



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Machine électriques

Réf. :

Présenté et soutenu par :
BAKROUNE Ayoub Sabar
BOUDERHEM Youcef

Le :

Techniques de bobinage des stators des machines à courant alternatif

Jury :

Mme	SAADI Aicha	MCA	Université d'appartenance	Président
M.	TITAOUINE Abdennacer	Pr	Université d'appartenance	Rapporteur
M.	KRAA Okba	MCA	Université d'appartenance	Examineur

Année universitaire : 2021 - 2022

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique Filière
: Electrotechnique
Option : Machine électriques

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Thème

Techniques de bobinage des stators des machines à courant alternatif

Présenté par :

BAKROUNE Ayoub Sabar

BOUDERHEM Youcef

Avis favorable de l'encadreur :

Pr. TITAOUINE Abdennacer

Signature avis favorable du Président du Jury :

Mr. SAADI Aicha

Cachet et signature

Dédicaces

Je dédie ce travail

À mes très chers parents que Dieu les bénissent

À mes sœurs

À mes adorables neveux et nièces

À toute ma famille

À tous mes amis

Ayoub sabar

Dédicaces

Au propriétaire d'une biographie parfumée et d'une pensée éclairée, car il a eu le premier crédit pour mon éducation supérieure. Mon père bien-aimé, que Dieu prolonge sa vie.

A celle qui m'a mis sur le chemin de la vie, m'a calmé et a pris soin de moi jusqu'à ce que je devienne vieux, ma chère mère, que Dieu bénisse son âme.

A mes frères, qui ont eu un grand impact dans de nombreux obstacles et difficultés, à tous mes chers professeurs, qui n'ont pas hésité à me tendre la main.

À mes amis et à tous ceux qui m'ont soutenu et m'ont aidé avec tout ce qu'ils avaient et de bien des façons.

Je vous présente cette recherche, et j'espère qu'elle vous satisfera

Youssef

Remerciements

Nous premiers remerciements s'adressant au DIEU de nous avoir de donné la foi, la volonté, la patience et le courage pour terminer ce travail.

Nous tenons à remercier profondément notre encadreur, Monsieur le professeur TITAOUINE Abdennacer., pour nous avoir guidé tout au long de la réalisation de ce travail, de nous avoir apporté des connaissances, pour sa patience et ses conseils.

Notre remerciements sont adressés également au madame SAADI Aicha pour avoir accepté de présider le jury. Et au Monsieur KRAA Okba pour avoir accepté de faire partie du jury.

Nous voudrions également exprimer nos vifs remerciements à Monsieur Toufik abdellaoui pour son aide et ses encouragements.

Ceux et celles que nous avons oublié de mentionner, excusent cette inattention de hâte.

ملخص

نظرا لما تتميز به المحركات التيار المتناوب ثلاثية الطور (متزامن و غير متزامن) من خصائص المتمثلة في المتانة وكفاءة والإستطاعة الكتلية, فإنها أصبحت شيأ فشيأ الأكثر إستعمالا في ميدان الجر الكهربائي و إنتاج الطاقة مقارنة بمحركات التيار المستمر و بالتالي فإن صيانتها أصبح يلعب دورا إقتصاديا فعالا.

نقدم في هذا الموضوع بعض الدراسات المتعلقة بملفات محرك التيار المتردد حاولنا أيضا دمج بعض العناصر التي تشكل طريقة التشغيل تكنولوجيا لتطوير حلول لف الجزء الثابت. بسبب تنوع هذه التقنيات و هناك الكثير من التعقيد فيه ، ونحن مهتمون بتحليل بعض هذه الأساليب ، بالإضافة إلى الحاجة إلى أساليب اللف الفنية ، من أجل الحصول على أداء جيد على المدى الطويل من أجل الحفاظ على استمرارية خدمات سلسلة الإنتاج.

كلمات البحث: محركات التيار المتناوب - اللفائف الكهربائية لآلة التيار المتناوب - تقنية اللف

Résumé

En raison des caractéristiques des moteurs triphasés à courant alternatif (synchrones et asynchrones) en termes de durabilité, de rendement et de capacité massique, ils sont progressivement devenus de plus en plus utilisés dans le domaine de l'entraînement électrique et de la production d'énergie par rapport aux moteurs à courant continu, et donc leur entretien est devenu un rôle économique efficace.

Dans cette rubrique, nous présentons quelques études d'enroulements de moteurs à courant alternatif. Nous avons également essayé d'incorporer certains éléments qui composent la technologie du mode de fonctionnement pour développer des solutions d'enroulement de stator. Du fait de la diversité de ces techniques et de leur grande complexité, nous nous intéressons à analyser certaines de ces méthodes, en plus du besoin de méthodes techniques de bobinage, afin d'obtenir de bonnes performances sur le long terme afin de maintenir la continuité des services de la chaîne de production.

Mots-clés : Moteurs à courant alternatif - Bobinages électriques machine à courant alternatif - Technique de bobinage

Abstract

Three-phase AC motors (synchronous and asynchronous) are increasingly being employed in the field of electrical drive systems and power generation due to their durability, efficiency, and mass capacity. Maintenance has become a cost-effective job for AC motors as compared to DC motors.

In this topic, we present some studies of AC motor windings and we have tried to incorporate some of the elements that make up the operating mode technology to develop stator-winding solutions. Due to the great diversity and complexity of these techniques, we are interested in analyzing some of these methods, as well as the need for technical filling methods, in order to have good long-term performance in order to maintain continuity services.

Keywords: AC motors - Electric windings AC machine - Winding technology

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES
LISTE DES TABLEAUX
LISTE DES SYMBOLES

Introduction générale	2
<i>Chapitre I : généralité sur les machines tournantes à courant alternatif</i>	
I.1 Bref histoire sur les machines électriques	5
I.2 Introduction	6
I.3 Les machines asynchrones.....	7
I.4 les machines synchrones.....	10
I.5 Constitution des machines tournantes à courant alternatif	12
I.6 Défauts des Machines Electriques tournantes	19
I.6.1 Aperçu sur les enroulements des machines électriques dans l'industrie électrotechnique	20
I.6.2 Arbre des causes de défaillances des bobinages statorique	20
I.6.3 Défauts statoriques.....	21
I.7 Conclusion	22
<i>Chapitre II : Etude des enroulements à courant alternatif</i>	
II.1 Introduction	24
II.2 Bobinage imbriqué	24
II.3 Bobinage ondulé	24
II.4 Représentation des enroulements à courant alternatif	25
II.4.1 Bobines concentriques reliée en série	26
II.4.2 Bobines identiques reliées en série	26
II.4.3 Bobinage à pas diamétral	26
II.4.4 Bobinage à pas raccourci	27
II.4.5 Bobinage à pas allongé.....	27
II.4.6 Coefficient de bobinage kb.....	28
II.4.7 Couplage des bobines	28
II.5 Exécution des schémas de bobinage	29

II.6 Réalisation des schéma de bobinage	30
II.6.1 Bobinage des stators triphasé	30
II.6.2 Enroulement Monophasé.....	37
II.7 Conclusion	38
<i><u>Chapitre III : Bobinage des stators à deux polarités</u></i>	
III.1 Généralité	40
III.2 Moteurs à deux vitesses et un seul bobinage	41
III.3 Couplage du bobinage à deux vitesses	42
III.3.1 Couplage à couple constant	43
III.3.2 Couplage à puissance constante	43
III.4 Moteurs à deux enroulements distincts	44
III.4.1 Méthode de réalisation de bobinage du stator	44
III.5 Changement des caractéristiques du bobinage d'un stator	45
III.5.1 Transposition ou la puissance reste la même et/ou la tension seule change	46
III.5.2 Transposition ou la puissance change et la tension reste la même.....	49
III.5.3 Transposition à tension variable et à puissance variable	50
III.6 Conclusion	51
<i><u>Chapitre IV : Calculs simplifiés des paramètres de bobinage et réalisation pratique</u></i>	
IV.1 Introduction.....	53
IV.1 Calcul simplifiés du bobinage.....	53
IV. 2.1 Les dimensions principales.....	53
1. Le nombre de pair de pôles	53
2. La hauteur préalable de l'axe de rotation.....	53
3. A) Le diamètre extérieur D_a	54
B) Le diamètre intérieure.....	54
4. Le pas polaire	54
5. La puissance de calcul(électromagnétique)	54
6. Les charges électromagnétiques	54
7. Les valeurs préalables de α_i , b et kb_1	54
8. La longueur de calcul de l'entrefer	54

9. Le rapport λ	55
IV. 2.2 Paramètres d'enroulement statoriques.....	55
10. Le pas dentaire	55
11. Le nombre d'encoche possible.....	55
12. Le pas dentaire	55
13. Le nombre des conducteurs efficaces préalables pour $a=1$	56
14. Le nombre de spires d'une phase.....	56
15. La charge linéaire	56
B) Le flux magnétique	56
16. L'induction magnétique	56
17. La section du fil efficace.....	57
18. La densité du courant	57
IV 3. Les schémas de bobinage.....	58
IV.4 Conclusion.....	59
Conclusion générale.....	61
Bibliographie	63

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Généralités sur les machines tournantes à courant alternatif

Fig. I.1 Machine de gamme	5
Fig. I.2 Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone	7
Fig. I.3 Principe de fonctionnement d'un moteur monophasé	9
Fig. I.4 Condensateur	10
Fig. I.5 Principe de fonctionnement d'un alternateur triphasé	11
Fig. I.6 Typique d'une machine asynchrone triphasée	12
Fig. I.7 Carcasse d'une machine tournante à courant alternatif	13
Fig. I.8 Rotors pour machines à courant alternatif	14
Fig. I.9 Stator d'une machine tournante	14
Fig. I.10 Différents types de toles magnétiques	15
Fig. I.11 Circuit magnétique après assemblage des toles magnétiques	16
Fig. I.12 Enroulement statorique	17
Fig. I.13 Plaque à borne d'un moteur triphasé	18
Fig. I.14 Plaque signalétique d'un moteur asynchrone	19
Fig. I.15 Arbre des causes de défaillance des bobinages statoriques	21
Fig. I.16 Différents types de court-circuit dans le stator	22

Chapitre II : Etude des enroulements à courant alternatif

Fig. II.1 Enroulement imbriqué de deux bobines en série	24
Fig. II.2 Enroulement ondulé de deux bobines en série	25
Fig. II.3 Bobine concentrique reliées en série	26
Fig. II.4 Bobine identique ou "section" reliées en série	26
Fig. II.5 Angle géométrique et électrique pour une machine à 4 pôles	28
Fig. II.6 Représentation de deux types de bobinage nodule (a: progressif/b: rétrograde)	29
Fig. II.7 Enroulement à une couche	30
Fig. II.8 Etoile de phase	31
Fig. II.9 Bobinage d'une machine asynchrone, 4 pôles à nombre d'entier d'encoche	32
Fig. II.10 Bobinage semi régulier à pas diamétral, 30 encoches 4 pôles	33
Fig. II.11 Schéma de bobinage d'un stator, 6 pôles, 39 encoches, 36 bobinés et 3 vides	34
Fig. II.12 Bobinage imbriqué d'un stator de 24 encoches à deux vitesses	36
Fig. II.13 Schéma de bobinage du stator d'un moteur asynchrone monophasé 36 enc	38

Chapitre III : *Bobinage des stators a deux polarités*

Fig III.1 Schéma de bobinage d'une machine à deux vitesses	40
Fig III.2 Schéma de bobinage à double faisceaux 2/4 poles	41
Fig III.3 Schéma de couplage utilises pour les moteurs à deux vitesses	42
Fig III.4 Couplage à puissance constant d'un stator 2/4 poles , 24encoches	44
Fig III.5 Schéma de bobinage d'un moteur à deux vitesses, à 2 enroulements	45

Chapitre IV : *Calculs simplifiés des paramètres de bobinage et réalisation pratique*

Fig IV.1 Schéma de bobinage Enroulment par poles (triplan)	58
Fig IV.2 Shcéma de bobinage Enroilment par conséquant (bipan)	58

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre III: Bobinage des stators a deux polarités

Tab. III.1 Tableau des diamètres des fils destines au bobinage des machines électriques 51

Chapitre IV: Calculs simplifiés des paramètres de bobinage et réalisation pratique

Tab. IV.2 Tableau de fiche bobineur 53

LISTE DES SYMBOLES

Ω_s	vitesse synchrone de rotation du champ tournant en rad.s-1.
W	pulsation des courants alternatifs en rad.s-1. $w = 2.p.f$
P	nombre de paires de poles
n_s	vitesse de rotation de synchronisme du champ tournant (tr.s-1).
n_r	vitesse de rotation du rotor (tr.s-1).
Z	nombre d'encoche
2P	nombre de pôles
m	nombre de phase
q	nombre d'encoche par pole et par phase
Z	nombre d'encoches statorique
D_s	diamètre intérieure statorique (mm)
L_s	longueur du circuit magnétique statatorique (mm)
S_e	surface d'encoche (mm ²)
W_b	nombre de spire dans une bobine
B	induction (T)
K_b	coefficient de bobinage
D	diamètre de file nu (mm)
D	diamètre de file isolé (mm)
N	rendement (%)
g	glissement (%)
P_u	puissance utile (W)
P_a	puissance absorber (W)
U	tension (Volts)
I	intensité (Amp)
f	la fréquence (HZ)
B	induction magnétique dans l'entrefer (T)
K_r	coefficient de remplissage
S_e	surface d'encoche (mm ²)
Y	Le pas polaire
N	Le nombre de conducteurs
Δ	Couplage en triang

γ	couplage en étoile
Θ	écart angulaire entre phases
qp	nombre d'encoche par pôle et par phase d'enroulement principale
qA	nombre d'encoche par pôle et par phase d'enroulement principale à facteur de remplissage
R	résistance ohmique du stator par phase
Pc	poids de cuivre
H	hauteur préalable de l'axe de rotation (mm)
D	diamètre extérieur (mm)
P'	puissance de calcul
A	charge linéaire
Bg	entraînée l'entrefer
Lc	longueur de calcul de l'entrefer
λ	rapport
t ₁	le pas dentaire
U'en	nombre de conducteurs efficaces
W1	nombre de paires d'une phase
Φ	FLUX magnétique [wb]
J1	densité de courant (A/mm)

Introduction

INTRODUCTION GENERALE

L'une des disciplines les plus anciennes dans le vaste domaine de l'électrotechnique est la conception de machines électriques. En fait, les premières tentatives de construction de machines électriques ont commencé avec la découverte du phénomène d'induction et la reconnaissance des forces générées par l'interaction des champs électromagnétiques et des courants conducteurs.

Actuellement, les moteurs électriques à courant alternatif triphasé jouent un rôle important dans la vie professionnelle et sont un composant essentiel de toute centrale électrique ou installation industrielle. De plus, les domaines d'application des moteurs électriques sont très larges, de sorte que le développement de divers domaines est diversifié. Stratégique, où l'on cite dans ce cas : l'aéronautique, la robotique, certains mécanismes, les industries de haute précision, la traction ferroviaire, la propulsion électrique marine, le pompage, la ventilation, les machines-outils, le nucléaire, etc. Ces machines peuvent être affectées par des défauts entraînant des dommages au moteur et la cellule de production soumise à un arrêt partiel ou complet de toute la chaîne pendant un certain temps, ainsi qu'à un arrêt complet.

Le but de l'affectation à un moteur est de convertir l'énergie d'une forme à une autre, dont au moins un est de nature électrique. Cette transformation électromagnétique dépend fortement du bobinage, du type, de la qualité de l'isolation, du processus d'encoche et de toutes les opérations intermédiaires. Présence sur les bobinages. Prenant l'exemple d'un filon de charbon ou de poussière de 1 mm d'épaisseur provoquant une « surchauffe », les statistiques de plusieurs entreprises pour améliorer la fiabilité des moteurs montrent que 70 % des pannes ou des arrêts sont causés par les bobinages.

Compte tenu de l'importance des ateliers de réparation qui ont un impact direct sur la production, nous avons abordé des sujets brûlants comme l'étude et l'analyse des enroulements de stators dans les machines à courant alternatif, ainsi que leurs techniques de placement, qui permettront d'améliorer la fiabilité des performances du moteur en fonction de la puissance disponible et du débit du processus. En conséquence.

Ce travail de mémoire est structuré en quatre chapitres pour réaliser cette étude.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les brefs historiques sur les machines électriques, les différents types des machines électrique a courant alternatif, leurs classements et leurs principes de fonctionnement ainsi que leurs constitutions et la plaque signalétique. Nous présenterons les principaux défauts qui pouvons effectuer les machines électriques : surtout

l'accent sur défauts des éléments communs aux moteurs à courant alternatif, à savoir les défauts statorique

Dans le deuxième chapitre, nous sommes passés à l'étude des différents types de bobinages que l'on trouve sur le stator des machines à courant alternatif, et à la multiplicité des manières de répartir le bobinage dans les encoches ainsi qu'aux différentes connexions entre les bobinages (série, parallèle)

Dans le troisième chapitre est consacré à l'étude simplifiée de bobinage des stators à deux polarités, ainsi que les différentes transpositions.

Dans le dernier chapitre, nous présentons des procédures visant les calculs homologués pour le rebobinage des stators des machines tournantes à courant alternatif. Ce qui se rencontre au stator des machines synchrones et asynchrones.

Finalement, on va clôturer ce mémoire par une conclusion générale, Faisant ressortir l'intérêt de ce travail ainsi que les techniques utilisées et Normes relatives du travail effectué

CHAPITRE I
GENERALITES SUR LES
MACHINES
TOURNANTES A
COURANT ALTERNATIF

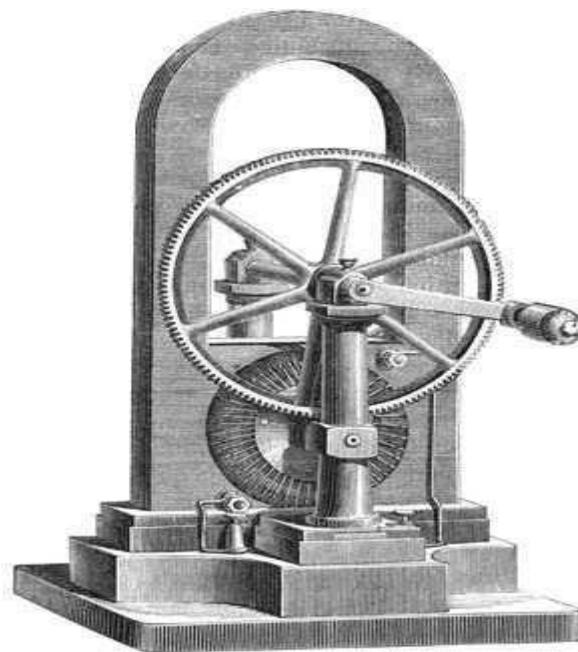
Chapitre I : Généralité sur les machines tournantes à courant alternatif

I.1 Bref historique sur les machines électriques

Avant de nous étaler aussi longuement que nous le souhaitons sur la machine synchrone, il convient de faire un petit détour sur les prémices de cette machine combien importante et intéressante dans notre vie de tous les jours.

Nous pouvons affirmer sans trop nous tromper que l'histoire des machines électriques débute avec le professeur Pacinotti (1841-1912) qui effectua des travaux sur un anneau tournant dans un champ magnétique. Dans cette expérience, bien que restée au stade expérimental, il a envisagé une utilisation en mode générateur et moteur. Cependant certaines voix se sont levées pour réfuter cette théorie car l'effet magnétique du courant électrique a été découvert un peu plus tôt par Oersted en 1820 et l'induction magnétique par Faraday en 1831.

