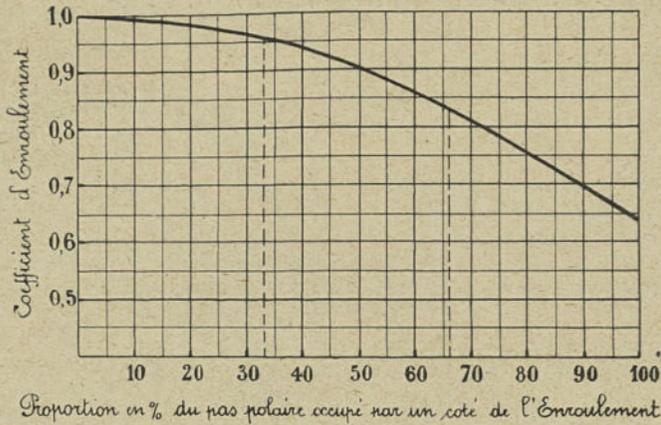


Fig. 122.

41. Rotor. — On peut comparer un moteur asynchrone à un transformateur où le stator porterait l'enroulement primaire et le rotor l'enroulement secondaire.

Les rotors se font en court-circuit ou bobinés avec bagues. Les moteurs en court-circuit démarrent avec un courant pouvant atteindre facilement le quadruple de l'intensité normale en pleine

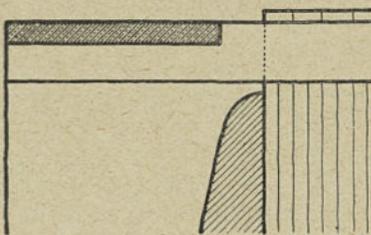


Fig. 123.

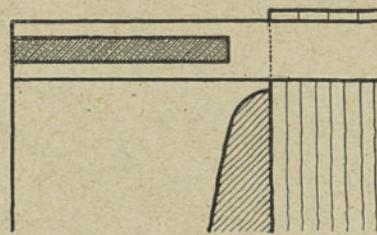


Fig. 124

charge, mais, dans presque tous les cas, on limite le courant de démarrage. Cette condition est de rigueur là où les moteurs sont alimentés par un réseau de lumière pour éviter les fortes variations de charges de l'usine génératrice au cas où l'on viendrait à démarrer au même instant un grand nombre de moteurs.

Certains constructeurs ont adopté pour les moteurs en court-circuit, les rotors dits « à cage d'écureuil ». Cette construction est en somme constituée par une série de barres placées dans des encoches et soudées ou rivées d'une manière quelconque à des anneaux de court-circuit (*fig. 123 et 124*), l'ensemble de l'enroulement formant une sorte de cage d'écureuil d'où leur nom.

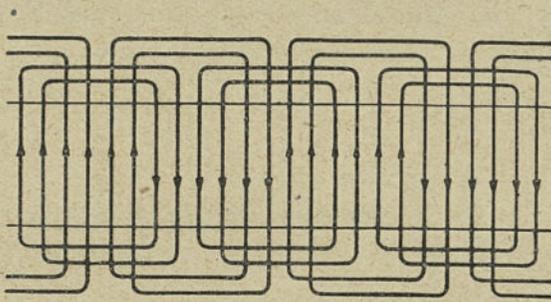


Fig. 125.

En employant le schéma de la figure 125 on évite les anneaux de mise en court-circuit. Comme dans la cage d'écureuil on a des encoches rondes et un conducteur par encoche. Ce conducteur passant successivement dans un certain nombre d'encoches formera une bobine fermée sur elle-même.

Les cages d'écureuil exigent un encochage spécial. Dans un but de standardisation on peut se servir des mêmes tôles pour un rotor en court-circuit que pour un rotor bobiné. On munit les premiers d'un enroulement bouclé, qui est différent de la cage d'écureuil, en ce que les barres au lieu d'être toutes réunies entre elles des deux côtés du noyau forment des spires indépendantes fermées sur elles-mêmes. On emploie le même fil et même nombre de fils par entaille que pour le rotor bobiné, mais ce fil est mis nu dans l'encoche non isolée. Cette disposition conduit à une grande surface de refroidissement qui donne une bonne ventilation,

Si l'on veut obtenir un démarrage énergique, on peut mettre une certaine quantité de spires $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{2}$ en laiton, également réparties sur la circonférence du rotor.

Le rotor bobiné porte un enroulement identique à celui du sta-

tor ayant naturellement le même nombre de pôles, mais le nombre de phases peut être différent. Quel que soit le nombre de phases du stator on emploie généralement le même rotor. Pour les petits moteurs, dans le but de simplification du démarreur on fait quelquefois le rotor biphasé, mais ordinairement le rotor est triphasé, ce qui pour une même puissance est la combinaison donnant le minimum d'intensité avec le minimum de d. d. p. par phase. La puissance transmise par le rotor étant proportionnelle à

$$m_2 e_2 i_2$$

ou $m_2 =$ Nombre de phases du rotor.

$e_2 =$ Force électromotrice induite par phase du rotor.

$i_2 =$ Intensité par phase du rotor.

Si m_2 diminue e_2 ou i_2 augmentent dans les mêmes proportions puisque le produit est constant.

Le rapport de transformation entre le stator et le rotor se déduit du rapport des nombres de spires, il est approximativement égal à :

$$e_2 = e_1 \times \frac{N_2}{N_1}$$

On doit choisir un nombre de spires par phase au rotor, pour que la tension maximum atteinte au démarrage entre les bagues, ne soit ni trop élevée pour les isolants, ni dangereuse pour le personnel appelé à faire la manœuvre.

Dans les moteurs de petite et de moyenne puissance, on ne dépasse pas 200 volts entre bagues ; pour les gros moteurs on va jusqu'à 600 volts.

42. Encoches. — Les stators des moteurs asynchrones ont les mêmes types d'encoches que les génératrices alternatives (*fig. 83*). Cependant dans les petits moteurs, beaucoup de firmes donnent aux entailles une section trapézoïdale pour avoir des dents à flancs parallèles ou à peu près forme 1 (*fig. 126*).

Les rotors à cage d'écureuil ont des encoches rondes, tandis

que les rotors bobinés ont des entailles de la forme 2 ou 3 (fig. 126).

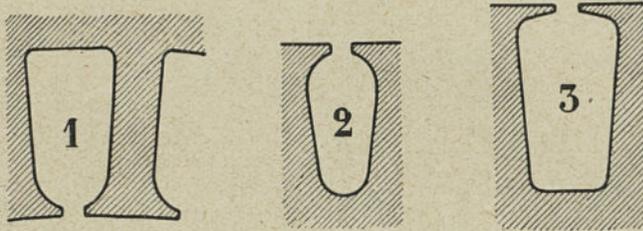


Fig. 126.

L'encoche 2 de la figure 83 est toute indiquée pour les rotors bobinés en barres.

43. Schémas. — Les schémas des figures 99 à 111 peuvent servir de modèles pour tracer n'importe quel enroulement pour génératrices alternatives ou pour moteurs asynchrones, mono, bi ou triphasé. On choisira le schéma correspondant selon que le bobinage sera fait à la main ou sur gabarit. Pour ce dernier genre de confection des bobines on doit chercher autant qu'il est possible à n'avoir qu'une seule dimension de bobine.

Lorsqu'on a un schéma à tracer, le nombre de phases m , le nombre de paires de pôles p et le nombre total d'encoches z sont connus. On détermine immédiatement le nombre d'encoches par pôle et par phase :

$$q = \frac{z}{2pm}$$

Tous les conducteurs d'une même encoche sont en série. Un conducteur peut être formé de plusieurs fils en parallèle et les bobines ou demi-bobines d'une même phase peuvent être reliées en série ou en parallèle.

Le plus pratique est de dessiner le schéma en autant de couleurs différentes qu'il y a de phases. Dans un pôle on a donc q encoches de chaque phase. Chaque encoche étant représentée par

un trait de la couleur conventionnellement adoptée, m traits forment un pôle. Ces derniers sont marqués par des flèches indiquant le sens instantané du courant. Il ne reste plus pour terminer le schéma qu'à relier les fils actifs et faire les connexions entre bobines (*fig. 127*) selon le mode de couplage auquel on s'est arrêté dans le calcul des constantes de la machine.

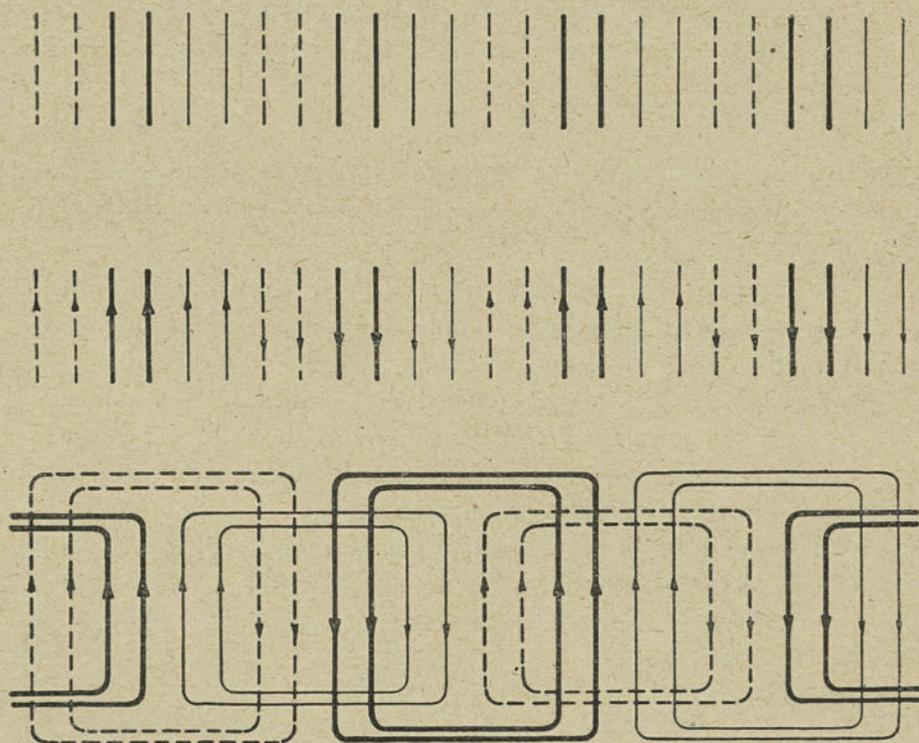


Fig. 127.

Pour les moteurs monophasés on se sert des mêmes schémas que pour les génératrices, en utilisant les encoches vides de ces dernières pour le bobinage auxiliaire servant au démarrage du moteur (*fig. 128*). On obtient en quelque sorte un schéma biphasé dont l'enroulement d'une phase n'occuperait qu'un nombre d'encoches moitié moindre que l'autre phase.

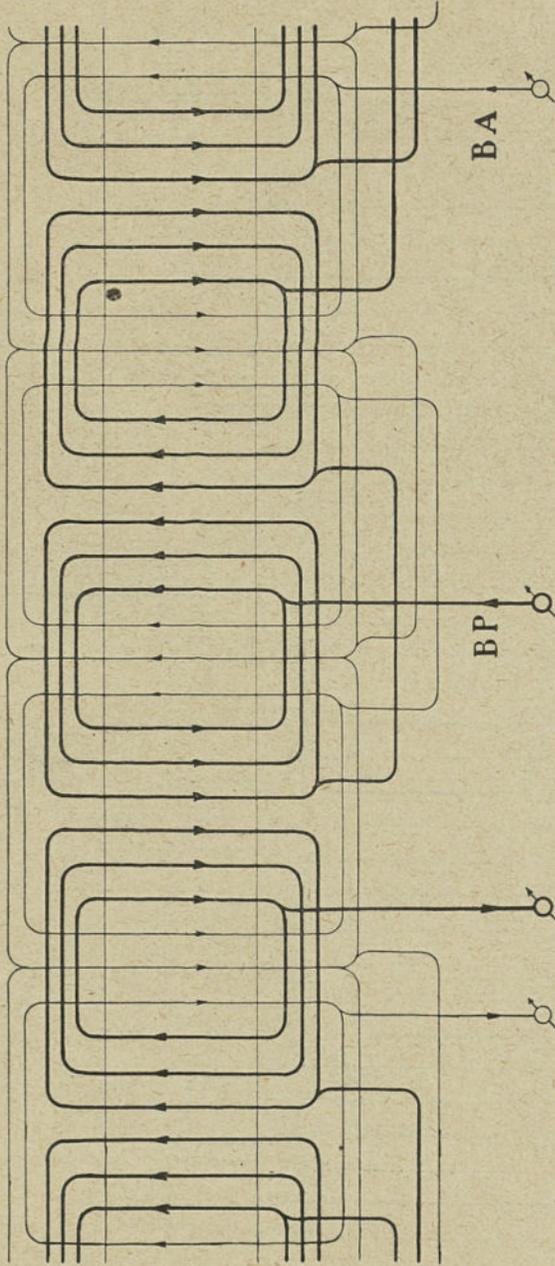


Fig. 128. — *Enroulement monophasé. 4 pôles, 36 encoches, 4 demi-bobines (bob. principal). BP, Bobinage principal ; BA, Bobinage auxiliaire.*

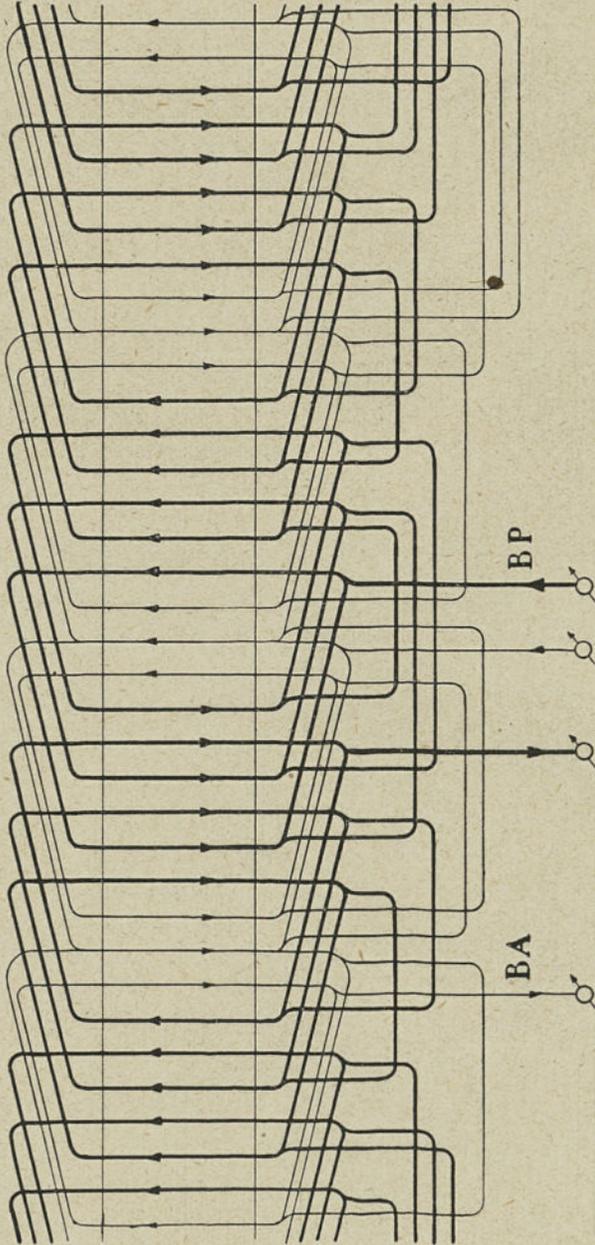


Fig. 129. — *Enroulement monophasé sur gabarit. 4 pôles, 36 encoches.*
BP, Bobinage principal ; BA, Bobinage auxiliaire.

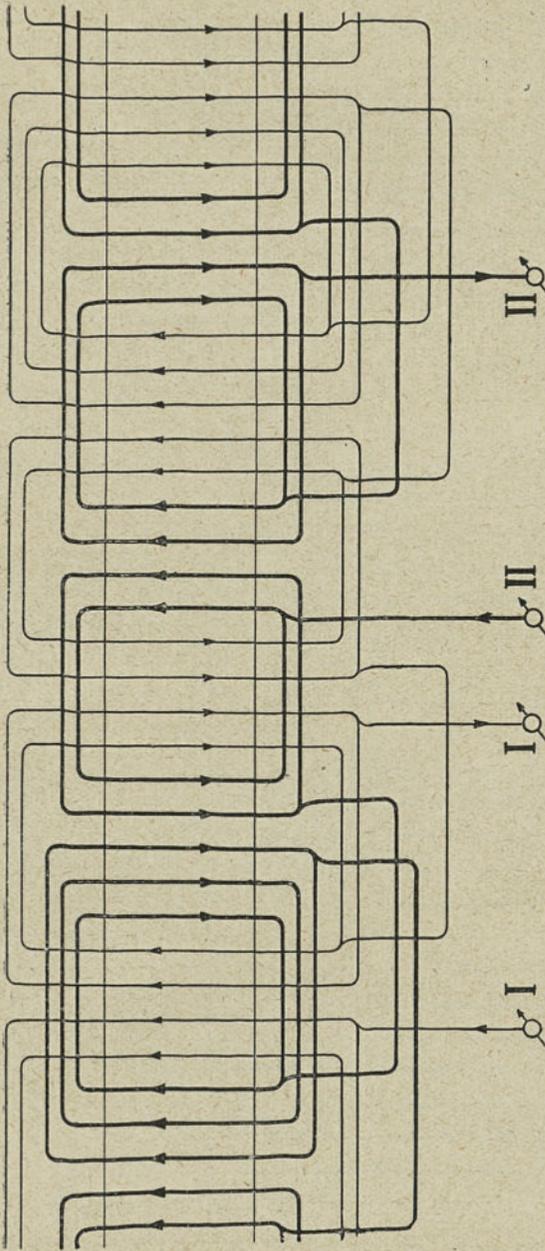


Fig. 130. — Enroulement biphasé. 4 pôles, 36 encoches, 8 demi-bobines.

