

N.C. 6  
BIBLIOTHÈQUE DE L'INGÉNIEUR ÉLECTRICIEN - MÉCANICIEN

FiV  
1526

Fondée par Louis BARBILLON  
à l'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE, DIRECTEUR DE L'INSTITUT POLYTECHNIQUE  
refondue sous la direction de Maurice DENIS-PAPIN  
INGÉNIEUR-CONSEIL ET EXPERT (I.E.G.)  
PROFESSEUR A L'ÉCOLE D'ÉLECTRICITÉ PHYSIQUE ET INDUSTRIELLE

# LA PRATIQUE INDUSTRIELLE DES TRANSFORMATEURS

PAR

**MAURICE DENIS-PAPIN**

INGÉNIEUR-CONSEIL ET EXPERT (I.E.G.)  
PROFESSEUR A L'ÉCOLE D'ÉLECTRICITÉ PHYSIQUE ET INDUSTRIELLE

A L'USAGE DES

Elèves-Ingénieurs, des Ingénieurs, des Constructeurs  
et des Exploitants

2<sup>e</sup> édition refondue et mise à jour



PARIS  
ÉDITIONS ALBIN MICHEL

22, RUE HUYGHENS, 22

1951

LA PRATIQUE INDUSTRIELLE  
DES TRANSFORMATEURS

4° V  
17526

## OUVRAGES DE M. DENIS-PAPIN

### Enseignement supérieur scientifique et technique

- NOTES ET FORMULES DE L'INGÉNIEUR (FORMULAIRE DE LAHARPE), sous la direction de M. DENIS-PAPIN ET J. VALLOT. — Albin Michel, éditeur.
- PRÉPARATION DES MANUSCRITS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES. — CORRECTION DES ÉPREUVES (CONSEILS AUX AUTEURS). — Albin Michel, éditeur (Plaquette tirée à part de l'ouvrage précédent).
- MATHÉMATIQUES GÉNÉRALES. — Aide-mémoire Dunod.
- MÉCANIQUE ET PHYSIQUE GÉNÉRALES. — Aide-mémoire Dunod.
- ÉLECTROTECHNIQUE GÉNÉRALE. — Aide-mémoire Dunod.
- MÉTROLOGIE GÉNÉRALE (GRANDEURS ET UNITÉS) (En collaboration avec J. VALLOT). — Aide-mémoire Dunod.
- MÉTROLOGIE APPLIQUÉE (MÉTHODES ET INSTRUMENTS DE MESURES) (En collaboration avec J. VALLOT). — Aide-mémoire Dunod.
- BIBLIOTHÈQUE DE L'INGÉNIEUR-ÉLECTRICIEN-MÉCANICIEN, fondée par L. BARBILLION, refondue sous la direction de M. DENIS-PAPIN. — Albin Michel, éditeur.
- TRAITÉ PRATIQUE DES UNITÉS DE MESURE. — Albin Michel, éditeur.
- LA PRATIQUE INDUSTRIELLE DES TRANSFORMATEURS. — Albin Michel, éditeur.
- COURS DE CALCUL OPÉRATIONNEL (En collaboration avec le Capitaine A. KAUFMANN). — Albin Michel, éditeur.
- COURS DE CALCUL MATRICIEL APPLIQUÉ (En collaboration avec le Capitaine A. KAUFMANN). — Albin Michel, éditeur.
- COURS DE CALCUL TENSORIEL APPLIQUÉ (En collaboration avec le Capitaine A. KAUFMANN). — Albin Michel, éditeur.
- FORMULAIRE DE MATHÉMATIQUES, PHYSIQUE ET CHIMIE (LICENCE, GRANDES ÉCOLES) (En collaboration avec P. BELGODÈRE). — Albin Michel, éditeur. (*En préparation.*)
- MONOGRAPHIES TECHNIQUES DU XX<sup>e</sup> SIÈCLE, collection dirigée par M. DENIS-PAPIN. — Desforges, éditeur.
- PRINCIPES GÉNÉRAUX DE VENTILATION INDUSTRIELLE ET DE CONDITIONNEMENT D'AIR. — Desforges, éditeur.
- LES FOURS D'ÉLECTROMÉTALLURGIE (En collaboration avec J. BISTESI). — Desforges, éditeur.
- MEMENTO DES UNITÉS GIORGI (M. K. S. A.) (En collaboration avec le Capitaine A. KAUFMANN). — Une plaquette, Desforges, éditeur.

### Enseignement secondaire — Baccalauréats

- COLLECTION DE RÉSUMÉS AIDE-MÉMOIRE DE MATHÉMATIQUES, PHYSIQUE ET CHIMIE, 6 volumes. — Fernand Nathan, éditeur.
- FORMULAIRE GÉNÉRAL DE MATHÉMATIQUES, PHYSIQUE ET CHIMIE (MATHÉMATIQUES ÉLÉMENTAIRES). — Fernand Nathan, éditeur.

### Enseignement professionnel

- LES MATHÉMATIQUES APRÈS L'ÉCOLE PRIMAIRE (En collaboration avec L. TRIPARD). — Dunod, éditeur.
- COURS ÉLÉMENTAIRE D'ÉLECTRICITÉ GÉNÉRALE (INITIATION A L'ÉLECTRICITÉ ET A LA T.S.F.). — Albin Michel, éditeur.
- COURS ÉLÉMENTAIRE D'ÉLECTRICITÉ INDUSTRIELLE (En collaboration avec P. MAURER). — Albin Michel, éditeur.
- POUR SE PRÉSERVER DES DANGERS DE LA FOUDRE ET DE L'ÉLECTRICITÉ. — Doin, éditeur.

