



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

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Réseaux électriques

Réf. :

Présenté et soutenu par :
GUESBAYA Nadjib

Le : **lundi 8 juillet 2019**

Techniques de bobinage des stators des machines à courant alternatif

Jury :

Mr	NAIMI Djemai	MCA	Université d'appartenance	Président
Mr	YAHIA Khaled	Pr	Université d'appartenance	Examineur
Mr	BEN MEDDOUR Mostefa	MCA	Université d'appartenance	Rapporteur

Année universitaire : **2018 - 2019**

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 : Réseaux 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 :
GUESBAYA Nadjib

Avis favorable de l'encadreur :
Pr. TITAOUINE Abdennacer

Avis favorable du Président du Jury :

Mr. NAIMI Djemai

Cachet et signature

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 : Réseaux électriques

Thème :

Techniques de bobinage des stators des machines à courant alternatif

Proposé et Dirigé par : **Pr. TITAOUINE ABDENNACER**

RESUME

Dans ce thème, nous avons présenté quelques études concernant les enroulements des machines à courant alternatif et nous avons essayé de rassembler aussi quelques éléments constituant une approche aux procédés techniques pour développer un schéma de bobinage des stators. Vu la diversité de ces techniques et la complexité d'un grand nombre d'entre eux nous sommes intéressés à l'analyse de certaines de ces méthodes, ainsi que la méthodologie de la technique de rebobinage qu'il faut, afin d'avoir un bon rendement à long terme dans le but de maintenir la continuité de service d'une chaîne de production.

Mots clés: machines à courant alternatif, Technique de rebobinage

Résumé

ملخص

في هذا الموضوع تطرقنا الى دراسة بعض لفائف آلات التيار المتناوب، وحاوّلنا جمع بعض العناصر التي تساعد على فهم كيفية انشاء مخطط اللف المناسب لكل ماكينة و ذلك نظرا إلى تنوع هذه المخططات وتعقيد عدد كبير منها، كما تطرقنا ايضا الى المراحل التي يجب ان تتبع لانجاز التلّيف و بينا الوسائل المتبعة للحصول على لف مطابق يتمشى مع نوعية الماكينة، بهدف الحصول على مردود فعال يضمن استمرارية الانتاج على المدى الطويل.

كلمات رئيسية: آلات التيار المتناوب، تقنية اللف

Abstract

In this thesis, we have presented a study about the windings of AC machines and we have tried to collect some elements constituting an approach to the technical processes to develop a winding scheme of the stators. Considering the diversity of these techniques and the complexity of a large number of them, we are interested only in analyzing some of these methods, as well as the rewinding technique methodology that is needed. In order to have a good long-term efficiency and maintain the continuity of service of a production line.

Key words: AC machines, Rewinding technique

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciement

*Tout d'abord, mes remerciements s'adressent naturellement au **Pr. TITAOUINE ABDENNACER** le directeur de la thèse qui a eu un rôle principal en menant la thèse à cette fin satisfaisante. En plus de l'encadrement et grâce à ses expériences riches dans le domaine.*

*Ensuite, je tiens à remercier messieurs **Dr. BEN MEDDOUR MUSTAPHA** et **Dr. NAIMI DJAMAI** et **Pr. YAHIA KHALED**.*

rapporteurs du jury de thèse, pour avoir accepté d'examiner le mémoire final et pour le plaisir que j'ai eu à répondre à leurs questions, qui ont montré leur intérêt pour le sujet et leur profonde analyse.

Mes remerciements vont également à tous mes Collègues du département d'électrotechnique et à son corps administratif.

إهداء

أهدي هذا العمل المتواضع إلى أعز انسانين في الحياة أمي وأبي حفظهما الله

إلى زوجتي وأولادي مريم, محمد الصادق, معاذ و عبد الرؤوف

ولإخواني وأخواتي

و إلى كل الاصدقاء

Table des matières

Table des matières

Table des matières

Introduction générale	1
<u>Chapitre I : Généralités sur les machines tournantes à courant alternatif</u>	
I.1 Bref historique sur les machines électriques :	3
I.2 Introduction :	4
I.3 Les machines asynchrones :	4
I.4 Les machines synchrones :	8
I.5 Constitution des machines tournantes à courant alternatif :	9
I.6 Défauts des Machines Electriques tournantes :	16
I.6.1 Aperçu sur les enroulements des machines électriques Dans l'industrie électrotechnique :	17
I.6.2 Arbre des causes de défaillance des bobinages statoriques :	17
I.6.3 Défauts statoriques :	18
I.7 Conclusion :	19
<u>Chapitre II : Etude des enroulements à courant alternatif</u>	
II.1 Introduction :	20
II.2 Bobinage imbriqué :	20
II.3 Bobinage ondulé :	20
II.4 Représentation des enroulements à courant alternatif:	21
II.4.1 Bobines concentriques reliée en série:	21
II.4.2 Bobines identiques reliées en série:	22
II.4.3 Bobinage à pas diamétral :	22
II.4.4 Bobinage à pas raccourci :	22
II.4.5 Bobinage à pas allongé :	23
II.4.6 Coefficient de bobinage k_b :	24
II.4.7 Couplage des bobines :	24
II.5 Exécution des schémas de bobinage :	24
II.6 Réalisation des schémas de bobinage :	25
II.6.1 Bobinage des stators triphasé:	25