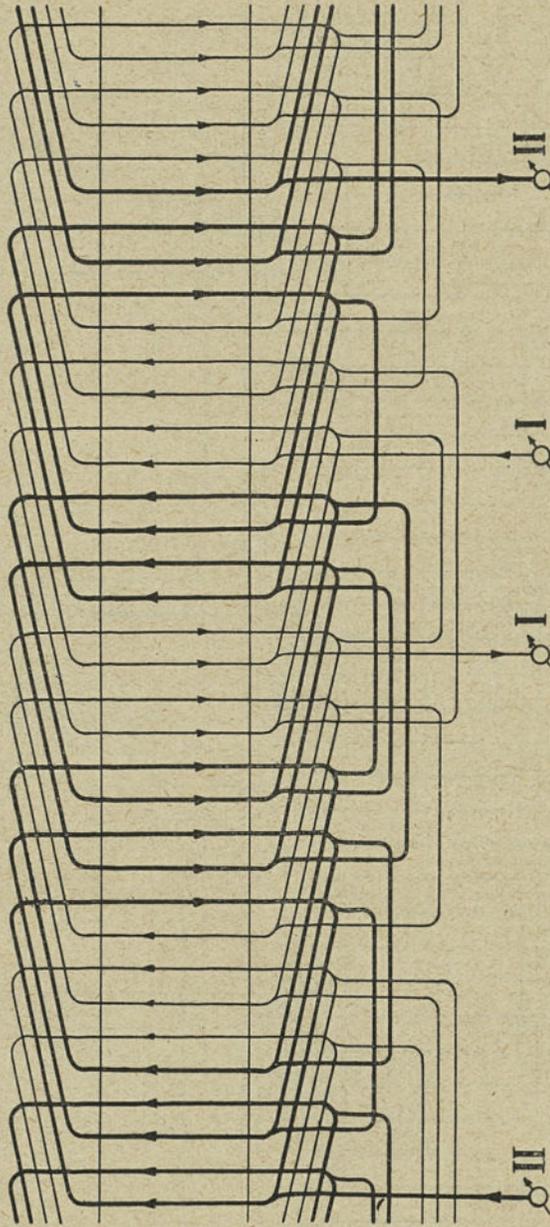


Fig. 131. — *Enroulement biphasé sur gabarit. 4 pôles, 36 encoches, 18 bobines, embrassement 9 dents.*

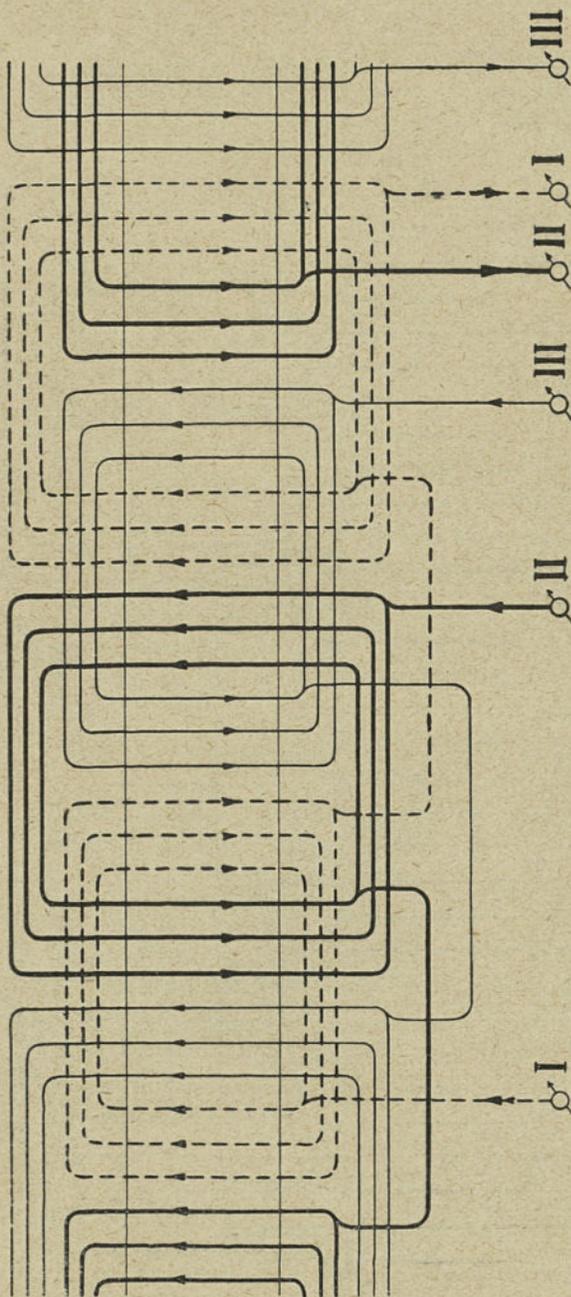


Fig. 132. — Enroulement triphasé. 4 pôles, 36 encoches, 6 bobines.

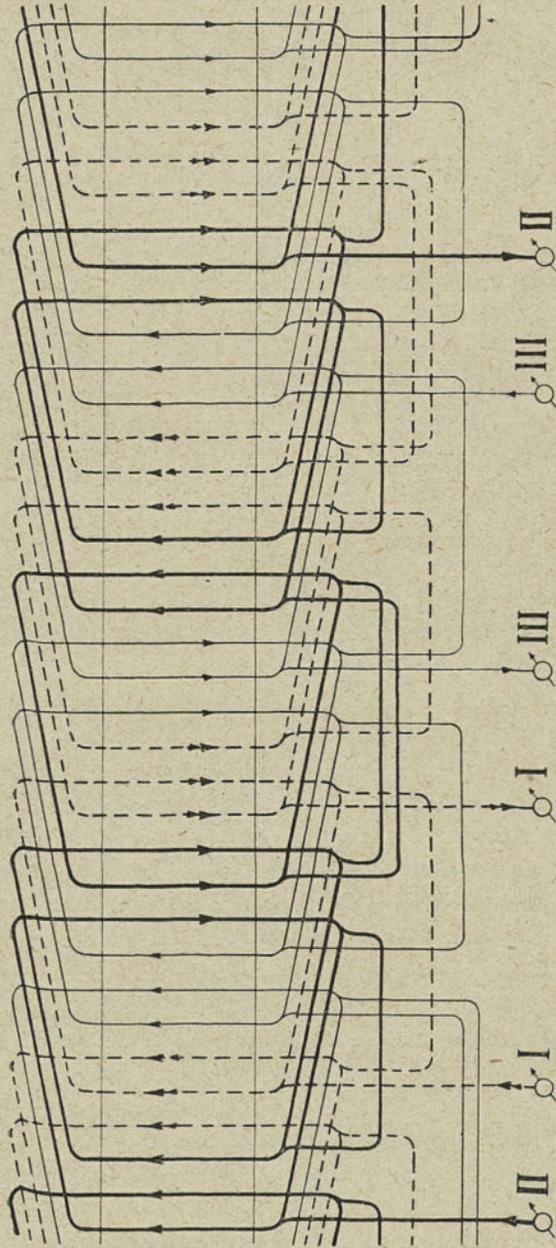


Fig. 133. — Enroulement triphasé sur gabarit. 4 pôles, 36 encoches, 18 bobines, embrassement 9 dents.

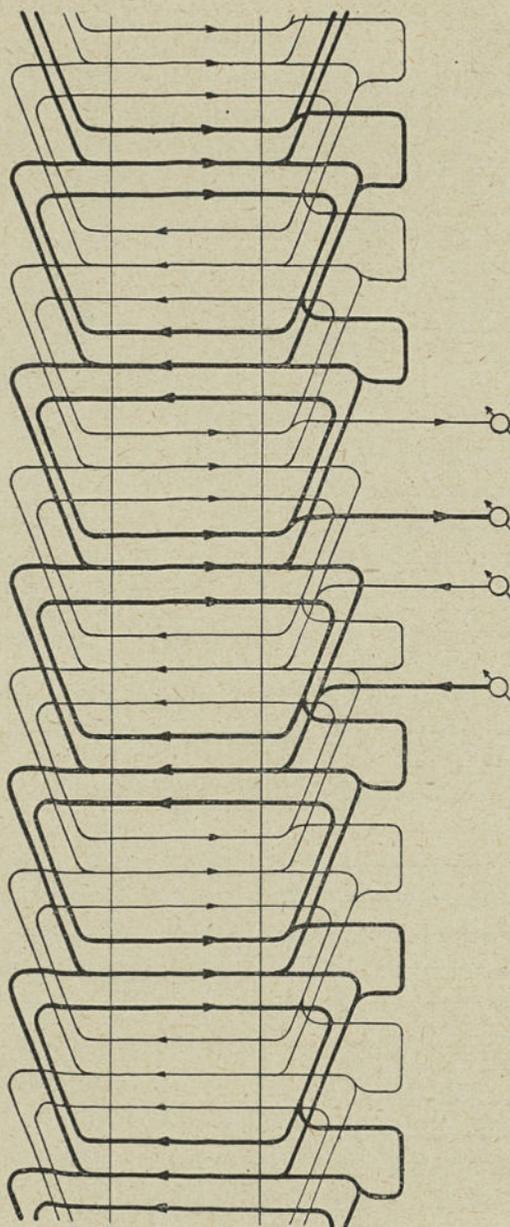


Fig. 134. — Enroulement biphasé sur gabarit. 6 pôles, 36 encoches.

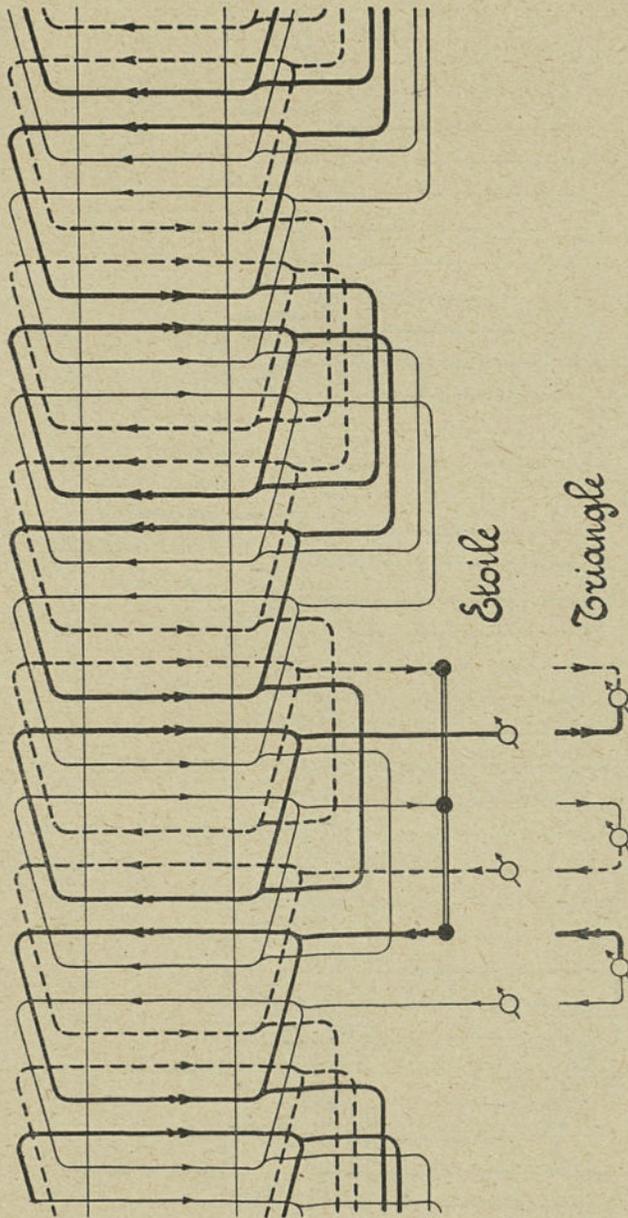


Fig. 135. — Enroulement triphasé sur gabarit, 6 pôles, 36 encoches.

Les enroulements en barres se font ordinairement de façon à loger un, deux, quatre ou six conducteurs par encoche. Si ces dernières sont ouvertes on peut comme dans le

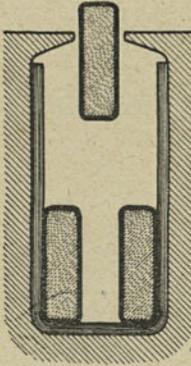


Fig. 136.

courant continu confectionner les éléments sur gabarit et les loger ensuite dans les entailles. Quand une encoche est demi-fermée et qu'elle comporte plus de deux barres, on fait la fente de la largeur suffisante pour laisser passer une barre ce qui permet un montage facile comme le montre la figure 136, en passant les barres les unes à la suite des autres.

Les bornes des stators triphasés comprennent généralement 6 entrées ou sorties correspondantes aux trois phases, que l'on relie en triangle ou en étoile suivant le cas.

Exemple. — Moteur de x chevaux 110/190 volts ; ce moteur relié en triangle fonctionnera sous 110 volts, tandis que couplé en étoile son courant d'alimentation sera de $110 \times \sqrt{3} = 190$ volts. Voir chapitre vi.

Pour tous les schémas triphasés on se reportera aux figures 135 et 137 en ce qui concerne le mode de couplage : triangle en étoile et planche à bornes.

Dans tous les enroulements statoriques, génératrices et moteurs, il est absolument nécessaire d'avoir le même nombre de conducteurs par phase. Pour les enroulements rotoriques des moteurs asynchrones on peut répartir inégalement le nombre de conducteurs par phase. On obtient un nombre de barres qui n'est pas un multiple du nombre de phases lorsqu'on emploie pour les rotors un nombre d'encoches qui n'est pas divisible par $2p$. Cette façon de faire n'est pas à recommander et on peut toujours enlever au nombre total de barres une certaine quantité pour obtenir le nombre de conducteurs divisible par le nombre de phases, par exemple 120 barres et 61 encoches (1 encoche vide).

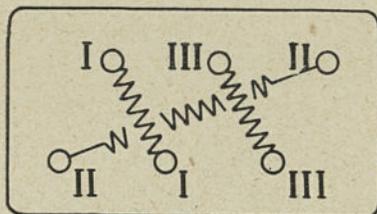
Ici il y a à considérer pour le tracé du schéma non plus le

nombre d'encoches, mais le nombre de barres par pôle et par phase. Ce nombre est ce qu'on appelle la *caractéristique du bobinage*.

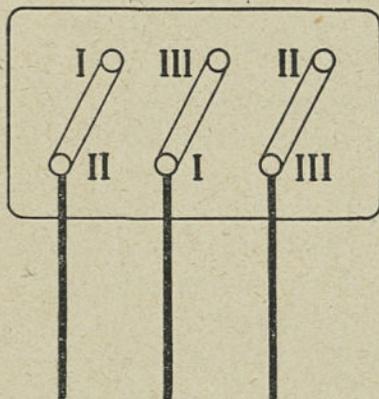
$$\text{Caractéristique} = \frac{N}{2p \times m} \quad \text{ou} \quad N = N^b \text{ total de barres.}$$

La caractéristique peut être un nombre entier pair ou impair, ou un nombre fractionnaire.

Planche à Bornes



Triangle



Étoile

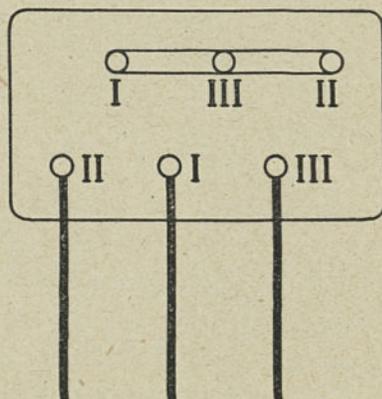


Fig. 137. — Planche à bornes. Triangle, Étoile.

Lorsque cette caractéristique n'est pas divisible par le nombre de barres par encoche, il y a dans une même entaille des conducteurs de phases différentes, il est alors nécessaire de prévoir un isolement convenable entre fils.

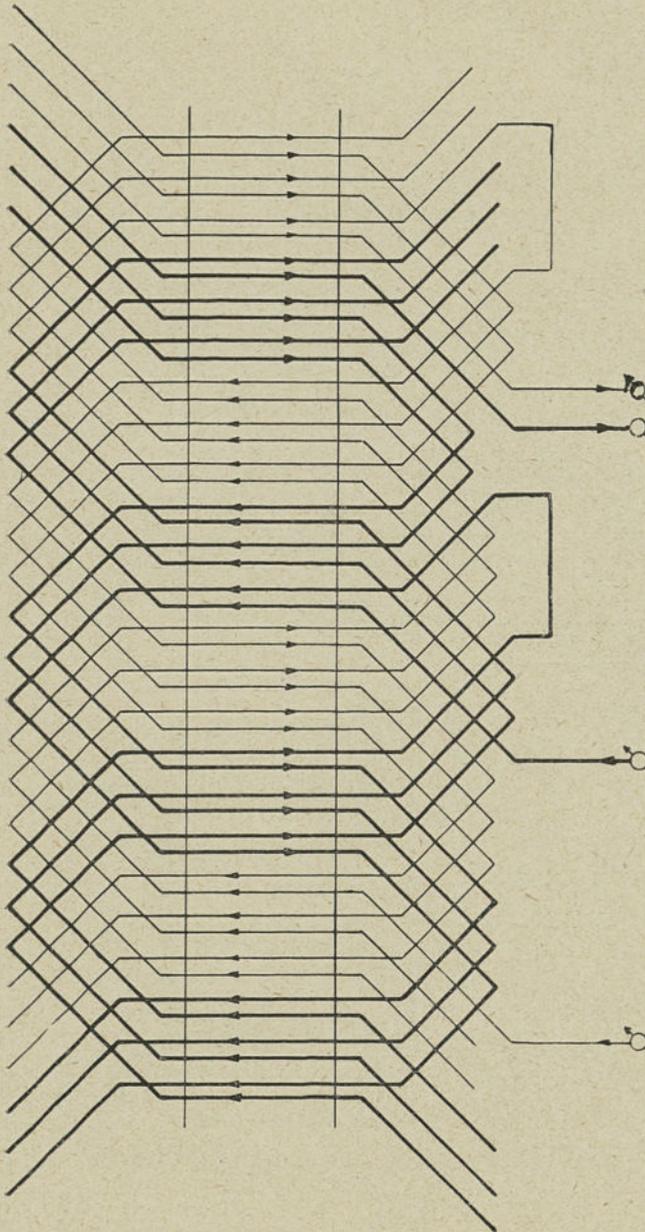


Fig. 138. — Bobinage biphasé. Enroulement ondulé rétrograde.

4 pôles, 24 encoches, 48 barres, caractéristique $\frac{48}{4 \times 2} = 6$.

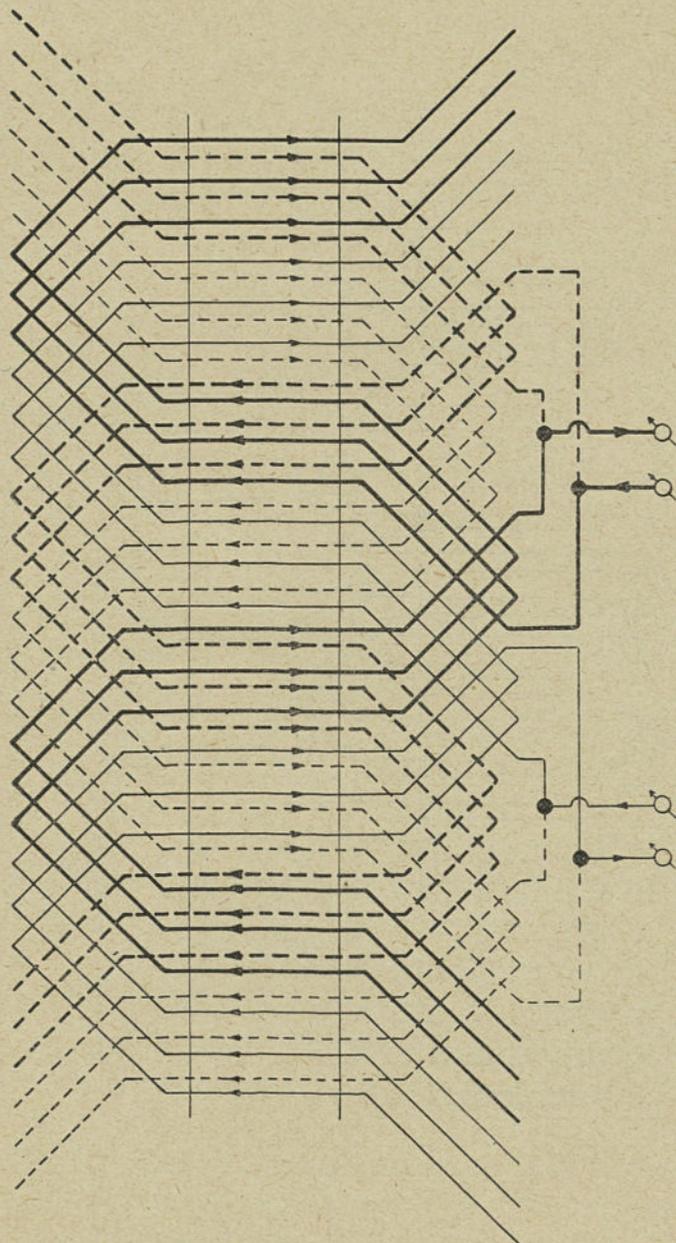


Fig. 139. — Bobinage biphasé. Enroulement ondulé.
4 pôles, 24 encoches, 48 barres, 2 bobinages en 11 par phase.