**Bibliothèque de l'Ingénieur Électricien-Mécanicien**

**Fondée par Louis BARBILLION**

Professeur à l'Université de Grenoble, Directeur de l'Institut Polytechnique

**Refondue sous la direction de Maurice DENIS-PAPIN**

Ingénieur-conseil et expert (I. E. G.), Professeur à l'École d'Électricité  
physique et industrielle

---

# LA PRATIQUE INDUSTRIELLE DES TRANSFORMATEURS

PAR

**MAURICE DENIS-PAPIN**

INGÉNIEUR-CONSEIL ET EXPERT (I. E. G.)

PROFESSEUR A L'ÉCOLE D'ÉLECTRICITÉ PHYSIQUE ET INDUSTRIELLE

A L'USAGE DES

ÉLÈVES-INGÉNIEURS, DES INGÉNIEURS, DES CONSTRUCTEURS  
ET DES EXPLOITANTS

---

*2<sup>e</sup> édition refondue et mise à jour*

---

ÉDITIONS ALBIN MICHEL

22, RUE HUYGHENS — PARIS

1951

Bibliothèque de l'Institut National de France  
Fondée par Louis BARRIOL  
Déposée sous le patronage de Monsieur DEBILLY  
Membre de l'Académie des Sciences et belles-lettres  
Membre de l'Académie des Inscriptions et belles-lettres  
Membre de l'Académie des Sciences morales et politiques  
Membre de l'Académie des Sciences et belles-lettres  
Membre de l'Académie des Inscriptions et belles-lettres  
Membre de l'Académie des Sciences morales et politiques

LA PRATIQUE INDUSTRIELLE  
DES  
TRANSFORMATEURS

MARTELL  
MARTELL & CO  
COGNAC



Droits de traduction et reproduction réservés pour tous pays.  
Copyright 1946, by ALBIN MICHEL

# LA PRATIQUE INDUSTRIELLE DES TRANSFORMATEURS

---

## CHAPITRE PREMIER

### GÉNÉRALITÉS SUR LA TRANSFORMATION DES COURANTS

Il convient de distinguer tout d'abord, parmi les appareils servant à la transformation des courants, les transformateurs *immédiats* et les transformateurs *différés*. Cette dernière classe comprend les *accumulateurs* et les *condensateurs statiques*, ainsi que les *bobines de self-induction* apparentées aux transformateurs statiques.

La première classe, en dehors des *transformateurs de fréquence* (1), est constituée par :

1° Les *transformateurs statiques* proprement dits, permettant de transformer des courants alternatifs, mono-, bi-, ou triphasés, de fréquence et de tension données, en d'autres courants alternatifs de même fréquence, ayant : soit le même nombre de phases, et des tensions différentes ; soit un nombre de phases différent, et des tensions égales ou différentes.

2° Les *redresseurs*, appareils statiques aussi, permettant de transformer les courants alternatifs mono-, bi- ou triphasés en courants continus, ou plus exactement dans la majorité des cas, en courants « ondulés », très voisins d'un courant continu, et dits « courants redressés » (2).

3° Les *commutatrices*, permettant de transformer les courants alternatifs en courants continus, et inversement, et cela au moyen d'une machine tournante unique, pourvue d'un seul bobinage (3).

---

(1) Ces appareils sont rotatifs (groupes moteur-générateur) ou statiques (multiplicateurs de fréquence, employés en Radiotélégraphie et en Radiotéléphonie).

(2) La transformation inverse, au moyen d'appareils statiques appelés *inverters*, ne peut pas encore être considérée comme une solution industrielle.

(3) Nous ne mentionnerons que pour mémoire les *permutatrices*. Ces appareils, proches parents des commutatrices, sont fixes et possèdent des balais tournants. Ils sont absolument inutilisés dans l'industrie.

4° Les *groupes moteur-générateur*, conduisant au même résultat, mais au moyen de deux machines distinctes. Ils peuvent servir de « transformateurs de fréquence ».

La transformation de courants continus en courants continus de tensions différentes est obtenue par des groupes moteur-dynamo, des groupes survolteurs-dévolteurs ou des machines à deux collecteurs reliés à deux enroulements induits distincts.

Les *transformateurs statiques de courants alternatifs* <sup>(1)</sup>, appareils que l'on désigne en général sous la dénomination absolue de « transformateurs », constituent la classe de machines électriques la plus répandue et la plus importante, car ils sont indispensables dans la production, le transport, la distribution et l'utilisation de l'énergie.

Cette classe de machines est, par surcroît, la plus simple de toutes, et, néanmoins, les problèmes qui s'y rapportent sont aussi ardu qu'intéressants. En effet, en raison même de sa simplicité, le transformateur a permis une analyse des phénomènes beaucoup plus

poussée que dans les machines tournantes, et son étude se fait avec plus de précision que celle de ces dernières. De plus, l'emploi de hautes tensions et de grandes puissances oblige à approfondir certains points vitaux pour la conservation de l'appareil.

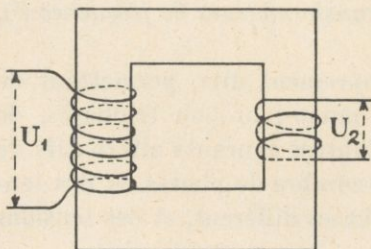


Fig. 1.

Un transformateur est constitué en principe (fig. 1) par un circuit magnétique en tôles, sur lequel sont bobinés deux enroulements (primaire et secondaire), l'un à fil long et fin, l'autre à fil gros et court. En réalité, ces *bobinages* sont entremêlés et répartis également sur deux *colonnes* du circuit magnétique (Voir chapitre VII : *Construction*).

Un transformateur est *abaisseur* ou *élévateur* de tension suivant les besoins de la cause. Le *rapport de transformation*  $\frac{U_2}{U_1}$ , est alors respectivement inférieur ou supérieur à l'unité.

(1) Voir la *Bibliographie* sur les transformateurs à la fin de l'ouvrage.