Table des matières

II.6.2	Enroulements Monophasé :	32
II.6.3	L'enroulement diphasé :	34
II.7	Conclusion :	35

Chapitre III: Bobinage des stators à deux polarités

III.1	Généralités :	36
III.2	Moteurs à deux vitesses et un seul bobinage :	37
III.3	Couplage du bobinage a deux vitesses :	38
III.3.1	Couplage à couple constant :	39
III.3.2	Couplage a puissance constante :	39
III.4	Moteurs à deux enroulements distincts :	40
III.4.1	Méthode de réalisation le bobinage du stator :	41
III.5	Changement des caractéristiques du bobinage d'un stator :	41
III.5.1	Transposition ou la puissance reste la même et ou la tension seule change :	42
III.5.2	Transposition ou la puissance change et la tension reste la même :	44
III.5.3	Transposition a tension variable et a puissance variable :	46
III.6	Conclusion :	47

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

IV.1	Introduction :	48
IV.2	Calcul simplifié du bobinage:	48
IV.2.1	Calcul du facteur de remplissage :	48
IV.3	Réalisation pratique du bobinage:	53
IV.3.1	Repérage d'un bobinage :	53
IV.3.2	Retrait du cuivre dans les encoches :	54
IV.3.3	Contrôle et nettoyage du circuit magnétique :	55
IV.3.4	Confection et montage des isolations d'encoche :	55
IV.3.5	Comptage du nombre de fils par encoche :	56
IV.3.6	Mesure et choix des fils :	57
IV.3.7	Calcul des différents paramètres du moteur et établissement du schéma de bobinage :	59
IV.3.8	Confection des bobines :	61

Table des matières

IV.3.9 Insertion du bobinage dans la machine :	61
IV.3.10 Fermeture des encoches ou calage des encoches :	62
IV.3.11 Isolation entre phase :	63
IV.3.12 Brasage des connexions :	63
IV.3.13 Frettages et positionnement des sondes de protection thermiques :	64
IV.3.14 Test du moteur avant imprégnation :	64
IV.3.15 Vernissage du bobinage :	69
IV.3.16 Remontage du moteur :	69
IV.3.18 Essai en charge :	70
IV.3.19 Interprétation :	71
IV.4 Conclusion :	71
Conclusion générale :	72
Bibliographie :	73

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les machines tournantes a courant alternatif

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

Chapitre II : Etude des enroulements à courant alternatif

Fig. II.1 Enroulement imbriqué de deux bobines en serie	20
Fig. II.2 Enroulement ondulé de deux bobines en serie	21
Fig. II.3 Bobine concentrique reliées en série	21
Fig. II.4 Bobine identique ou "section" reliées en série	22
Fig. II.5 Angle géométrique et électrique pour une machine à 4 poles	23
Fig. II.6 Représentation de deux types de bobinage nodule (a:progressif/b:retrograde)	24
Fig. II.7 Enroulement à une couche	25
Fig. II.8 Etoile de phase	26
Fig. II.9 Bobinage d'une machine asynchrone, 4poles a nombre d'entier d'encoche	27
Fig. II.10 Bobinage semi régulier à pas diamétral, 30 encoches 4poles	28
Fig. II.11 Schéma de bobinage d'un stator, 6poles, 39encoches, 36 bobinés et 3 vide	29
Fig. II.12 Bobinage imbriqué d'un stator de 24 encoches à deux vitesses	31
Fig. II.13 Schéma de bobinage du stator d'un moteur asynchrone monophasé 36 enc	33
Fig. II.14 Schéma d'enroulement diphasé à bobine concentrique dispose sur 2 plans	34
Fig. II.15 Schéma de bobinage d'un stator diphasés, 16 encoches à deux faisceau	34

Liste des Figures

Chapitre III : *Bobinage des stators a deux polarités*

Fig III.1 Schéma de bobinage d'une machine à deux vitesses	36
Fig III.2 Schéma de bobinage à double faisceaux 2/4 poles	37
Fig III.3 Schéma de couplage utilises pour les moteurs à deux vitesses	38
Fig III.4 Couplage à puissance constant d'un stator 2/4poles , 24encoches	40
Fig III.5 Schéma de bobinage d'un moteur à deux vitesses, à 2 enroulements	41

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

Fig IV.1 Stator grillé d'un moteur asynchrone triphasé 36KW	53
Fig IV.2 Débobinage du moteur	54
Fig IV.3 Stator nettoyer et préparé après le débobinage	55
Fig IV.4 Montage des isolants dans les encoches	56
Fig IV.5 Chignons récupéré après le débobinage du moteur	57
Fig IV.6 micromètre (palmer) pour mesure le diamètre fil	57
Fig IV.7 Schéma de bobinage	60
Fig IV.8 Machines de confection des bobines	61
Fig IV.9 montages des bobines dans le stator	62
Fig IV.10 cales de fermeture d'encoche	62
Fig IV.11 Montages et isolations des bobines	63
Fig IV.12 Frettages et positionnement des sondes de protection thermiques	64
Fig IV.13 Mégohmmètre C.A 6547 chauvin Arnoux	66
Fig IV.14 test de rigidité diélectrique avec générateur de choc THUMM	67
Fig IV.15 Teste dynamique	68
Fig IV.16 Remontage des roulements à l'aide d'un Chauffe roulement réglé en T°	69
Fig IV.17 test à vide du moteur après le remontage	70