En 1869, le belge Zénobie Gramme réalisa les premières génératrices à courant continu en imaginant le collecteur. Ses travaux furent présentés à l'Académie des Sciences de Paris et cette première machine a reçu le nom de machine de Gramme dont une photo est donnée par la (Fig. I.1).



Collection Ecole polytechnique

Fig. I. 1 : Machine de Gramme

En 1887 Nikola Tesla (1856-1943), ingénieur yougoslave en électronique, né en Croatie, fonde une société de construction d'alternateurs. Grâce à ses travaux, le courant alternatif va gagner la bataille du transport à distance et son utilisation va se trouver profondément bouleversée. C'est ainsi que la première expérience de transport d'électricité s'est faite dans les années 1890 vers l'Allemagne sur une distance de 175 km avec un rendement de 75 %. Tesla préconise d'abord l'utilisation des courants polyphasés et réussit à créer un champ magnétique tournant qui permet d'entraîner en rotation une armature mobile tournante. L'invention du moteur asynchrone à courant triphasé à cage d'écureuil intervient en 1889 grâce à l'électricien Russe Michail Ossipowitsch Doliwo-Doborwolski.

Cette machine ne sera construite industriellement que deux ans plus tard. La paternité de cette invention est contestée et souvent attribuée à Tesla, ainsi avant le début du vingtième siècle la plupart des machines électriques que nous connaissons actuellement avaient été mises en œuvre ou leur principe avait été déjà posé [1].

Les machines synchrones, asynchrones et à collecteur constituent l'essentiel du parc des machines électriques depuis un siècle et demi. Cependant, le domaine des machines électriques n'est pas resté figé. Depuis la découverte du transistor en 1948 et du thyristor en 1958, des progrès immenses ont été effectués dans ce domaine conduisant à d'importants développements théoriques et technologiques. Au-delà de leur conception qui est quasi standardisée, il convient de savoir dans quelle mesure ces machines peuvent être exploitées au meilleur de leurs performances. Cela passe non seulement par une meilleure connaissance du système mais surtout par une élaboration de lois de commande adaptées.

I.2 Introduction

Les machines à courant alternatif (synchrone, asynchrone...etc.) ne posent pas de telles limitations, d'où coût moindre, elles sont robustes et pouvant supporter de très fortes puissances et de très hautes vitesses, le moteur asynchrone est le moteur le plus utilisé dans l'ensemble des applications industrielles, du fait de sa facilité de mise en œuvre, de son faible encombrement, son bon rendement et de son excellente fiabilité. Son seul point noir est l'énergie réactive, toujours consommée pour magnétiser l'entrefer.

Dans ce chapitre, on présentera des généralités sur la construction des machines asynchrone, synchrone triphasés, son principe de fonctionnement et ses différentes constitutions ainsi que les causes principales d'endommagement d'une machine à courant alternatif.

I.3 Les machines asynchrones

I.3.1 Moteurs asynchrones triphasés

Le moteur asynchrone triphasé est basé sur la production d'un champ tournant qui produit par trois bobinages fixes géométriquement décalés de **120°**, et parcourus par des courants statoriques alternatifs présentant le même décalage électrique, les trois champs alternatifs qu'ils produisent se composent pour former un champ tournant d'amplitude constante comme il est présenté dans la (figure. I.2)

La fréquence de rotation n_s se mesure à l'aide d'un tachymètre. La valeur de

$$n_s = \frac{60}{p} f \tag{I.1}$$

Est imposée pour le moteur par la fréquence f (Hz) du réseau [2].

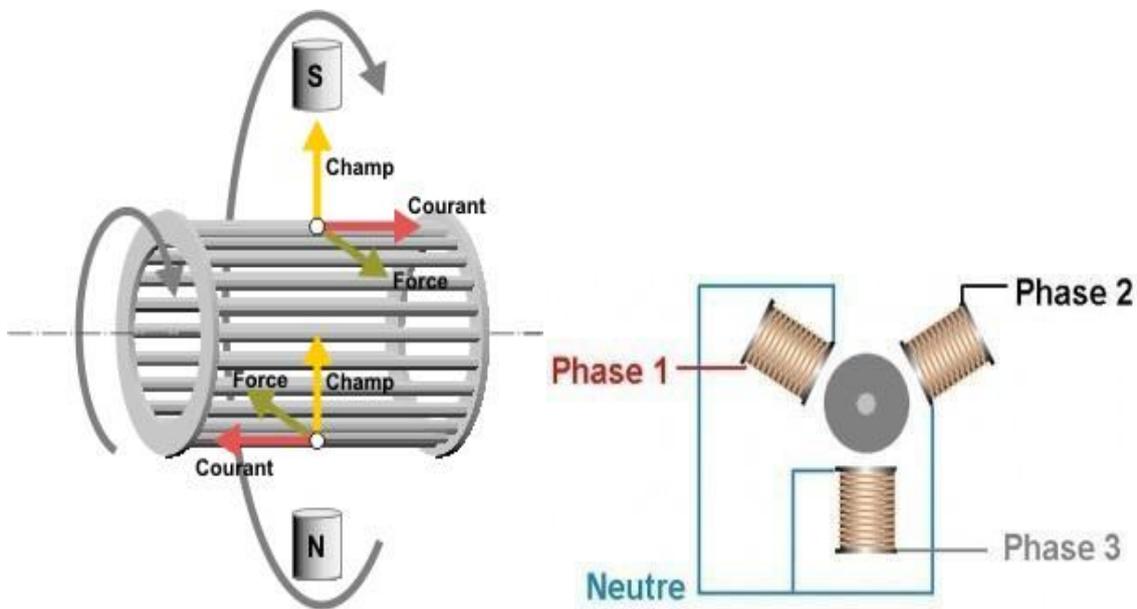


Fig. I. 2 : principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone

$$\begin{aligned}
 P = 1 \quad n_s &= 60 \frac{50}{1} = 3000 \text{tr/min} & (I.2) \\
 P = 2 \quad n_s &= 60 \frac{50}{2} = 1500 \text{tr/min}
 \end{aligned}$$

$$P = 3 \quad ns = 60 \frac{50}{3} = 1000 \text{ tr/min}$$

Un rotor de moteur asynchrone ne tourne donc jamais à la vitesse de synchronisme ns . Pour un moteur à une paire de pôles (à 50 Hz, la vitesse de rotation du champ tournant (ns) est de 3000 [tr/min]), la vitesse de rotation du rotor (nr) peut être de 2950 [tr/min] par exemple ; intervient ici la notion de glissement g .

I.3.1.1 Glissement

Le glissement est la différence entre la vitesse synchrone et la vitesse du rotor et il correspond à l'équation suivante :

$$n = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} = \frac{ns - nr}{ns} \quad (I.3)$$

Le glissement s'exprime aussi en pourcentage :

$$g \times 100\%$$

Quand :

- $g = 0$ pas de couple $nr = ns$
- $g < 0$ la machine fonctionne en génératrice pour ($nr > ns$).
- $g > 0$ fonctionnement en moteur ($nr < ns$).

- $g = 1$ la machine est à l'arrêt ($nr = 0$). Rendement : $\eta = \frac{P_u}{P_1}$

(I.4)

Le rotor des moteurs asynchrones triphasés peut être de deux types :

- A cage d'écurueil
- Bobiné.

Les moteurs asynchrones à rotor bobiné permettent de limiter le courant de démarrage et d'augmenter le couple de démarrage, la vitesse de rotation d'un moteur à rotor bobiné peut être contrôlée à l'aide d'un rhéostat extérieur. Les moteurs sont classés en fonction de leurs conditions d'utilisation en fonction de leurs indices de protection **IP** et **IK** de même qu'en fonction de leurs caractéristiques électriques. Les moteurs asynchrones triphasés cumulent de multiples avantages, ils sont **simples, robustes et faciles d'entretien**. Toutes ces raisons

expliquent leur popularité en milieu industriel, leurs applications sont nombreuses, on les retrouve, par exemple dans :

- Les pompes
- les convoyeurs
- les élévateurs
- les palans, etc.

I.3.2 Moteurs asynchrones monophasés

Principe de fonctionnement Considérons un stator comprenant deux enroulements raccordés sur le réseau d'alimentation L1 et N, le courant alternatif monophasé engendre dans le rotor un champ alternatif simple H qui est la superposition de deux champs tournants H1 et H2 de même valeur et de sens contraires.

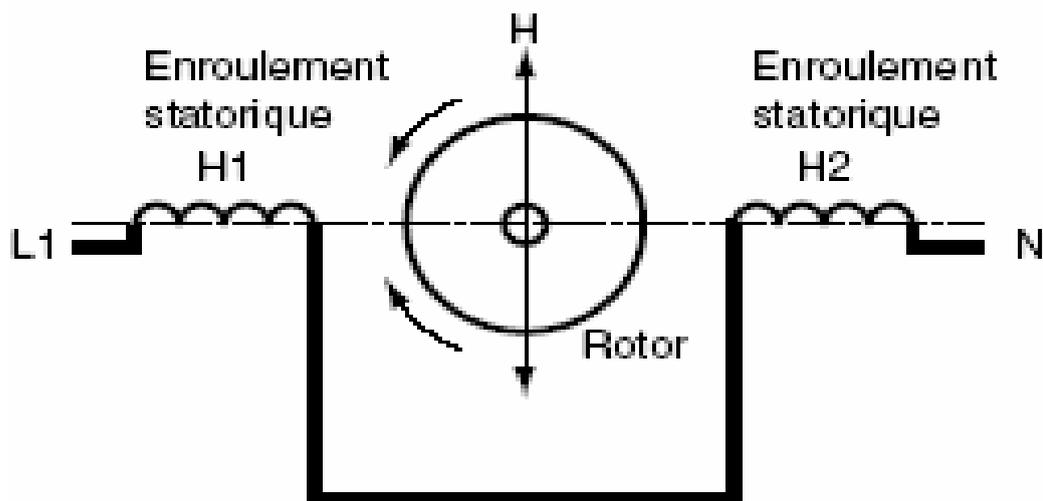


Fig. I.3 : Principe de fonctionnement moteur monophasé

A l'arrêt, le stator étant alimenté, ces champs présentent le même glissement par rapport au rotor et produisent par conséquent deux couples égaux et opposés, le moteur ne peut démarrer. afin de résoudre ce problème de couple lors de la phase de démarrage, dans le système le plus courant, un deuxième bobinage décalé de 90° est inséré dans le stator. Cette phase auxiliaire est alimentée par un artifice de déphasage (condensateur ou inductance); une fois le démarrage effectué la phase auxiliaire peut être supprimée [2].



Fig. I. 4 : Condensateur

Le moteur asynchrone monophasé, bien que moins utilisé dans l'industrie que son homologue triphasé, représente néanmoins une part d'applications non négligeable dans les petites puissances et dans les applications du bâtiment qui utilisent le réseau monophasé 230 V.

I.4 Les machines synchrones

Une machine synchrone est une machine électrique qui : On peut classer les machines synchrones d'après le mode de construction utilisé pour la fabrication des rotors, mais quelque soit le type utilisé, sa vitesse est constante ($n_s = \text{constante}$).

1- Soit produit un courant électrique (I) dont la fréquence (f) est déterminée par la vitesse de rotation du rotor n_r donc fonctionnement en (**génératrice**) dans deux quadrants du plan couple-vitesse. L'alternateur est une application particulière de la machine synchrone, fonctionnant en génératrice dans un seul quadrant du plan couple-vitesse.

Donc l'alternateur est une machine tournante qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. L'alternateur s'appellera également générateur de courant électrique alternatif, le mot alternatif est donc à l'origine de son appellation « alternateur ».

Les génératrices de courant alternatif (alternateurs) produisent du courant monophasé ou triphasé principalement (le diphasé et l'héxaphasé ne seront pas évoqués ici) à la fréquence de 50 ou 60Hz.

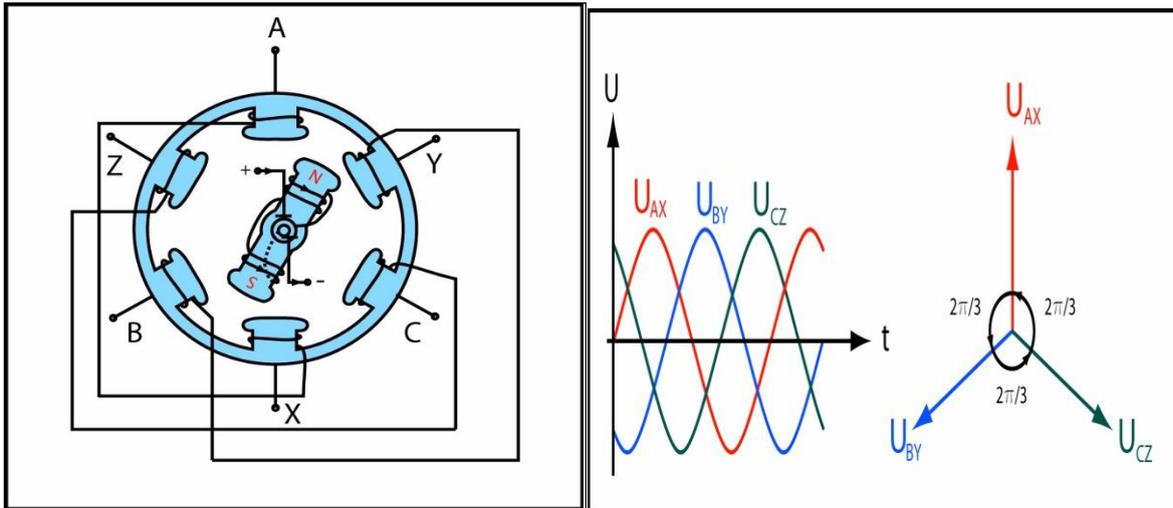


Fig. I.5 : Principe de fonctionnement d'un alternateur triphasé

- 2- Soit absorbe un courant électrique dont la fréquence détermine la vitesse de rotation du rotor : fonctionnement (moteur).
- 3- les moteurs synchrones ont une vitesse rigoureusement constante qui dépend du nombre de pôles (**2p**) qu'ils possèdent et de la fréquence du courant au quel ils sont branchés [3].

$$n_s = (f / p) \times 60 = tr/mn \tag{I.5}$$

f: fréquence du courant du réseau (50Hz)

p : nombre de paires de pôles de l'inducteur (rotor) Exemple :

Un moteur bipolaire tourne à :

$$n_s = (f / p) \times 60 = (50/1) \times 60 = 3000 tr/mn$$

Un moteur à six pôles tourne à :

$$n_s = (f / p) \times 60 = (50/3) \times 60 = 1000 tr/mn$$

Parmi ces avantages :

- La vitesse du moteur est constante, quelle que soit la charge
- Il peut fournir de la puissance réactive et permettre d'améliorer le facteur de puissance d'une installation. Il est effectivement employé à cette fin dans des installations ayant un pauvre $\cos \varphi$ (beaucoup de charge inductive).
- Il peut supporter sans décrocher des chutes de tension relativement importantes (de l'ordre de 50 % en raison de ses possibilités de surexcitation).

I.5 Constitution des machines tournantes à courant alternatif

Dans cette partie, nous présentons les éléments constitutifs des principales machines électriques industrielles, un **alternateur** tout comme un **moteur** est constitué d'un **stator**, d'un **rotor** et de **paliers**, l'arbre servant d'organe de transmission, le stator comprend une **carcasse** dans laquelle est monté le **circuit magnétique avec son bobinage**.

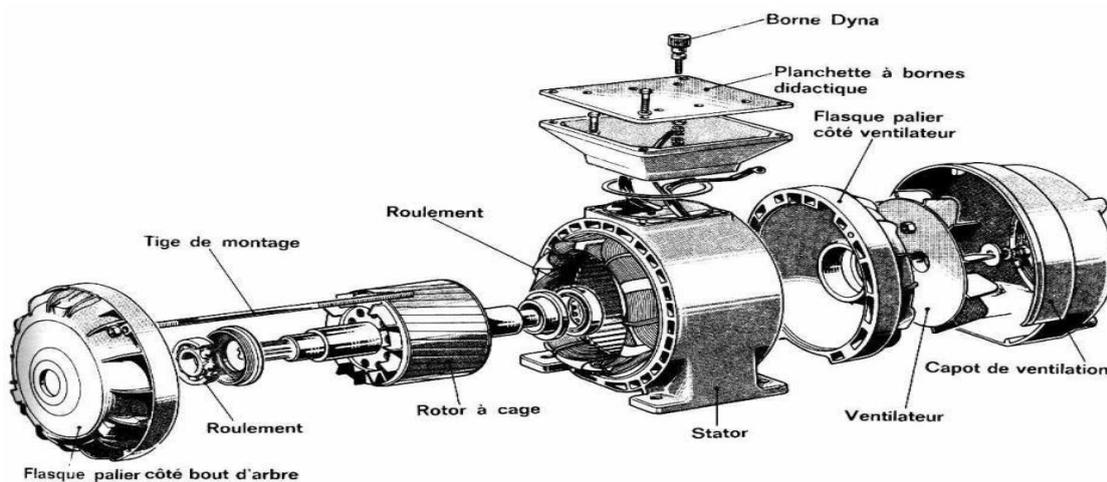


Fig. I. 6 : Typique d'une machine asynchrone triphasée

I.5.1 Carcasse

La carcasse sert de support, transmet les efforts à l'assise de la machine, joue le rôle d'enveloppe, assure la protection contre les agents extérieurs et guide l'air de ventilation ; elle agit aussi parfois comme échangeur thermique ; c'est le cas des carcasses coulées des moteurs à ailettes ou des moteurs fermés à tubes, dans certains cas, comme dans les machines à courant continu et dans l'alternateur inversé, la carcasse peut aussi servir de circuit magnétique



Fig. I.7 : Carcasse d'une machine tournante à courant alternatif

I.5.2 Rotor

Le rotor en électrotechnique est la partie mobile, par rapport au stator, des machines électriques tournantes : machine à courant continu, machine synchrone, machine asynchrone, etc. le rotor peut être un aimant qui lors de sa rotation induit un champ électrique dans les enroulements du stator du générateur/alternateur. Dans un moteur électrique, le courant passant dans les enroulements du rotor provoque un champ magnétique qui réagit avec celui permanent du stator pour faire tourner l'axe central.