## CHAPITRE II

### DIFFÉRENTS TYPES DE TRANSFORMATEURS

*a) Classification.* — Du point de vue de leurs applications courantes (et en n'envisageant pas pour l'instant les appareils spéciaux), on peut classer les transformateurs en deux catégories :

1° *Les transformateurs de réseau* sont utilisés soit dans une centrale pour élever la tension des alternateurs en vue d'un transport à grande distance (*élevateurs*), soit dans une sous-station pour abaisser la tension du réseau à une valeur commode pour la distribution du réseau secondaire (*abaisseurs*), soit pour l'*interconnexion* de réseaux.

Ces appareils sont en général de grande puissance et à haute tension (60 000 volts et plus : jusqu'à 220 000 volts de nos jours, avec même des lignes d'essai à 500 000 volts).

2° *Les transformateurs de distribution* servent à ramener la tension du réseau de distribution (ou réseau secondaire) à une valeur compatible avec les appareils d'utilisation : lampes, fours, groupes convertisseurs, etc...

Ils sont donc tous *abaisseurs*, et construits pour des tensions allant de 5 000 à 30 000 volts au primaire (moyennes tensions) et de 200 à 500 volts au secondaire (basses tensions).

Leur puissance varie, suivant l'emploi qu'on leur affecte, de 3 kVA à 600 kVA (exceptionnellement 1 000 et 2 000).

*b) Choix d'un transformateur de distribution.* — L'abonné, à qui incombent généralement les frais d'installation de ces transformateurs, a intérêt à choisir judicieusement leur puissance, qui doit être la plus faible possible et compatible avec la puissance moyenne à fournir au cours d'une période de travail.

Il doit donc connaître la variation de cette puissance, les surcharges à prévoir et leur durée, et les développements futurs possibles de son installation.



Par exemple, si le transformateur alimente un réseau d'éclairage ne fonctionnant que quelques heures par jour, il restera sous tension à vide le reste du temps. On aura intérêt, dans ce cas, à le prévoir pour une puissance nominale plus faible que celle qu'il doit fournir pendant les heures d'éclairage, ou à le choisir dans un type à pertes à vide très réduites. Il devra, de toute manière, pouvoir absorber les surcharges importantes des heures de « pointe ».

Il en est autrement si le transformateur doit alimenter des moteurs ou des groupes qui le feront toujours travailler à pleine charge. Le transformateur devra être prévu pour cette charge permanente, et la question des pertes à vide aura une importance de second ordre.

c) **Nombre de phases.** — Les transformateurs peuvent être mono- ou triphasés, ce dernier type étant de beaucoup le plus répandu.

1° *Monophasés.* — Ces appareils sont construits soit avec deux colonnes bobinées, soit dans le type cuirassé (Voir : *Construction des transformateurs*).

2° *Biphasés.* — Dans le cas exclusif d'une distribution à trois fils (fig. 2), les transformateurs possèdent trois colonnes dans un

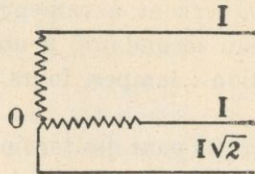


Fig. 2.

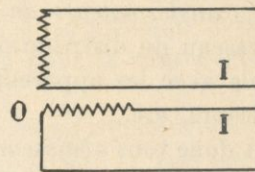


Fig. 3.

même plan, dont l'une (celle du milieu) a une section  $\sqrt{2}$  fois plus grande que chacune des deux autres.

Ce système est d'ailleurs peu usité, et l'on emploie de préférence deux transformateurs monophasés, qui conviennent aussi bien à une distribution à trois fils qu'à une distribution à quatre fils (fig. 3).

3° *Triphasés.* — Les transformateurs triphasés possèdent trois colonnes situées dans un même plan <sup>(1)</sup> et sur chacune desquelles

(1) Ces appareils ne sont pas symétriques. Voir : *Marche à vide* (au chapitre III); *Construction, Essais*.

sont bobinées simultanément une phase primaire et la phase secondaire correspondante. Leur usage est courant dans toutes les gammes de puissances et de tensions.<sup>(1)</sup> ; ce sont les appareils de beaucoup les plus répandus.

On peut remplacer un appareil triphasé par trois monophasés, généralement groupés suivant le schéma de la figure 4, qui réalise

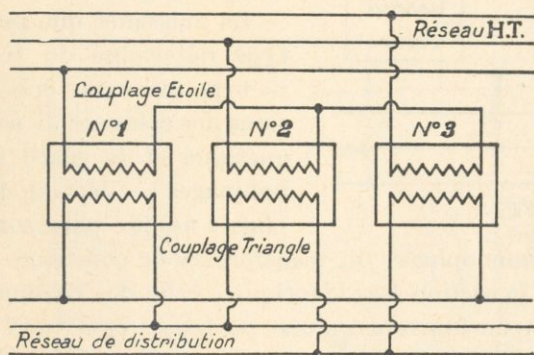


Fig. 4.

un couplage étoile-triangle (Voir chapitre IV : *Modes de couplage des transformateurs triphasés*).

Cette solution n'est à envisager que pour les grosses puissances et les hautes tensions. Elle a, en effet, l'avantage de nécessiter quatre transformateurs monophasés (dont un de réserve en cas d'avarie), au lieu de deux triphasés (dont un de réserve) ; or l'emploi de deux appareils triphasés est plus coûteux (50 % en plus du prix de quatre transformateurs monophasés). D'autre part, elle nécessite un encombrement moins grand ; mais la surface de refroidissement est alors moins grande aussi ; donc le refroidissement est moins facile et le rendement moins élevé.

Il faut examiner, dans chaque cas, l'importance relative de ces avantages et de ces inconvénients, avant de donner la préférence à l'une ou l'autre solution.

(<sup>1</sup>) En pratique, la haute tension se construit pour 1 500 à 15 000 volts de 5 à 15 kVA ; pour 1 500 à 30 000 de 25 à 40 kVA ; pour 5 500 à 30 000 de 63 à 630 kVA et pour des tensions bien plus élevées au delà.