Liste des Tableaux

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 49

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

Tab. IV.1 Tableau des diamètres des fils nus, émaillés, isolés et rayonne 52

Tab. IV.2 Tableau de fiche bobineur 58

Tab. IV.3 Tableau des resultants de calculs 59

Tab. IV.4 Tableau de different valeur de DAR 66

LISTE DES SYMBOLES

Ω_s	vitesse synchrone de rotation du champ tournant en rad.s-1.
ω	pulsation des courants alternatifs en rad.s-1. $\omega = 2.p.f$
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
P	nombre de paires de poles
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)
η	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 triangle

Liste des Symboles

γ	couplage en étoile
Θ	écart ongulaire entre phases
q_p	nombre d'encoche par pôle et par phase d'enroulement principale
q_A	nombre d'encoche par pôle et par phase d'enroulement principale
a	facteur de remplissage
R	résistance ohmique du stator par phase
P_c	poids de cuivre

Introduction
générale

Introduction générale

Dans le vaste champ de l'électrotechnique, une des plus anciennes disciplines est la construction des machines électriques. En fait les premières tentatives de construction de machines électriques commencèrent avec la découverte des phénomènes d'induction et la mise en évidence des forces issues de l'interaction entre les champs électromagnétiques et les courants de conduction.

Les machines électriques occupent une place importante dans la vie active et constituent l'élément essentiel de toute installation énergétique ou industrielle, en outre, le domaine d'application des machines électrique est très vaste, d'où une diversité d'exploitation des différents secteurs stratégique, nous citons entre autre : la traction ferroviaire, la propulsion électrique des navires, le pompage, la ventilation, les machines à outils, le nucléaire, etc....

La panne d'une machine électrique dans une unité de production entraîne un arrêt partiel ou total de toute une chaîne pour une durée de temps, s'accompagnant en global par des arrêts de productions.

Le but assigné à une machine électrique est la transformation de l'énergie, d'une forme à une autre, dont l'une au moins est de nature électrique .cette transformation électromagnétique dépend dans une large mesure des enroulements, le type, la qualité de l'isolant, le procédé de mise en encoches ainsi que toute l'opération intermédiaire. La présence sur l'enroulement. exemple d'une couche de charbon ou de poussière d'épaisseur 1mm entraîne son « surchauffement », les statistiques menées par plusieurs firmes sur l'amélioration de la fiabilité des machines électriques, ont montré que 70% des défauts ou des arrêts de ces derniers sont dus aux enroulements.

Vue l'importance des ateliers de réparations qui ont une influence directe sur la production, nous a orienté vers le présent sujet qui comprend l'étude et l'analyse des enroulements des stators des machines tournante a courant alternatif ainsi que leurs techniques de placement en fonction de la puissance et des processus technologiques existants, permettra d'améliorer la fiabilité des machines électriques.

A cet effet notre mémoire et réparti comme suit

Introduction générale

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les différents types des machines Electrique a courant alternatif, leurs classement et leurs principe de fonctionnement ainsi que leurs constitutions. Nous présenterons les principaux défauts qui peuvent affecter les machines électriques.

Dans le deuxième chapitre, nous avons procédé à l'étude des enroulements des machines a courant alternatif. Et ces différents types d'enroulements.

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 les procédures a pour but de définir l'ensemble des opérations adoptées pour le rebobinage des machines électriques.

Chapitre I:
***Généralités 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 (1800-1864) 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).

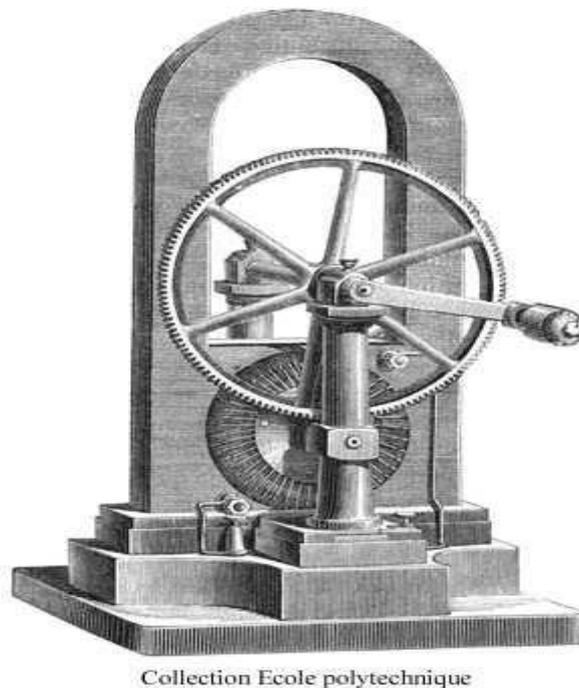


Fig. I. 1 : Machine de Gramme

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].