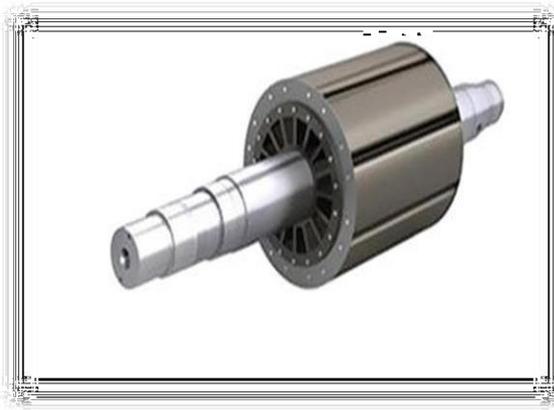


PHOTO A



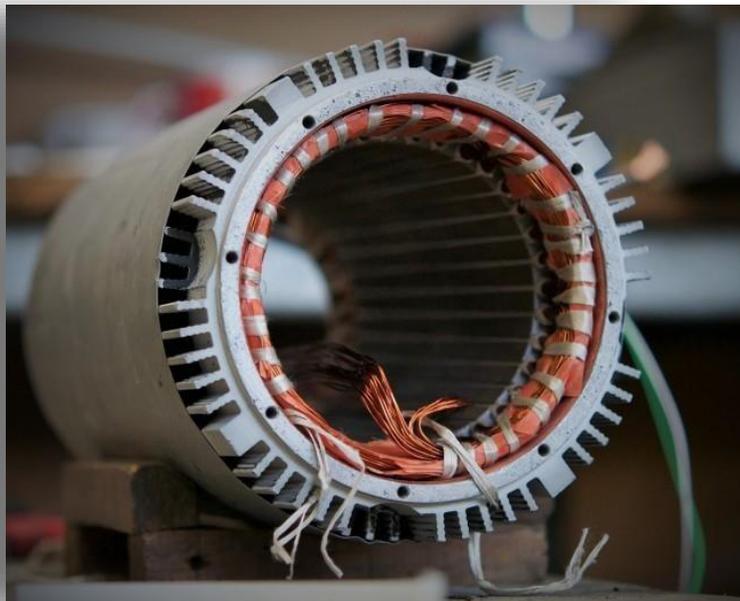
PHOTO B

Fig. I. 8 : Rotors d'une machine a courant alternatif

(Rotor à pôles saillant pour machine synchrone A, Rotor cage pour moteur asynchrone B)

I.5.3 Stator

Le stator d'une machine électrique est la partie stationnaire d'un moteur électrique ou d'un alternateur. Selon la configuration de la machine, le stator peut créer un champ magnétique qui par interaction avec le champ magnétique rotorique produit le couple électromécanique. Le stator peut être constitué d'aimants permanents ou d'électroaimants.

**Fig. I. 9 :** Stator d'une machine tournante.

I.5.4 Circuit magnétique

Le couple C développé dans une machine électrique est proportionnel au produit du flux magnétique Φ par le courant induit I ; il est exprimé par la relation :

$$C = k I \Phi \quad (\text{I.6})$$

Il existe donc deux constituants principaux pour la partie active d'une machine :

- ✚ un ensemble de conducteurs chargé de véhiculer les courants ;
- ✚ Un circuit magnétique, dont les fonctions principales sont :
 - ✓ la canalisation des lignes d'induction magnétiques,
 - ✓ le maintien des conducteurs,
 - ✓ la conduction thermique des conducteurs vers les zones de refroidissement (canaux de ventilation, entrefer).
- Le circuit magnétique doit donc présenter à la fois des propriétés magnétiques, des caractéristiques mécaniques déterminées et une bonne conductivité thermique.
- Les circuits magnétiques des stators des machines électriques alternatives peuvent être réalisés dans la carcasse ou être autoporteuse et rapportés en carcasse.

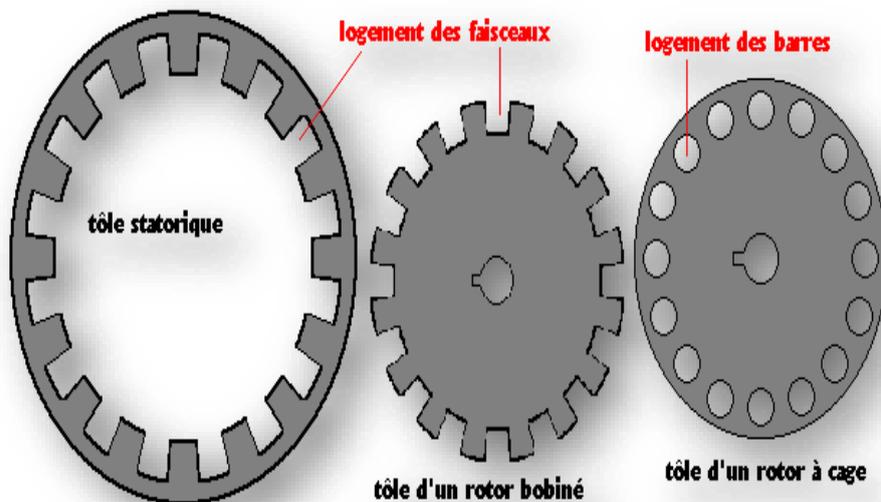


Fig. I. 10 : Différents types de tôles magnétiques

- Les circuits magnétiques des stators des machines électriques alternatives peuvent être réalisés dans la carcasse ou être autoporteuse et rapportés en carcasse.

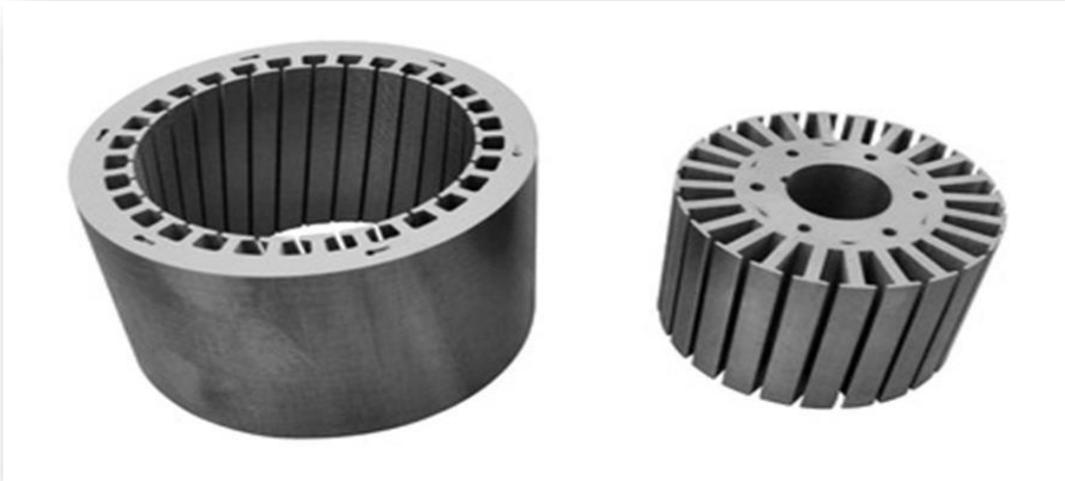


Fig. I. 11 : Circuit magnétique après assemblage des tôles magnétiques

I.5.5 Enroulements

Les enroulements servent à véhiculer les courants électriques à l'intérieur de la machine, on distingue principalement les enroulements inducteurs, les enroulements d'induit et les enroulements des machines asynchrones. En majeure partie, dans le circuit magnétique en traversant l'entrefer, et qui constitue le flux utile, accessoirement, dans les encoches, où se trouvent les conducteurs rectilignes d'aller et de retour du courant, ainsi que dans l'air, de part et d'autre du fer autour des connexions frontales appelées têtes de bobine ; ces trajets aériens correspondent aux flux de fuite [4].

Les **enroulements inducteurs** transportent les courants nécessaires à la magnétisation de la machine. Ils sont utilisés dans les machines à courant continu, les machines synchrones et dans les moteurs à courant alternatif à collecteur. Ils peuvent être constitués de conducteurs enroulés sur des pôles saillants situés au stator (machines à courant continu) ou au rotor (machines synchrones), mais ils peuvent être, également, constitués de conducteurs formant un bobinage concentrique situé dans des rainures à la périphérie du rotor (machines synchrones à rotor lisse).

Les **enroulements d'induit** sont constitués de conducteurs répartis dans des encoches à la périphérie du stator (machines synchrones) ou à la périphérie du rotor (machines à courant continu).



Fig. I. 12 : Enroulement statorique

Les **enroulements des machines asynchrones** sont constitués de conducteurs répartis à la périphérie du stator et éventuellement du rotor lorsqu'il est bobiné. Notons qu'il n'y a pas dualité entre enroulement inducteur ou induit et la localisation stator ou rotor.

I.5.6 Couplage de la machine

N'est concerné que le stator, bien entendu puisqu'il n'y a aucune communication avec le rotor, la machine possède des bornes pour effectuer son raccordement sur l'alimentation.

Dans l'exemple de la figure ci-dessus l'on couple les enroulements en triangle pour un réseau triphasé en 220V, et en étoile pour un réseau en 380V.

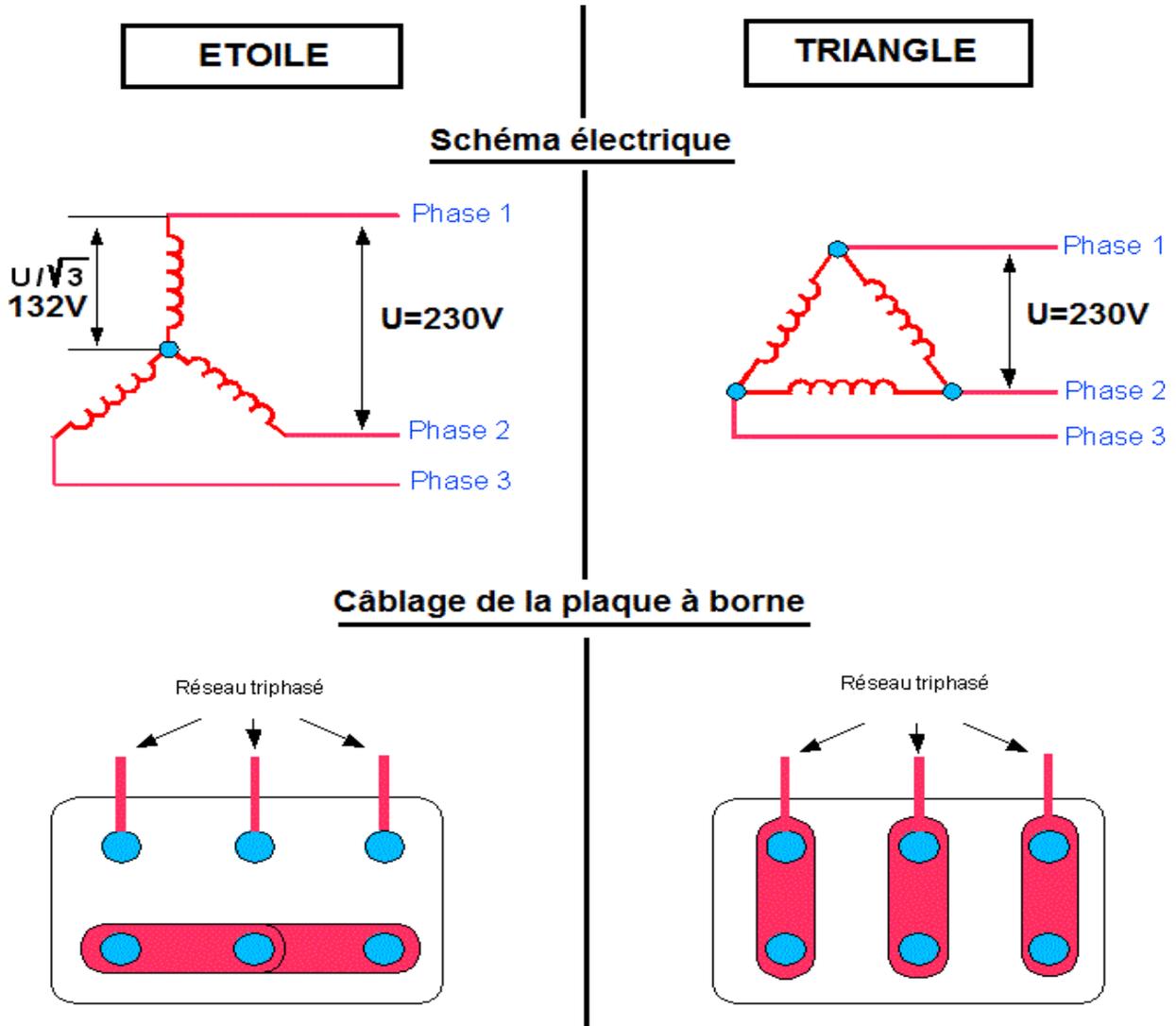


Fig. I. 13 : Plaque à borne d'un moteur triphasé

I.5.7 La plaque signalétique

Elle présente comme une carte d'identité de la machine donnée et confirmée par le constructeur, elle contient toutes les informations nécessaires se retrouvent sur la plaque signalétique comme sur l'exemple ci-après :

LS		LEROY SOMER		MOT. 3~	LS80 L	T
				N° 734570	BJ 002	kg 9
IP 55		I cl.F	40°C	S1		
V	Hz	min ⁻¹	kW	cosφ	A	
Δ 220	50	2780	0,75	0,86	3,3	
Y 380					1,9	
Δ 230	50	2800	0,75	0,83	3,3	
Y 400					1,9	
Δ 240	50	2825	0,75	0,80	3,3	
Y 415					1,9	

MOT. 3~ : moteur triphasé alternatif
LS : série
80 : auteur d'axe
L : Symbole de carter
T : Indice d'impregnation

N° : numéro de série moteur
B : année de production
J : mois de production
002 : N° d'ordre dans la série
kg : masse
IP55 : indice de protection
Icl.F : classe d'isolation F
40°C : température maxi de fonctionnement
V : tension d'alimentation
Hz : fréquence d'alimentation
min⁻¹ : nombre de tours par minute
kW : puissance nominale
cosφ : facteur de puissance
A : intensité nominale
Δ : branchement triangle
Y : branchement étoile

Fig. I. 14 : Plaque signalétique d'un moteur asynchrone

Une plaque signalétique est habituellement placée sur la machine, à un endroit visible, cette plaque contient des informations relatives **aux caractéristiques électriques et mécaniques de la machine**. Il s'agit donc là d'une source d'information très utile pour l'électromécanicien.

I.6 Défauts des Machines Electriques tournantes

La majorité des défaillances du stator et du rotor sont provoquées par une combinaison de contraintes diverses qui agissent sur ces derniers. Pour le stator, ces contraintes peuvent être groupées comme suit [5] :

1. Thermiques : démarrages fréquents, surcharges.
2. Electriques : diélectriques.
3. Mécaniques : défaillances des roulements, coupure des barres du rotor.
4. Environnement : humidité, objets étrangers (poussières).

Pour le rotor, ces contraintes peuvent être regroupées en :

- a) Thermiques
- b) Courant de surcharge
- c) Electromagnétique

- d) Dynamique
- e) Mécanique

Ces contraintes sont le résultat des forces et des conditions suivantes :

- 1) Couple de fonctionnement
- 2) Vibration et couples transitoires
- 4) Forces magnétiques provoquées par la vibration du flux de fuite
- 5) Forces provoquées par excentricité d'entrefer
- 6) Forces centrifuges
- 7) Contrainte thermique provoquée par la différence de température (effet de peau)
- 8) Contrainte thermique provoquée par dilatation.

Suivant le fonctionnement et l'entretien, la durée de vie change d'une machine à une autre.

I.6.1 Aperçu sur les enroulements des machines électriques Dans l'industrie électrotechnique

L'un des problèmes majeurs dans la fabrication des machines électriques reste principalement la mise en encoches des enroulements. Le taux élevé de claquage des conducteurs ronds s'explique par le fait que l'email du conducteur, l'isolation à la masse et entre phases de la machine sont soumis à un nombre significatif de chocs et d'autres actions mécaniques.

Comme résultat, des microfissures apparaissent dans l'isolant, particulièrement entre les spires et les bobines. Celles-ci vont évoluer dans le cas où la machine fonctionne dans des conditions d'humidité, de vibrations, de surtensions de commutation, de forces dynamiques de démarrage et d'inversion. Les enroulements de machines électriques diffèrent par leurs sources d'alimentation à courant alternatif ou à courant continu. De même qu'ils diffèrent par les modes de conversion en machines tournantes ou statiques (transformateurs) [5].

I.6.2 Arbre des causes de défaillance des bobinages statoriques

Les causes d'apparition de la défaillance des enroulements statoriques sont données par l'arbre ci-dessous :

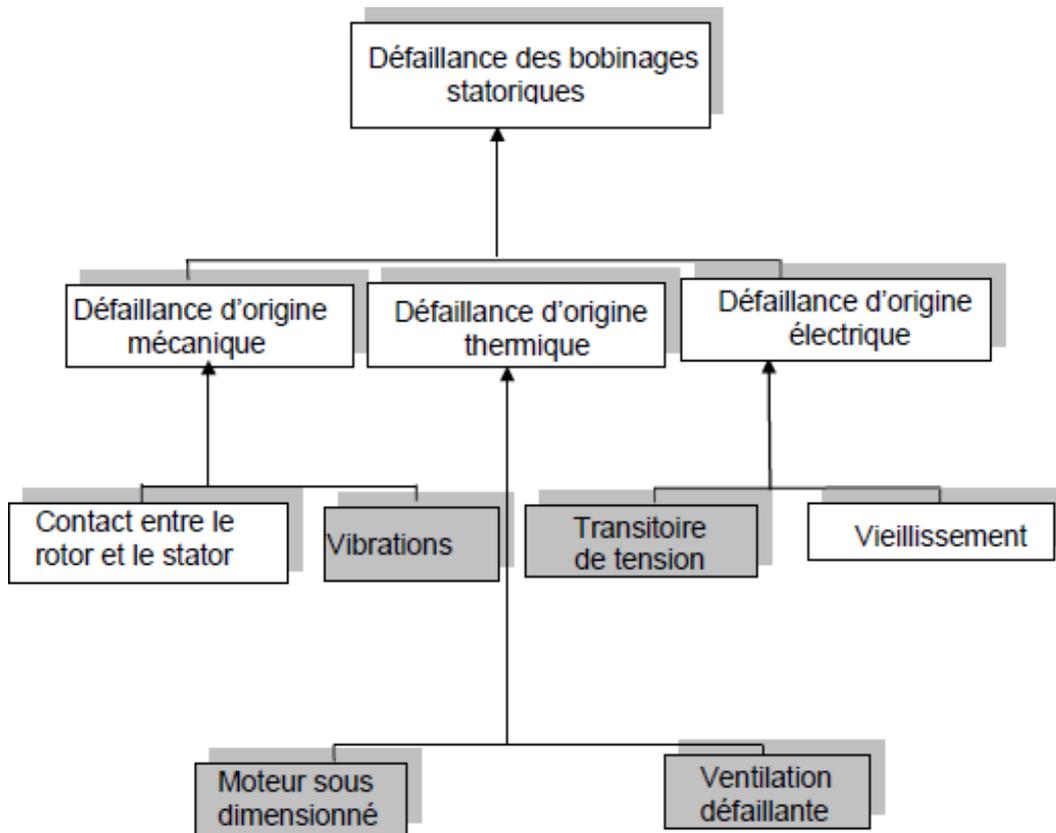


Fig. I. 15 : Arbre des causes de défaillance des bobinages statoriques

I.6.3 Défauts statoriques

Les défauts statoriques se manifestent sous la forme d'un court-circuit inter-spires, d'un court-circuit entre deux phases ou d'un court-circuit entre une phase et la carcasse (figures I.16). Il est schématisé par la connexion franche entre deux points du bobinage. Le court-circuit entre phases apparaît préférentiellement dans les têtes de bobines, puisque c'est dans celles-ci que les conducteurs de phases différentes se côtoient. Le court-circuit entre spires de la même phase peut apparaître soit au niveau des têtes de bobines soit dans les encoches, ce qui entraîne une diminution du nombre de spires effectives de l'enroulement. Un court-circuit entre phases provoquerait un arrêt net de la machine. Cependant, un court-circuit entre une phase et le neutre (via la carcasse) ou entre spires d'une même phase. Il conduit à un déséquilibre de phases, ce qui a une répercussion directe sur le couple.