La basse tension est souvent de 200 (ou 380) volts jusqu'à 630 kVA. Elle s'élève ensuite à 500, 1 000 et 5 500 volts au minimum.

On notera encore que la solution avec trois transformateurs monophasés permet, en cas d'avarie à l'un des appareils, une marche de fortune avec le montage dit *en V* (fig. 5).

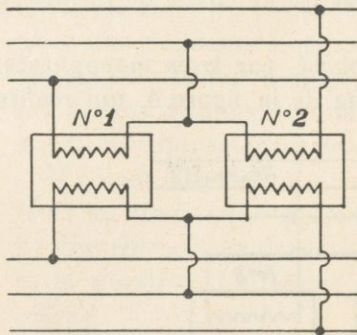


Fig. 5.

**d) Influence du nombre de phases et de la fréquence sur la puissance.**

— La puissance que peut fournir un type déterminé de transformateur — type que caractérisent les dimensions des colonnes de son circuit magnétique et la place accordée aux bobinages — dépend du nombre de phases adopté pour son utilisation.

Ainsi, en monophasé, un transformateur constitué par deux colonnes dont la section sera identique à celle des colonnes d'un appareil triphasé, ne fournira qu'une puissance égale aux  $2/3$  de celle fournie en triphasé. Par exemple, un transformateur monophasé de 30 kVA devra être prévu avec deux des trois colonnes d'un transformateur triphasé de  $\frac{3}{2} \times 30 = 45$  kVA. Dans le type à une seule colonne <sup>(1)</sup>, le coefficient  $3/2$  sera remplacé par 3.

La fréquence du réseau d'alimentation influe sur la puissance en raison directe, toutes choses égales d'ailleurs <sup>(2)</sup>. Par conséquent, à puissance égale, un transformateur sera d'autant plus volumineux que la fréquence sera plus faible.

Les fréquences usuelles sont : 50 et 25 p : s en mono- et triphasé ; plus rarement, on rencontre 42 p : s en mono- et biphasé ; exceptionnellement,  $16\frac{2}{3}$  p : s en traction monophasée.

Un transformateur triphasé, de 30 kVA à 25 p : s, devra être construit dans le type  $\frac{50}{25} \times 30 = 60$  kVA triphasé à 50 p : s <sup>(3)</sup>.

Un transformateur monophasé à deux colonnes, de 10 kVA à

<sup>(1)</sup> Type cuirassé, voir : *Construction des transformateurs*.

<sup>(2)</sup> Voir : *Calcul*.

<sup>(3)</sup> En toute rigueur, comme on pousse l'induction à 25 p : s, il suffira environ de 57 kVA. Mais, en pratique, cela ne change rien à ce qui a été dit, car les types d'appareils s'échelonnent suivant des chiffres normalisés de puissances : 40, 63, 80,.. kVA.

25 p : s, devra être construit dans le type  $\frac{3}{2} \times \frac{50}{25} \times 10 = 30$  kVA triphasé à 50 p : s. Et ainsi de suite.

e) **Transformation du nombre de phases.** — 1° *Transformateurs de triphasé en monophasé.* Ce sont des appareils triphasés dans lesquels

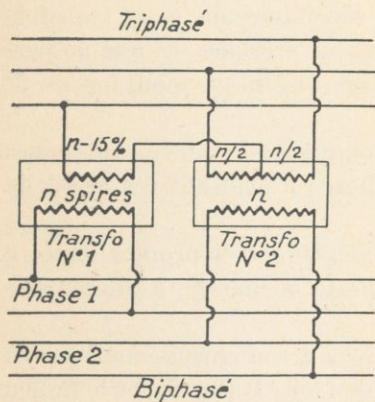
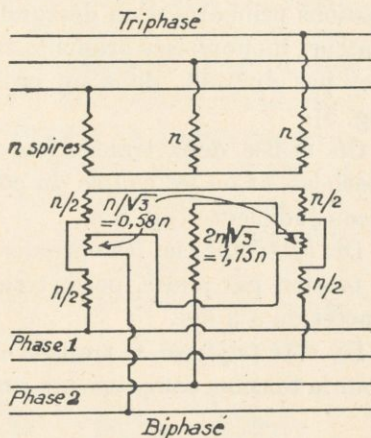


Fig. 6 a.



les bobinages secondaires sont mis en série, l'un d'entre eux étant inversé (On obtient deux fois la tension secondaire simple). A chaque annulation de la puissance secondaire monophasée, l'énergie primaire est emmagasinée dans une batterie de condensateurs (Brevet Société Savoissienne de Constructions Electriques).

Le rendement et l'équilibrage sont médiocres ; d'ailleurs ce mode de transformation ne convient qu'à des cas spéciaux (essais, appareils de laboratoire, etc...), et non à des usages industriels.

2° *Groupes Scott* <sup>(1)</sup>.

Ces appareils, dérivés des transformateurs monophasés ordinaires,

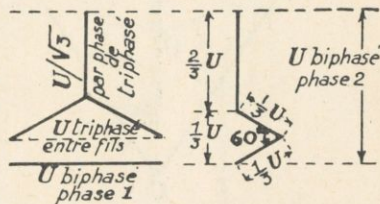


Fig. 6 b.

Dans les figures 6 a et 6 b, la tension biphasée est supposée égale, par phase, à la tension triphasée composée (entre fils de ligne).

(1) M.-D. PAPIN. — Détermination d'un groupe Scott, *L'Électricien* (15 juillet 1931, p. 333-335).

transforment industriellement du triphasé en biphasé, ou inversement <sup>(1)</sup>. Ils sont utilisés lorsqu'il s'agit de brancher en parallèle un réseau triphasé avec un biphasé, ou d'alimenter certains fours électriques (Miguet) ou divers autres appareils qui comportent des phases généralement déséquilibrées.