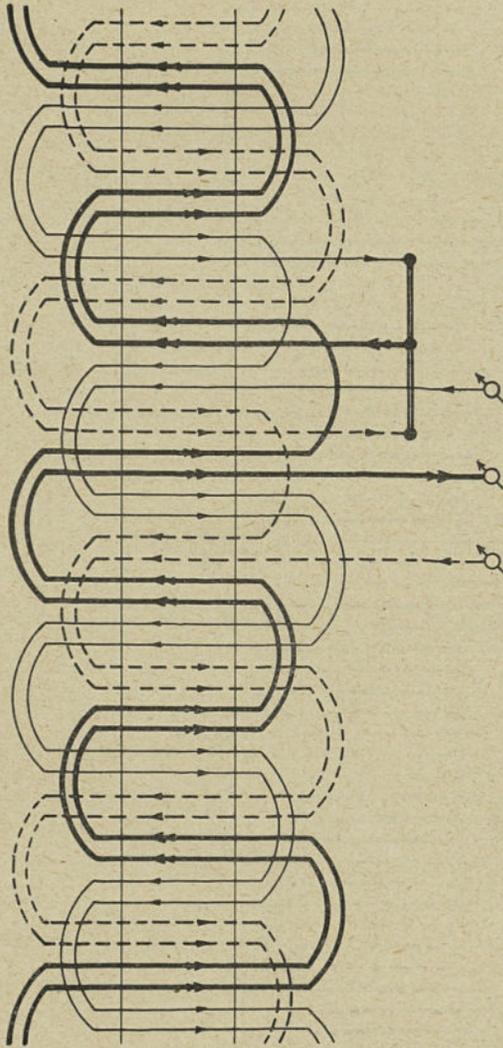


Fig. 140. — Bobinage triphasé. Enroulement ondulé progressif.
 8 pôles, 48 encoches, 48 barres, caractéristique $\frac{48}{8 \times 3} = 2$.

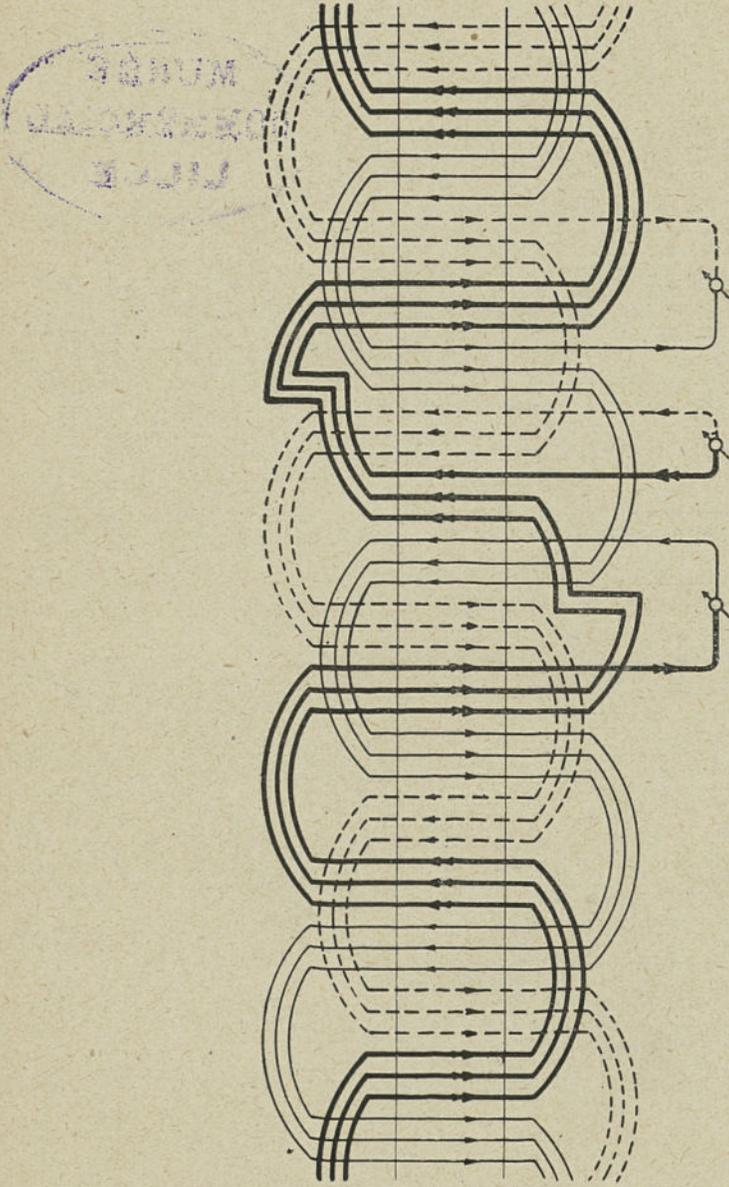


Fig. 141. — Bobinage triphasé. Enroulement ondulé progressif.

6 pôles, 54 barres, 54 encoches, caractéristique $\frac{54}{6 \times 3} = 3$.

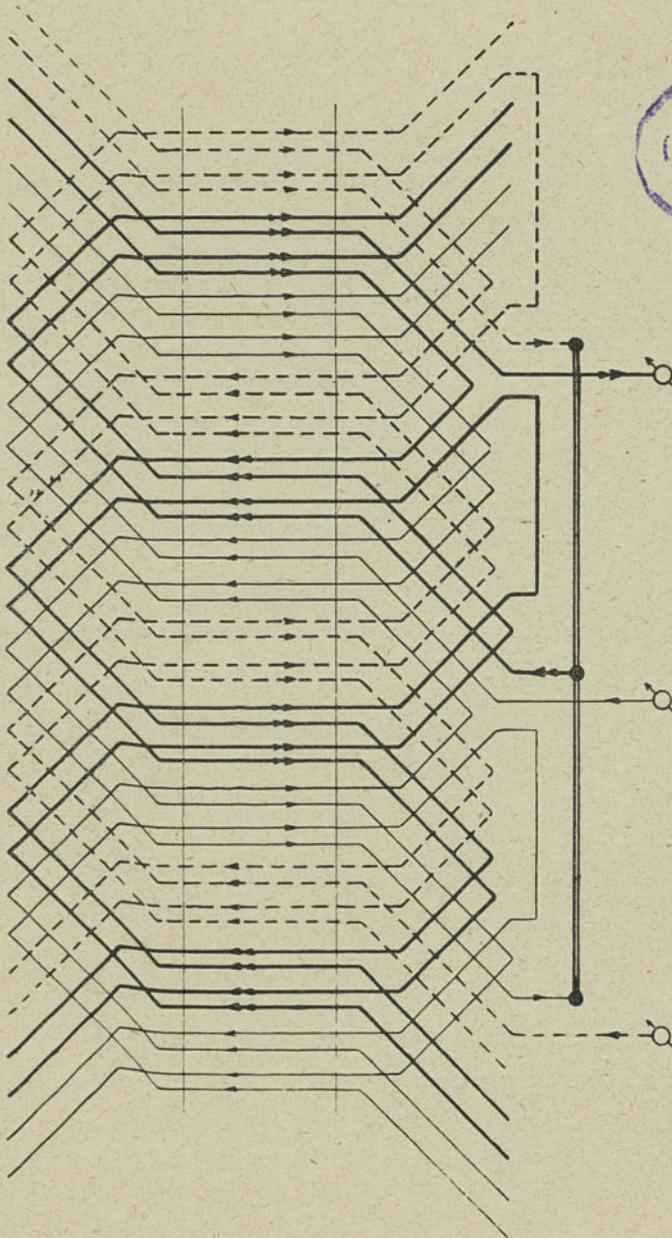


Fig. 142. — Bobinage triphasé. Enroulement onduilé rétrograde.

4 pôles, 24 encoches, 48 barres, caractéristique $\frac{48}{4 \times 3} = 4$.

Connexions et sorties du même côté.

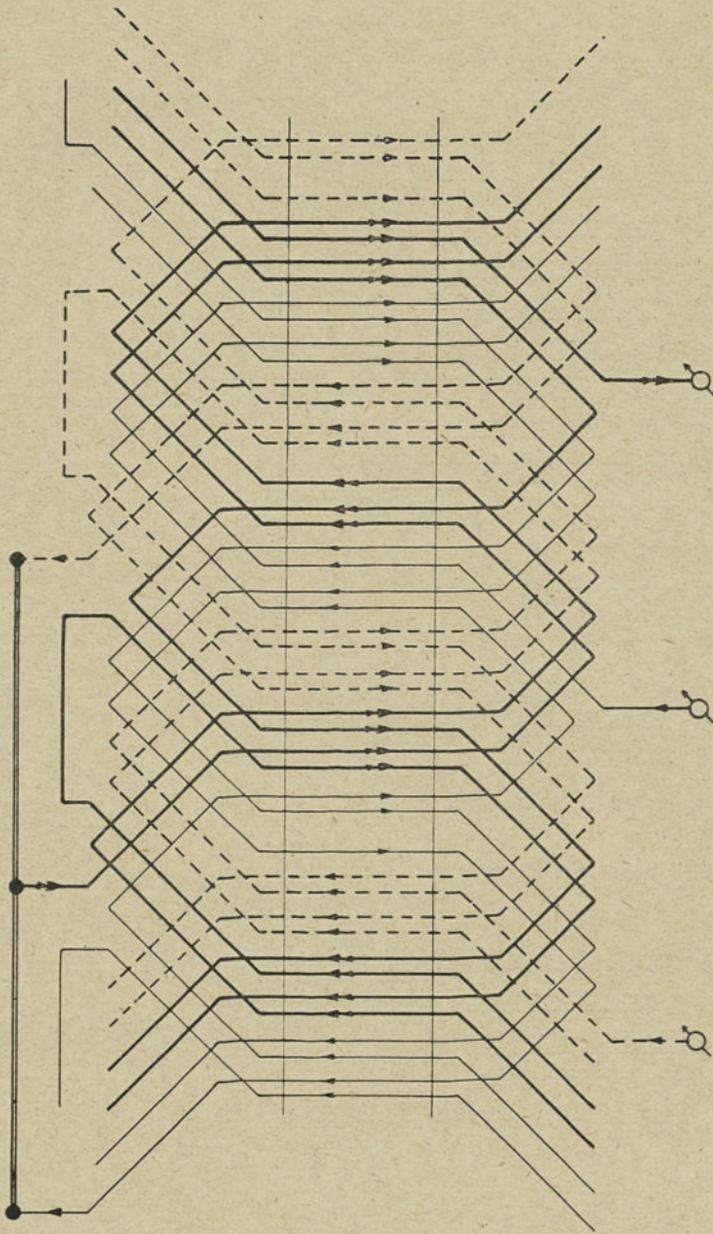


Fig. 143. — Bobinage triphasé. Enroulement ondulé rétrograde.
4 pôles, 24 encoches, 45 barres.

Il a été supprimé une barre par phase pour avoir les connexions du côté opposé aux entrées ou sorties de câbles.

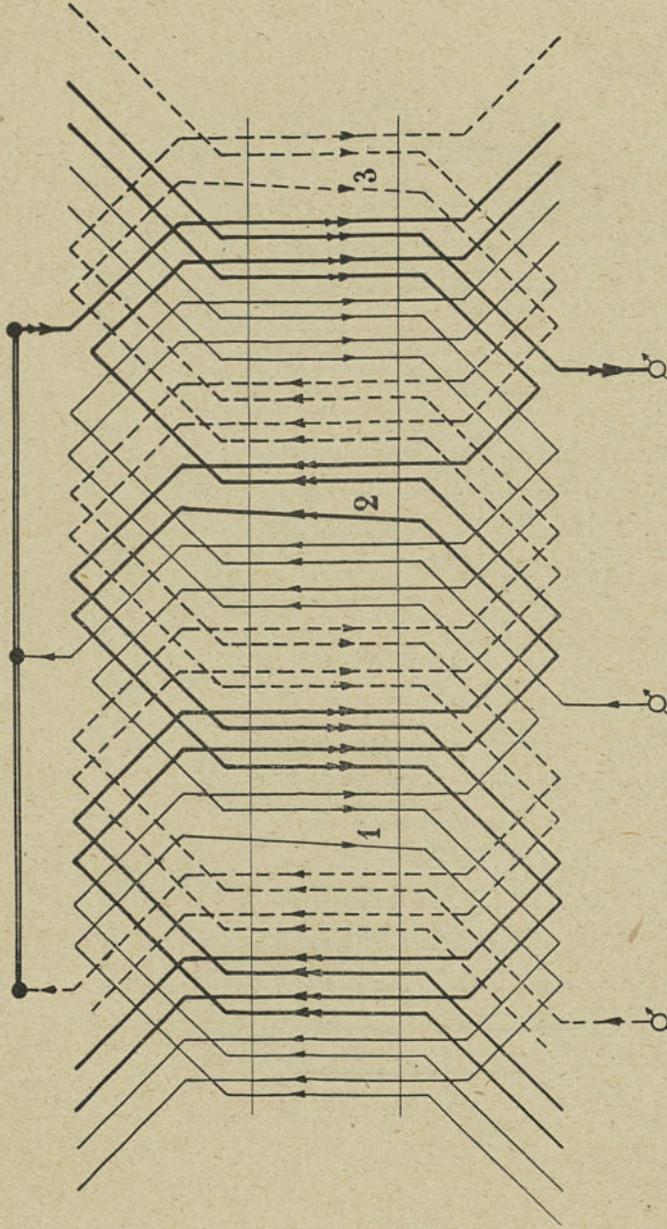


Fig. 144. — *Bobinage triphasé. Enroulement ondulé rétrograde.*
4 pôles, 24 encoches, 45 barres.

1, 2 et 3, barres dites de *renversement* destinées à remplacer les connexions de retour. Ces barres occupent une position oblique par rapport à l'axe de l'arbre, d'un côté en haut de l'encoche. Elles sont maintenues dans cette position par des cales en bois.

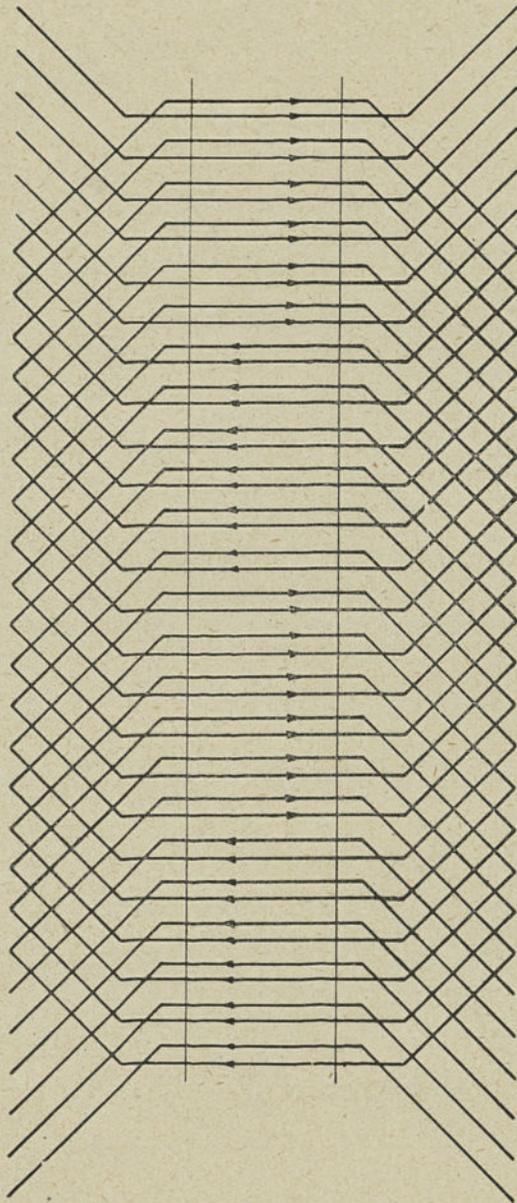


Fig. 145. — Rotor en court-circuit. Enroulement imbriqué.
4 pôles, 24 encoches, 48 barres, 24 spires indépendantes fermées sur elles-mêmes.

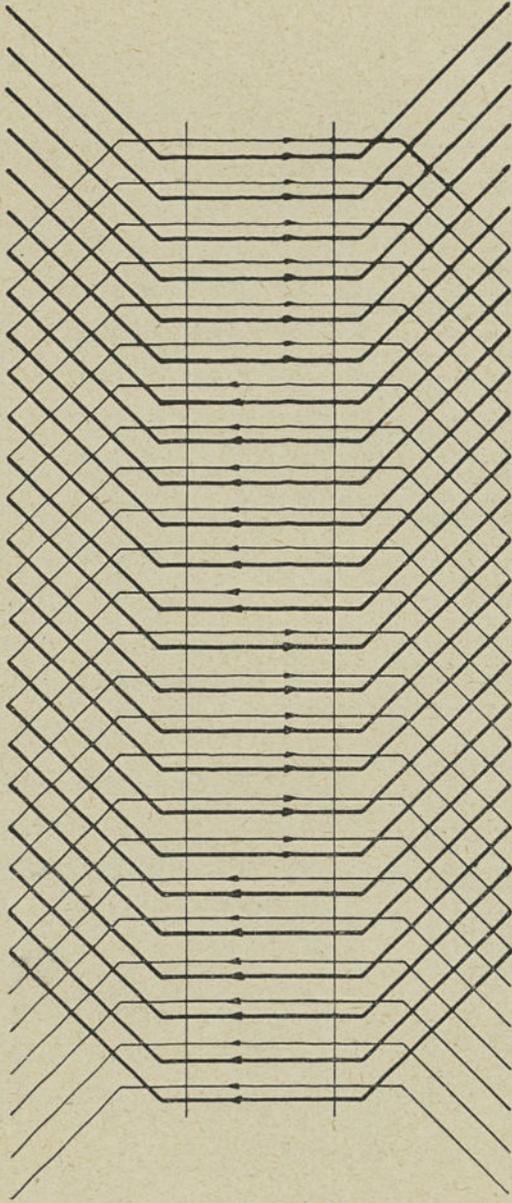


Fig. 146. — Rotor en court-circuit. Enroulement imbriqué (même schéma que fig. 145).
Moitié cuivre, moitié laiton.