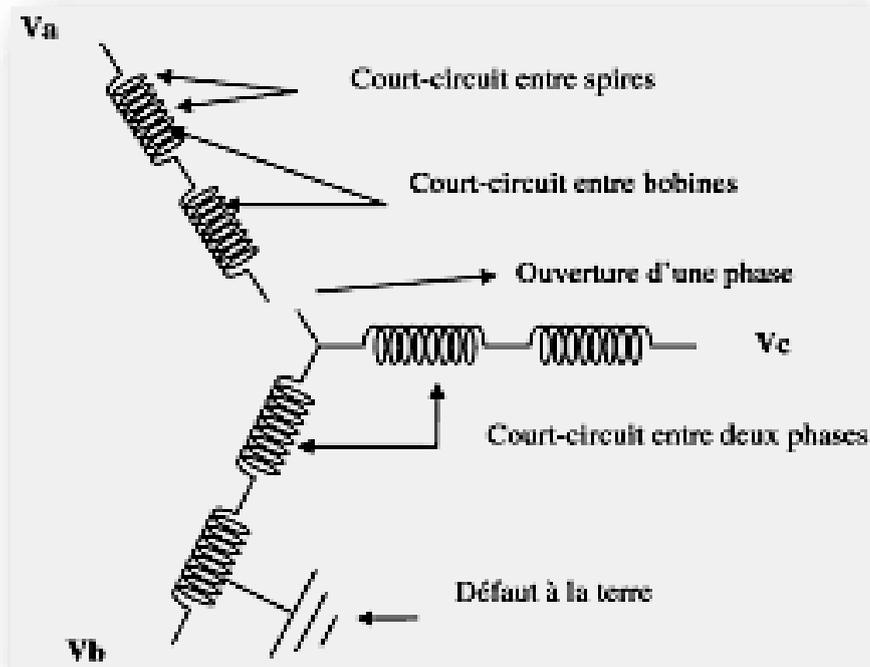


Fig. I. 16 : Différents types de court-circuit dans le stator

I.7 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation des généralités sur des différents types de machines électriques tournantes à courant alternatif et leurs constitutions, après un bref aperçu sur l'histoire des machines électriques, nous nous sommes intéressés aux différentes évolutions technologiques, est le rôle de chaque partie, aussi quelles sont les défauts pouvant survenir dans une machine électrique, qui peuvent être d'origine électrique, mécanique ou magnétique, un des défauts les plus rencontrés étant le court-circuit entre spires qui est souvent dû à la dégradation de l'isolant suite à un échauffement excessif ou un champ électrique fort.

CHAPITRE II
ETUDE DES
ENROULEMENTS A
COURTANT
ALTERNATIF

Chapitre II : Etude des enroulements à courant alternatif

II.1 Introduction

Cette partie qui consiste à mettre en évidence les différents types d'enroulement que l'on rencontre au stator des machines synchrones et asynchrones, est formée par des bobines élémentaires clonées entre elles. Elles sont appelées alors des sections, dans l'enroulement des machines à courant alternatif, une ou plusieurs sections constituent une phase de l'enroulement, les possibilités de distribution du bobinage dans les encoches sont nombreux, le bobinage des stators peut être exécuté sous différentes formes.

II.2 Bobinage imbriqué

Que l'on appelle bobinage à pôles alternés (Fig. II. 1), nécessite une bobine par pôle et par phase, c'est -à-dire autant de bobines que de pôles les liaisons entre groupes sont généralement en série. La sortie du 1^{er} va vers la sortie du 2^{ème}, l'entrée du 2^{ème} vers l'entrée du 3^{ème} et ainside suite [3].

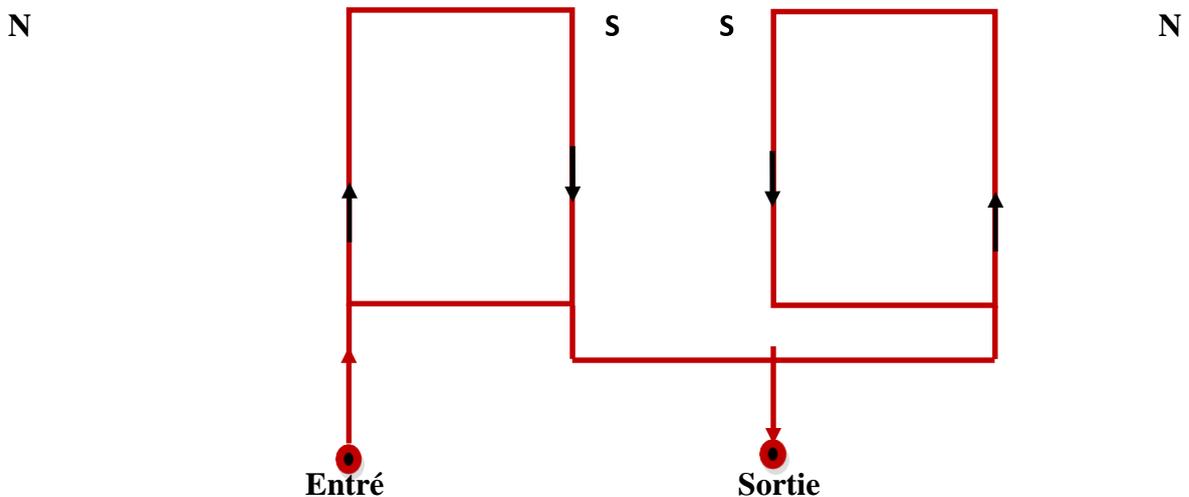


Fig. II. 1 : Enroulement imbriqué de deux bobines en série

II.3 Bobinage ondulé

Désigné sous le nom de bobinage à (pôles consécutifs), comporte une bobine par paire de pôles et par phase, les liaisons entre groupes sont généralement en série. La sortie du 1^{er} va vers l'entrée du 2^{ème} et ainsi de suite (fig. II. 2) [3].

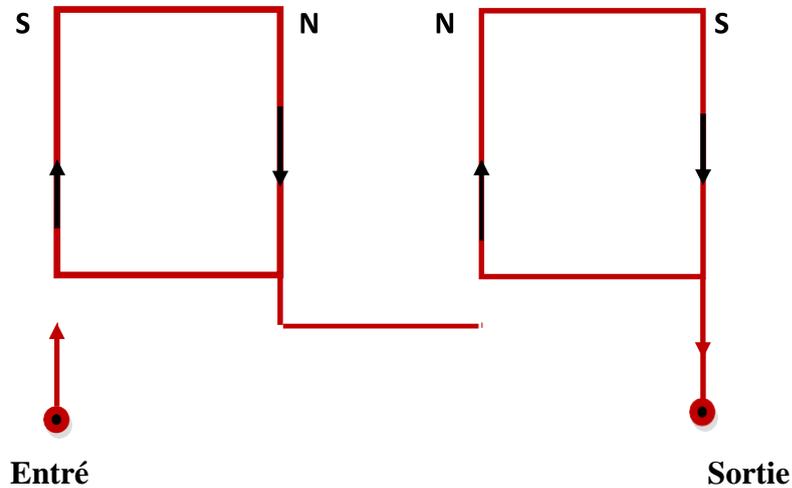


Fig. II. 2 : Enroulement ondulé de deux bobines en série

Un pôle est constitué par une ou plusieurs encoches dont les conducteurs sont parcourus par un courant dirigé dans le même sens. L'indication de pôles **N** et **S** sur un schéma d'initiation à l'étude des enroulements pour courant alternatif est symbolique qui permet de ressortir les lignes neutres et les pôles. Par contre les schémas d'application ne comporte pas la représentation des pôles mes sont déterminés à l'aide des flèches qui indiquent le sens du courant dans les conducteurs du bobinage [3].

II.4 Représentation des enroulements à courant alternatif

Les enroulements électriques sont constitués de groupe de bobine [5]. Le groupe de bobine peut être composé de plusieurs bobines reliées de la façon suivante :

II.4.1 Bobine concentrique reliées en séries.

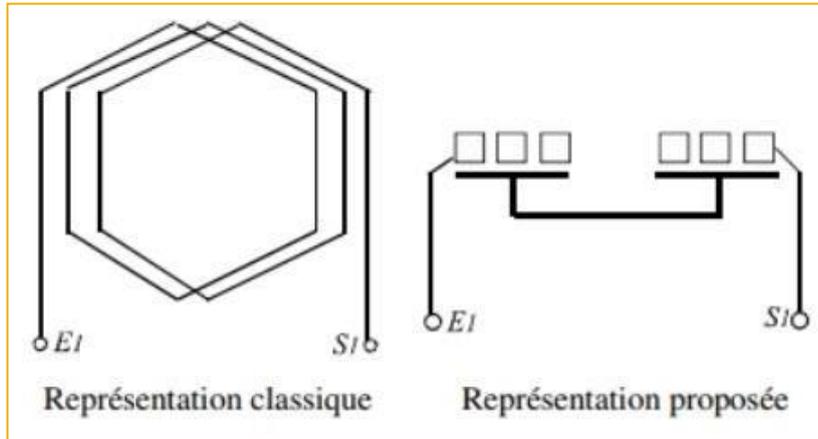


Fig. II. 3 : Bobine concentriques reliées en série

II.4.2 Bobines identiques reliées en série

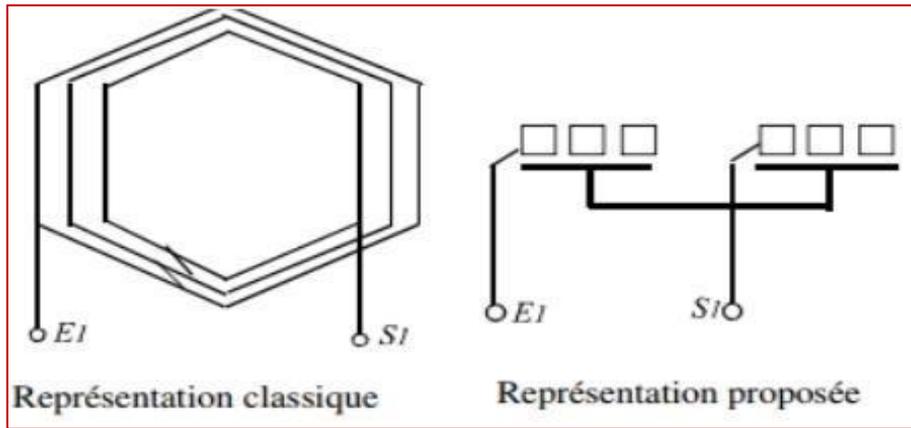


Fig. II. 4 : Bobines identique ou "section" reliées en série

Les bobines d’une machine peuvent être mises en série ou groupées si l’on désire par exemple d’avoir une tension élevée à la sortie d’un alternateur, ou groupées en parallèle ou en série parallèle, ces différents raccordements sont aussi adopté pour les moteurs [3].

Pour réaliser un enroulement on doit déterminer le pas des sections ou des bobines.

II.4.3 Bobinage à pas diamétral

Lorsque les deux faisceaux d’une section séparé d’une distance angulaire γ égale à la distance angulaire entre deux pôles adjacents (ou pas polaire), le bobinage est dit à pas diamétral, ainsi l’ouverture des sections est de 180° électriques si cette distance est exprimée en pas dentaires nous pouvons écrire :

$$Y = \frac{Z}{ZP} \tag{II.1}$$

Le bobinage à pas diamétral se caractérise par le fait que chaque encoche contient des conducteurs n'appartenant qu'à une seule phase [3].

II.4.4 Bobinage à pas raccourci

Le raccourcissement du pas de bobinage consiste à employer des sections avec une ouverture

Y inférieur au pas polaire :

$$Y < \frac{Z}{2P} \quad (\text{II.2})$$

Le raccourcissement du pas réduit les longueurs des têtes de bobines, donc la consommation en cuivre, un enroulement à pas raccourci assure une distribution sinusoïdale de l'induction magnétique dans l'entrefer.

II.4.5 Bobinage à pas allongé

Lorsque le pas d'encoches supérieur au pas diamétral

$$Y > \frac{Z}{2P} \quad (\text{II.3})$$

On a un pas allongé. Les conducteurs soumis à l'influence d'une paire de pôles occupent 360 degrés électriques (Fig. II.6), la distance angulaire électrique d'un pas polaire est de 180° (exemple le bobinage triphasé) chaque phase emploie q d'encoches successives sous un angle électrique de 60°. L'angle α entre deux encoches avoisinantes a une valeur [3] :

$\alpha = 60/q$ degré électrique

q = nombre d'encoches par pôles et phase

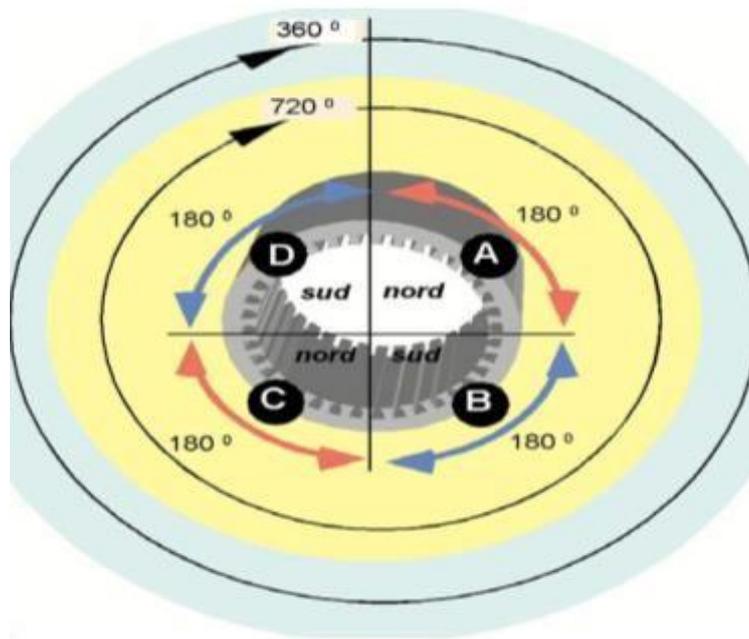


Fig. II. 5 : Angle géométrique et électrique pour une machine à 4 pôles

Dans une machine **bipolaire** 1 degré géométrique = 1 degré électrique. Dans une machine à **4 pôles** 1 degré géométrique = 2 degré électrique.

II.4.6 Coefficient de bobinage k_b

Ce coefficient est nécessaire pour le calcul du flux inducteur dans les machines à courant alternatif, k_b doit être toujours inférieur à 1 ($k_b < 1$). $k_b = 1$ si tous les conducteurs d'un pôle étaient logés dans une seule encoche, il sera plus faible lorsque le nombre d'encoches par pôle et par phase est plus grand [3].

II.4.7 Couplage des bobines

Le couplage peut s'effectuer sous la forme ondulé ou imbriqué, pour le premier cas on peut avoir un enroulement ondulé **progressif** ou un enroulement **rétrograde**, dans le cas progressif les bobines progressent dans le même sens, le deuxième cas si l'inverse une moitié de bobinage progresse dans un sens et l'autre moitié dans le sens inverse (Fig. II. 6) [3].

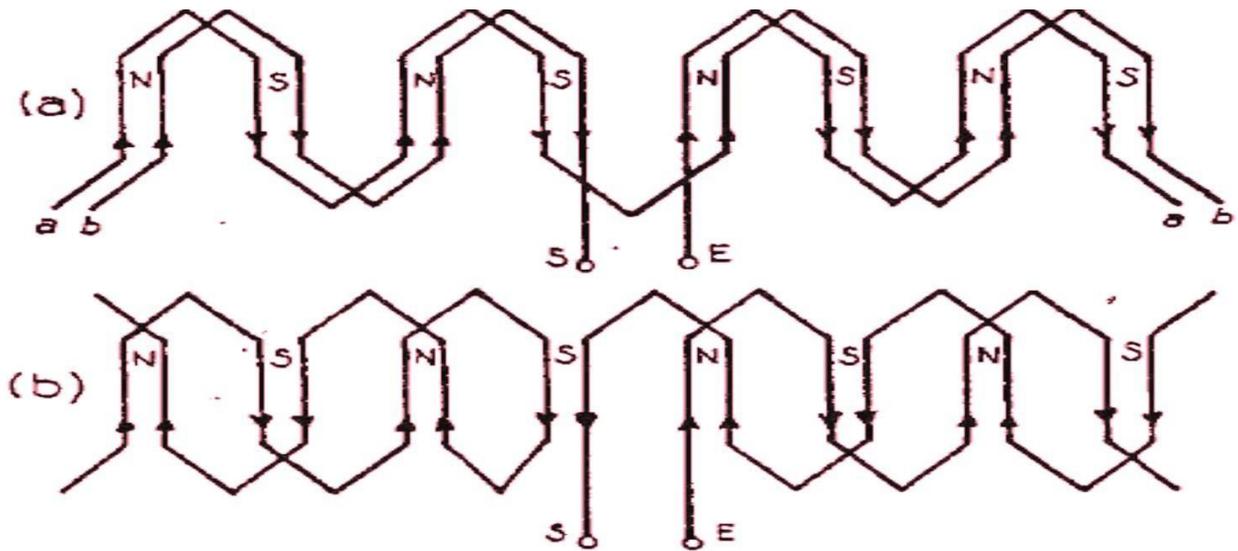


Fig. II. 6 : Représentation de deux types de bobinage ondulé (a: progressif et b : rétrograde) Dans un enroulement polyphasé

On a :

$$Q = \frac{Z}{z_p \times m} \text{ Encoches par pôle et phase [3]} \quad (\text{II.4})$$

II.5 Exécution des schémas de bobinage

Pour l'étude des schémas on peut utiliser les symboles suivants [3] : Z=nombre d'encoche ;

q = nombre d'encoches par pôle et par phase ; m =nombre de phases ;

2p = nombre de pôles ; P = nombre de pair de pôles ;

Y = pas d'enroulement (nombre d'encoches embrassées par une section) ; Kb=coefficient de bobinage ;

Kr = coefficient de raccourcissement ;

α = écart angulaire en degrés électriques, entre deux encoches ; θ = écart angulaire entre phases.

Avant d'exécuter un schéma, on doit déterminer le nombre d'encoches successives occupées par pôles et par phases, ce qui permet de connaître le pas des bobines.

Pour dessiner un bobinage de machine à courant alternatif il importe de connaître les données suivantes [6] :

Le nombre d'encoches du stator (**z**) ;

Le nombre de phases (**m**) ;

Le nombre de faisceaux par encoche.

II.6 Réalisation des schémas de bobinage

II.6.1 Bobinage des stators triphasés

II.6.1.1 Enroulement a une couche

L'enroulement a une couche (Fig. II. 7), est un enroulement dont les côtés actifs des bobines occupent toute l'encoche [7].