Le montage Scott permet en effet de réduire au minimum les répercussions primaires d'un déséquilibre secondaire de deux transformateurs monophasés branchés sur un réseau triphasé, ce que ne permet pas du tout, dans un ordre d'idées voisin, le montage en V (fig. 5).

On utilise deux transformateurs monophasés pourvus de prises spéciales, et on les couple du côté triphasé en utilisant ces prises de façon judicieuse (fig. 6 a).

Du côté biphasé, les enroulements, identiques et proportionnés à la tension par phase, permettent à volonté la marche à phases distinctes ou à 3 fils.

Du côté triphasé, le transformateur n° 2 a son enroulement prévu pour la tension composée (ou entre deux fils)  $\overline{AB}$  (fig. 7), et le milieu

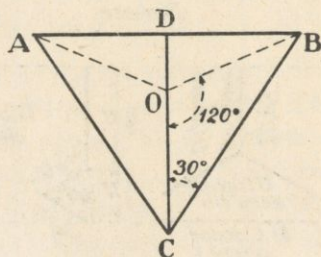


Fig. 7.

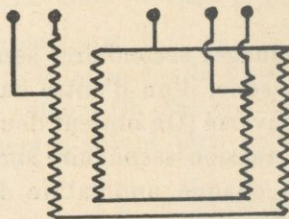


Fig. 8.

de cet enroulement est relié à une extrémité de l'enroulement du transformateur n° 1. L'autre extrémité de ce dernier se raccorde au fil de ligne vacant.

L'enroulement côté triphasé du transformateur n° 1 est prévu pour la tension :

$$\overline{CD} = \overline{CA} \cos 30^\circ = \overline{AB} \cos 30^\circ = 0,866 \overline{AB}.$$

Il comporte donc environ 15 % de spires de moins que l'enroule-

<sup>(1)</sup> Divers autres montages (dont le « Leblanc ») sont peu utilisés en comparaison du « Scott ». Le montage Leblanc utilise un appareil triphasé à circuit magnétique normal et enroulement triphasé normal (fig. 6b).

ment correspondant du transformateur n° 2, et aucune prise n'est utilisée en son milieu.

En pratique, on emploie deux appareils identiques, de façon à permettre leur interchangeabilité, et construits dans le type habituel avec primaire et secondaire répartis sur les deux colonnes (voir : *Construction*).

Les enroulements côté triphasé sont *sandwichés*, c'est-à-dire répartis entre ces deux colonnes (fig. 8), pour obvier aux déséquilibrages. On sort une prise médiane entre les deux colonnes et on ne l'utilise que sur l'un des appareils. Puis on prévoit sur chaque colonne des prises éliminant 15 % des spires, et utilisées seulement sur l'autre appareil.

Enfin, comme cela se fait sur tous les transformateurs, on prévoit (en haut et en bas de chaque colonne, pour simplifier ici les connexions) une prise à + 5 % et une à - 5 %, pour le réglage de la tension secondaire ou l'adaptation à la tension primaire.

Les extrémités des bobinages et les différentes prises sont reliées aux bornes d'après le schéma de la figure 9.

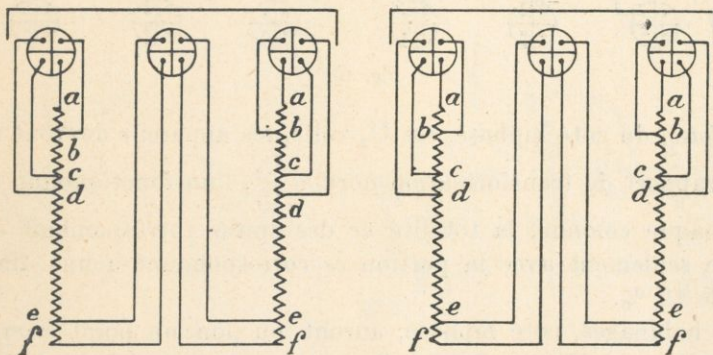


Fig. 9.

On voit aisément que, pour les diverses combinaisons possibles, les portions de bobinages correspondantes s'adaptent à des tensions qui sont respectivement les suivantes :

Parties de bobinages utilisées sur chaque colonne

De a à e  
De a à f  
De b à e  
De c à e  
De c à f  
De d à e

Tension

Tension normale entre fils U  
U + 5 %  
U - 5 %  
U - 15 %  
(U - 15 %) + 5 %  
(U - 15 %) - 5 %

Les figures 10 *a*, 10 *b* et 10 *c* donnent les couplages à réaliser entre bornes pour obtenir la marche respectivement pour la tension normale (*a*), et les prises + 5 % (*b*) et - 5 % (*c*).

La détermination d'un groupe Scott de  $P$  kVA à  $f$  périodes par seconde se ramène à celle de deux transformateurs monophasés de  $\frac{P}{2}$  kVA à la même fréquence, et comportant deux colonnes bobinées, avec prises spéciales et sandwichage.

Si la tension *entre fils*, du côté triphasé, est  $U_1$  volts, et si la tension

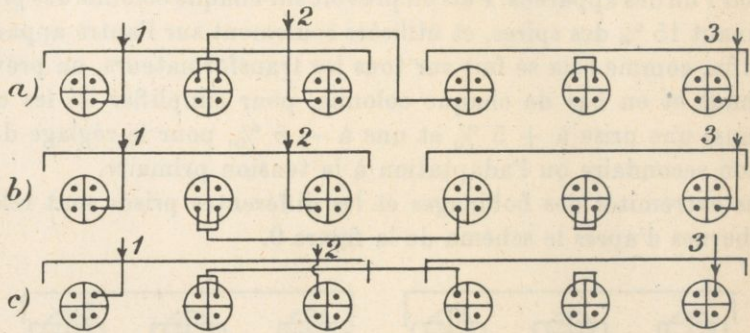


Fig. 10.