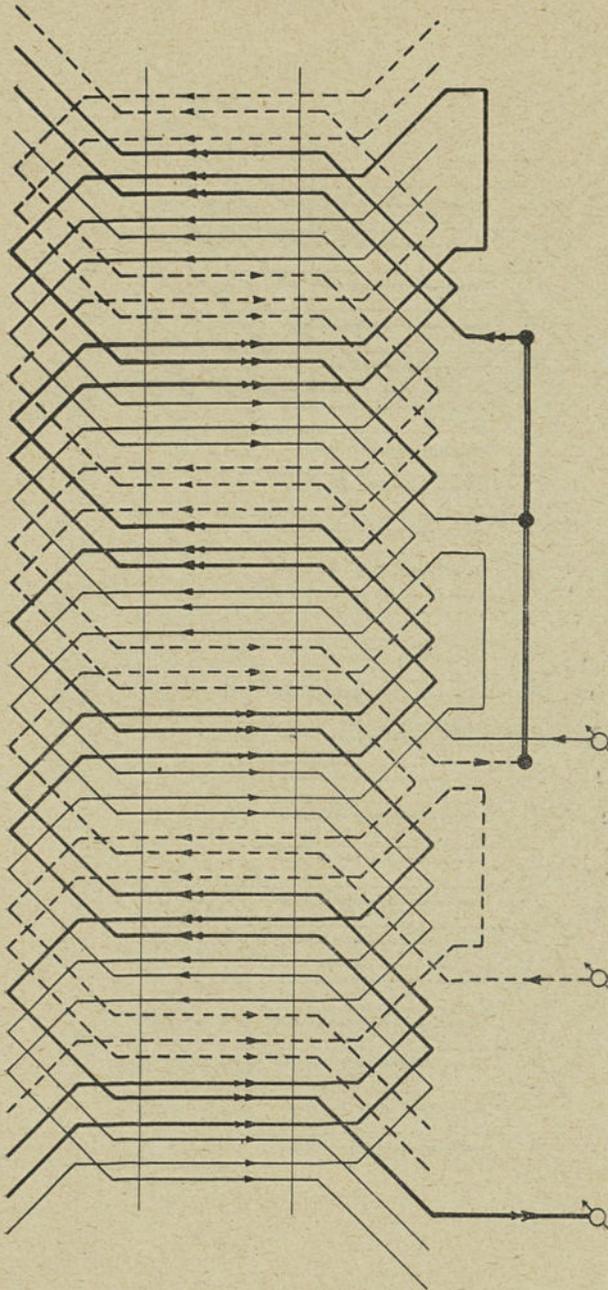


Fig. 147. — Bobinage triphasé. Enroulement ondulé rétrograde.
 6 pôles, 27 encoches, 54 barres, caractéristique $\frac{54}{3 \times 6} = 3$.

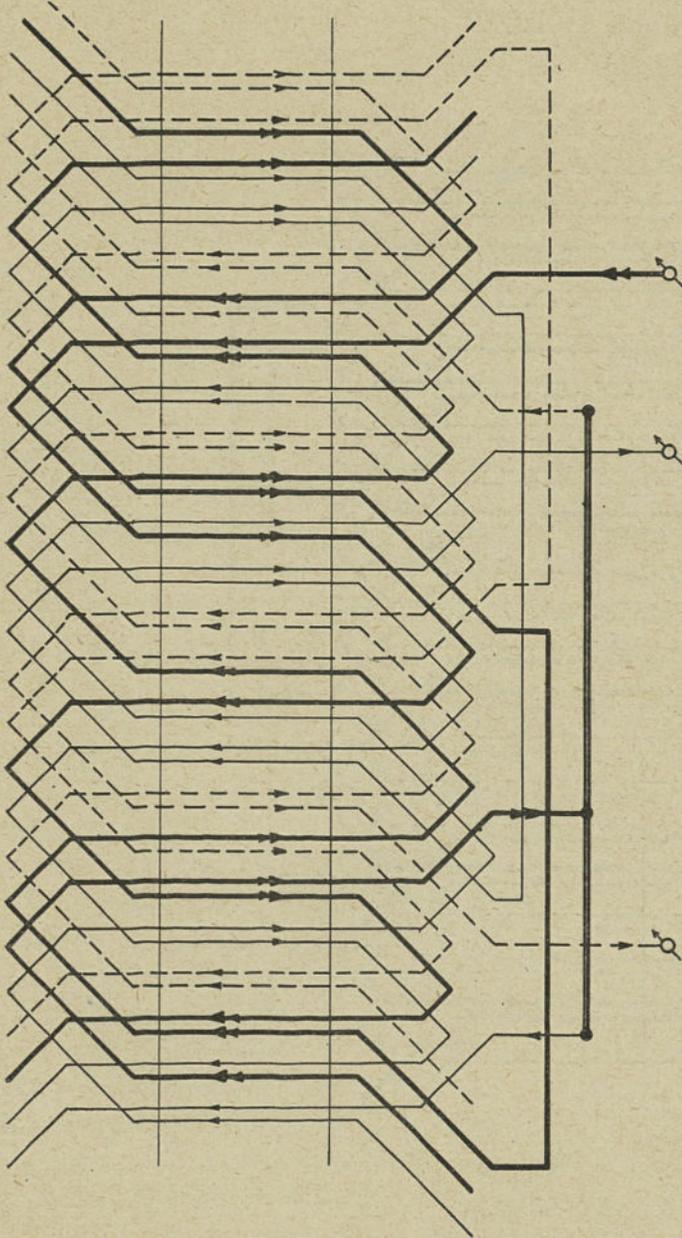


Fig. 148. — Schéma de bobinage triphasé.
 6 pôles, 48 barres, caractéristique $\frac{48}{6} \times 3 = 2^2/3$.

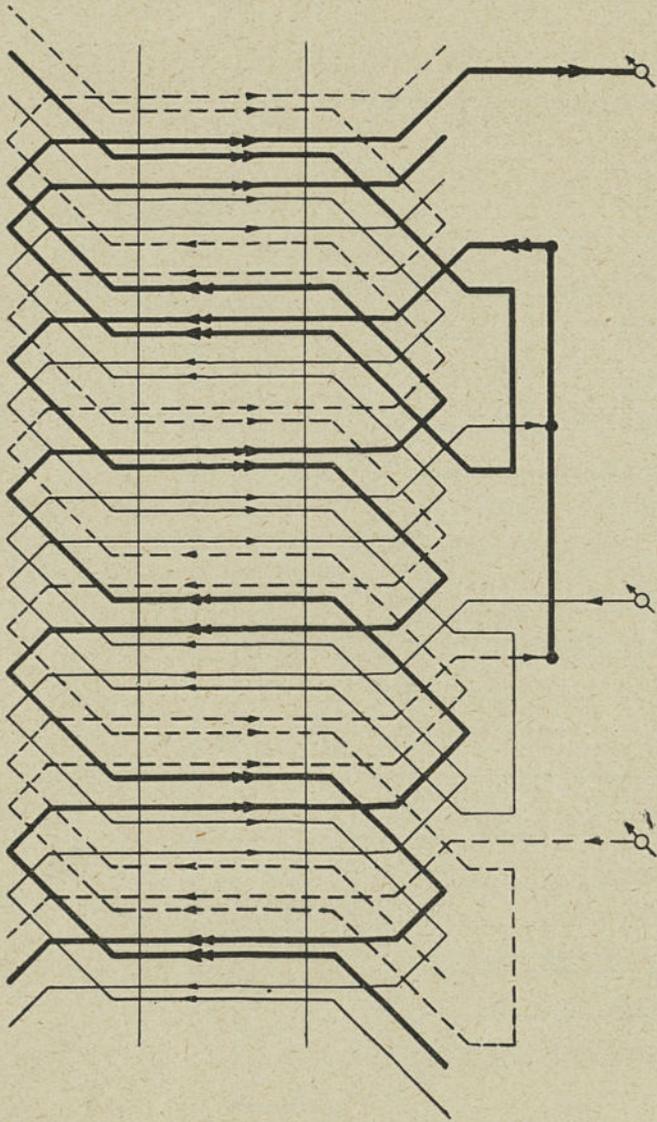


Fig. 149. — Schéma de bobinage triphasé.

6 pôles, 42 barres, caractéristique $\frac{42}{6 \times 3} = 2 \frac{1}{3}$.

Les connexions entre conducteurs actifs pour stators et rotors se font, en manteau comme dans les machines à courant continu ou par des fourches en développante de cercle.

44. **Bobinage des stators.** — Dans un bobinage sur gabarit (*fig.* 133), le nombre de bobines est égal à la moitié du nombre d'encoches et les bobines d'une même phase peuvent être reliées en série ou en parallèle. Ce genre d'enroulement est avantageux au double point de vue du poids de cuivre et de la main-d'œuvre. Les bobines, ayant toutes la même position par rapport au fer, ont toutes le même coefficient de self-induction et un coefficient de fuites moindre, ce qui a pour effet d'améliorer sensiblement le cosinus φ . Malgré ces avantages, il existè encore des partisans de l'ancien bobinage à la main, qui reprochent notamment au bobinage sur gabarit par sa confection de former un amas de fils qui se prête mal au bon refroidissement. L'obtention d'un meilleur cosinus φ diminue le courant absorbé, mais les pertes variant comme le carré de ce courant, on voit combien cet argument a peu de valeur. Aussi le bobinage sur gabarit pour les moteurs asynchrones mono ou polyphasés est-il employé de plus en plus, la plupart des grandes firmes l'ont adopté.

La figure 150 représente la section droite d'un bobinage statorique de moteur triphasé de 7 chevaux à 1430 tours, 50 périodes, dont les dimensions de fer sont les suivantes :

Diamètre extérieur = 272 millimètres.

Diamètre du rotor = 180 millimètres.

Largeur du fer = 115 millimètres.

Hauteur des encoches = 22 millimètres.

Largeur moyenne des encoches = 10^{mm},5.

36 encoches au stator.

Bobiné suivant le schéma de la figure 132, la longueur moyenne d'une spire était de 76^{cm},5.

La figure 151 représente l'encombrement pris par le bobinage sur gabarit pour le même moteur, la longueur moyenne d'une spire est réduite à 71 centimètres (schéma de la *fig.* 133).

Désignons par S_1 la section d'une encoche, isolant non compris

(*fig.* 153); ν le nombre de bobines chevauchant côte à côte (*fig.* 152); S, la section droite limitée par la courbe enveloppe des ν bobines (*fig.* 151):

on a
$$S = 2\nu s_1.$$

L'embrassement moyen de la bobine triple (*fig.* 132) est le même que l'embrassement d'une bobine (*fig.* 133), il est égal à 9 dents.

Si l'on appelle λ la longueur moyenne développée au milieu des encoches (*fig.* 154), on peut écrire :

Longueur moyenne développée d'une spire $l_m = (L + \lambda) \times k_1.$

k_1 = coefficient variable avec le genre de bobinage employé.

Dans le cas cité ci-dessus on a pour le bobinage à la main

$$k_1 \text{ (1)} = 2,8$$

$$l_m = (115 + 158) \times 2,8 = 765 \text{ millimètres.}$$

Pour les bobinages sur gabarit $k_1 = 2,6$

$$l_m = (115 + 158) \times 2,6 = 710 \text{ millimètres.}$$

La forme qui a servi à confectionner les bobines de cet enroulement est représentée sur la figure 155.

Il est évident que cette forme peut être avantageusement remplacée par l'appareil à bobiner de la figure 76.

45. Bobinage en barres. Connexions en développante. —

Lorsque le bobinage du stator est constitué par des barres, il peut être exécuté de différentes manières.

Quand on a 2, 4 ou 6 barres par encoche, l'enroulement en manteau est tout indiqué, il offre les mêmes avantages que dans les machines à courant continu.

Si comme dans le schéma de la figure 141 il y a une seule barre par encoche, les connexions entre fils actifs peuvent avoir la forme représentée par la figure 156.

1. k_1 est souvent égal à 3 sur les machines bobinées à la main, 2,8 est le coefficient donné par le tracé.

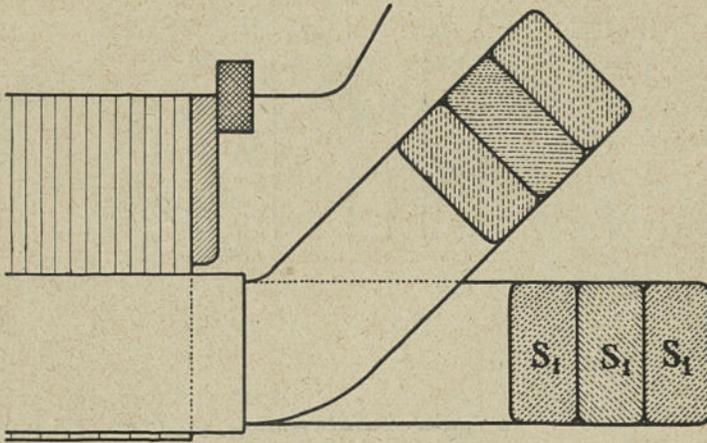


Fig. 150.

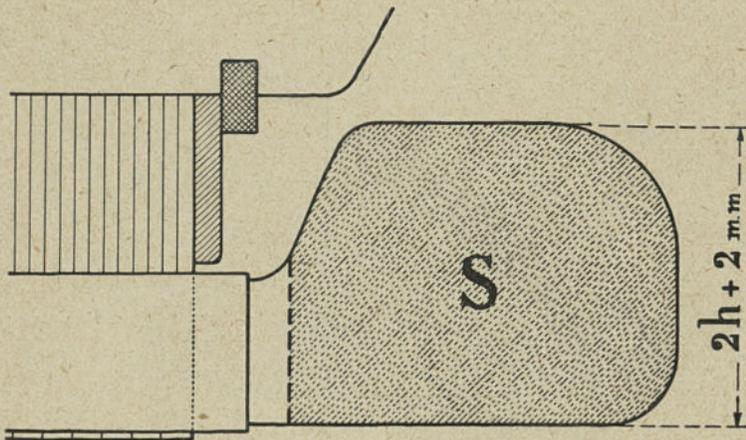


Fig. 151.

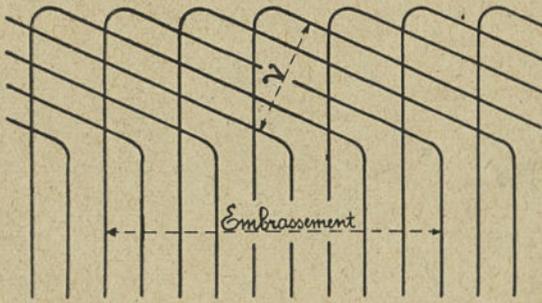


Fig. 152.

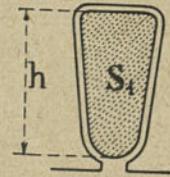


Fig. 153.

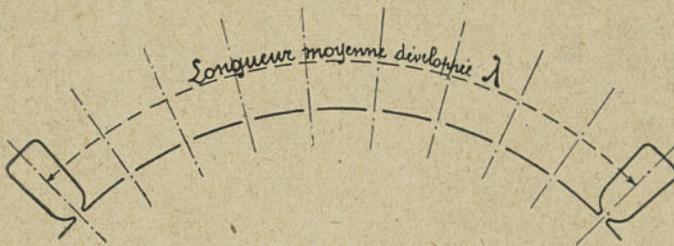


Fig. 154.

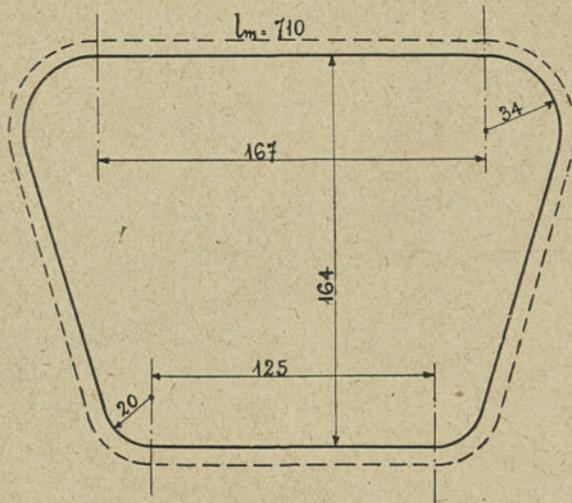


Fig. 155.

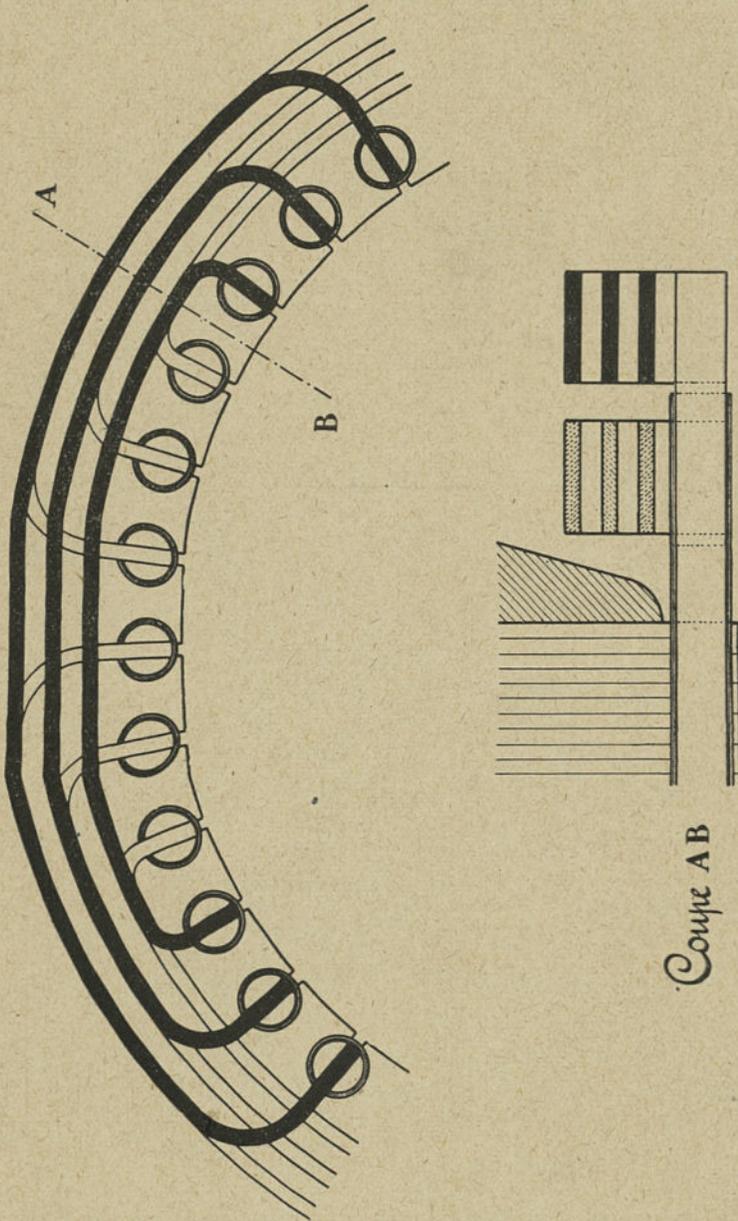


Fig. 156.