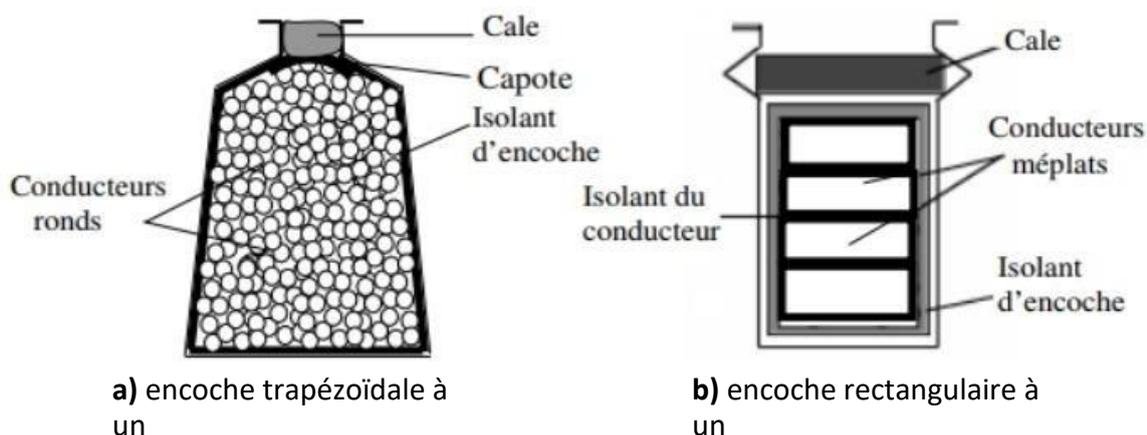


Fig. II. 7 : Enroulement à une couche

L'utilisation de ces enroulements est destinée particulièrement aux machines de faibles puissances (à petits diamètres intérieurs statoriques), et aux machines de grandes puissances quand le nombre de pôles est élevé.

Pour concevoir tout enroulement, il faut tout simplement faire appel au nombre d'encoches par pôle et par phase q et à l'étoile des phases.

Chaque bobine est séparée en deux parties la première représente la tête aller, signe "+", et la deuxième partie représente la tête retour, signe "-". Chaque bobine est donc placée dans les encoches statoriques dans l'ordre d'apparition sur l'étoile des tensions. La figure 6 représente le stator d'une machine, supposant un bobinage distribué. On peut y voir l'ordre d'apparition des bobines défini par l'étoile des tensions (Fig. II. 8) [5].

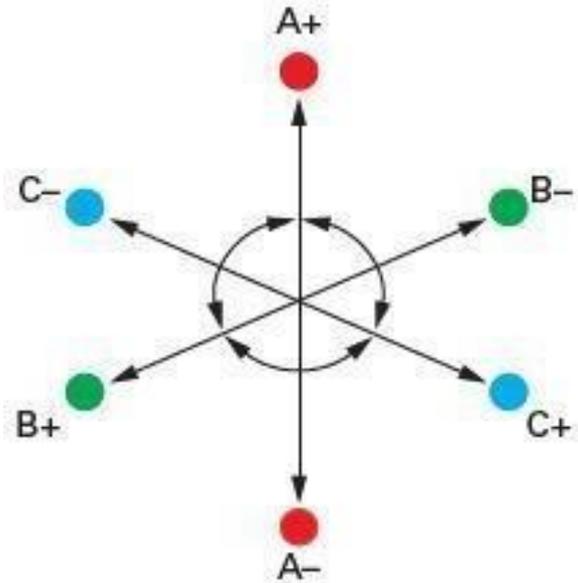


Fig. II. 8 : L'étoile de phase.

II.6.1.1.1 Différent types d'enroulements triphasés

Ces types d'enroulements peuvent classer comme suit :

II.6.1.1.2 Enroulements réguliers

Un enroulement est dit régulier (Fig. II. 9) s'il répond aux conditions suivantes [3] :

- avec un pas y diamétral ;
- un nombre entier d'encoches par pôles et par phase ;
- et un écart angulaire θ entre phases rigoureusement égal à :

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

Électrique triphasé (m = nombre de phase).

Pour ce type d'enroulement, le coefficient de bobinage **kb** peut se calculer avec la formule suivante (3):

$$k_b = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}}$$

α = écart angulaire(en **degré**) entre deux encoches consécutives.

Exemple :

Stator triphasé de 24 encoches à 4 encoches par pôle et phase :

Écart angulaire entre encoches :

$$\alpha = \frac{360^\circ}{24} = 15^\circ$$

$$k_b = \frac{\sin(4 \times \frac{15}{2})}{4 \sin(\frac{15}{2})} = \frac{0.5}{4} \times 0.3 = 0.957$$

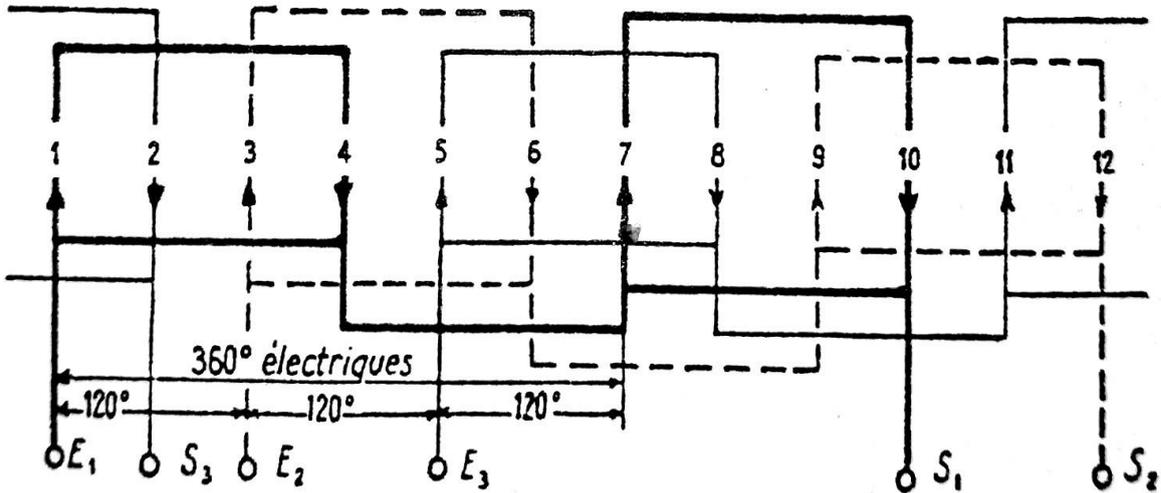


Fig. II. 9 : Bobinage d’une machine asynchrone ,4 pôles a nombre d’entier d’encoche

II.6.1.1.3 Enroulements semi – réguliers

Ce type de bobinage ne reprend pas à l’une ou aux deux conditions exigées des enroulements réguliers, parmi les enroulements semi- réguliers, on remarque [3] :

- les bobinages triphasés, avec pas diamétral et q fractionnaire ;
- les bobinages triphasés, avec pas raccourci et q entier et pair ;
- les bobinages triphasés avec pas raccourci et q entier et impair ;
- les bobinages avec pas raccourci et q fractionnaire.

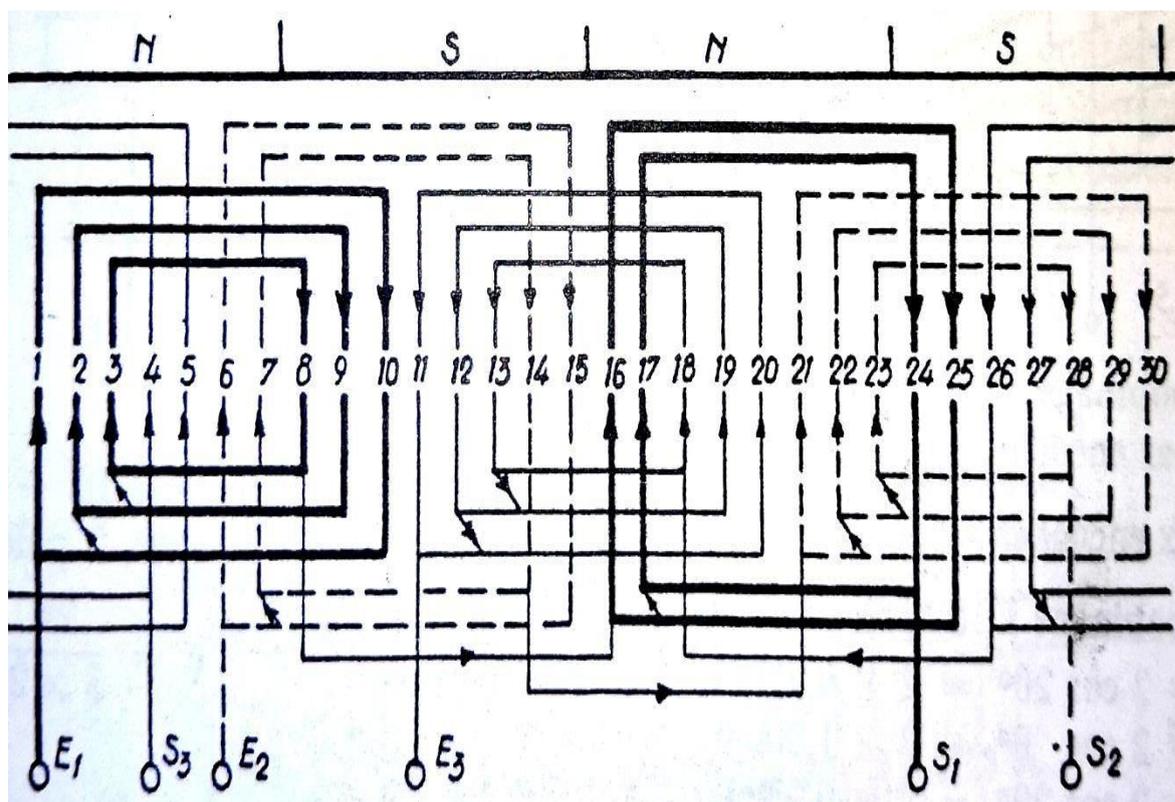


Fig. II. 10 : Bobinage semi-régulier à pas diamétral, 30 encoches 4 pôles

II.6.1.1.4 Bobinage a nombre fractionnaire d'encoches par pole et par phase :

Ces derniers sont définis sous le nom de bobinage a trous qui se divises en deux types [3] :

✚ **Bobinage symétrique** pour que le bobinage être réalisé il faut que le nombre d'encoches soit un multiple de 3, ou il devra toujours être divisible par **trois**.

✚ **Bobinage asymétrique** dans ce cas les conditions ne sont pas rigoureusement satisfaites car certain décalage angulaire entre les 3 phases, ce décalage peut être faible lorsque le nombre d'encoches du stator est grand.

Il arrive de laisser certain encoches vides dans les bobinages asymétriques et symétriques à trous partiels, c'est le nombre d'encoches vide et divisibles en trois on doit le réparti sur le périphérique de stator a 120° .

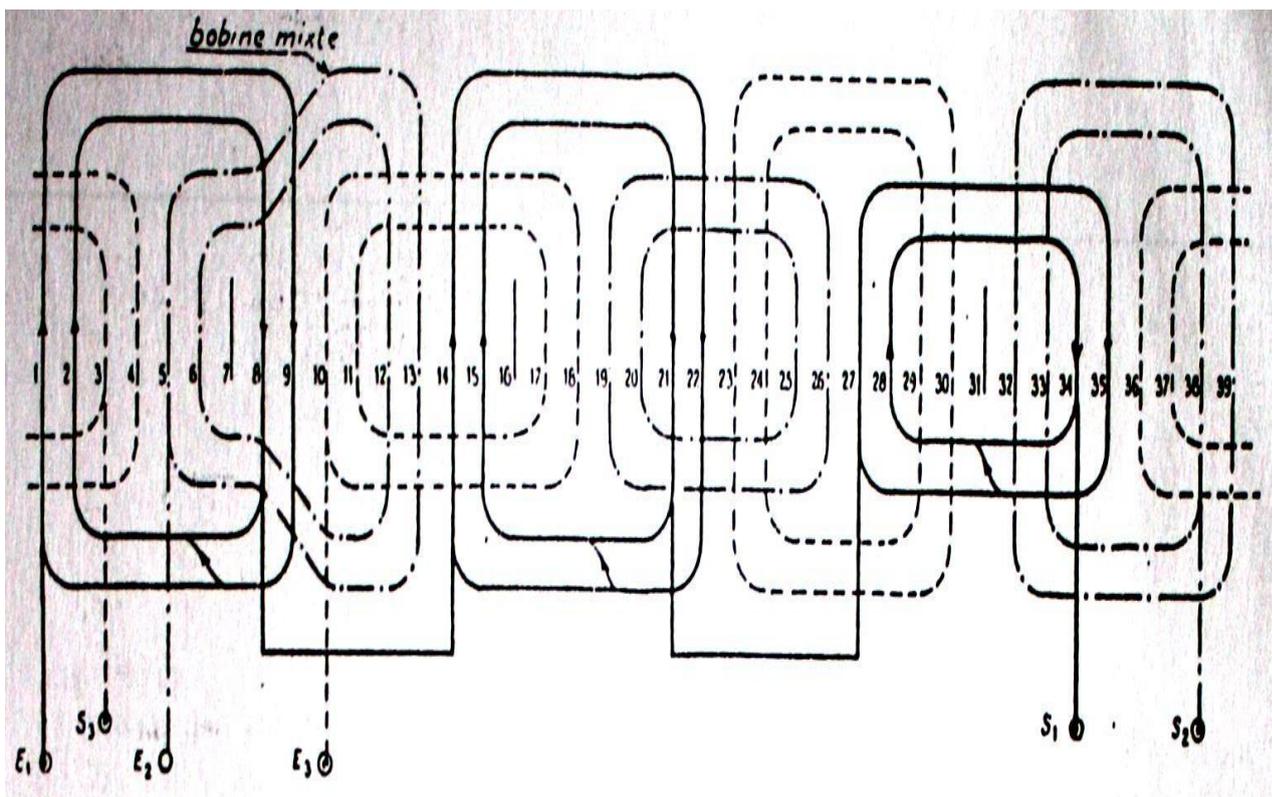


Fig. II. 11 : Schéma de bobinage d'un stator ,6pôles, 39 encoches 36 bobinés et 03 vide
(Bobinage a trous)

II.6.1.2 Les enroulements à deux couches

L'enroulement à deux couches, comme l'illustre la (Fig. II. 12) chaque encoche contient deux paquets de conducteurs appartenant à deux sections différentes qui peuvent être de la même phase ou non, cela conduit à renforcer l'isolement entre les deux sections présentes dans la même encoche.

L'enroulement à deux couches ou encore deux faisceaux par encoche n'est utilisés qu'avec des sections. Parmi ces **avantages** et la possibilité d'éliminer les harmoniques et aussi la consommation de cuivre sera démunie [5].

L'inconvénient principal, nécessite le renforcement de l'isolation entre les deux faisceaux, car ilappartenant à différentes phases dans la même encoche.

Suivant Le nombre d'encoches par pole et par phase **q**, on distingue [5] :

- les enroulements à deux couches à **q** entier
- les enroulements à deux couches à **q** fractionnaire.

Il existe trois méthodes de placement le bobinage dans les encoches :

- Par succession asymétrique

- Par levée
- Par succession symétrique

II.6.1.2.1 Placement par succession asymétrique

Les premières bobines dont le nombre est égal au pas d'enroulement (y) sont placées des deux côtés dans le bas des encoches ; les bobines suivantes sont placées, en haut de l'encoches d'un côté et en bas de l'autre, les dernières bobines dont le nombre est égal au pas de l'enroulement sont placées des deux côtés en haut des encoches. L'inconvénient majeur de cette méthode est qu'elle ne permet pas d'exécuter des branches parallèles ; « a » doit être égal à l'unité ($a=1$). Il est à signaler que le courant de la phase B a toujours une valeur supérieur à la valeur nominale à cause du nombre de faisceaux placés en haut des encoches que est supérieur à la valeur moyenne, cela est une conséquence de l'effet de peau [7].

II.6.1.2.2 Placement par (levée)

Cette méthode est plus répandue dans les usines de construction des machines électriques à courant alternatif.

L'opération consiste à placer les premières bobines dont le nombre égal au pas de raccourcissement sont placées, d'un coté en bas de l'encoche, et de l'autre elles sont laissées en attente en l'air, ensuite on place les bobines suivantes dont le nombre est égal à ($y-z$) successivement d'un coté en haut et de l'autre en bas de l'encoche, on doit soulever les (y) bobines restées en attente au cour de l'opération pour permettre de leur placement.

L'utilisation de cette méthode permettre d'obtenir :

- ✚ Un enroulement symétrique
- ✚ Résistance ohmique équilibré entre phase ✚ des branches parallèles ($a=1, \dots, 2p$)
- ✚ Un refroidissement uniforme.

Lorsque l'alésage du circuit magnétique est petits, cette technique d'emplacement et n'est pas recommandable, suite a des faisceaux des bobines qui doivent rester en attente au cours du processus de mise en encoches qui provoque un encombrement [7].

II.6.1.2.3 Placement par succession symétrique

Technique d'emplacement consiste à changer le sens de placement de bobinage après avoir remonté les trois premiers groupes de bobines de chaque phase, en suite en changeant le sens de la mise en encoche, on prend le placement à partir de l'encoche dont le numéro égal au pas de l'enroulement.

Ce type d'emplacement qui ne permet [7] :

- ✚ D'obtenir une égalité de résistances entre les phases ;

- ✚ La création des branches parallèles $a = 1$ jusqu'à $a = p$.

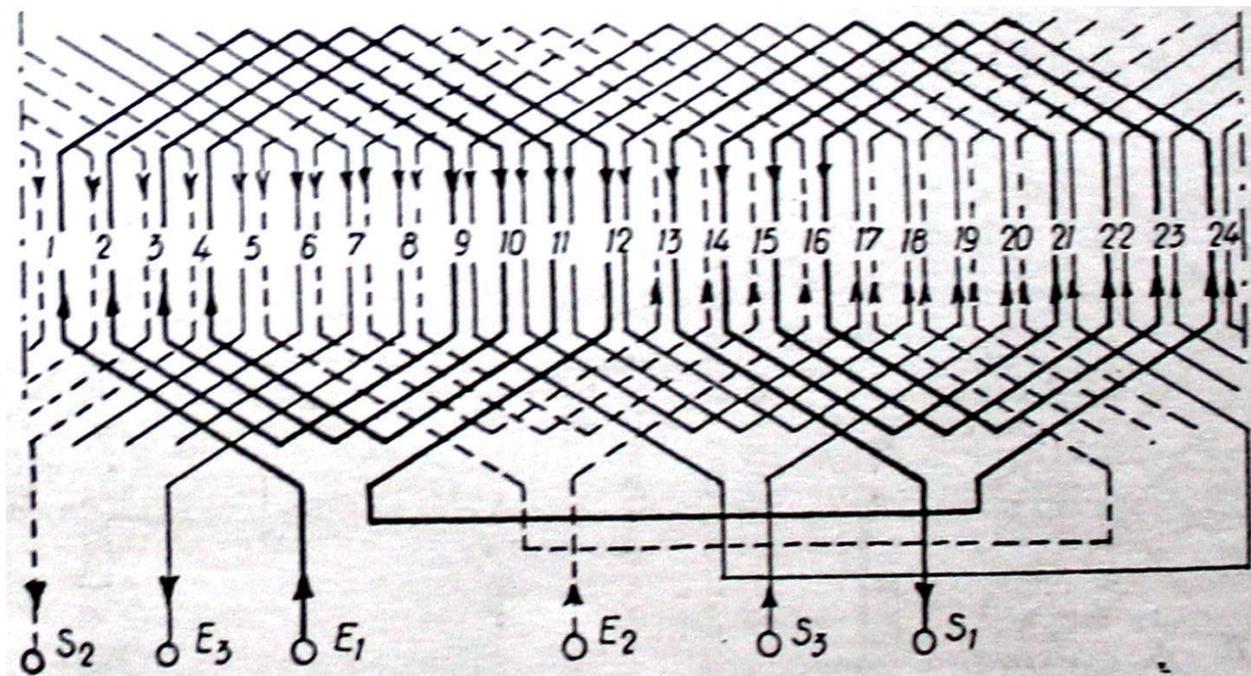


Fig. II. 12 : Bobinage imbriqué d'un stator de 24 encoches à deux vitesses

II.6.1.3 Enroulement à une deux couche

Les enroulements à une deux couches, c'est un types de bobinage intermédiaire entre les deux types sus -cité (bobinage a une couche et à deux couches), le placement manuel nécessite une presse centrifuge nécessaire lors de la formation des parties frontales, la présence des grandes bobines rend la torsion manuelle très délicate et peut même entrainer la destruction de l'isolant.