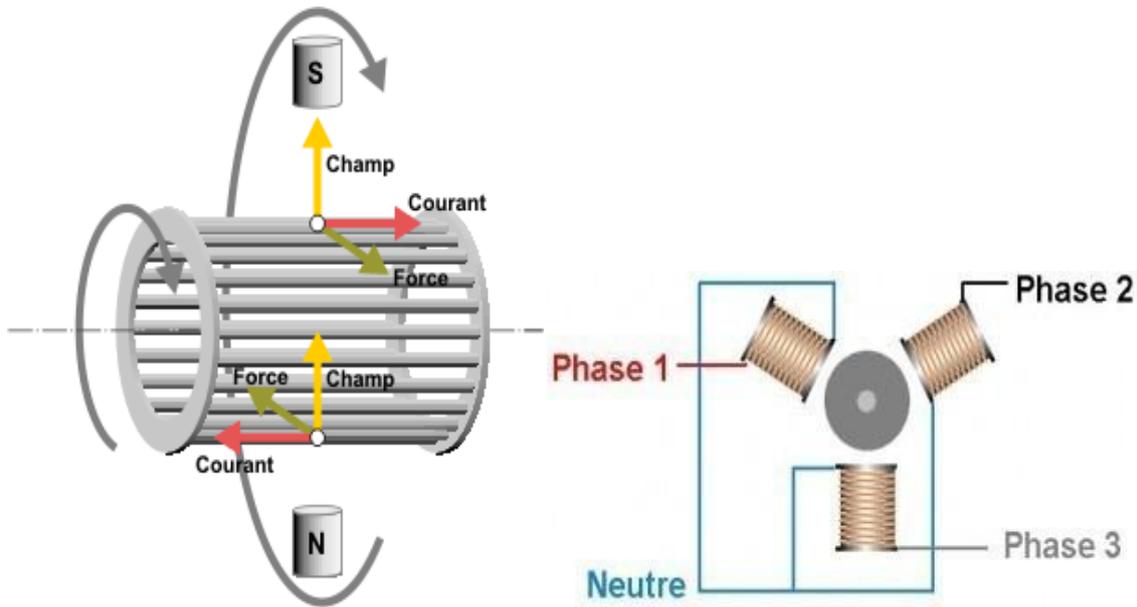


Fig. I. 2 : principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone

$$p = 1 \quad n_s = 60 \times \frac{50}{1} = 3000 \text{tr/min} \tag{I.2}$$

$$p = 2 \quad n_s = 60 \times \frac{50}{2} = 1500 \text{tr/min}$$

$$p = 3 \quad n_s = 60 \times \frac{50}{3} = 1000 \text{tr/min}$$

Un rotor de moteur asynchrone ne tourne donc jamais à la vitesse de synchronisme n_s . Pour un moteur à une paire de pôles (à 50 Hz, la vitesse de rotation du champ tournant (n_s) est de 3000 [tr/min]), la vitesse de rotation du rotor (n_r) 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:

$$g = \frac{(\Omega_s - \Omega_r)}{\Omega_s} = \frac{(n_s - n_r)}{n_s} \quad (\text{I.3})$$

Le glissement s'exprime aussi en pourcentage :

$$g \times 100\%$$

Quand :

- $g = 0$ pas de couple $n_r = n_s$
- $g < 0$ la machine fonctionne en génératrice pour $(n_r > n_s)$.
- $g > 0$ fonctionnement en moteur $(n_r < n_s)$.
- $g = 1$ la machine est à l'arrêt $(n_r = 0)$.

✓ Rendement :
$$\eta = \frac{P_u}{P_1} \quad (\text{I.4})$$

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

- à cage d'écureuil
- 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.

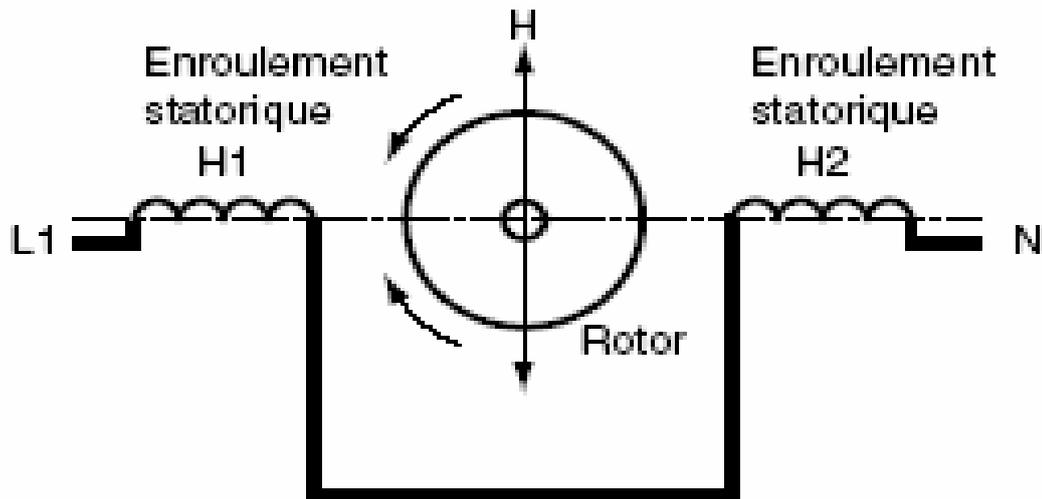


Fig. I.3 : principe de fonctionnement moteur monophasé

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.