L'enroulement en développante permet d'avoir dans chaque encoche un ou deux conducteurs. Dans ce dernier cas, on a, comme pour le bobinage en manteau, l'un des côtés de la bobine occupant le fond de l'encoche, tandis que l'autre occupe l'entrée.

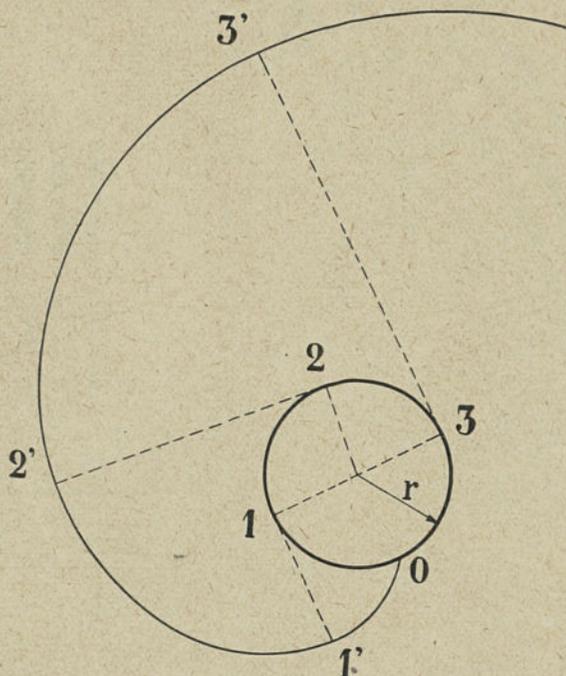


Fig. 157. — Développante de cercle (1).

Les connexions appelées fourches en développante ou simplement fourches sont pliées sur gabarit et soudées aux barres.

La condition est que toutes les connexions puissent être logées en occupant toute la face latérale des tôles, avec entre elles un faible jeu. Cette condition est remplie si la connexion est incurvée selon une développante de cercle de base r .

1. On appelle développante de cercle le lieu des points décrits par l'extrémité d'un fil inextensible enroulé sur une circonférence de rayon r et développé. La normale en un point quelconque est la tangente menée de ce point au cercle générateur. Cette normale a pour longueur, la longueur développée de la portion de circonférence comprise entre l'origine O et le point de tangence.

Si l'épaisseur d'une fourche isolée, augmentée du jeu que l'on admet, est appelée e , on a :

$$m \times \frac{N_1^{(1)}}{2} \times e = 2\pi r$$

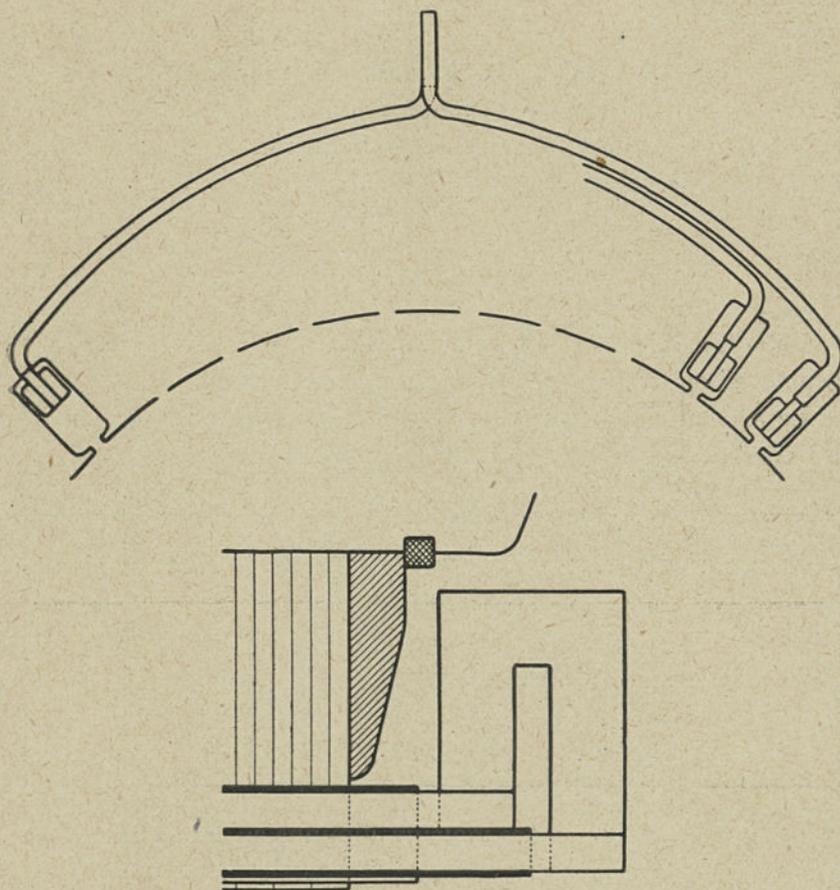


Fig. 158.

d'où le rayon du cercle générateur est égal à

$$r = \frac{m \times N_1 \times e}{4\pi}$$

1. Une fourche reliant 2 fils par 2 branches se trouvant sur 2 plans différents. Le nombre de branches se trouvant sur le même plan sera égal à $\frac{N}{2}$.

Remarquons que pour un alternateur monophasé dont le bobinage occupe les $\frac{2}{3}$ des encoches, on aurait :

$$r = \frac{1,5 \times N_1 \times e}{4\pi}$$

46. Nombre de tours par minute des machines à courant alternatif. — Le nombre de tours par minute des génératrices à courant alternatif est fonction de la fréquence f du courant et du nombre de paires de pôles p de la machine

$$n = \frac{60 \times f}{p}$$

Cette formule est générale quelle que soit la nature du courant (mono, bi ou triphasé) et le voltage d'alimentation.

Le tableau ci-dessous donne ces vitesses, qui sont également les vitesses de synchronisme des moteurs asynchrones.

NOMBRE DE PÉRIODES.	2 POLES	4 POLES	6 POLES	8 POLES	10 POLES	12 POLES
53	3 180	1 590	1 060	795	636	530
50	3 000	1 500	1 000	750	600	500
42	2 520	1 260	840	630	504	420
25	1 500	750	500	375	300	250
16,6	1 000	500	333	250	200	166

Le nombre de tours des moteurs diminue au fur et à mesure que la charge augmente.

Si n_c est cette vitesse, on appelle *glissement* le rapport :

$$\text{Glissement} = \frac{n - n_c}{n} \quad \text{en pour 100} = \frac{n - n_c}{n} \times 100.$$

Le glissement est d'autant plus élevé que la résistance du rotor est plus grande.

47. Nombre d'encoches par pôle et par phase pour machines à courant alternatif.
Génératrices et moteurs.

NOMBRE D'ENCOCHES du stator.	MONOPHASE						BIPHASE						TRIPHASE					
	2 POLES	4 POLES	6 POLES	8 POLES	10 POLES	12 POLES	2 POLES	4 POLES	6 POLES	8 POLES	10 POLES	12 POLES	2 POLES	4 POLES	6 POLES	8 POLES	10 POLES	12 POLES
24	8	4	»	2	»	»	6	3	2	»	»	»	4	2	»	»	»	»
36	12	6	4	»	»	2	9	4,5	3	»	»	»	6	3	2	»	»	»
48	»	8	»	4	»	»	12	6	4	3	2	»	8	4	»	2	»	»
54	»	»	6	»	»	»	»	»	4,5	»	»	»	9	»	3	»	»	»
60	»	10	»	»	4	»	»	»	5	»	»	»	10	»	»	2	»	»
72	»	12	8	6	»	4	»	9	6	4,5	3	»	12	6	4	3	»	2
90	»	»	10	»	6	»	»	»	»	4,5	»	»	»	»	5	»	3	»
96	»	»	»	8	»	»	»	12	8	6	4	»	»	8	»	4	»	»
108	»	»	12	»	»	6	»	»	9	»	4,5	»	»	»	6	»	3	»
120	»	»	»	10	8	»	»	»	10	»	5	»	»	10	»	4	»	»
144	»	»	»	12	»	8	»	»	12	9	6	»	»	12	8	6	»	4

CHAPITRE V

TRANSFORMATEURS

48. **Transformateurs.** — Les transformateurs sont constitués simplement de noyaux de fer, sur lesquels sont disposées des bobines dites primaires et secondaires.

Les pertes dans le fer ont pour effet de modifier la valeur du courant primaire sans changer le rapport des forces électromotrices instantanées, quelle que soit la forme de la valeur périodique de cette force électromotrice. Les forces électromotrices primaires et secondaires ont la même forme et sont proportionnelles aux nombres de spires des deux enroulements.

Toutes les spires étant au même instant embrassées par le même Φ , nous n'avons donc pas à faire intervenir de coefficient de bobinage, ni à nous occuper de la forme de la courbe du champ et la formule :

$$E_{\text{eff}} = 2,22 \times f \times \Phi \times N_1 \times 10^{-8} \text{ volts}$$

est directement applicable.

Pour $w_1 = \frac{N_1}{2}$ on a

$$E_{\text{eff}} = 2,22 \times 2 \times f \times \Phi \times w_1 \times 10^{-8} \text{ volts.}$$

Nous avons déjà vu que la forme circulaire est celle qui donne la moindre dépense de cuivre, avec une main-d'œuvre plus facile pour la confection des bobines, mais la superposition des tôles ne permet d'atteindre la forme circulaire que d'une façon approchée ; forme de croix de Saint-André plus ou moins compliquée (*fig. 159*).

On donne aussi aux noyaux de transformateurs des sections carrées ou rectangulaires. Pour diminuer les fuites, on répartit les enroulements primaire et secondaire également entre les noyaux. Sur chacun des montants les bobinages peuvent être disposés de deux façons différentes; dans l'une on alterne les bobines haute et basse tension (*fig. 160*), dans l'autre on adopte le montage de la figure 161 où les deux enroulements sont concentriques. Dans ce dernier cas, il faut réduire au minimum le jeu entre les deux enroulements, c'est le plus facile à exécuter. Il suffit en effet de monter les enroulements sur des tubes en matière isolante rigide et d'épaisseur suffisante pour n'avoir pas à redouter des courts-circuits entre le primaire et le secondaire ou entre eux et la masse.



Fig. 159.

Les avaries étant plus fréquentes sur la HT que sur la BT, il est recommandé de mettre la bobine, basse tension, à l'intérieur.

Dans la disposition alternée, la difficulté principale est d'assurer l'isolement des connexions entre bobines de même enroulement qui passe près des autres bobines.

Les bobines haute tension des transformateurs de petite et de moyenne puissance se font avec du fil relativement fin, dont l'isolement est composé de 2 guipages de coton. Il est bon de s'en tenir à 100 volts de différence de potentiel entre deux couches superposées d'une même bobine. Dans les transformateurs dans l'huile on va jusqu'à 150 volts.

On est donc obligé de composer l'enroulement HT d'un certain nombre de bobines. Il est prudent de ne pas dépasser 1500 volts entre l'entrée et la sortie d'une même bobine.

Les connexions d'une bobine à l'autre doivent se faire entre fils de la couche inférieure ou de la couche supérieure, de manière que ces connexions ne puissent venir en contact avec des conducteurs ayant avec elles une grande différence de potentiel. On arrive à ce résultat en constituant chaque bobine en deux

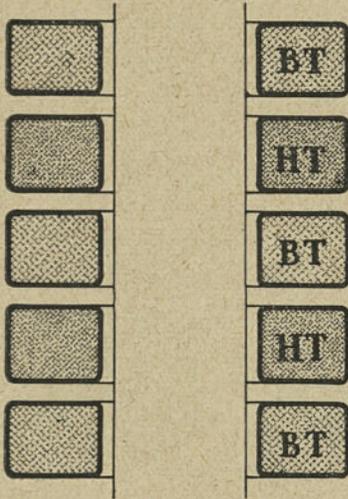


Fig. 160.

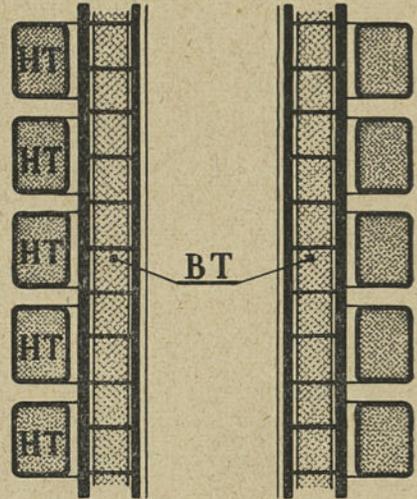


Fig. 161.

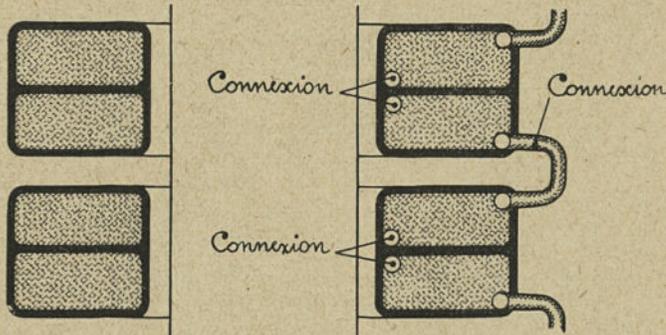


Fig. 162.

parties; dans ce cas, on commence à enrouler le fil par son milieu (fig 162). On isole les couches les unes des autres en interposant entre elles une feuille de papier ou de toile huilée.

Pour les très hautes tensions on fait des bobines avec joues. Il faut prévoir entre les bobines extrêmes et les bouts du tube isolant sur lequel est placé l'enroulement, un espace d'autant plus grand que le voltage entre les bornes est plus élevé. Cet espace ne sera jamais inférieur à 1 centimètre.

Avec les fortes intensités auxquelles on arrive quelquefois dans les enroulements BT, on est amené à adopter des conducteurs massifs dans lesquels il se développe des courants de Foucault donnant lieu à des pertes relativement élevées. On y remédie en employant un bobinage formé de plusieurs bobines reliées en parallèle; mais il est assez difficile de confectionner des bobines exactement semblables. On peut constituer l'enroulement avec plusieurs fils en parallèle, ce qui demande un grand soin pour la même raison que ci-dessus. On supprimera tous ces inconvénients en employant un câble formé de plusieurs fils toronnés et laminé ensuite pour lui donner une section carrée ou rectangulaire. Dans ce cas la résistance se trouve très légèrement augmentée du fait de l'allongement du fil résultant de la torsion de ce dernier. En plus le câble ne présente guère, comme section utile, que 70 à 75 pour 100 de la place qu'il occupe.

Il faut remarquer également qu'en cas de court-circuit dans l'enroulement le nombre de spires actives du primaire diminue et le flux croît dans la proportion inverse. Les spires non court-circuitées tendant à embrasser le plus grand flux possible sont soumises à un effort de déformation assez grand qui tend à leur donner la forme circulaire. Il faudra donc fixer solidement les bobines dont les extrémités seront soudées et rivées de façon à avoir un joint d'une bonne conductibilité et d'une solidité mécanique parfaite.

Pour les courants biphasés, on emploie deux transformateurs à courant alternatif simple (*fig.* 170), un sur chaque circuit d'une puissance égale à la moitié de la puissance totale à fournir.

Dans les courants triphasés les enroulements sont disposés sur 3 noyaux parallèles disposés soit dans le même plan, soit aux sommets d'un triangle équilatéral et reliés magnétiquement par des traverses en tôles.

On peut également, et c'est une pratique très répandue en Amérique, employer trois transformateurs monophasés distincts d'une puissance trois fois plus faible. Cette solution n'est pas recommandable, car les trois transformateurs sont plus encombrants et plus coûteux qu'un transformateur unique.

On peut, pour les transformateurs triphasés à montants dans le même plan, employer les mêmes dimensions de tôles que pour les transformateurs monophasés, avec trois montants au lieu de deux (*fig. 163*). Dans les mêmes conditions d'isolement, le transformateur triphasé a une puissance égale à environ 1,5 fois celle du monophasé correspondant.

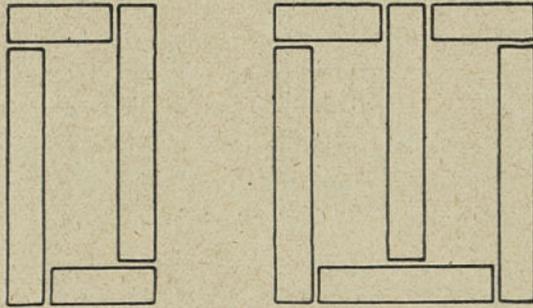


Fig. 163.

Cette méthode, qui nécessite seulement une traverse supplémentaire pour le triphasé, permet de se servir du même outillage pour la confection des bobines et des mêmes tubes isolants dans le cas d'enroulements concentriques.

Les schémas des figures 164 à 169 représentent divers montages pour transformateurs monophasés. Les montants étant sur une ligne verticale (*fig. 164, 166, 168*) ou sur une ligne horizontale (*fig. 165, 167, 169*).

Le schéma de la figure 170 montre un montage de deux transformateurs à courant alternatif simple pour courant biphasé.

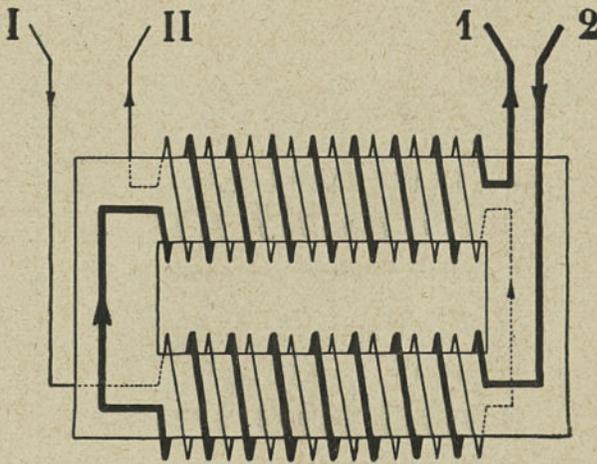
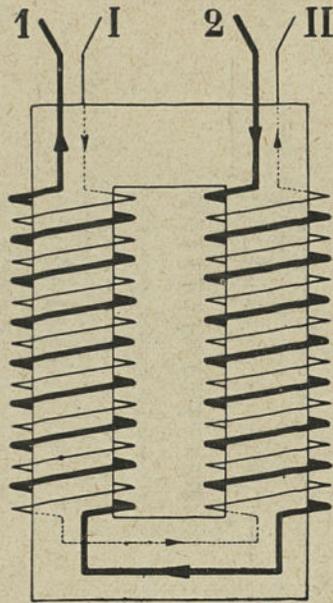


Fig. 164 et 165. — Transformateur monophasé.

HT. Les bobines en série, 2 Bornes I, II.

BT. Les bobines en série, 2 Bornes 1, 2.

Toutes les bobines sont enroulées dans le même sens.