On peut placer ces enroulements de la façon suivante :

II.6.1.3.1 Placement par phase asymétrique

Le bobinage ce réalise en trois étapes, on commence par la 1^{er} phase en suite en place la 3^{eme} phase et en dernier lieu en place la 2^{eme} phase.

II.6.1.3.2 Placement symétrique

Le placement existera en cinq étape, on place le première groupe de la 1^{er} phase, après le 2^{eme} groupe de la 3^{eme} phase, on continue, on plaçant les deux groupes de la seconde phase, ensuite dans la 4^{eme} étape on place le second groupe de la 3^{eme} phase.

II.6.2 Enroulements Monophasés

Ce type de moteur est constitué de deux enroulements, un principal (fonctionnel) et un auxiliaire utilisé que pour faire démarrer la machine, ces enroulements sont alimentés en parallèle.

L'enroulement auxiliaire est décalé physiquement de 90° par rapport à l'enroulement principal.

Il crée un champ magnétique tournant qui doit être décalé $\frac{\pi}{2} = (90^\circ)$

Par rapport au champ magnétique produit par l'enroulement principal, pour cela, on connecte un condensateur en série avec l'enroulement auxiliaire.

Pour améliorer le couple au démarrage, il faut :

- Soit augmenter la capacité du condensateur
- Soit mettre un second condensateur en parallèle avec le premier et le déconnecter une fois que le rotor tourne (environ $16 \mu\text{F}$ pour un moteur de 200 W) [8].

Dans tel moteur l'enroulement principal occupe $2/3$, alors que celui de l'auxiliaire $1/3$ du nombre total d'encoches statorique, dans les moteurs monophasés le nombre d'encoche par pôle et par phase pour chaque bobinage est calculer par la manière suivante ;
 q_p : nombre d'encoches par pôle et par phase de l'enroulement principal.

$$q_p = \frac{Z_p}{2p} \quad (\text{II.5})$$

$$q_A = \frac{Z_A}{2p} = \left(\frac{1}{3}\right) \times \frac{Z}{2p} \quad (\text{II.6})$$

$$q_A = \text{nombre d'encoches par pôle et par phase de l'enroulement auxiliaire. ;} \\ Z_p = (2/3) \times Z \quad (\text{II.7})$$

Z_p = d'encoche occupé par la phase principale ;

$Z_A = (1/3) \times Z$ le nombre d'encoche occupé par la phase auxiliaire ;

Schéma de bobinage monophasé sont réaliser ont trois cas [3] :

Cas d'un enroulement monophasé à un faisceau par encoche, bobine concentriques, on trouve que les $(2/3)$ des encoches seulement bobinés

Cas d'un bobinage monophasé à un faisceau par encoche avec bobine gabariées, les tiers des encoches reste vides, dans ce genre de bobinage les bobines formées et coudées

pour pouvoir s'enchevêtrer, les faisceaux des sections sont de longueurs différentes afin de se coiffer l'un l'autre.

Cas d'un bobinage avec deux faisceaux par encoche avec bobine gabariées, dans ce genre de bobinage, les bobines sont formées sur gabarit, l'un des faisceaux de la bobine forme le plan inférieur du bobinage, et l'autre le plan supérieur, avec la même méthode de placement des enroulements triphasés.

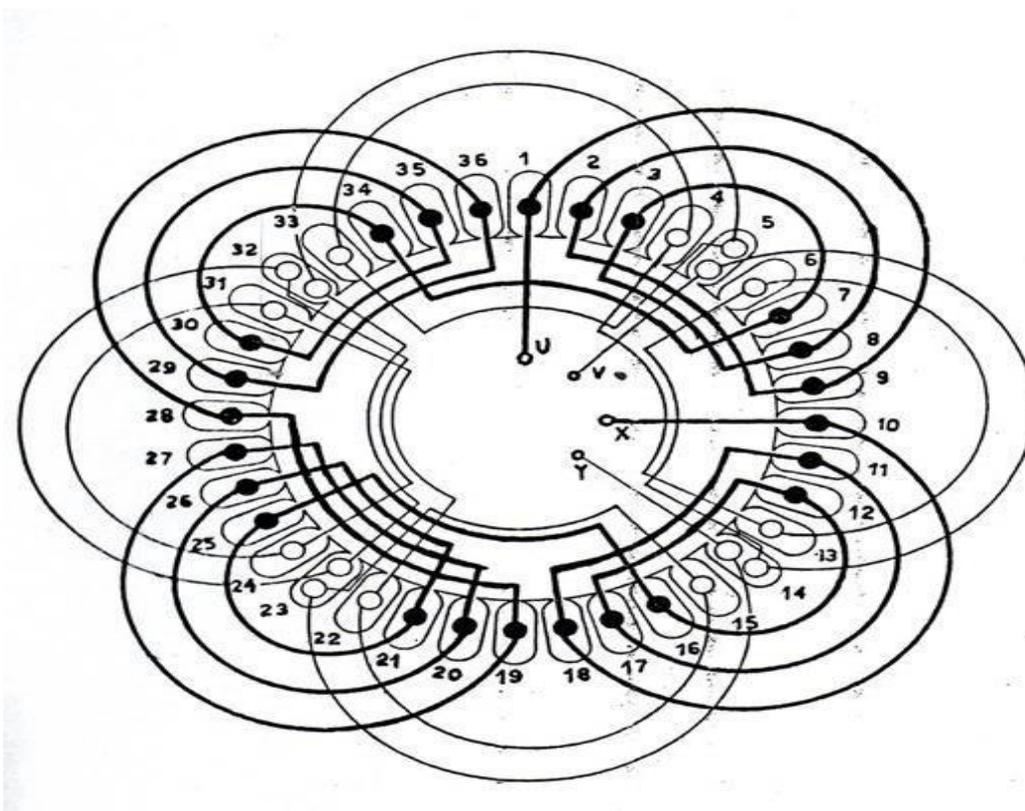


Fig. II. 13 : Schéma de bobinage d'un moteur asynchrone monophasé 36 encoches

U. X : présente l'entrée et sortie du bobinage principal.

V. Y : présente l'entrée et sortie du bobinage auxiliaire.

La figure sus-dessus (Fig. II. 16) présente la répartition du bobinage dans les encoches, sachant que le nombre d'encoches est de 36 encoches, le bobinage principal occupe 24 encoches et le bobinage auxiliaire qui se raccorde au condensateur, occupe 12 encoches.

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons représenté des différents types d'enroulements concernant les machines tournantes à courant alternatif, est quelle sont les méthodes à utiliser pour la mise en encoches, aussi que les différents liaisons entre bobines (séries, parallèles).

CHAPITRE III
BOBINAGE DES
STATORS A DEUX
POLARITES

Chapitre III : Bobinage des stators à deux polarités

III.1 Généralité

Il est possible de faire varier la vitesse d'un moteur en modifiant le nombre de pôles, pour arriver à ce résultat, il suffit de pouvoir changer le couplage des bobines du stator, le schéma de la figure (fig. III.1) montre comment réduit le nombre de pôles de quatre à deux pôles, en créant une prise au milieu du bobinage de chaque phase,

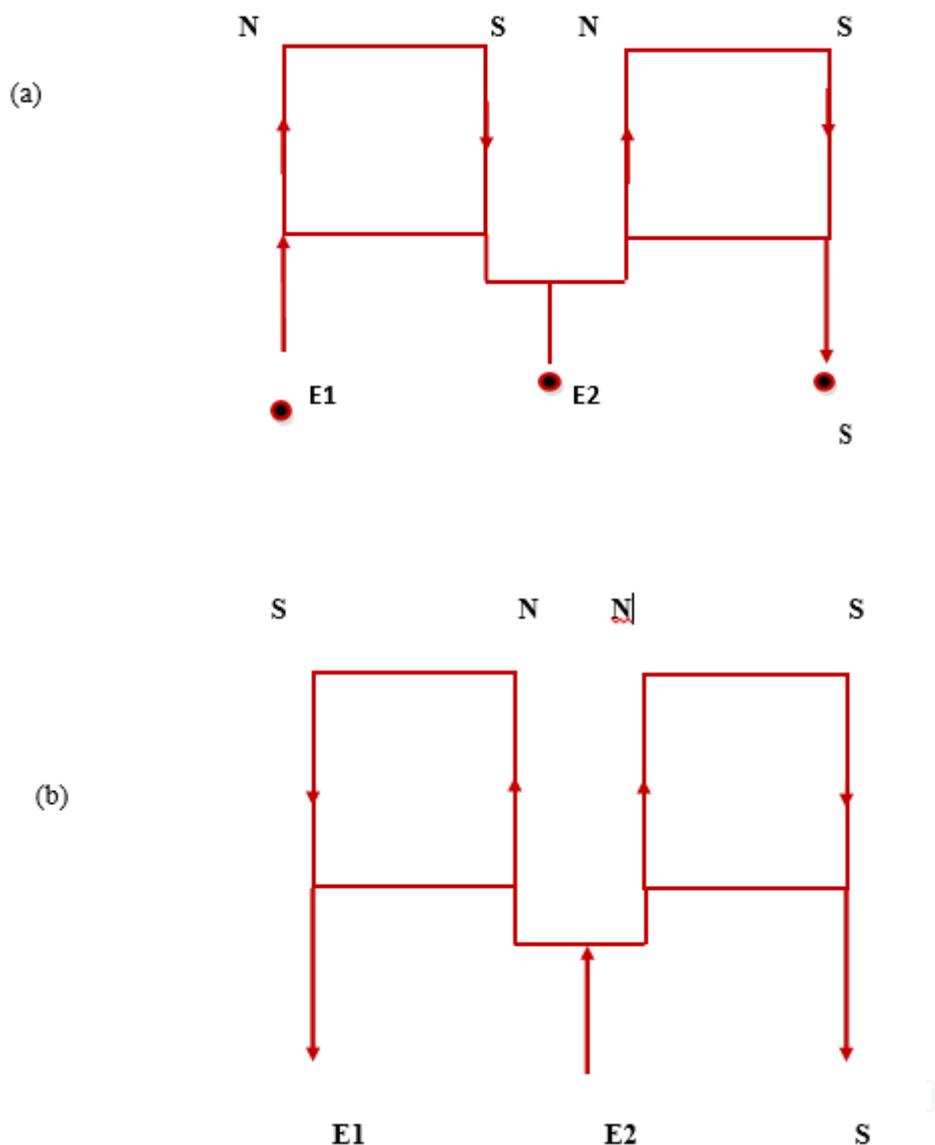


Fig. III. 1 : Schéma de bobinage d'une machine à deux vitesses

En modifiant judicieusement l'entrée du courant dans un bobinage, on peut changer le nombre de ses pôles et par conséquent les vitesses de rotation du moteur.

Dans le schéma de principe ci-dessus, on obtient 4 pôles (en figure a) en branchant le réseau entre E1 et S, d'autre part, si on utilise la borne E2 comme entrée, (en figure b) et que l'on réunisse E1 et S pour en faire une sortie, on réalise 2 pôles, du moteur la vitesse sera doublé.

C'est sur ce principe que sont basés les couplages des moteurs à deux vitesses du types dahlander et lindstrom dans la quels ;

$$ns = \frac{f}{p} \text{ tr/s} \tag{III. 1}$$

f : est la fréquence du courant ;

p : est le nombre de paires de pôles.

Les pôles sont indiqués par les fléchées placés sur les faisceaux [3]

III.2 Moteurs à deux vitesses et un seul bobinage

Si en prend le moteur a deux vitesses qui utilisent les bobinages statorique du type dahlander et lindstrom donne des rapports de vitesse de l'ordre de 1 à 2,

Exemple 2/4 pôles, 4/8 pôles, 6/12 pôles,

On effectue un enroulement à pas diamétral et à pôles conséquent pour la petite vitesse (grande polarité), et on le couple en bobinage à pôles alternés et pas raccourci pour avoir la petitepolarité (grande vitesse).

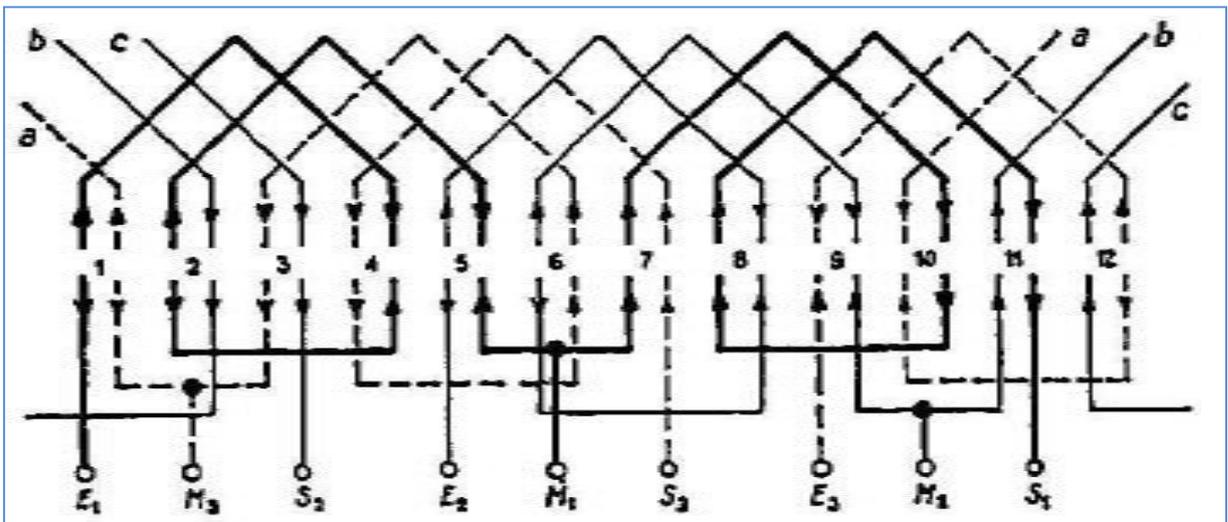


Fig. III. 2 : Schéma d'un bobinage à double faisceaux 2/4 pôles

Le pas des bobines (Fig. III. 3) a été choisi pour fonctionner normalement à la grande polarité (4poles conséquents), soit

Un pas de $12/4 = 3$ encoches (1 à 4 encoches). Les flèches du haut donnent le sens du courant

dans les faisceaux le fonctionnement en 4 pôles **PV**, les flèches du bas pour la marche en 2 pôles **GV**, a l'instant choisi sur le schéma, on constate que le sens du courant est inversé dans les faisceaux de 4 encoches pour la marche en 4 pôles **PV**, et dans les 6 encoches pour le fonctionnement en 2 pôles **GV** [3].

De ce qui procède, il résulte que la marche en quatre pôles **PV** est normale, mais qu'en deux pôles **GV** nous aurons une mauvaise utilisation du moteur, due au raccourcissement du pas, et principalement au démarrage en raison du faible couple, par contre en utilisant un enroulement à deux couches par encoches, on constate que le couple de démarrage est sensiblement amélioré.

III.3 Couplage du bobinage a deux vitesses

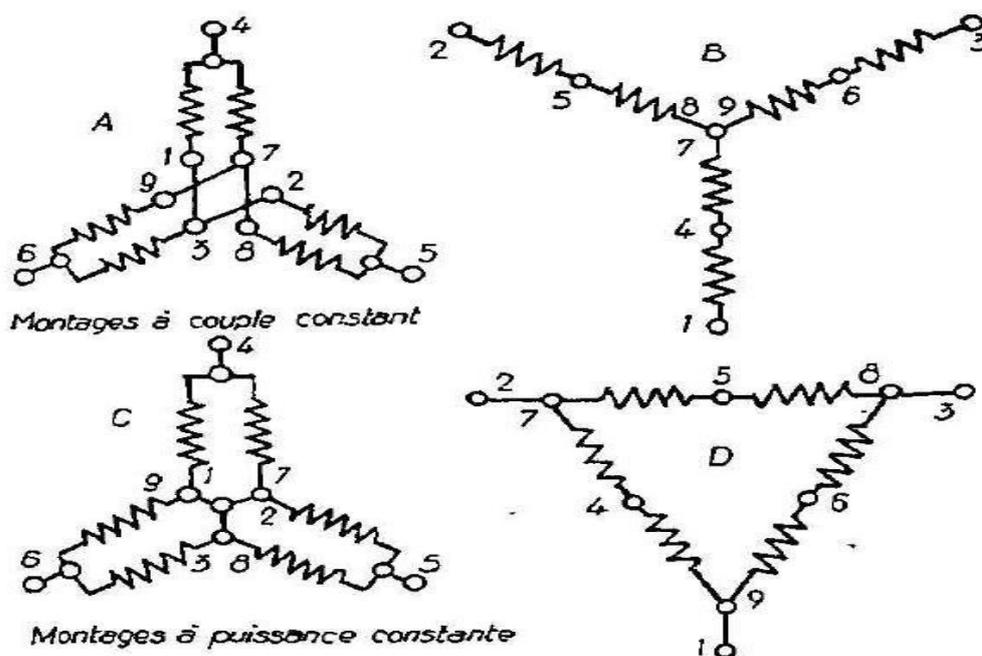


Fig. III. 3 : Schéma de couplage utilisé pour les moteurs à deux vitesses

Dans les schémas ci-dessus chaque phase comporte 2 ondes qui peuvent se grouper soit en série soit en parallèle, grace au prises médianes, les entrées E1, E2, E3 portent les chiffres 1-2-3 les prise médianes les chiffres 4-5-6 et les sorties S1, S2, S3 les chiffres 7-8-9. Les montages A et B s'utilisent pour les couplages a couple constant et les montages C et D pour

les couplages à puissance constante [1]. **Pour passer** de l'un à l'autre, il suffit de réaffecter certaines bobines à d'autres phases. Cela peut toutefois demander un nombre relativement important de contacteurs afin de pouvoir réaliser toutes les permutations nécessaires [4].

III.3.1 Couplage à couple constant

A la grande polarité (grand nombre de pôles), on réalise le couplage étoile série, par contre à la petite polarité (petit nombre de pôles), on utilise le groupement étoile-parallel. Une étoile permanente est réalisée sur le bobinage formée par le rassemblement des trois sorties S1, S2, S3 ce qui limite à six le nombre des bornes sur la plaque du moteur (les trois entrées plus trois médianes). Exemple dans un moteur de 4/8 pôles à couple constant, la puissance utile à 8 poles est des 4 pôles divisés par la valeur du rapport :

$$\left(\frac{\text{vitesse 4 poles}}{\text{vitesse 8 poles}}\right)^3 \quad (\text{III. 2})$$

III.3.1.1 Montage à la plaque à borne

A la grande polarité (étoile-série), il suffit de connectés les fils de la ligne aux trois entrées (E1,E2,E3) (fig. III.3), en laissant les trois prises médianes libres, **pour la petite polarité** (étoile-parallel) on connecte la ligne du réseau aux borne M1,M2,M3 et court-circuite les bornes E1,E2,E3 au moyen de barrettes pour créer une seconde étoile.