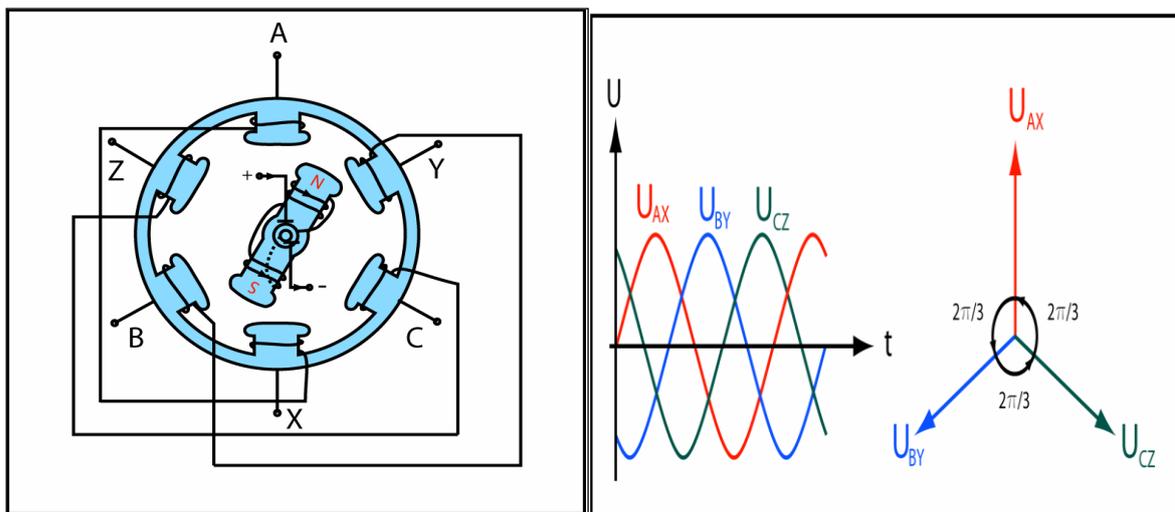


Fig. I.5 : principe de fonctionnement d'un alternateur triphasé

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].

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

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**.

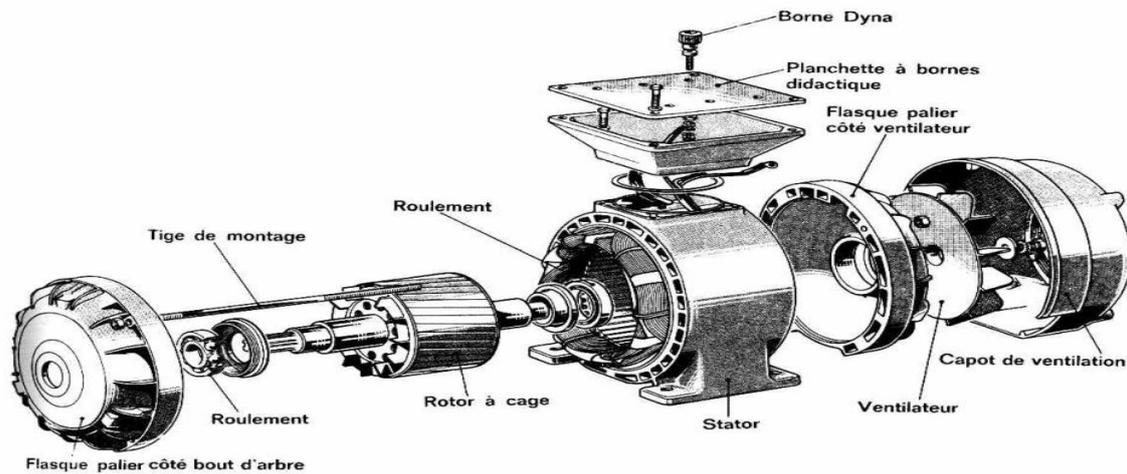


Fig. I. 6 : Typique d'une machine asynchrone triphasée

I.5.1 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.