*par phase*, du côté biphasé, est  $U_2$  volts, les appareils devront avoir pour rapport de transformation normal  $\frac{U_2}{U_1}$ , l'un fonctionnant avec, sur chaque colonne, la totalité *ae* des spires correspondant à  $U_1$ , l'autre seulement avec la portion *ce* correspondant à une diminution de 15 %.

Les bobinages, côté biphasé, auront ou non un point commun, suivant le mode de distribution (le point commun permettant de disposer de la tension  $U_2\sqrt{2}$ ). Ils seront évidemment répartis sur les deux colonnes, mais sans prises ni sandwichage.

*f) Transformateurs spéciaux.* — Voir chapitre VIII.

## CHAPITRE III

### THÉORIE SOMMAIRE ET CARACTÉRISTIQUES DE FONCTIONNEMENT

a) **Flux et inductances.** — Une tension alternative, appliquée aux bornes du bobinage primaire (des bobinages, dans le cas d'un appareil polyphasé), engendre un flux magnétique alternatif et de même fréquence que la tension. Ce flux induit à son tour une force électromotrice alternative et de même fréquence dans le circuit secondaire, et

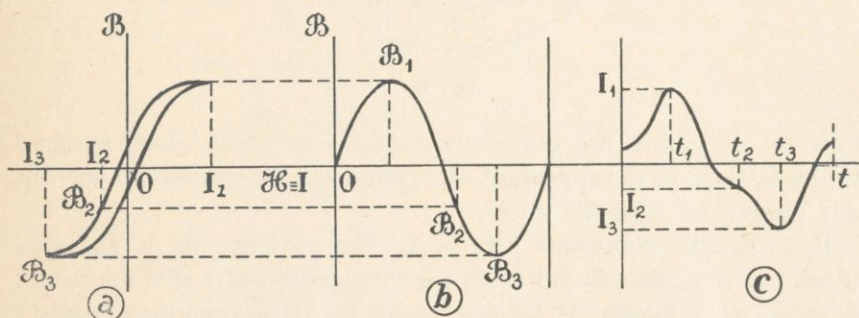


Fig. 11. — a) Cycle d'hystérésis donnant le champ, d'où le courant  $I$ , en fonction de l'induction  $\mathcal{B}$ .

b) Variation sinusoïdale de l'induction  $\mathcal{B}$  en fonction du temps  $t$ .

c) Variation du courant  $I$  en fonction du temps  $t$  (Courbe obtenue par élimination de  $\mathcal{B}$  entre les courbes a et b).

ce dernier, fermé sur un réseau extérieur, y débite un courant alternatif — ou, du moins approximativement : en effet, le circuit magnétique d'un transformateur ne comporte pas d'entrefer comme celui d'une machine tournante (du moins en négligeant en première approximation des joints d'assemblage de l'ordre du dixième de millimètre). Il en résulte une déformation de la courbe sinusoïdale,



due à la *saturation* du circuit ; cette déformation est d'ailleurs d'autant plus sensible que l'induction est plus élevée <sup>(1)</sup> (fig. 11).

Les courants primaire et secondaire donnent lieu à deux forces magnétomotrices dont la résultante produit dans le noyau un flux d'induction. La majeure partie de ce flux passe dans le noyau : le reste se ferme par l'air et constitue le *flux de fuites* (ou de *dispersion*), cause essentielle de la *chute de tension* en charge.

Adoptons les notations suivantes (fig. 12), exprimant toutes, pour

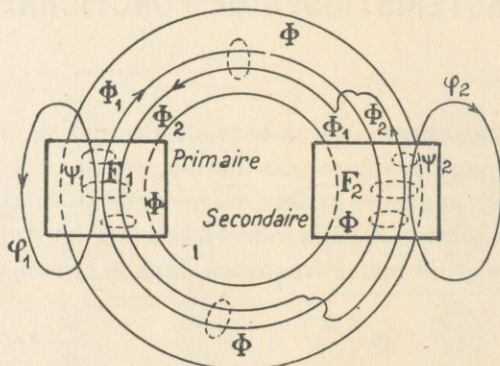


Fig. 12.

l'instant du moins, des grandeurs évaluées en unités électromagnétiques C. G. S, et se rapportant au primaire ou au secondaire suivant que l'indice est 1 ou 2 :

$F_1$  et  $F_2$ , flux résultants ;  $\Psi_1$  et  $\Psi_2$ , flux totaux ;  $\Phi_1$  et  $\Phi_2$ , flux utiles ;  $\varphi_1$  et  $\varphi_2$ , flux de fuites <sup>(2)</sup> ;  $\nu_1$  et  $\nu_2$ , coefficients d'Hopkinson ;  $\mathcal{L}_1$  et  $\mathcal{L}_2$ , self-inductances totales ;  $L_1$  et  $L_2$ , self-inductances utiles ;  $l_1$  et  $l_2$ , self-inductances de fuites ;  $n_1$  et  $n_2$ , nombres de spires ;  $I_1$  et  $I_2$  courants maximum ;  $U_1$  et  $U_2$ , tensions maximum ;  $m = \frac{n_1}{n_2}$  ;  $\Omega = 2\pi f$ , pulsation ( $f$ , fréquence) ;  $\mathcal{R}$ , réluctance du circuit magnétique ;  $I_0$ , courant magnétisant ;  $\Phi$ , flux résultant dans le circuit (ou flux magnétisant) ;  $\mathcal{M}$ , inductance mutuelle ;  $\sigma$ , coefficient de dispersion ;  $\lambda$ , inductance de fuites rapportée au primaire.

<sup>(1)</sup> On ne dépasse jamais, pour ce motif, les inductions de 15 000 et même 14 500 gauss.

<sup>(2)</sup> Les valeurs considérées pour les flux alternatifs sont toujours des valeurs *maxima*. De même, d'ailleurs, pour les inductions.