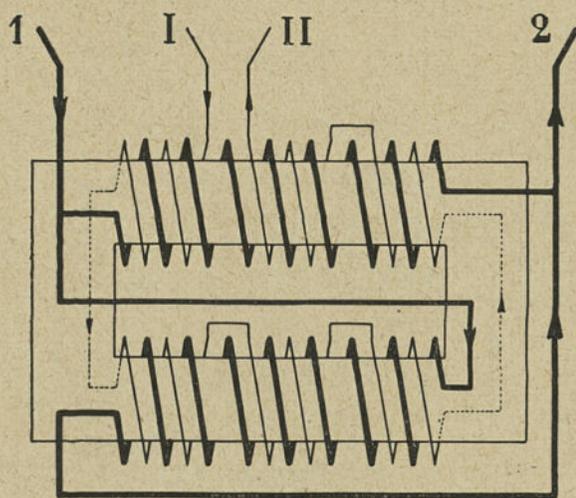
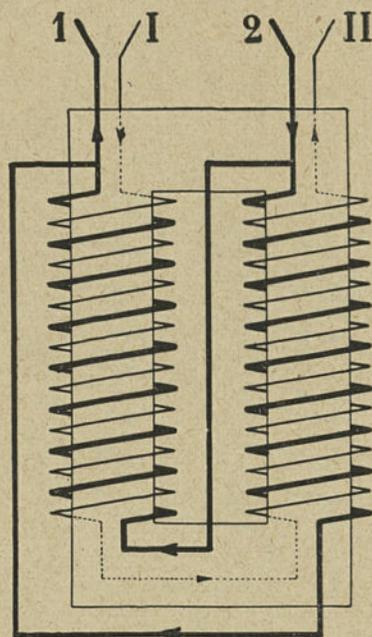


Fig. 166 et 167. — Transformateur monophasé.

HT. Les bobines en série, 2 Bornes I, II.

BT. Les 2 montants en 11, 2 Bornes 1, 2.

Toutes les bobines sont enroulées dans le même sens.

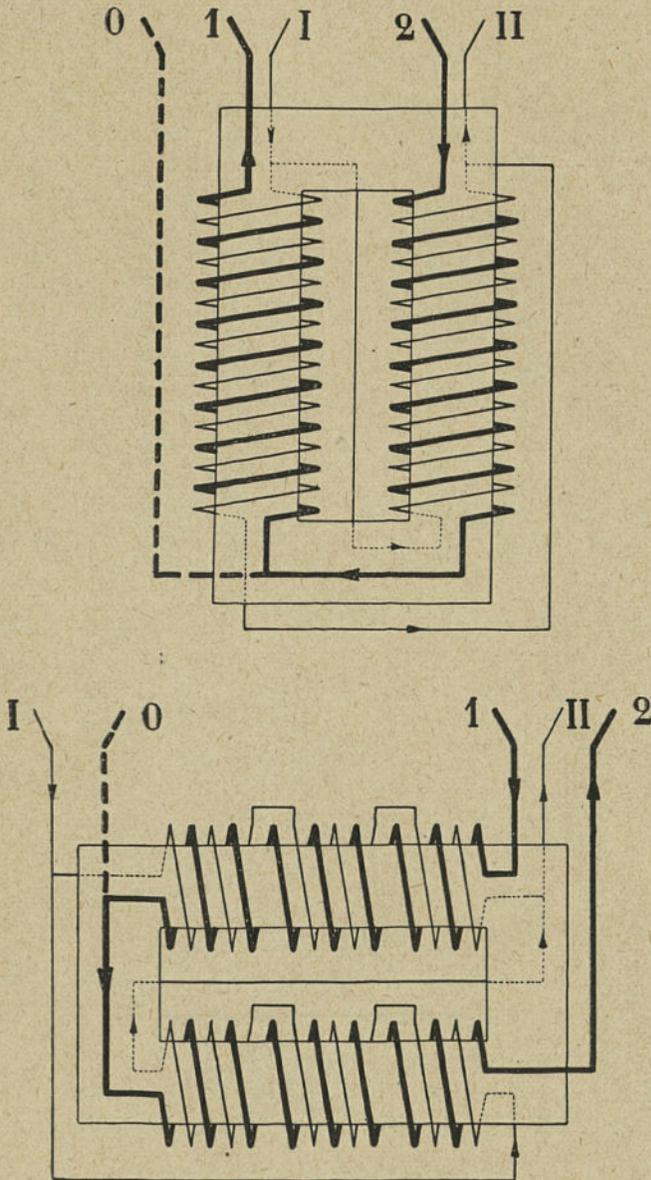


Fig. 168 et 169. — Transformateur monophasé.

HT. Les deux montants en 11, 2 Bornes I, II.

BT. Les bobines en série, 2 bornes 1, 2 ou 3 Bornes 0, 1, 2.

Toutes les bobines sont enroulées dans le même sens.

CLÉMENT. *Bobinages.*

13

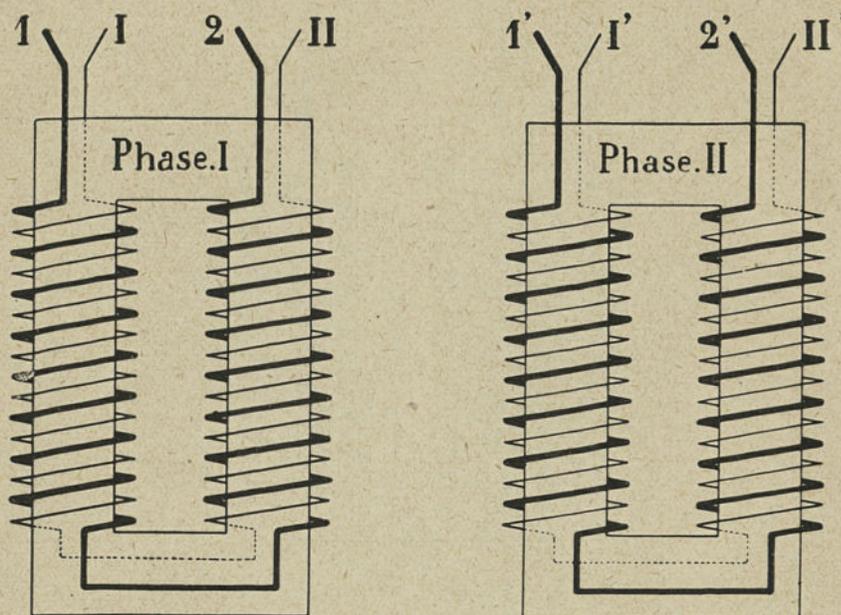


Fig. 170. — Transformateur biphasé.

HT.

Phase I, Bornes I, II.

Phase II, Bornes I', II'.

BT.

Phase I, Bornes 1, 2.

Phase II, Bornes 1', 2'.

Toutes les bobines sont enroulées dans le même sens.

Les couplages usuels pour transformateurs triphasés sont représentés sur les figures 171 à 173.

Dans l'enroulement en zig-zag (*fig. 174 et 175*) utilisé pour secondaire avec fil neutre (3 bornes pour un monophasé, 4 bornes pour un triphasé) chaque enroulement secondaire est réparti sur deux noyaux.

En général, les transformateurs triphasés ont le primaire connecté en étoile, ce qui diminue les difficultés d'isolement mais lorsque les phases sont inégalement chargées il peut y avoir avantage à relier le primaire en triangle (*fig. 173*).

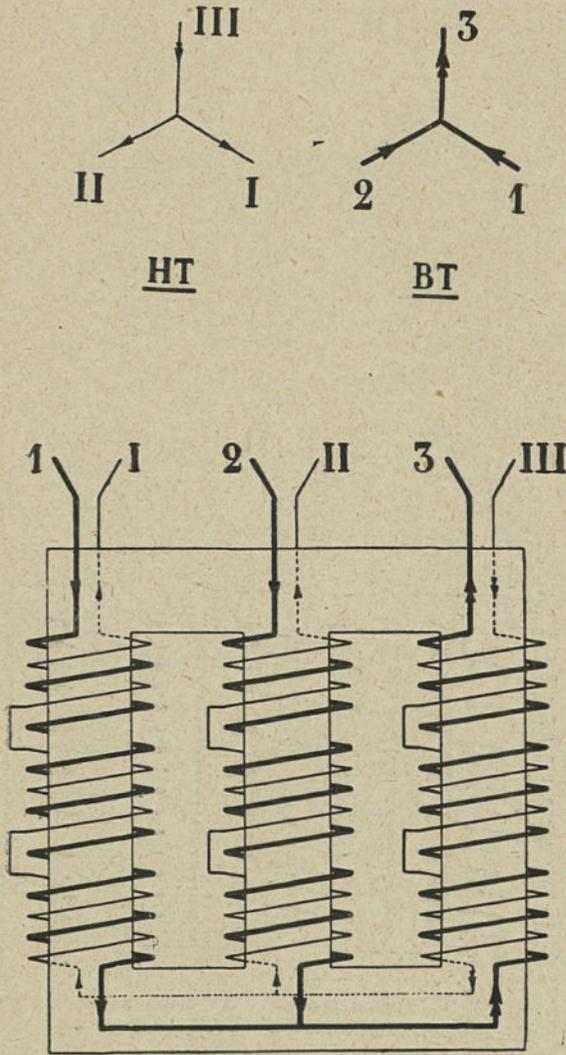


Fig. 171. — Transformateur triphasé.

HT. Étoile, 3 Bornes I, II, III.

BT. Étoile, 3 Bornes 1, 2, 3.

Toutes les bobines sont enroulées dans le même sens.

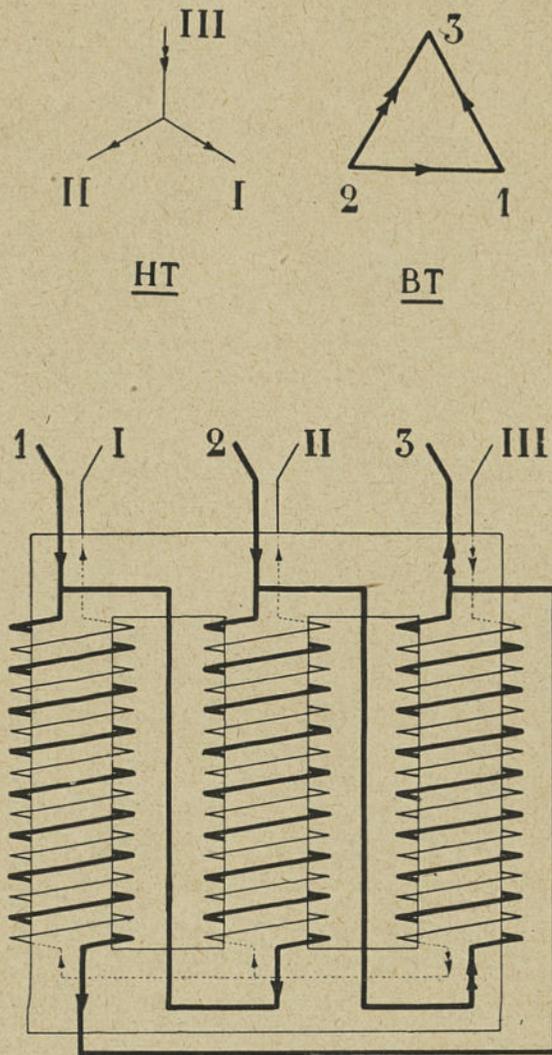


Fig. 172. — Transformateur triphasé.

HT. Étoile, 3 Bornes I, II, III.

BT. Triangle, 3 Bornes 1, 2, 3.

Toutes les bobines sont enroulées dans le même sens.

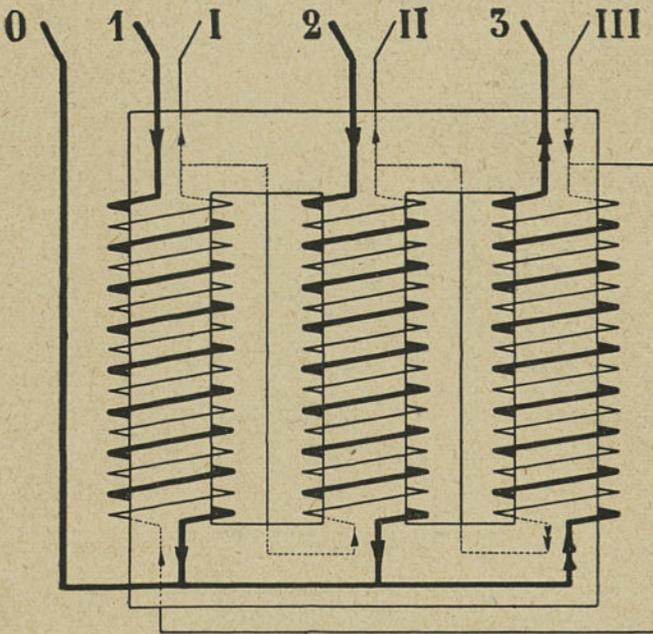
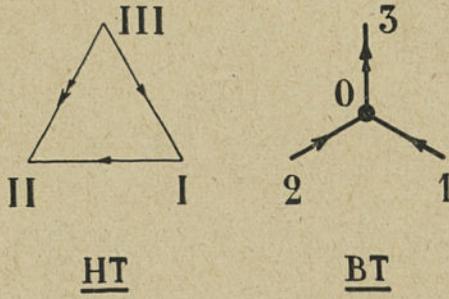


Fig. 173. — *Transformateur triphasé.*

HT. Triangle, 3 Bornes I, II, III.

BT. Étoile, 4 Bornes 0, 1, 2, 3.

Toutes les bobines sont enroulées dans le même sens.

Supposons un transformateur abaisseur de tension devant servir en même temps à alimenter des moteurs et des lampes. Pour cela on utilisera une distribution à 4 fils, la tension composée entre fils de phase convenant pour la force et la tension simple entre fils de phase et le neutre servant pour la lumière.

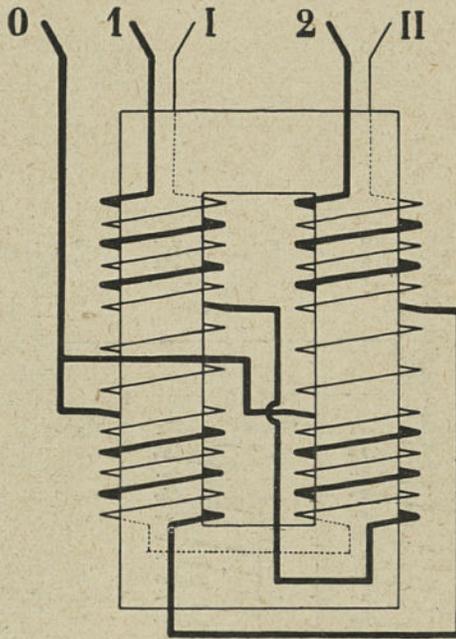


Fig. 174. — Transformateur monophasé en zig-zag.

Il suffira pour cela d'ajouter un fil neutre au schéma de la figure 171. Mais si pour une raison quelconque, il n'y a en service que les lampes branchées entre la phase 1 et le neutre on n'aura de courant secondaire que dans l'enroulement 1. Le courant primaire fera retour à la source d'alimentation pour les enroulements 2 et 3. Ces enroulements qui ont un grand nombre de spires ont beaucoup de self, il y aura par suite baisse de tension primaire. En outre les ampères-tours qu'ils créent

sur chacun des noyaux 2 et 3 sont en opposition avec le flux utile dans le noyau 1 et s'opposent à son passage. A travers 2 et 3, il y aura donc beaucoup de fuites et une grande chute de tension secondaire.

Avec un primaire en triangle (*fig. 173*) il n'y aura pas de courant de retour à travers les enroulements 2 et 3 où nous n'aurons

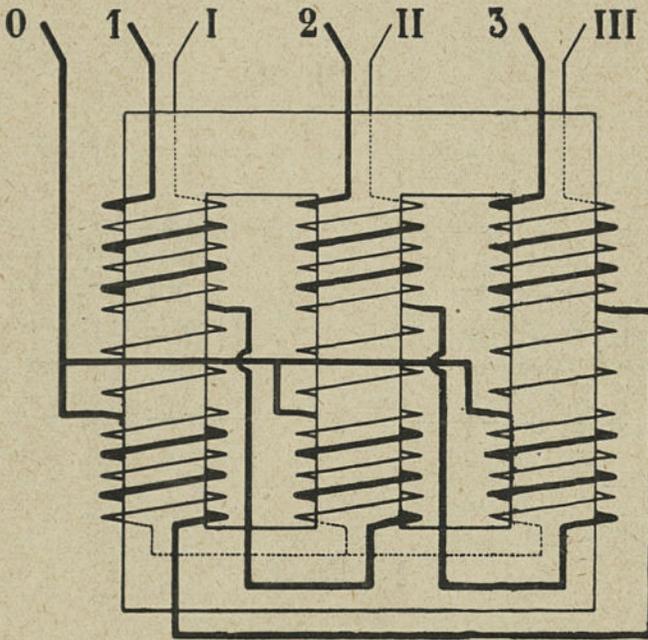


Fig. 175. — Transformateur triphasé en zig-zag.

que les ampères tours à vide ne modifiant pas sensiblement le fonctionnement de la phase 1.

On peut conserver les avantages de l'étoile au primaire, même dans le cas ci-dessus en adoptant pour le secondaire l'enroulement en zig-zag (*fig. 175*).

Dans ce cas, la charge de chaque enroulement secondaire se trouve répartie sur deux enroulements primaires, le retour du courant primaire n'influence plus les autres flux. La tension aux

bornes de chaque enroulement secondaire sera donc sensiblement constante.

Le cas des transformateurs monophasés pour distribution à 3 fils est analogue à celui-ci-dessus et l'on aura pour les mêmes raisons une grande chute de tension sur un pont quand l'autre ne sera pas chargé. Un enroulement secondaire en zig-zag (*fig. 174*) évitera ces inconvénients.

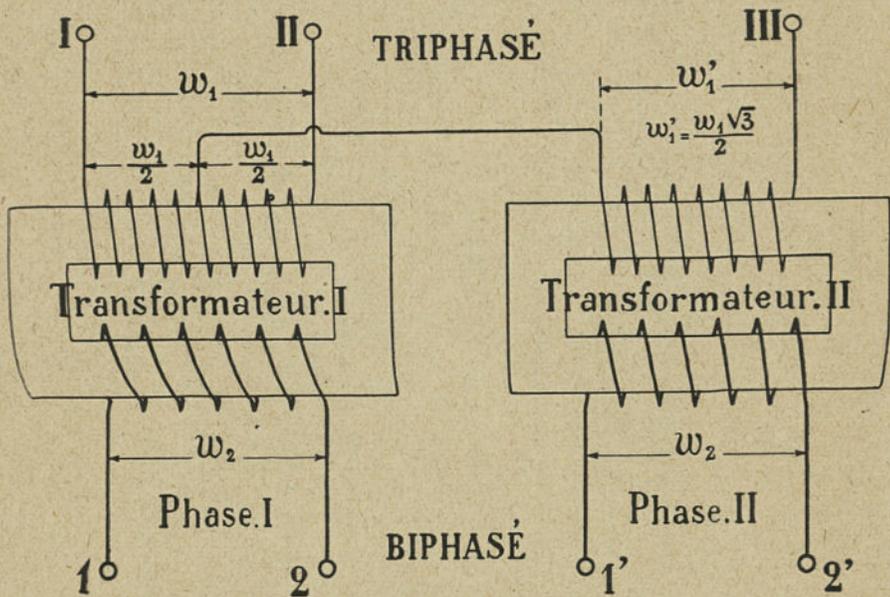


Fig. 176.