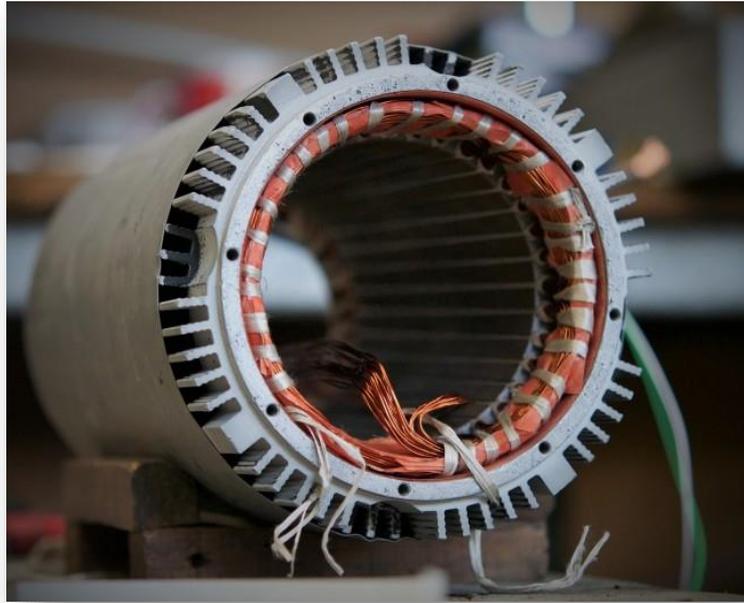


Fig. I. 9 : Stator d'une machine tournante.

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.

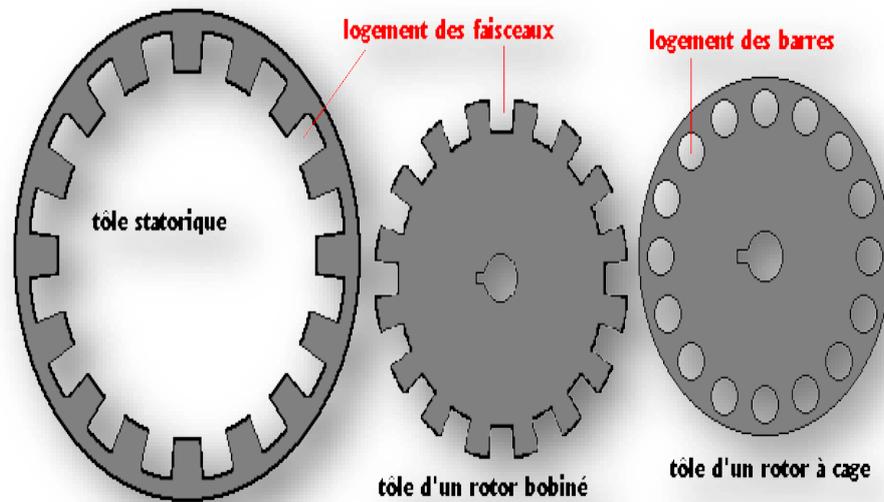


Fig. I. 10 : Différents types de tôles magnétiques

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

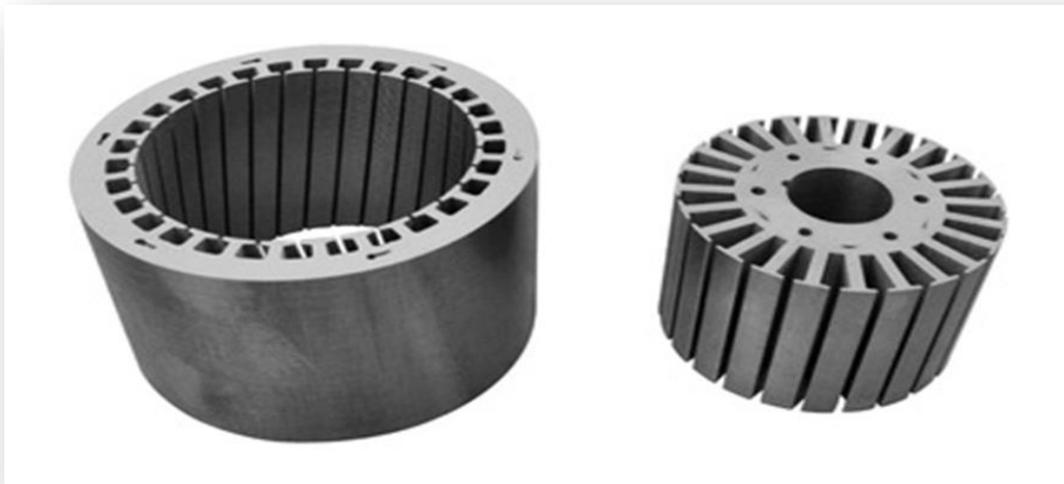


Fig. I. 11 : Circuit magnétique après assemblage des tôles magnétiques

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.