III.3.2 Couplage a puissance constante

La grande polarité (petite vitesse), le bobinage doit avoir un pas plus que diamétral, toujours branché en triangle-série, de telle sorte que chaque coté du triangle soit constitué par deux bobinage en série. La petite polarité (grande vitesse), le pas est raccourci sensiblement de 50%, le cas d'utilisation le plus fréquent est le couplage étoile-parallel, dans les deux moitiés de l'enroulement de chaque phase sont toujours connectées en parallel.

III.3.2.1 Montage a la plaque à bornes

La plaque a bornes comporte six bornes, quoi que l'enroulement contient neuf sorties, dont trois prise médianes. L'enroulement des moteurs à puissance constante est couplé en triangle et ce sont les trois prises médianes et les trois sorties des sommets du triangle qui sont reliées à la plaque à bornes (fig. III.4) pour la marche en petite vitesse (triangle-étoile), on alimente le moteur par les trois sommets du triangle (E1-E2-E3) les trois bornes (M1-M2-M3) restant libres, pour la marche en grande vitesse (étoile-parallel), on court-circuite les trois

sommets du trianglesur les bornes (E1-E2-E3), puis on branche la ligne du réseau sur les bornes (M1,M2,M3), le couplage étoile-parallèle de la (fig. 16) a été volontairement monté avec ses bobines cote a cote, mais en réalité il n'y avait rien à changer par rapport à la figure triangle-série, sauf l'entrée de la ligne qui se fait en (M1,M2,M3) et l'étoile sur les bornes du bas.

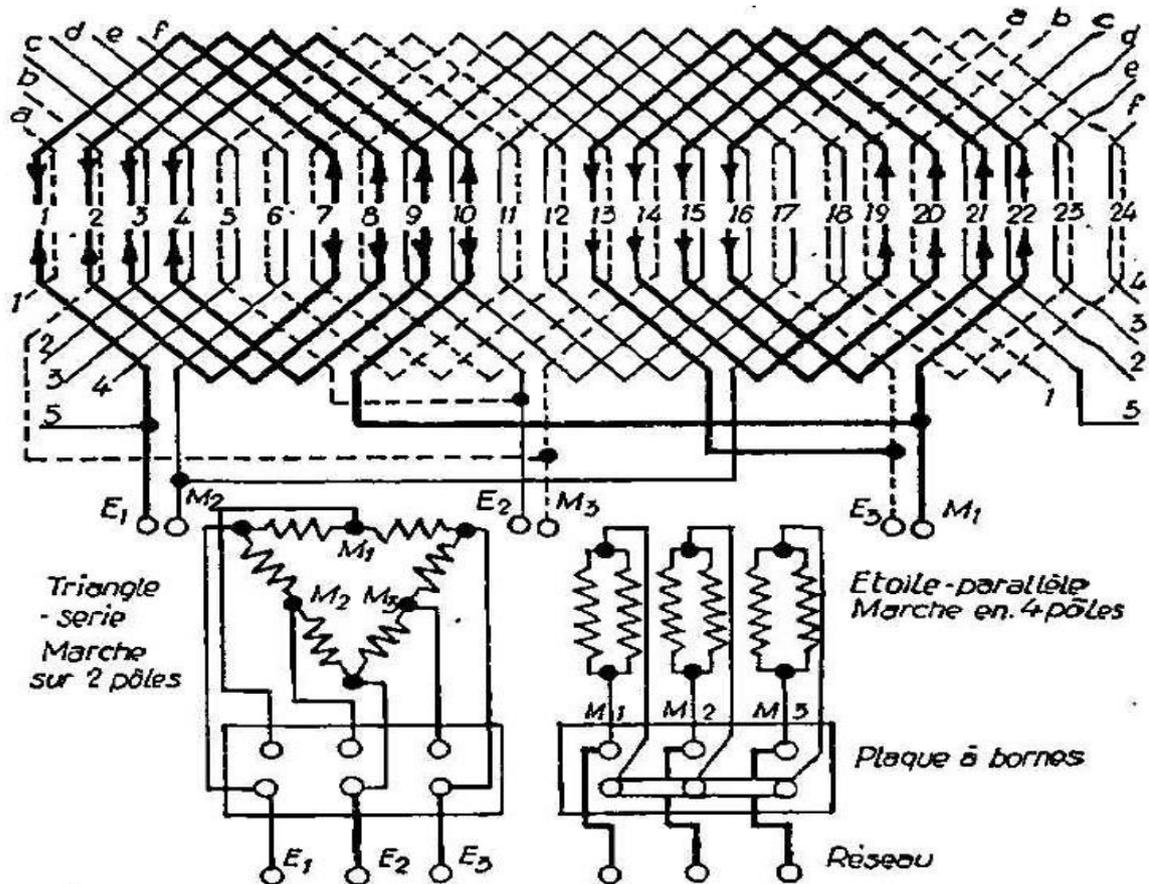


Fig. III. 4 : Couplage à puissance constante d'un stator 2/4 pôles, 24 encoches

III.4 Moteurs à deux enroulements distincts

Les diverses polarités du stator d'un moteur peuvent être obtenues en faisant deux bobinage séparés. Quand on désire un rapport de vitesse différent du simple au double, on réalise sur le stator, **deux bobinages distincts**, à un ou deux faisceaux par encoche (fig. III.5).

Pour éviter un bobinage trop volumineux et encombrant, on réalise généralement l'enroulement à petite polarité avec un pas raccourci qui réduit la masse des têtes des bobines.

III.4.1 Méthode de réalisation le bobinage du stator

Pour réaliser le bobinage du stator on commence par la petite polarité, puis on recouvre

celle-ci par la grande polarité. Ce dispositif d'enroulement permet d'obtenir une grande variété dans la gamme des vitesses en construisant, par exemple, des moteurs 2/6 pôles ou 2/8 pôles, etc

Les moteurs à deux vitesses comportent deux bobinages distincts ont une plaque à bornes sans barrettes, le couplage est fait directement sur chaque bobinage, trois bornes de la plaque se relient au réseau d'alimentation et servent pour une vitesse, les trois autres sont utilisées pour l'autre vitesse, ce procédé permet l'usage de contacteur spéciaux [3].

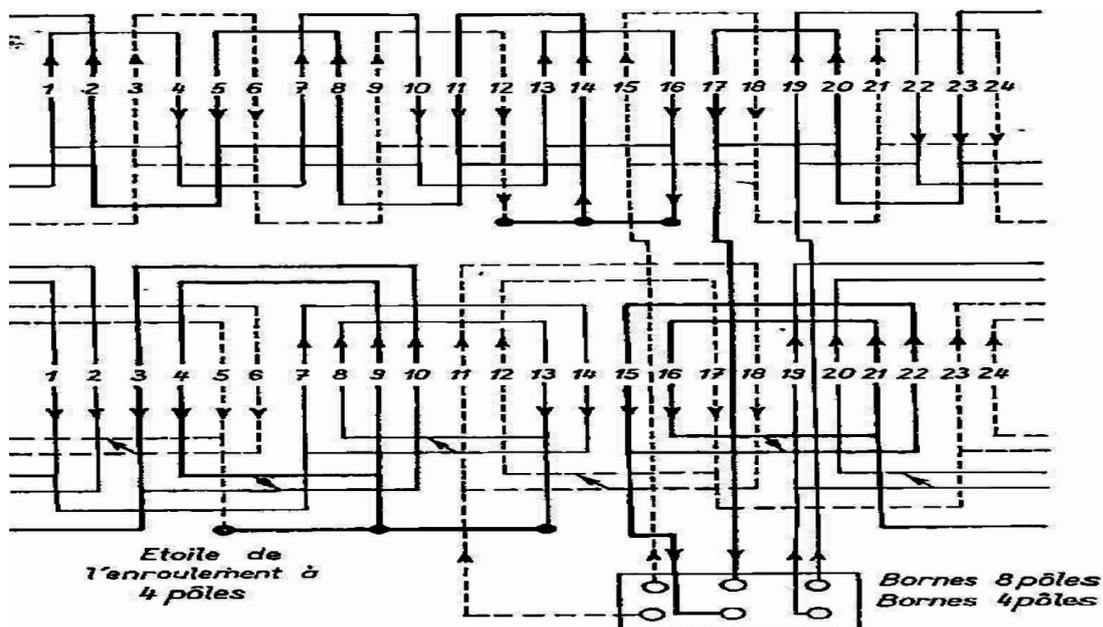


Fig. III.5 : Schéma de bobinage d'un moteur à deux vitesses, à deux enroulements distincts

Le mode de démarrage sur le réseau peut être différent :

- ✓ 2 x 3 bornes : démarrage direct sur le réseau
- ✓ 2 x 6 bornes : démarrage Y Δ possible

Dans le premier cas, ces moteurs seront mono tension dans le second, ils peuvent être soit bitension soit mono tension à démarrage Y Δ .

Les rapports de vitesse les plus courants sont :

3000 / 750 t/min (2/8 pôles), 1500 / 1000 t/min (4/6 pôles) [9].

III.5 Changement des caractéristiques du bobinage d'un stator

Il arrive que, pour des raisons spéciales, on soit tenu de modifier certaines caractéristiques d'une machine.

Ce changement peut être obtenu en modifiant l'enroulement du stator, ce qui permet :

- ✚ Une transposition ou la puissance reste la même et ou la tension seule change ;
- ✚ Une transposition ou la tension reste fixe, alors que la puissance change ;
- ✚ Une transposition à tension et puissance variable.

Pour simplifier l'étude on a choisi un moteur électrique triphasé.

III.5.1 Transposition ou la puissance reste la même et ou la tension seule change

On a un moteur tel que [3]:

N = nombre de conducteur par encoche du stator ; P =puissance en KW ;

R =résistance par phase du stator à 20°C ; D =diamètre du fil isolé ;

d =diamètre fil nu ;

P_c = poids total des conducteurs du stator; U =tension : 220/380v ;

I_1 =intensité dans le stator à 220v, couplage en triangle (Δ). I_2 =intensité dans le stator à 380v, couplage en étoile (γ).

Pour une tension de 115/200v, on désire connaître les caractéristiques de ce moteur à la même puissance P .

1. Si N' et le nouveau nombre de conducteurs par encoche, on a :

$$N' = N \times \frac{115}{220} \quad \text{couplage en triangle} \quad (\text{III. 3})$$

Ou, ce qui revient au même

$$N' = N \times \frac{200}{380} \quad \text{couplage en étoile} \quad (\text{III. 4})$$

La transposition se réalise donc relativement au rapport des tensions de même couplage.

2. Si D' est le nouveau diamètre fil isolé, on a :

$$D' = D \frac{\sqrt{N}}{N} \quad (\text{III. 5})$$

3. Si R' la nouvelle résistance ohmique du bobinage statorique par phase à 20°C on a ;

$$R' = R \times \frac{N'}{N} \times \left(\frac{d}{d'}\right)^2 \quad (\text{III. 6})$$

La résistance ohmique et inversement proportionnel au nombre de conducteur et aux sections.

4. Si P_c' est le nouveau poids du fil nu du stator, on a :

$$P_c' = P_c \times \frac{N'}{N} \times \left(\frac{d'}{d}\right)^2 \quad (\text{III. 7})$$

Le poids du fil est proportionnel au nombre de conducteur et aux sections.

5. Si I'_1 c'est la nouvelle intensité dans le stator à la tension de 115v, couplage en triangle (Δ), on a :

$$I'_1 = I_1 \times \left(\frac{\text{ancienne tension en } (\Delta)}{\text{nouvelle tension } (\Delta)} \right) = I_1 \times \frac{220}{115} = A \quad (\text{III. 8})$$

Il revient au même d'utiliser le couplage étoile (γ), en respectant les tensions dans ce couplage on a aussi :

$$I'_1 = I_1 \times \frac{380}{200} = A$$

6. Si I'_2 est la nouvelle intensité dans le stator à 200v, on a

$$I'_1 = I_1 \times \left(\frac{220}{115} \right) = I_1 \times \frac{380}{200} \quad (\text{III.9})$$

Ou encore :

$$I'_1 = I_1 \times \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (\text{III.10})$$

Si on connaît le rendement et le cosinus du moteur à 220/380 V, comme ils auront respectivement les mêmes valeurs à 115/200 v, on aura aussi [3]:

$$I'_1 = \frac{\text{puissance utile en watts}}{\sqrt{3} \times 115 \times \eta \times \cos'} \quad \text{et} \quad I'_2 = \frac{\text{puissance utile en watts}}{\sqrt{3} \times 200 \times \eta \times \cos'} \quad (\text{III.11})$$

III.5.1.1 Exemple de transposition à P (kw) constante et U(v) variable

Exemple d'un moteur électrique d'une certaine polarité contiens les caractéristiques suivantes :

P = 2.2kw à la tension 220/380 v ;

N = 53 conducteurs par encoche au stator ; **D** = 1.24 mm diamètre fil isolement compris
= 1.05 mm diamètre nu ;

R = 2.5Ω résistance par phase du stator à 20°C;

Pc = 2.9kg le poids total du fil du stator ; **I1** = 8.7A l'intensité au stator à 220 v ; **I2** = 5A
l'intensité au stator à 380 v ;

On voudrait connaître les caractéristiques de ce moteur à la même puissance de 2.2kw, mais à 115/200 v, on aura :

- **Nombre conducteur par encoche**

$$N' = N \times \frac{115}{220} = 53 \times \frac{115}{220} = 27.7 \text{ conducteur/encoche}$$

Ou bien , ce qui revient au même :

$$N' = N \times \frac{200}{380} = 53 \times \frac{200}{380} = 27.9 \text{ conducteur par encoche}$$

On prendre donc : $N'=28$ conducteurs par encoche.

- **Diamètre isolé du conducteur**

$$D' = D \sqrt{\frac{N}{N'}} = 1.24 \sqrt{\frac{53}{28}} = 1.7 \text{ mm}$$

On se reporte alors à la liste des conducteurs et en choisit le diamètre fil isolé se rapprochant le plus de 1.7mm. On lit sur le tableau 1.705mm qui correspond un diamètre nu de 1.5mm.

On a donc :

Diamètre fil nu =1.55mm , Diamètre fil isolé =1.705mm

- **résistance à 20°C d'une phase du stator**

$$R' = R \times \frac{N'}{N} \times \frac{(d')^2}{d^2} = 2.5 \times \frac{28}{53} \times \frac{(1.05)^2}{1.5^2} = 0.648 \Omega$$

- **poids de fil total au stator**

$$Pc' = Pc \times \frac{N'}{N} \times \left(\frac{d'}{d}\right)^2 = 2.9 \times \frac{28}{53} \times \left(\frac{1.05}{1.5}\right)^2 = 3.120 \text{ kg}$$

- **Intensité dans le stator**

$$\text{A } 115 \text{ v} \Rightarrow I'1 = I1 \times \frac{220}{115} = 8.7 \times \frac{220}{115} = 8.7 \times \frac{380}{200} = 16.5 \text{ A}$$

$$\text{A } 220 \text{ v} \Rightarrow I'2 = I2 \times \frac{220}{115} = 8.7 \times \frac{220}{115} = 8.7 \times \frac{380}{200} = 9.5 \text{ A}$$

Ou bien :

$$I'2 = \frac{I'1}{\sqrt{3}} = \frac{16.5}{\sqrt{3}} = \frac{16.5}{1.732} = 9.5 \text{ A}$$

III.5.2 Transposition ou la puissance change et la tension reste la même [

N= nombre de conducteur par encoche du stator ;

P= puissance en KW ;

R= résistance par phase du stator à 20°C ;

D= diamètre du fil isolé ;

d= diamètre fil nu ;

Pe= poids total des conducteurs du stator ;

I Δ = intensité dans le stator à 220v, couplage en triangle (Δ).

I γ = intensité dans le stator à 380v, couplage en étoile (γ).

Si l'on désire les caractéristiques de ce moteur, à une autre puissance **P'** mais à la même tension, on a

- **Nouveau nombre de conducteur par encoche**

$$N' = N\sqrt{\frac{P}{P'}} \quad (\text{III. 12})$$

Le diamètre du fil **D'**, la résistance **R** à 20°C par phase du bobinage statorique, le poids de fil **P'**, se calculent de la même façon que précédemment, c'est-à-dire avec les mêmes formules.

La nouvelle intensité dans le stator (couplage triangle) sera donnée par la relation :

$$I'\Delta = \frac{P'}{P} I\Delta \quad (\text{III. 13})$$

Le cas de transposition se présente lorsqu'un moteur est soumis à un régime de fonctionnement normal.

III.5.2 Exemple de transposition à U(v) constante et P (kW) variable

On a un moteur électrique [3] :

P= 6kw, U=220 v

N= 32 conducteurs par encoche au stator **D**= 1.81 mm diamètre fil isolement compris **d** = 1.6 mm diamètre nu

R= 0.805 Ω résistance par phase du stator à 20°C

Pe= 5.82 kg le poids total du fil du stator

I pour 220v Δ =16.8A

On **désire réduire la puissance** de ce moteur à **5kw** sous la même tension et couplage (220v Δ).

- **Le nouveau nombre de conducteur par encoche du stator sera**

$$N' = N \sqrt{\frac{P}{P'}} = 32 \sqrt{\frac{6}{5}} = 35 \text{ conducteur/encouche}$$

- Le diamètre du fil isolé sera

$$D' = D \sqrt{\frac{N}{N'}} = 1.81 \sqrt{\frac{32}{35}} = 1.72 \text{ mm}$$

On lit sur le tableau : D isolé= 1.705 mm auquel correspond un diamètre de $d_{nu}=1.5\text{mm}$.

La résistance à 20°C par phase sera :

- Le poids du fil statorique sera

$$P' = P \times \frac{N'}{N} \times \left(\frac{d'}{d}\right)^2 = 5.82 \times \frac{35}{32} \times \left(\frac{1.5}{1.6}\right)^2 = 5.5 \text{ kg}$$

- L'intensité sous 220 v sera

$$I'\Delta = I\Delta \frac{P'}{P} = 16.8 \times \frac{5}{6} = 14 \text{ A}$$

III.5.3 Transposition a tension variable et a puissance variable

On exécute successivement deux transpositions, on réalise d'abord le calcul des caractéristiques en changeant la tension, comme dans le premier cas, puis avec ces nouvelles caractéristiques, on calcule la transposition à la nouvelle puissance qui donne les caractéristiques finales.

Tableau 1. Tableau des diamètres des fils destinés au bobinage des machines électriques.