Les figures 176 et 177 montrent les connexions du *montage de Scott*, transformant du courant triphasé en courant biphasé ou inversement.

M. Scott a imaginé et appliqué ce montage au Niagara. On dispose à cet effet de deux transformateurs monophasés comportant chacun deux circuits représentés sommairement sur le schéma de la figure 176.

Pour que le fer des deux transformateurs travaille dans les

mêmes conditions d'induction (en ayant des fers de dimensions égales) on doit avoir

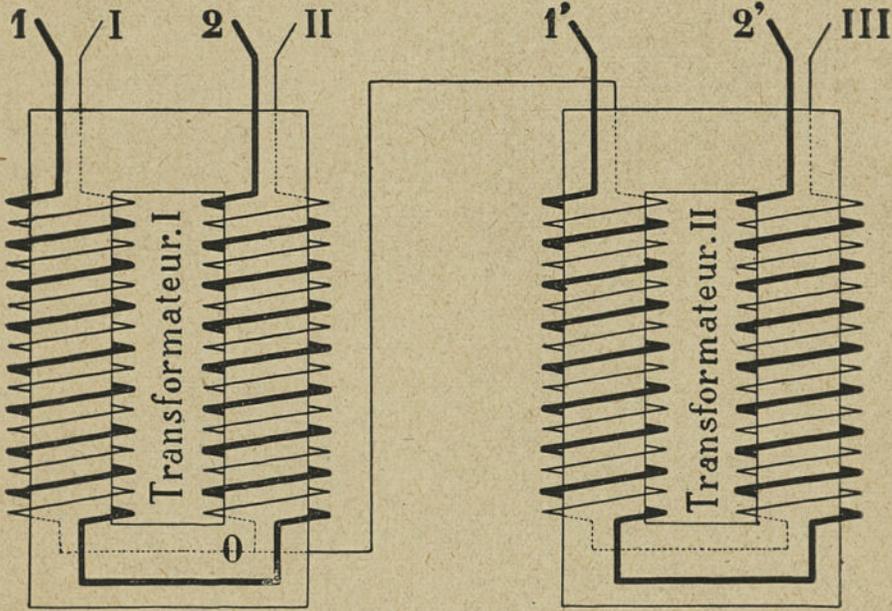
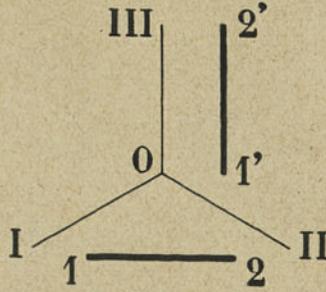


Fig. 177. — Transformation du courant triphasé en courant biphasé.

Triphasé, bornes I, II, III.
Biphasé, bornes 1 et 2, 1' et 2'.

$$\text{Nombre de spires primaires} \begin{cases} \text{Transformateur I} = w_1, \\ \text{Transformateur II} = w'_1 = \frac{w_1 \sqrt{3}}{2}. \end{cases}$$

Le rapport de transformation est égal à $\frac{w_1}{w_2}$.

CHAPITRE VI

EXEMPLES NUMÉRIQUES

COURANT CONTINU

49. **Dynamos.** — La puissance utile d'une dynamo s'exprime en kilo-watts :

$$\text{KW} = \frac{E \times I}{1\,000}$$

La puissance absorbée en chevaux-vapeur sera égale à :

$$\text{Chevaux absorbés} = \frac{\text{KW} \times 1\,000}{736 \times \eta}$$

E = différence de potentiel aux bornes, en volts,

I = intensité du courant en ampères,

η = rendement de la machine.

Exemple I. — Dynamo de 34,2 KW (Voir tableau de la page 68, 2^e ligne) dont les caractéristiques sont les suivantes :

$$E = 120 \text{ volts}, \quad I = 285 \text{ ampères}, \quad n = 780 \text{ tours.}$$

Bobinage ondulé en séries-parallèles :

$$p = 2, \quad a = 2, \quad N = 304, \quad \Phi = 3,15 \times 10^6, \quad \eta = 0,91.$$

$$\text{Chevaux absorbés} = \frac{34,2 \times 1\,000}{736 \times 0,91} = 51,06.$$

Pour une dynamo il faut développer dans l'induit une force

électromotrice qui doit être égale à la différence de potentiel aux bornes de la machine augmentée de la chute de tension dans l'induit $R I$ ou R est la résistance de l'induit en ohms. On a :

$$E = \frac{\Phi \times N \times n \times p}{60 \times a \times 10^8} = \frac{3,15 \times 10^6 \times 304 \times 780 \times 2}{60 \times 2 \times 10^8} = 124 \text{ volts}$$

soit une chute de tension de 4 volts et une différence de potentiel de 120 volts aux bornes.

Si nous prenons maintenant l'exemple de la 4^e ligne on a un bobinage ondulé série et $a = 1$, $N = 302$ pour satisfaire à la formule du couplage, la force électromotrice développée dans l'armature sera :

$$E = \frac{\Phi \times N \times n \times p}{60 \times a \times 10^8} = \frac{3,15 \times 10^6 \times 302 \times 780 \times 2}{60 \times 1 \times 10^8} = 248 \text{ volts}$$

soit une chute de tension de 8 volts et une différence de potentiel de 240 volts aux bornes.

50. Moteurs. — La puissance utile d'un moteur s'exprime en chevaux-vapeur, tandis que la puissance absorbée s'indique en KW.

$$\text{KW} = \frac{\text{chevaux} \times 736}{1000 \times \eta}$$

Les machines à courant continu étant reversibles nous pouvons utiliser la dynamo décrite ci-dessus comme moteur, il vient alors :

$$\text{KW absorbés} = \frac{120 \times 285}{1000} = 34,2.$$

De la formule précédente, on déduit la puissance utile :

$$\text{Chevaux utiles} = \frac{1000 \times 34,2 \times 0,91}{736} = 42,3.$$

Pour un moteur la force contre-électromotrice est égale à la différence de potentiel appliqué aux bornes de la machine diminuée de la chute de tension dans l'induit.

Exemple II. — Si l'on conserve à la dynamo de 120 volts toutes

ses caractéristiques et que l'on applique aux bornes de cette machine une d. d. p. correspondante, la vitesse du moteur à vide se déduira immédiatement de la formule de la f. é. m., il vient :

$$n_{\text{vide}} = \frac{E \times 10^8 \times 60 \times a}{\Phi \times N \times p} = \frac{120 \times 10^8 \times 60 \times 2}{3,15 \times 10^6 \times 304 \times 2} = 750 \text{ tours.}$$

Dans ce cas comme le courant qui parcourt l'induit est très faible en regard de l'intensité normale, la chute de tension est négligeable.

Si le moteur est chargé et donne sa puissance normale, le nombre de tours sera égal à :

$$n_{\text{charge}} = \frac{116 \times 10^8 \times 60 \times 2}{3,15 \times 10^6 \times 304 \times 2} = 730 \text{ tours.}$$

L'induit étant le même que celui de la dynamo, pour une même intensité on aura la même chute de tension égale à 4 volts, et la force contre-électromotrice développée dans le moteur sera égale à $120 - 4 = 116$ volts.

Exemple III. — Supposons maintenant que nous ayons un moteur de 42 chevaux à 240 volts à mettre sous 120 volts.

Les caractéristiques de l'induit sont :

$$E = 240 \text{ volts, } I = 142 \text{ ampères, } n_{\text{ch}} = 730, \quad p = 2.$$

Bobinage ondulé série :

$$a = 1, \quad N = 302, \quad K = 151, \\ y = y_1 + y_2 = \frac{302 - 2}{2} = 150, \quad y_1 = y_2 = 75.$$

Les inducteurs se composent de 4 bobines de 2 240 spires chacune, de fil nu diamètre 1^{mm}, 25. Les 4 bobines réunies en série.

Pour faire la transformation demandée, il faut et il suffit de changer le bobinage ondulé série en un bobinage imbriqué en parallèle simple (1). Les pas composants deviendront :

1. Dans ce cas $a = p = 2$.

$$y_1 = \frac{302 - 2}{4} = 75, \quad y_2 = 75 - 2 = 73.$$

On conservera 75 comme pas du côté poulie pour n'avoir rien à changer de ce côté. Les connexions au collecteur seront pliées de la position I (ondulé) à la position II (imbriqué).

On vérifiera ensuite la section des balais qui doit être suffisante pour pouvoir supporter une intensité double de la précédente. Il sera probablement utile d'augmenter l'épaisseur des balais et de donner à ces derniers une dimension telle qu'ils recouvrent 3 lames du collecteur au lieu de deux par exemple.

Quant aux bobines inductrices on les remplacera par des bobines ayant un nombre de spires moitié moindre mais faites avec du fil ayant une section double c'est-à-dire 1 120 spires par électro, diamètre du du fil nu = 1^{mm},8.

En se reportant à la formule donnant la section du fil inducteur (paragraphe 13) :

$$s = \frac{AT \times (1 + 0,004t) \times l_m}{57 \times 100 \times E}$$

E aux bornes devenant deux fois plus petit, les autres termes restant les mêmes, s sera deux fois plus grand. Pour la même densité de courant, l'intensité d'excitation est égale au double que précédemment, ce qui nous donne un nombre de spires moitié moindre pour obtenir le même total d'ampères-tours.

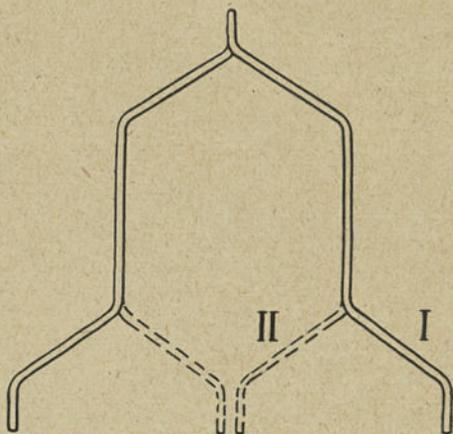


Fig. 178.

COURANT ALTERNATIF

51. **Alternateurs.** — Nous avons vu chapitre 1 que la puissance effective d'un alternateur était :

$$P = \frac{m \times e_{\text{eff}} \times i_{\text{eff}} \times \cos \varphi}{1\ 000} = \text{KW} \text{ (1)}$$

et la puissance apparente

$$P = \frac{m \times e_{\text{eff}} \times i_{\text{eff}}}{1\ 000} = \text{KVA.}$$

m = nombre de phases,

$e = e_{\text{eff}}$ = f. é. m. efficace en volts par phase,

$i = i_{\text{eff}}$ = intensité efficace en ampères par phase.

$E = E_{\text{eff}}$ = f. é. m. efficace aux bornes de la machine,

$I = I_{\text{eff}}$ = intensité efficace aux bornes de la machine.

Alternateur monophasé.

$$E = e \quad \text{et} \quad I = i,$$

$$\text{KVA} = \frac{EI}{1\ 000}, \quad \text{Chevaux absorbés} = \frac{\text{KVA} \times \cos \varphi}{0,736 \times \eta}$$

Alternateur biphasé.

$$E = e \quad \text{et} \quad I = i,$$

$$\text{KVA} = \frac{EI}{1\ 000}, \quad \text{Chevaux absorbés} = \frac{\text{KVA} \times \cos \varphi}{0,736 \times \eta}$$

Alternateur triphasé. Ces alternateurs peuvent être montés en triangle (*fig. 179*) ou en étoile (*fig. 180*).

Dans les deux cas on a :

$$\text{KVA} = \frac{3 \times e \times i}{1\ 000} = \frac{1,73 \times E \times I}{1\ 000},$$

1. Pour le cas particulier de $\cos \varphi = 1$ on a $\text{KVA} = \text{KW}$.

$$\text{Chevaux absorbés} = \frac{\text{KVA} \times \cos \varphi}{0,736 \times \eta}$$

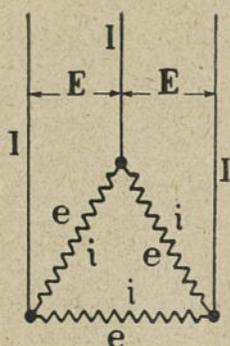


Fig. 179. — Triangle.

$$\begin{aligned} E &= e, \\ I &= \sqrt{3}i, \\ P &= 3ei = \frac{3EI}{\sqrt{3}} = \sqrt{3}EI, \end{aligned}$$

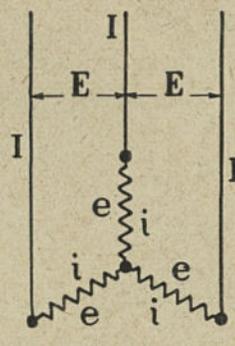


Fig. 180. — Étoile.

$$\begin{aligned} E &= \sqrt{3}e, \\ I &= i, \\ P &= 3ei = \frac{3EI}{\sqrt{3}} = \sqrt{3}EI. \end{aligned}$$

Exemple IV. — Supposons un alternateur triphasé de 75 KVA pour $\cos \varphi = 1$, dont les caractéristiques sont les suivantes ;

$$n = 1\,000, \quad p = 3, \quad f = \frac{3 \times 1\,000}{60} = 50, \quad \text{rapport } \frac{b}{\tau} = 0,6,$$

72 encoches, 2 conducteurs par encoche, 144 conducteurs en tout. 48 conducteurs par phase, Φ émanant d'un pôle = $2,3 \times 10^6$.

$$\begin{aligned} e_{\text{eff}} &= \frac{k \times f \times \Phi \times N_1}{10^8} \\ &= \frac{2,3^{(1)} \times 50 \times 2,3 \times 10^6 \times 48}{10^8} = 127 \text{ volts,} \end{aligned}$$

on a :

$$75 = \frac{3 \times 127 \times i}{1\,000} \quad \text{d'où} \quad i = \frac{75 \times 1\,000}{3 \times 127} = 197 \text{ ampères.}$$

1. $k = 2,3$. Voir courbe de la fig. 89.

Si les trois phases sont couplées en triangle, on aura aux bornes de l'alternateur $E = 127$ volts et $I = 362$ ampères, tandis que si elles sont couplées en étoile on aura aux bornes $E = 220$ volts et $I = 197$ ampères.

Réunissons ces 144 conducteurs de façon à avoir un enroulement biphasé, on aura par phase 72 conducteurs et $k = 2,15$.

$$e_{\text{eff}} = \frac{2,15 \times 50 \times 2,3 \times 10^6 \times 72}{10^8} = 178 \text{ volts}$$

et

$$75 = \frac{2 \times 178 \times i}{1000} \quad \text{d'où} \quad i = \frac{75 \times 1000}{2 \times 178} = 210 \text{ ampères.}$$

Dans la même machine on peut faire un alternateur monophasé, la puissance sera réduite dans la proportion de 3 à 2 et

$$\text{KVA} = \frac{75 \times 2}{3} = 50.$$

Les $\frac{2}{3}$ des encoches seulement seront remplies de conducteurs ce qui nous donnera $\frac{144 \times 2}{3} = 96$ fils répartis dans 48 encoches, $k = 2,05$.

$$e = \frac{2,05 \times 50 \times 2,3 \times 10^6 \times 96}{10^8} = 227 \text{ volts}$$

et

$$50 = \frac{227 \times i}{1000} \quad i = \frac{50 \times 1000}{227} = 220 \text{ ampères.}$$

52. Moteurs asynchrones. — La puissance des moteurs asynchrones s'indique en chevaux-vapeur, tandis que la puissance absorbée s'exprime en KVA.

Il vient :

$$\text{KVA absorbés} = m \times e \times i,$$

$$\text{Chevaux utiles} = \frac{\text{KVA} \times \eta \times \cos \varphi}{0,736}$$

$$\text{Moteur monophasé. — KVA} = \frac{E \times I}{1000}.$$

$$\text{Moteur biphasé. — KVA} = \frac{2 \times E \times I}{1000}.$$

$$\text{Moteur triphasé. — KVA} = \frac{1,73 \times E \times I}{1000}.$$

Exemple V. — Un moteur triphasé a les caractéristiques suivantes :

10 chevaux, 4 pôles, 1500 tours au synchronisme, $f = 50$.
36 encoches au stator, 132 fils par phase, 11 fils par encoche.

Couplé en triangle, le moteur marche sous une tension de 115 volts, en étoile il marchera sous 220 volts.

Avec 3 encoches par pôle et par phase $C = 0,96$. En admettant une chute de tension de 4 volts dans le stator on a :

$$\Phi = \frac{111 \times 10^8}{2,22 \times 0,96 \times 50 \times 132} = 0,8 \times 10^6.$$

Nous voulons le transformer en un moteur à 25 périodes 110/190 volts. La puissance diminuera de moitié en même temps que sa vitesse, si on conserve 4 pôles. Nous aurons donc un moteur de 5 chevaux et 750 tours au synchronisme.

A 25 périodes on peut augmenter légèrement le flux 15 pour 100 environ ce qui nous donne $\Phi = 0,8 \times 10^6 \times 1,15 = 0,92 \times 10^6$.

$$\text{Nombre de fils par phase} = \frac{106 \times 10^8}{2,22 \times 0,96 \times 25 \times 0,92 \times 10^6} = 216 \text{ fils.}$$

$$\text{soit par encoches } \frac{216}{12} = 18 \text{ fils.}$$

Précédemment on avait les indications données sur la plaque du moteur (à $f = 50$).

Volts 115/200, Ampères 47,5/27,5, $\cos \varphi = 0,885$.
et

$$\text{KVA} = \frac{3 \times 115 \times 27,5}{1000} = 9,45.$$

Le $\cos \varphi$ du moteur ne sera pas modifié sensiblement du fait de le mettre à 25 périodes, mais le rendement diminuera de 5 à 6 pour 100 environ.

Le nombre de KVA absorbés sera proportionnel au nombre de chevaux utiles augmenté de 6 pour 100.

$$\text{KVA} = \frac{9,45 \times 5}{10} \times 1,06 = 5,0,$$

et

$$i = \frac{5 \times 1000}{3 \times 110} = 15,1 \text{ ampères.}$$

Si pour 27,5 ampères à 50 périodes, on avait une section de fil de 8^{mm^2} , 5 pour 15,1 ampères à 25 périodes on aura un fil de :

$$\frac{8,5 \times 15,1}{27,5} = 4,5 \text{ millimètres carrés de section.}$$

Exemple VI. — Proposons-nous de changer ce moteur triphasé à 50 périodes en un moteur biphasé, 110 volts, 53 périodes, 4 pôles.

Pour $\frac{36}{2 \times 4} = 4,5$ encoches par pôle et par phase en biphasé,

le coefficient d'enroulement est égal à 0,905 environ.

$$\text{Nombre de fils par phase} = \frac{(110 - 5) \times 10^8}{2,22 \times 0,905 \times 53 \times 0,79 \times 10^6} = 126 \text{ fils}$$

et par encoche $\frac{126}{18} = 7$ fils.