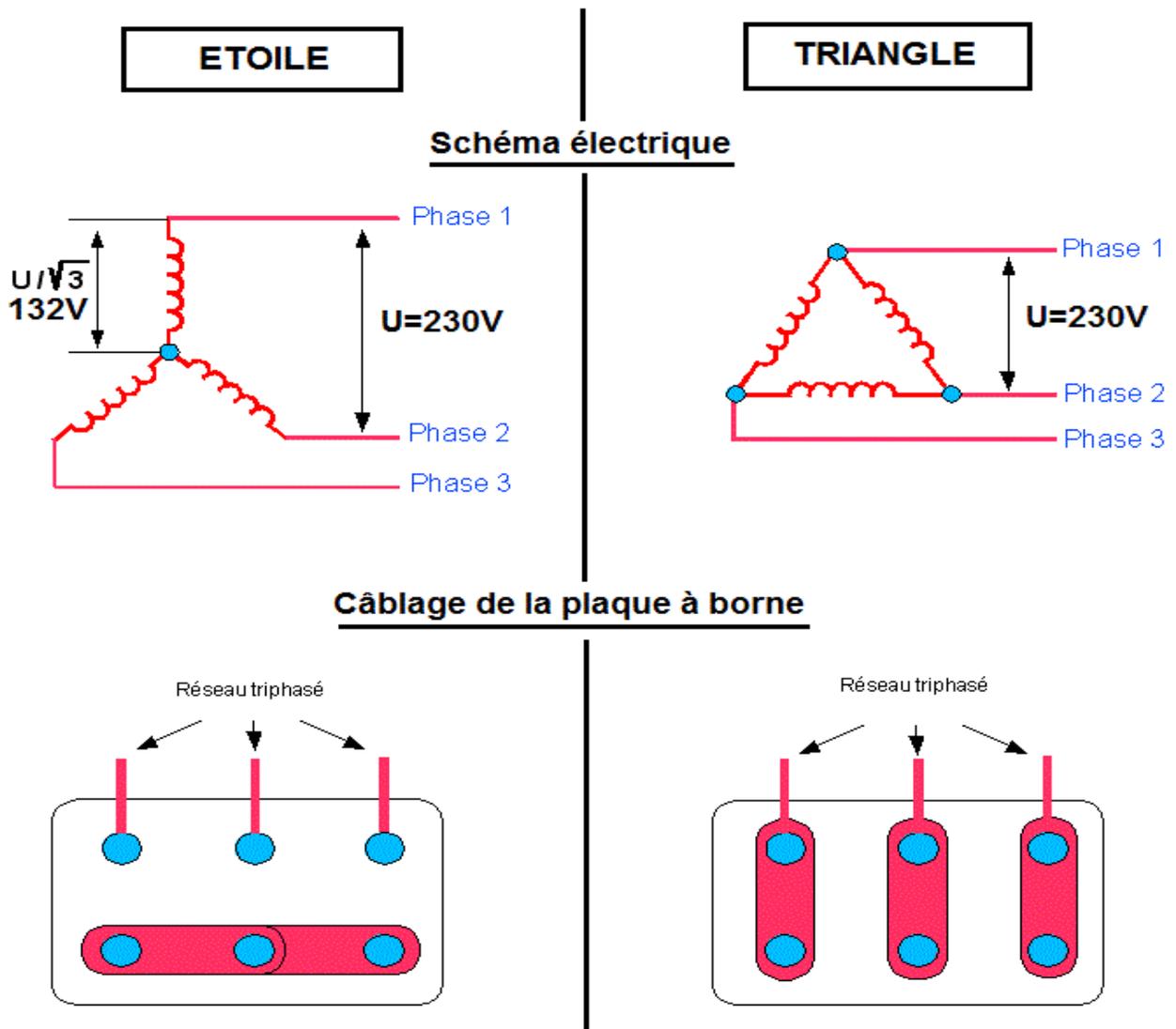


Fig. I. 13 : Plaque à borne d'un moteur triphasé

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		MOT. 3~		LS80 L		T	
		SOMER		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 Défaits 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) électromagnétique
- 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'émail 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 :