On a, entre les flux, les relations *vectérielles* suivantes :

$$\begin{aligned}\vec{\Phi} &= \vec{\Phi}_1 + \vec{\Phi}_2; \\ \vec{F}_1 &= \vec{\Psi}_1 + \vec{\Phi}_2 = \nu_1 \vec{\Phi}_1 + \vec{\Phi}_2 = \vec{\Phi} + \vec{\varphi}_1, \\ \vec{F}_2 &= \vec{\Psi}_2 + \vec{\Phi}_1 = \nu_2 \vec{\Phi}_2 + \vec{\Phi}_1 = \vec{\Phi} + \vec{\varphi}_2.\end{aligned}$$

Puis, entre les flux d'une part, et de l'autre entre flux et inductions, les relations *algébriques* :

$$\begin{aligned}\Psi_1 &= \Phi_1 + \varphi_1 = \nu_1 \Phi_1, & \Psi_2 &= \Phi_2 + \varphi_2 = \nu_2 \Phi_2; \\ \varphi_1 &= (\nu_1 - 1)\Phi_1, & \varphi_2 &= (\nu_2 - 1)\Phi_2; \\ \mathcal{Q}_1 &= \frac{n_1 \Psi_1}{I_1}, & L_1 &= \frac{n_1 \Phi_1}{I_1}, & \mathcal{Q}_1 &= \nu_1 L_1 \quad (\text{Idem pour 2}); \\ l_1 &= \frac{n_1 \varphi_1}{I_1} = (\nu_1 - 1)L_1 = \frac{\nu_1 - 1}{\nu_1} \mathcal{Q}_1, & \mathcal{Q}_1 &= L_1 + l_1 \quad (\text{Id. pour 2}); \\ & \lambda &= l_1 + l_2 m^2;\end{aligned}$$

$$\mathbb{M} = \frac{n_1 \Phi_1}{I_1} = \frac{n_2 \Phi_2}{I_2}, \quad \mathbb{M}^2 = n_1 n_2 \frac{\Phi_1 \Phi_2}{I_1 I_2},$$

$$\mathbb{M}^2 = L_1 L_2 = \frac{\mathcal{Q}_1 \mathcal{Q}_2}{\nu_1 \nu_2} = (\mathcal{Q}_1 - l_1)(\mathcal{Q}_1 - l_2),$$

$$\mathbb{M}^2 = (\mathcal{Q}_1 - \lambda)\mathcal{Q}_2 = \mathcal{Q}_1 \mathcal{Q}_2 - \lambda \mathcal{Q}_2,$$

$$\lambda = \frac{\mathcal{Q}_1 \mathcal{Q}_2 - \mathbb{M}^2}{\mathcal{Q}_2} = \frac{\mathcal{Q}_1 \mathcal{Q}_2 - \frac{\mathcal{Q}_1 \mathcal{Q}_2}{\nu_1 \nu_2}}{\mathcal{Q}_2};$$

$$\sigma = \frac{\mathcal{Q}_1 \mathcal{Q}_2 - \mathbb{M}^2}{\mathcal{Q}_1 \mathcal{Q}_2}, \quad \sigma = 1 - \frac{1}{\nu_1 \nu_2}, \quad \lambda = \sigma \mathcal{Q}_1;$$

$$\Psi_1 = \frac{4\pi n_1 I_1}{\mathfrak{R}}, \quad \Psi_2 = \frac{4\pi n_2 I_2}{\mathfrak{R}},$$

$$\mathfrak{R} = \frac{4\pi n_1 I_0}{\Phi} = \text{Cte} \quad \text{pour :} \quad U_1 = \text{Cte}, \quad \text{car :} \quad \Phi = \frac{U_1}{n_1 \Omega} = \text{Cte}.$$

$$\mathcal{Q}_1 = \frac{n_1 \Psi_1}{I_1} = \frac{4\pi n_1^2}{\mathfrak{R}} = \text{Cte}, \quad \mathcal{Q}_2 = \frac{n_2 \Psi_2}{I_2} = \frac{4\pi n_2^2}{\mathfrak{R}} = \text{Cte}.$$

Vectériellement :  $\vec{n}_1 \vec{I}_1 + \vec{n}_2 \vec{I}_2 = \vec{n}_1 \vec{I}_0 = \text{Cte.}$  (Induction constante.)

En négligeant  $n_1 I_0$ , on a, *algébriquement* :

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{n_1}{n_2} = m.$$

$\frac{1}{m}$  mesure le rapport de transformation à vide, si l'on néglige la chute de tension due à la résistance primaire :

$$\frac{1}{m} = \frac{U_2}{U_1}, \quad \text{ou:} \quad m = \frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}.$$

b) **Diagramme de fonctionnement.** — Soit un transformateur débitant au secondaire un courant de valeur efficace  $I_2$  ampères sous une tension efficace  $U_2$  volts et un facteur de puissance  $\cos \varphi_2$  (Pour un appareil triphasé, les tensions sont mesurées entre fils, et les f. e. m., ainsi que les chutes dues aux résistances et aux selfs, ramenées à cette mesure, d'après le couplage des enroulements). Le diagramme permet de déterminer en grandeur et en phase <sup>(1)</sup> les valeurs primaires correspondantes.

Soient  $R_1$  et  $R_2$  les résistances des bobinages en ohms ;  $l_1\Omega$  et  $l_2\Omega$  leurs réactances de fuites en ohms.