Pour un même rendement et un même $\cos \varphi$, on a :

$$I = i = \frac{9,45 \times 1000}{2 \times 110} = 43 \text{ ampères,}$$

$$\text{Section du fil} = \frac{8,5 \times 43}{27,5} = 13,3 \text{ millimètres carrés.}$$

Exemple VII. — Nous voulons maintenant de ce même moteur triphasé à 50 périodes en faire un moteur monophasé à 42 périodes sous 220 volts. Nous avons vu qu'un moteur portant un enroulement monophasé aura une puissance égale aux $\frac{2}{3}$ de celle qu'il pourrait donner s'il était bobiné en polyphasé. Comme la fréquence est de 42 périodes, cette puissance sera encore réduite dans la proportion de 50 à 42 et finalement on a :

$$\text{Chevaux utiles} = \frac{10 \times 2 \times 42}{3 \times 50} = 5,5 \text{ chevaux.}$$

L'enroulement principal sera réparti dans 24 encoches soit 6 encoches par pôle et par phase, ce qui nous donne un coefficient d'enroulement de 0,832.

En conservant le même flux par pôle on obtient :

$$\text{Nombre de fils} = \frac{(220 - 10) \times 10^8}{2,22 \times 0,832 \times 42 \times 0,8 \times 10^6} = 336,$$

$$\text{et par encoche : } \frac{336}{24} = 14.$$

Il nous faut calculer approximativement les KVA absorbés. Pour cela il est nécessaire de connaître le décalage et le rendement. Dans les moteurs de construction moderne, la valeur maximum du $\cos \varphi$ est atteinte aux environs de la puissance normale et on a

$$\cos \varphi_{\max} = \frac{1 - \sigma}{1 + \sigma} \text{ pour un polyphasé,}$$

$$\cos \varphi_{\max} = \frac{1 - 2\sigma}{1 + 2\sigma} \text{ pour un monophasé.}$$

σ étant le coefficient de dispersion totale du moteur.

Nous avons tracé (*fig. 181*) deux courbes qui donnent la valeur du $\cos \varphi_{\max}$ pour ces deux catégories de moteurs. Comme nous ne cherchons qu'un terme de comparaison, nous n'avons pas à nous occuper de σ qui a servi seulement pour tracer les courbes.

Connaissant la valeur de $\cos \varphi$ pour un moteur polyphasé, courbe I, on abaisse de ce point une perpendiculaire sur l'axe des

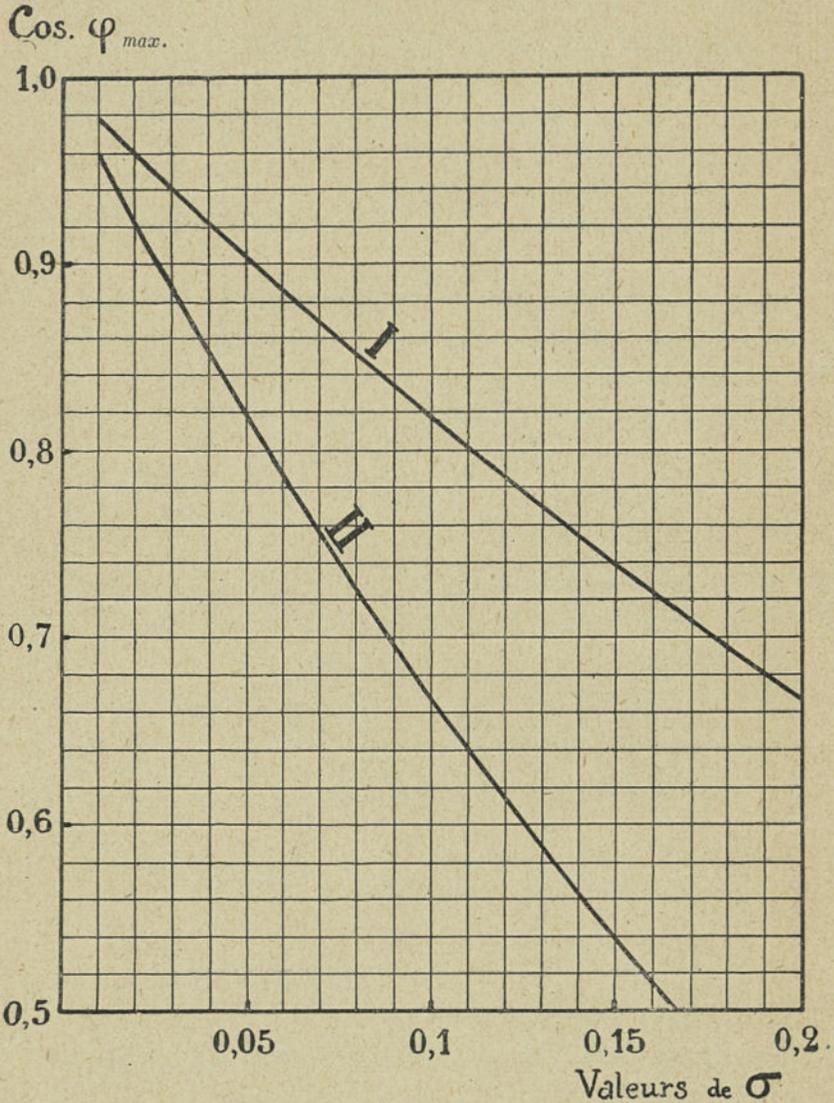


Fig. 181. — I. moteurs polyphasés, II. moteurs monophasés.

abscisses. Le lieu de rencontre de cette perpendiculaire avec la courbe II donnera la valeur du $\cos \varphi$ pour le même moteur por-

tant un enroulement monophasé, à condition que l'on conserve le même flux et que l'on fasse intervenir les coefficients d'enroulement.

Dans le cas présent nous obtenons $\cos \varphi = 0,785$.

En ce qui concerne le rendement, nous serons obligé de nous en tenir à une approximation assez grossière, n'ayant aucun élément pour le calculer; nous admettrons donc un η égal à celui du moteur à 25 périodes

$$\text{KVA} = \frac{9,45 \times 5,5 \times 0,885}{10 \times 0,785} \times 1,06 = 6,2.$$

C'est-à-dire que le nombre de KVA sera proportionnel à la puissance, inversement proportionnel au $\cos \varphi$ et au rendement. Comme ce dernier est inconnu, nous avons admis une diminution de 6 pour 100, ce dont on tient compte en faisant intervenir le terme 1,06

$$I = i = \frac{6,2 \times 1000}{220} = 28,2 \text{ ampères,}$$

$$\text{section du conducteur} = \frac{8,5 \times 28,2}{27,5} = 9 \text{ millimètres carrés.}$$

Le bobinage principal sera constitué avec deux fils 11 de 24/10 de diamètre nu. Pour le bobinage auxiliaire, qui n'est en circuit que quelques instants au moment du démarrage, nous pouvons adopter une densité plus élevée et prendre du fil de 22/10, il comportera autant de fils par encoche que l'enroulement principal.

53. Transformateurs. — Le calcul d'un transformateur est chose des plus facile si la section du fer et l'induction sont données, ou ce qui revient au même, si l'on veut modifier la tension d'alimentation ou le rapport de tension d'un transformateur existant. Ici on a :

$$\text{KVA absorbés} = \frac{m_1 \times e_1 \times i_1}{1000} \text{ au primaire,}$$

$$\text{KVA utiles} = \frac{m_2 \times e_2 \times i_2}{1000} \text{ au secondaire.}$$

Exemple VIII. — Soit un transformateur monophasé de 1 KVA, 60 périodes qui a les constantes suivantes :

Primaire : 110 volts, 9,75 ampères, 80 spires, fil de 4,6 millimètres carrés.

Secondaire : 12 500 volts, 0,08 ampère.

Section du fer : $7,2 \times 7,2 \times 0,9 = 46,5$ centimètres carrés.

Nous nous proposons de mettre ce transformateur sous 42 périodes, 220 volts au primaire et 9 000 volts au secondaire.

En comptant sur une chute de tension de 2 pour 100 dans chaque enroulement, on a :

$$\Phi = \frac{108 \times 10^8}{2,22 \times 2 \times 60 \times 80} = 0,510 \times 10^6,$$

Nombre de spires au secondaire

$$= \frac{12\,750 \times 10^8}{2,22 \times 2 \times 60 \times 0,510 \times 10^6} = 9\,400.$$

Pour faire cette modification, nous rebobinerons le primaire seulement. Le secondaire qui est formé de 10 bobines de 940 spires chacune sera utilisé tel quel, ce qui nous donnera à 42 périodes et 9 000 volts aux bornes un flux :

$$\Phi = \frac{9\,180 \times 10^8}{2,22 \times 2 \times 42 \times 9\,400} = 0,525 \times 10^6,$$

Nombre de spires au primaire

$$= \frac{216 \times 10^8}{2,22 \times 2 \times 42 \times 0,525 \times 10^6} = 222.$$

L'intensité dans le secondaire reste de 0,08 ampère (nous avons conservé le même fil) et la puissance utile devient :

$$\text{KVA utiles} = \frac{9\,000 \times 0,08}{1\,000} = 0,72.$$

L'intensité dans le primaire sera égale à environ :

$$\frac{9,75 \times 110 \times 0,72}{220 \times 1} = 3,5 \text{ ampères}$$

qui nécessite un fil de 1,7 millimètre carré environ, soit un diamètre nu de 15/10, isolement, 2 \times coton.

Généralement, pour les transformateurs, les constructeurs admettent la même puissance entre 42 et 60 périodes; dans ce cas on augmente l'induction au fur et à mesure que le nombre de périodes diminue. Si l'on conserve la même induction, la puissance du transformateur sera directement proportionnelle à la périodicité comme c'est le cas ci-dessus.

Exemple IX. — Un transformateur triphasé de 15 KVA-50 périodes dont le primaire relié en étoile a une différence de potentiel aux bornes de 3000 volts et une intensité de 3 ampères, soit par phase 1732 volts et 3 ampères. Le secondaire relié en triangle a une d. d. p. aux bornes de 110 volts et une intensité de 78,7 ampères, soit par phase 110 volts et 45,4 ampères.

On veut faire fonctionner ce transformateur sous 6000/190 volts. Les deux enroulements sont concentriques. Comme $110 \times \sqrt{3} = 190$, il suffira de relier les 3 phases du secondaire en étoile. Quant au primaire dont chaque phase était formée de 2 bobines de 656 spires chacune en fil de 17/10 nu, on le composera de 4 bobines de 656 spires en fil 12/10, c'est-à-dire un nombre de spires double et une section de fil moitié moindre.

54. Observations. — Pour tous ces exemples, nous nous sommes mis à la place d'un petit usinier qui répare ou transforme du matériel électrique, mais ces quelques applications peuvent également aider beaucoup les débutants en électricité à comprendre les formules.

Dans une dynamo à courant continu, pour obtenir la f. é. m. nécessaire dans l'induit, on fait varier la vitesse ou le flux, ou les deux à la fois. Tandis que dans un alternateur on ne peut faire varier que le flux, la vitesse étant fonction de la périodicité et du nombre de pôles, reste constante.

Pour ces dernières machines, les exemples calculés donnent la valeur de la f. é. m. à vide. La prédétermination de la chute de tension d'un alternateur est chose compliquée et sort du cadre de cet ouvrage. Si l'on veut transformer une génératrice alternative en une autre de voltage différent, ou de périodicité différente,

il faut se souvenir que la chute de tension en pour 100 ne change pas et que la d. d. p. aux bornes est proportionnelle au nombre de fils par phase et au nombre de périodes. Pour une encoche, on doit avoir :

Nombre de fils \times Ampères par fil = Constante.

Ce produit diminuera pour les hautes tensions à cause de la plus grande place occupée par l'isolant, le facteur d'utilisation de l'encoche diminue. Autrement dit pour une machine donnée, la puissance est directement proportionnelle à la section de cuivre par encoche si l'on conserve la même densité de courant.

Pour toutes les machines électriques dont on doit simplement faire varier le voltage, le nombre de fils est directement proportionnel et la section du fil inversement proportionnelle à la d. d. p. aux bornes.

Mais si d'un moteur asynchrone polyphasé on doit faire un moteur monophasé comme dans l'exemple VII, la détermination du rendement et du $\cos \varphi$ n'est possible que si l'on a tous les éléments du calcul ou l'essai complet d'un moteur semblable déjà modifié, ce qui ne se présente pour ainsi dire jamais. Il reste bien entendu que procéder comme nous l'avons fait ne donne qu'approximativement ces valeurs et les KVA calculés peuvent être légèrement différents des KVA absorbés, ce qui a pour résultat d'augmenter ou de diminuer la densité du courant.

Ce qui est très important pour un moteur asynchrone, c'est que la capacité de surcharge soit telle qu'il puisse supporter sans décrocher une surcharge momentanée d'environ 100 pour 100 pour un moteur polyphasé et 50 pour 100 pour un moteur monophasé, à tension et à vitesse normales.

TABLE DES MATIÈRES

	Pages.
PRÉFACE.	v
NOTATIONS.	ix

CHAPITRE I

1. Courant électrique.	1
2. Sens et variation de la force électromotrice induite dans une spire.	2
3. Courant alternatif et courant redressé.	5
4. Courant continu.	7
5. Valeur de la force électromotrice induite.	8
6. Machines multipolaires.	12
7. Courant alternatif. Force électromotrice maximum.	15
8. Force électromotrice moyenne et force électromotrice efficace.	17
9. Facteur de forme.	20
10. Puissance d'un courant.	21

CHAPITRE II

11. Champ magnétique.	25
12. Dynamos à courant continu.	26
13. Inducteurs.	26
14. Bobines inductrices.	30
15. Pôles auxiliaires ou de commutation.	35
16. Confection des bobines.	38
17. Armatures.	40
18. Genres d'enroulements.	41
19. Bobinage en hélice.	43
20. Enroulement parallèle multiple en hélice.	44
21. Enroulement bouclé ou imbriqué.	46
22. Enroulement bipolaire en tambour en parallèle.	50
23. Enroulement multipolaire en tambour en parallèle.	55
24. Armature en tambour à deux collecteurs.	58
25. Enroulement ondulé	60
26. Enroulement en série.	63
27. Enroulement en séries-parallèles.	69

28. Connexions équipotentielles.	73
29. Induit rainé en tambour.	76
30. Isolement de l'enroulement des armatures dentées.	78
31. Fils d'armature et isolement des fils d'armature.. . . .	79
Résistance des fils de cuivre électrolytique.	81
Augmentation du diamètre dû à l'isolement.	87
32. Enroulement en manteau.	88
33. Confection des enroulements.	92
34. Vernis et imprégnation.	96
35. Équilibrage des armatures.	99
36. Frettes d'induit.	100

CHAPITRE III

37. Génératrices à courant alternatif.	105
38. Enroulements induits des alternateurs.	113

CHAPITRE IV

39. Moteurs asynchrones.	126
40. Coefficient d'enroulement.	126
41. Rotor.	134
42. Encoches.	136
43. Schémas.	137
44. Bobinage des stators.	161
45. Bobinage en barres. Connexions en développante.	162
46. Nombre de tours par minute des machines à courant alternatif.	168
47. Nombre d'encoches par pôle et par phase pour machines à courant alternatif.	169

CHAPITRE V

48. Transformateurs.	170
Schémas.	175

CHAPITRE VI

49. Dynamos.	186
50. Moteurs.	187
51. Alternateurs.	190
52. Moteurs asynchrones.	192
53. Transformateurs.	197
54. Observations.	199

- Schémas et règles pratiques de bobinage des machines électriques**, par F. TORICES et A. CURCHOD, ingénieurs-électriciens. Volume 14 × 22 de 151 pages avec 16 figures et 47 planches, 2^e édition. Nouveau tirage 1922. 12 fr.
- Installations électriques de force et lumière.** *Schémas de connexions*, par A. CURCHOD, ingénieur diplômé de l'École supérieure d'électricité. Volume 16 × 22 de VIII-278 pages, avec figures et 85 planches. 4^e édition. Nouveau tirage 1920. Broché. 15 fr.
- Théorie des enroulements des machines à courant continu**, par G. SZARVADY, chargé de cours à l'École centrale des Arts et Manufactures. Volume 16 × 22 de 137 pages avec 40 figures. 1918. 14 fr. 50
- Électricité industrielle. Problèmes élémentaires avec schémas**, par F. HARANG, professeur aux Ecoles municipales professionnelles Diderot et Dorian. Volume 13 × 21 de XI-261 pages avec 167 figures. 1921. 11 fr.
- Recueil de problèmes avec solutions sur l'électricité et ses applications pratiques**, par H. VIEWEGER, traduit par G. CAPART, ingénieur civil des Mines. Volume 16 × 25 de XVI-400 pages avec 210 figures et 2 planches. 4^e édition. Nouveau tirage 1920. 30 fr.
- Théorie industrielle de l'électricité et des machines électriques**, par A. VERDURAND, ingénieur, ancien élève de l'École Polytechnique. Préface du général FERRIE, directeur de l'Établissement central du matériel radiotélégraphique. Volume 16 × 25 de 483 pages, avec 342 fig. 1919. 38 fr. 50
- Travaux pratiques d'électricité industrielle**, par P. ROBERJOT, professeur à l'École pratique d'industrie de Reims.
- TOME I. — *Mesures industrielles*. Volume 13 × 21 de X-238 pages, avec 258 figures. 2^e édition 1922. Broché. 10 fr.
- TOME II. — *Étude des machines électriques. Propriétés. Essais*. Volume 13 × 21 de VIII-276 pages, avec 227 fig. 2^e édition. Broché. 10 fr.
- TOME III. — *Installations intérieures*. Volume 13 × 21 de 338 pages, avec 496 figures. 2^e édition 1920. Broché. 12 fr.
- TOME IV. — *Usines génératrices. Transformateurs. Canalisations*, avec la collaboration de M. FÉRU, ingénieur à la C^{ie} électromécanique. Volume 13 × 21 de IV-184 pages avec figures et 6 planches 1921. Broché. 12 fr.
- Guide élémentaire du monteur électricien**, par GAISBERG, traduit par G. HAPPICH. Volume 13 × 21 de VI-356 pages avec 206 figures. Nouvelle édition 1922. Broché. 12 fr.
- L'électricité industrielle mise à la portée de l'ouvrier**, par E. ROSENBERG, traduit et adapté par A. MAUDUIT, professeur à l'Institut électrotechnique de Nancy. 7^e édition revue et augmentée. Volume 13 × 21, de X-548 pages avec 337 figures. Relié 27 fr. 50. Broché. 24 fr.
- Les compteurs d'électricité**, par M. R. FICHTER, ingénieur I. E. N. Préface de A. MAUDUIT. Volume 16 × 25 de IV-223 pages. avec 132 figures, 5 graphiques et 22 schémas. 1920. 24 fr.
- Les moteurs électriques et leurs applications industrielles**, par A.-F. GARNIER, ingénieur E. C. P. avec la collaboration de V. SYLVESTRE, ingénieur. Volume 24 × 31 de 100 pages, avec 206 figures. 1914. 16 fr.
- Généralités électriques à courant continu**, par H.-M. HOBART et F. ACHART. Volume 19 × 28 de VII-275 pages avec 151 figures. 1908. 24 fr.
- Agenda Dunod : Électricité. Aide-mémoire pratique de l'électricien**, par J.-A. MONTEPELLIER, ingénieur; revu par L.-D. FOURCAULT, ingénieur-conseil. Volume 10 × 15 de XLIV-330 pages avec 112 figures. 43^e édition 1924. Cartonné 6 fr. Relié toile souple. 9 fr.

Les prix ci-dessus ne sont pas susceptibles de majoration.