Section du fil nu mm ²	Diamètre du fil nu mm	Diamètre du fil émaillé mm	Diamètre du fil avec 1 couche rayonne mm	Diamètre du fil avec 2 couches coton mm	Résistance à 15 °C Ω/km
0,384	0,70	0,76	0,79	0,86	45,212
0,441	0,75	0,81	0,84	0,91	39,385
0,502	0,80	0,865	0,89	0,96	34,616
0,636	0,90	0,975	1,03	1,08	27,351
0,785	1,00	1,08	1,13	1,18	22,154
0,950	1,10	1,18	1,23	1,28	18,309
1,130	1,20	1,28	1,33	1,38	15,384
1,227	1,25	1,33	1,38	1,43	14,178
1,327	1,30	1,38	1,43	1,48	13,109
1,539	1,40	1,48	1,53	1,58	11,303
1,767	1,50	1,585	1,63	1,72	9,846
2,010	1,60	1,685	1,75	1,82	8,654
2,269	1,70	1,785	1,85	1,92	7,665
2,544	1,80	1,885	1,95	2,02	6,837
3,141	2,00	2,09	2,15	2,22	5,585
3,463	2,10	2,19	2,25	2,34	5,023
3,801	2,20		2,35	2,44	4,577
3,976	2,25		2,40	2,49	4,376
4,154	2,30		2,45	2,54	4,187
4,524	2,40		2,55	2,64	3,846
4,908	2,50		2,65	2,74	3,544
5,309	2,60		2,76	2,86	3,277
6,157	2,80		2,96	3,06	2,826
7,068	3,00		3,16	3,26	2,461

III.6 Conclusion

En conclusion, la variation de vitesse d'un moteur asynchrone peut être obtenue par la variation du nombre de pôles, en modifiant judicieusement l'entrée du courant dans un bobinage, par contre le moteur à deux enroulements séparés correspond à l'assemblage de deux moteurs aux vitesses différentes dans la même carcasse.

*CHAPITRE IV CALCULES
SIMPLIFIES DES
PARAMETRES DES
BOBINAGE ET REALISATION
PRATIQUE*

Chapitre IV : Calculs simplifiés des paramètres de bobinage et réalisation pratique

IV.1 Introduction

Lorsque une machine doit être rebobiné, le nouvel enroulement doit être, impérativement identique au précédent, c'est-à-dire qu'à partir du premier enroulement qu'on détermine le second. Cette procédure est applicable sur les différents types des machines électriques telles que, les moteurs asynchrones, alternateur, machines à courant continu, transformateur etc... .

IV.1 Calcul simplifiés du bobinage

Utiliser le guide copylov avec exemple TD

La puissance utile (nominale) P_n	3 [KW]
Le nombre de paires de pôles $2P$	6
La tension d'alimentation U	220/380
Le type de refroidissement IC	0141
Le type de protection IP	044
La classe d'isolation	F
Type du rotor	A CAGE 2013

Tab. IV.1 Tableau de fiche bobineur

La fréquence $f = 50\text{HZ}$ et $N=1500\text{ tr/min}$

IV2.1 Les dimensions principales

1. Le nombre de paires de pôles

$$2P=6 \quad \longrightarrow \quad P = 3$$

2. La hauteur préalable de l'axe de rotation

Selon la figure 9.1(a) $\longrightarrow H=110\text{ [mm]}$.

Selon le tableau 9.1 on choisit $\longrightarrow H = 112\text{ [mm]}$

3. A) Le diamètre extérieur D_a

Selon le tableau de la page 42 on trouve $\Rightarrow D_a = 197 [mm]$

B) Le diamètre intérieure

$$D = Kd \times D_a$$

Selon le tableau 9.2 on trouve :

$$[0.70 \div 0.72] * 197$$

$$D[137.9 \div 141.84]$$

On choisit $Kd=0.72 \Rightarrow D = 141$

4. Le pas polaire

$$r = \frac{\pi D}{2P} = \frac{\pi * 141}{6}$$

$$\Rightarrow r = 73.82 [mm]$$

5. La puissance de calcul (électromagnétique)

$$P' = \frac{P^2 * K_e}{\eta * \cos(\varphi)}$$

Où

$$K_e = 0.95$$

$$(\varphi) = 0.77$$

$$\eta = 0.82 = 82\%$$

$$P' = \frac{3 * 0.95}{0.82 * 0.77}$$

$$\Rightarrow P' = 4.513778904 [KVA]$$

6. Les charges électromagnétiques

On obtient :

$$A = 25.8 \times 10^3 [A/m] \text{ charge linéaire}$$

$$B\delta = 0.86 [T] \text{ entrefer lenterfer}$$

7. Les valeurs préalables de α_i , b et kb_1

$$p_{\text{posé}} = 1.25$$

$$\alpha_i = \frac{2}{\pi} + (0.156(K_s - 1))^{2/3} \Rightarrow \alpha_i = 0.7$$

$$K_b = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} - 0.085(K_s - 1)^{2/3} \Rightarrow K_b = 1.09$$

Le type de l'enroulement est concentrique à une couche monté fil à fil, alors $Kb_1 = 0.96$

8. La longueur de calcul de l'entrefer

$$L_e = \frac{P'}{D^2 * w(K_b * K_{b1} * A * B\delta)}$$

$$W = \frac{2\pi n}{60}$$

$$W = \frac{2\pi * 1500}{60} = 157.07 \text{ [red/sec]}$$

$$L_e = \frac{4.513778904 \times 10^3}{(141 \times 10^{-3})^2 * 157.07 * 1.09 * 0.96 * (25.08 \times 10^3) * 0.86}$$

$$L_e = 64$$

[mm]

9. Le rapport λ

$$\lambda = \frac{L_e}{r} = \frac{64}{73.82} = 0.88 \approx 0.9$$

Selon la figure 9.7 page 40 on obtient [0.8 ~ 1.20], alors la valeur $\lambda = 0.9$ est acceptable.

IV.22 Paramètres d'enroulement statoriques

10. Le pas dentaire

$$\tau = 0.07382 \text{ [m]}$$

$$t1 [0.0097 \div 0.012]$$

Le type de l'enroulement statorique est concentrique à une couche montré fil et la forme de l'encoche est trapézoïdale demi fermée

11. Le nombre d'encoche possibles

$$Z_{1min} \div Z_{1max} = \frac{\pi D}{t_{1max}} \div \frac{\pi D}{t_{1min}} = \frac{\pi * 141}{12} \div \frac{\pi * 141}{9.7}$$

$$= 36.91 \div 45.66$$

Selon le tableau 9.8 on choisit $Z_1 = 36$

$$\text{On a } Z_1 = 2P \times q \times m \Rightarrow q = \frac{Z_1}{2P * m} = \frac{36}{2 * 3 * 3} = 2$$

$$q = 2$$

D'une autre manière on peut déterminer que

$$q = 2 \quad Z = 2P \times q \times m = 6 \times 2 \times 3 = 36$$

12. Le pas dentaire

$$t1 = \frac{\pi * D}{2Pqm} = \frac{\pi * 141}{36} = 12.30$$

$$t_1 = 12.08 \text{ [mm]}$$

La valeur du pas dentaire $t_1 = 12.80 > 6$

Alors cette valeur est acceptable

13. Le nombre des conducteurs efficaces préalables pour $a=1$

$$U_{en'} = \frac{\pi * D * A}{I_{1nom} * Z_1}$$

$$I_{1nom} = \frac{P_2}{m * V * \eta * \cos(\varphi)}$$

$$I_{1nom} = \frac{3 * 10^3}{3 * 220 * 0.82 * 0.77} = 7.19 \text{ [A]}$$

$$U_{en'} = \frac{\pi * (141 * 10^{-3}) * 25.8 * 10^3}{7.19 * 36} = 44.15$$

$$U_{en'} = 44$$

14. Le nombre de spires d'une phase

$$W_1 = U_{en'} * p * q = 44 * 3 * 2 = 264 \text{ [spires]}$$

15. La charge linéaire

$$A_c = \frac{2 * I_{1nom} * W_1 * m_1}{\pi * D} = \frac{2 * 7.19 * 264 * 3}{\pi * 141} = 25.71$$

$$A_c = 25.71 * 10^3 \text{ [A/m]}$$

$$\Delta A = \left| \frac{A_c - A}{A} \right| * 100 = \left| \frac{(25.71 - 25.8) * 10^3}{25.8 * 10^3} \right| * 100 = 0.35\%$$

0.35% < 10% valeur est acceptable

B) Le flux magnétique

$$E = K_e * V = 4 * K_b * \varphi * f * W_1$$

$$\varphi = \frac{K_e * V}{4 * K_b * f * W_1} = \frac{0.95 * 220}{4 * 1.09 * 50 * 264}$$

$$\varphi = 3.63 * 10^{-3} \text{ [Wb]}$$

16. L'induction magnétique

$$B_{\delta c} = \frac{\varphi}{\alpha_i * L_e * \tau} = \frac{3.63 * 10^{-3}}{0.7 * 0.064 * (73.82 * 10^{-3})}$$

$$B_{\delta c} = [1.0976 \text{ T}]$$

$$\Delta B_{\delta} = \left| \frac{B_{\delta c} - B_{\delta}}{B_{\delta}} \right| * 100 = \left| \frac{1.0976 - 0.86}{0.86} \right| * 100 = 2.7\%$$

Alors $2.7\% < 5\%$ la valeur est acceptable

17. La section du fil efficace

$$S_{1eff} = \frac{I_{1nom}}{\alpha_1 \cdot J_1} \quad [mm^2]$$

$$J_1 = \frac{[A_j]}{A}$$

On trouve :

$$A_j = 187 \times 10^9 \left[\frac{A^2}{m} \right]$$

$$J_1 = \frac{187 * 10^9}{25.8 * 10^3} = 7.2480 \left[\frac{A^2}{m} \right]$$

On remarque que, $J_1 [3 \div 9]$ alors la valeur j_1 est acceptable

$$S_{1eff} = \frac{7.19}{1 * 7.2480} = 0.991 \quad [mm^2]$$

$$S_{1eff} = S_{él} \times n_{él}$$

$$n_{él} = [2 \div 3]$$

$$S_{él} = \frac{S_{1eff}}{n_{él}} = \frac{0.991}{3} = 0.330 S_{él} \quad \Rightarrow \quad = 0.330 \text{ mm}^2$$

S_{1eff} normalisée = **0.353** $[mm^2]$

Donc :

$$d_{iso} = 0.73 \text{ mm} \quad \Rightarrow \quad d_{nu} = 0.67 \text{ mm}$$

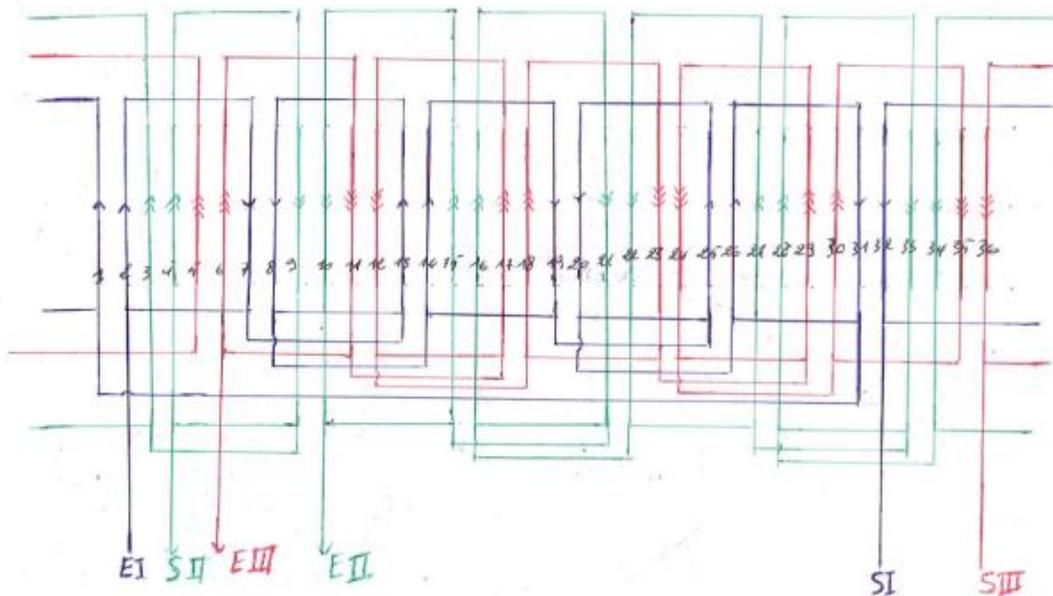
18. La densité du courant

$$J_1 = \frac{i_1 \text{ nom}}{a_1 \times S_{él} \times n_{él}}$$

$$J_1 = \frac{7.19}{1 * 0.330 * 3} = 7.26 \text{ A/mm}^2$$

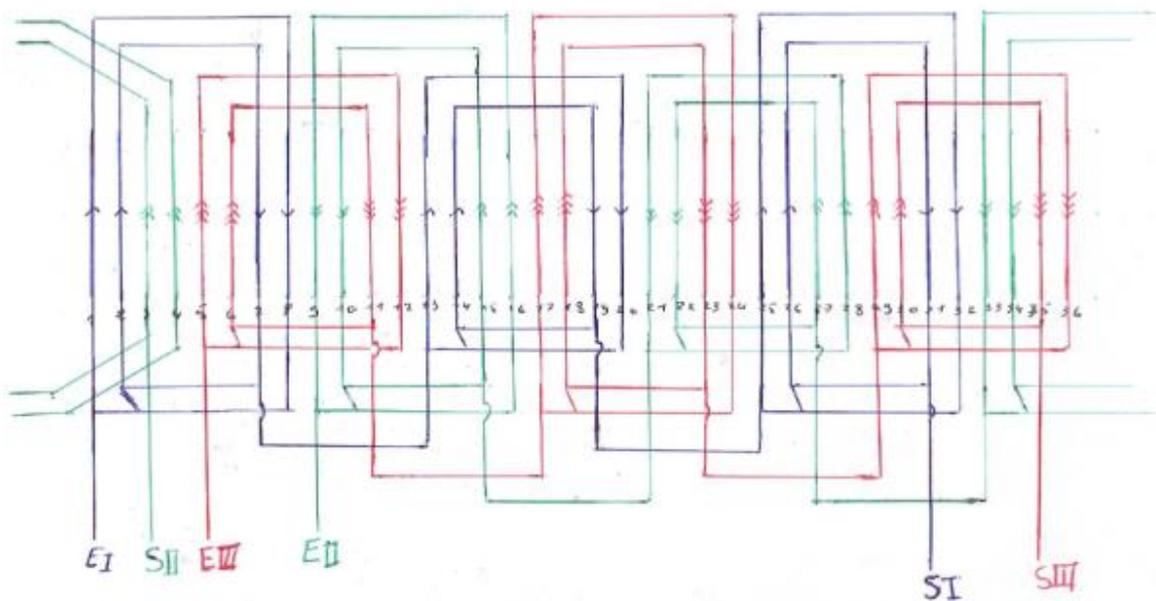
On remarque que $j_1 [3 \div 9]$ alors la valeur de j_1 est acceptable.

IV 3. Les schémas de bobinage



$Z = 36 ; m = 3 ; q = 2$

Fig IV.1 : Schéma de bobinage ; Enroulement par poles (Triplan)



$Z = 36 ; m = 3 ; q = 2$

Fig IV.2 : Schéma de bobinage ; Enroulement par conséquant (biplan)

IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons données quelque méthode de calculs simplifiés du bobinage des stators des machines tournante à courant alternatif. Ensuite une réalisation pratique de rebobinage, d'un moteur asynchrone triphasé, qui sont de loin les plus répons, pourront cependant être facilement généralisés à tout autre nombre de phases, que l'on rencontre au stator des machines synchrones et asynchrones.

*CONCLUSION
GENERALE*

Conclusion générale

Dans ce projet, commencez par un aperçu des machines électriques tournantes à courant alternatif, En fonction de ce que vous savez, leur composition ainsi que le principe de fonctionnement, etc. Ensuite, nous avons discuté des défauts des machines électriques à courant alternatif. L'un des trois types de défauts est résolu, à savoir l'usure du bobinage des stators, qui est un composant commun des moteurs synchrones et asynchrones, puis nous avons essayé de rassembler certaines des techniques utilisées et des normes liées au processus d'enroulement du stator dans les machines qui tournent à une vitesse

Etant donné la variété de ces systèmes et la complexité d'un grand nombre d'entre eux, nous nous attardons uniquement à l'examen d'une partie de ces stratégies et à l'investigation de quelques points centraux en prise avec le plan d'un bobinage.

Nous nous sommes concentrés sur les raisons de l'apparition de la déception de l'enroulement du stator qui provoque la fermeture à moitié ou complètement d'une machine, au motif que l'existence d'un enroulement est limitée par les états de fonctionnement de la machine auxquels les enceintes sont opprimées, le plus les circonstances sont terribles, plus la durée de vie de l'aide est limitée

Pour un rembobinage fiable, les techniques de calcul des limites d'enroulement et de choix de la nature du fil et du segment vital sont essentielles, au motif que les besoins des secteurs d'activité sont exceptionnellement différents, ce qui rend important de poursuivre une décision suffisante.

Les procédures de rembobinage des machines actuelles de substitution contrastent, suivant leur type et l'idée de chaque pièce d'équipement, la dernière option nécessite précision et exécution dans la mesure où la localisation des boucles dans les partitions, la nature du papier protecteur et la tâche d'imprégnation décident également de la rigidité de la machine

En outre lorsqu'une machine doit être rebobiné, le nouvel enroulement doit être impérativement identique au précédent, c'est-à-dire qu'à partir du premier enroulement qu'on détermine le second.

En fin de compte, nous espérons que, grâce à notre modeste travail, nous avons éclairé quelques points concernant les procédures à suivre pour la réalisation pratique d'un rembobinage, afin d'avoir un produit fiable et rentables.

Références bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Emile Bowendné Mouni Ingénieur E.S.I.P. (25 November 2008). Contribution à l'amélioration des performances des génératrices synchrones : nouvelle structure d'excitation basée sur une machine à aimants et combinée à des lois de commande avancées, thèse de doctorat université de Poitiers.
- [2] EXP-PR-EQ150-FR Dernière Révision. (18 Avril 2007). Support de Formation (Total).
- [3] R.MERLET (1980). Technologies d'électricité générale et professionnelle (TOME III). bobinage des machines électriques et des transformateurs statiques.n°2344.
- [4] TECHNIQUE DE L'INGENIEUR (Réf : D3420 V1).(Date de publication 10 février2001). Bobinage des machines tournantes à courant alternatif.
- [5] ABDESSEMED VERA.(2012). « CONTRIBUTION A L'ANALYSE ET L'AMELIORATION DE LA FIABILITE DES MACHINES ELECTRIQUES » these de doctorat Université Banta.
- [6] SIMON LOUTZKY Calcul Machine Electrique.
- [7] Abdessemed R, Tomachevitch V. F. (1995). « Enroulements des machines électriques ». Livre, Université Batna.
- [8] Etienne Gaucheron. (édition juin 2004). Technicien supérieur en électrotechnique, Cahier Technique Schneider Electric n° 207 / p.10, CT 207.
- [9] IFPM Maintenance.(Edition Septembre 2015). ART 80 5673, www.schneider-électrique.com.
- [10] Dominique RUCH.(2005). Guide pratique de rebobinage des moteurs, référence interne B546/1.
- [11] JAQUE SAINT MECHEL. (10 février 2001). Réalisation pratique des bobinages des machines tournantes à courant alternatif Réf : D3420 v1.
- [12] Conseil-expertise. (27 février 2018). Categories : Développer, Industrie & environnement , www.conseil-expertise.com.
- [13] (CHAVIN ARNAUX GROUP. (Ed.01-2010). Guide De La Mesure D'isolement, www.chauvin-arnoux.fr. 9062 101 96 - Ed.01.
- [14] NFC51-111 Tableau des normes pour Mesure la rigidité diélectrique.
- [15] Guesbaya N. (2019). Technique de bobinage des stators des machines à courant alternatif. Mémoire de master, Université Mohamed Kheider Biskra.