En partant de l'égalité vectorielle donnant la force électromotrice :

$$\vec{E}_2 = \vec{U}_2 + \vec{R}_2\vec{I}_2 + \vec{l}_2\Omega\vec{I}_2, \quad (1)$$

et de la relation :

$$\Phi = \frac{E_2 \sqrt{2}}{2\pi f n_2} \cdot 10^8 \text{ maxwells}, \quad (2)$$

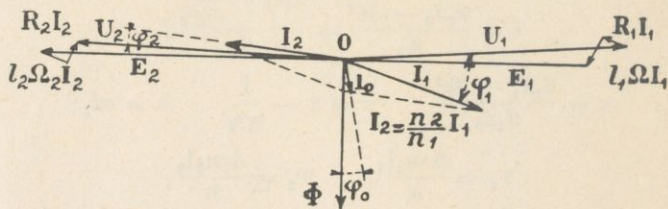


Fig. 13.

on détermine en grandeur et en phase le flux maximum  $\vec{\Phi}$ , en avance de  $\frac{\pi}{2}$  sur  $\vec{E}_2$  (fig. 13).

On détermine de même la tension primaire  $U_1$ , qui se déduit de la

<sup>(1)</sup> Rappelons qu'on doit dire : le *déphasage*, et non le *décalage*, de vecteurs représentant des grandeurs sinusoïdales. *Décalage* est réservé à l'*espace* ; un *déphasage* est au contraire un décalage dans le *temps*.

force électromotrice primaire  $E_1 = \frac{n_1}{n_2} E_2$  (en quadrature avant sur le flux).

Le courant primaire se déduit de l'égalité vectorielle :

$$\vec{I}_1 = \vec{I}_0 - \frac{\vec{n}_2}{n_1} I_1, \quad (3)$$

$\vec{I}_0$  étant le courant efficace à vide, défini en grandeur et en direction comme la résultante de deux courants en quadrature :

$\vec{I}_r$ , courant efficace magnétisant (ou réactif), en phase avec  $\Phi$  et nécessaire à sa production, déterminé par la courbe d'aimantation du circuit magnétique et les dimensions de celui-ci ;

$\vec{I}_a$ , courant efficace actif, en phase avec  $E_1$ , et nécessaire pour vaincre les pertes dans le fer ( $I_a = \frac{\text{Pertes fer}}{U_1}$  en monophasé ;  $\frac{\text{Pertes fer}}{\sqrt{3}U_1}$

en triphasé).

Ces deux courants se déterminent facilement par le calcul d'après les qualités de tôles.

Le courant  $\vec{I}_0$  fait avec le flux  $\vec{\Phi}$  un angle  $\varphi_0$  tel que :

$$\text{tg } \varphi_0 = \frac{I_a}{I_r}.$$

La tension primaire se déduit de l'égalité vectorielle :

$$\vec{U}_1 = \vec{E}_1 + \vec{R}_1 I_1 + \vec{l}_1 \omega I_1,$$

et fait connaître, en même temps, le déphasage primaire  $\varphi_1$ , le facteur de puissance  $\cos \varphi_1$ , et le rendement.

Le facteur de puissance primaire est toujours très voisin de celui du secondaire, mais toujours aussi un peu inférieur, d'une quantité sensiblement égale à 0,4 ( $a + b$ ) centièmes,  $a$  et  $b$  étant respectivement le courant à vide et la tension de court-circuit, en centièmes du courant et de la tension primaires (Règle de Bergeon et Bunet).  $a$  et  $b$  étant tous deux de l'ordre de 10 %, la quantité en question est de l'ordre de 8 %.

c) **Rapport de transformation.** — Le rapport de la tension effi-

TABLA DES MATIÈRES

Introduction ..... 1

Chapitre I. — Des principes de la géométrie ..... 15

Chapitre II. — Des propriétés des figures planes ..... 35

Chapitre III. — Des propriétés des figures solides ..... 65

Chapitre IV. — Des propriétés des courbes ..... 95

Chapitre V. — Des propriétés des surfaces courbes ..... 125

Chapitre VI. — Des propriétés des corps solides ..... 155

Chapitre VII. — Des propriétés des fluides ..... 185

Chapitre VIII. — Des propriétés des machines ..... 215

Chapitre IX. — Des propriétés des machines à vapeur ..... 245

Chapitre X. — Des propriétés des machines à feu ..... 275

Chapitre XI. — Des propriétés des machines à eau ..... 305

Chapitre XII. — Des propriétés des machines à vent ..... 335

Chapitre XIII. — Des propriétés des machines à cheval ..... 365

Chapitre XIV. — Des propriétés des machines à bras ..... 395

Chapitre XV. — Des propriétés des machines à vapeur ..... 425

Chapitre XVI. — Des propriétés des machines à feu ..... 455

Chapitre XVII. — Des propriétés des machines à eau ..... 485

Chapitre XVIII. — Des propriétés des machines à vent ..... 515

Chapitre XIX. — Des propriétés des machines à cheval ..... 545

Chapitre XX. — Des propriétés des machines à bras ..... 575



Participant d'une démarche de transmission de fictions ou de savoirs rendus difficiles d'accès par le temps, cette édition numérique redonne vie à une œuvre existant jusqu'alors uniquement sur un support imprimé, conformément à la loi n° 2012-287 du 1<sup>er</sup> mars 2012 relative à l'exploitation des Livres Indisponibles du XX<sup>e</sup> siècle.

Cette édition numérique a été réalisée à partir d'un support physique parfois ancien conservé au sein des collections de la Bibliothèque nationale de France, notamment au titre du dépôt légal. Elle peut donc reproduire, au-delà du texte lui-même, des éléments propres à l'exemplaire qui a servi à la numérisation.

Cette édition numérique a été fabriquée par la société FeniXX au format PDF.

La couverture reproduit celle du livre original conservé au sein des collections de la Bibliothèque nationale de France, notamment au titre du dépôt légal.

\*

La société FeniXX diffuse cette édition numérique en accord avec l'éditeur du livre original, qui dispose d'une licence exclusive confiée par la Sofia – Société Française des Intérêts des Auteurs de l'Écrit – dans le cadre de la loi n° 2012-287 du 1<sup>er</sup> mars 2012.

Avec le soutien du