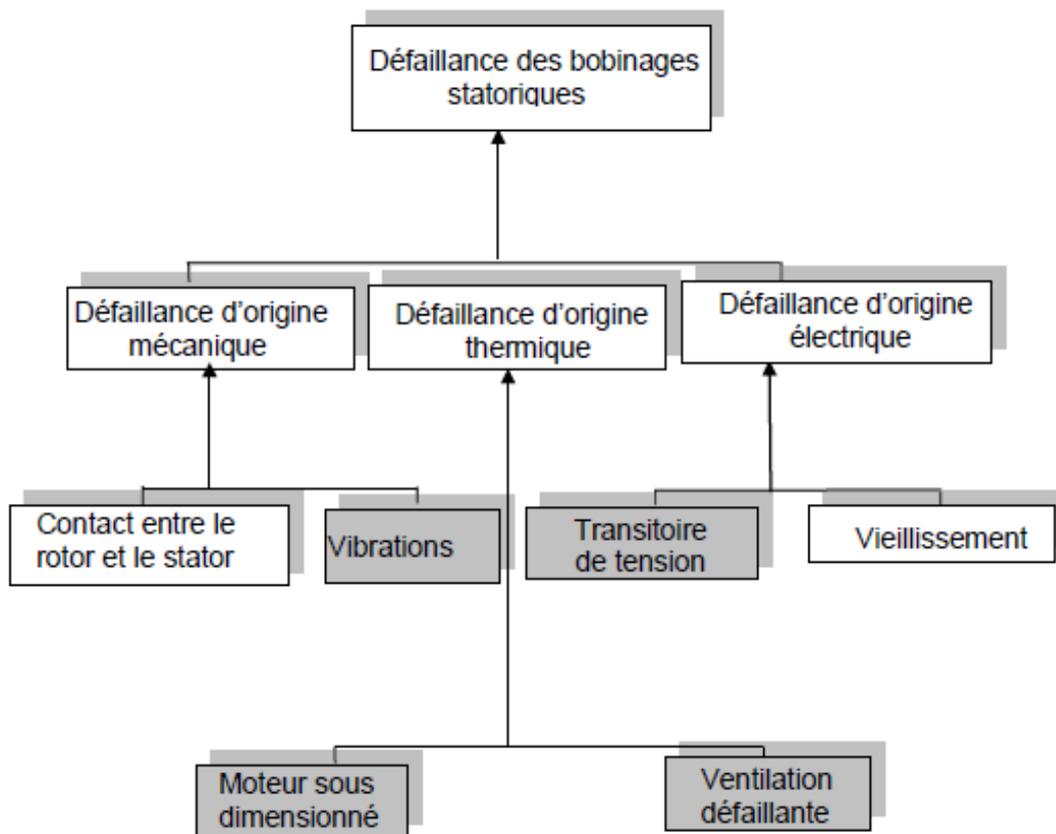


Fig. I. 15 : Arbre des causes de défaillance des bobinages statoriques

I.6.3 Défautes statoriques :

Les défauts statoriques se manifestent sous la forme d'un court-circuit inter-spices, 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.

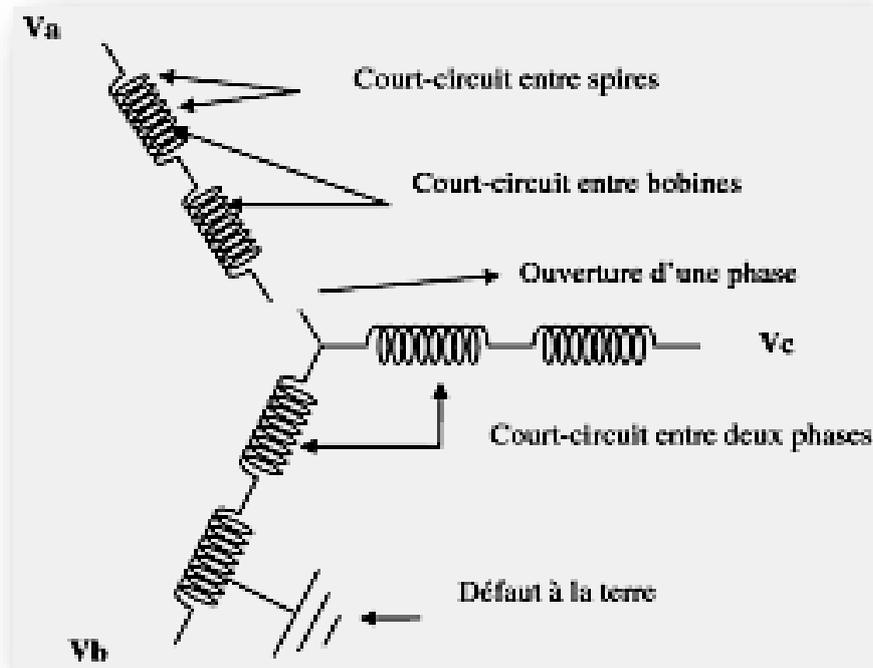


Fig. I. 16 : Différents types de court-circuit dans le stator

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'historique 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 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 ainsi de suite [3].

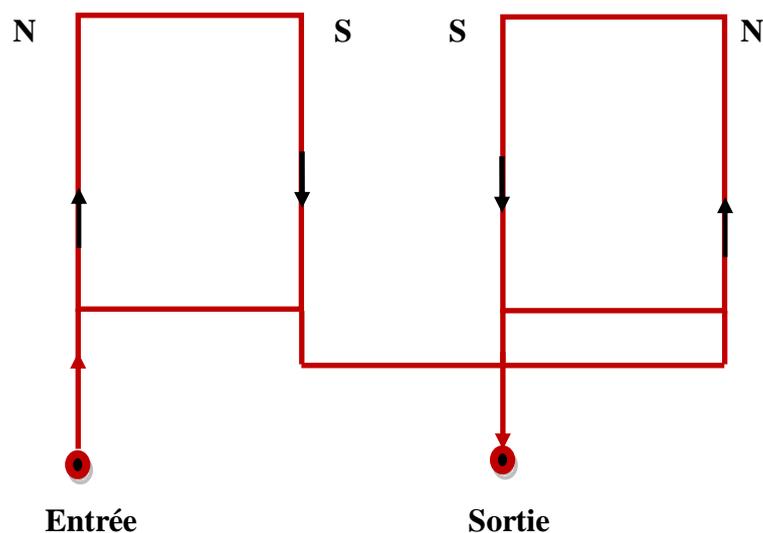


Fig. II. 2 : Enroulement imbriqué de deux bobines en série

II.3 Bobinage ondulé :

Désigné sous le nom de bobinage à (pôles conséquents), 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].

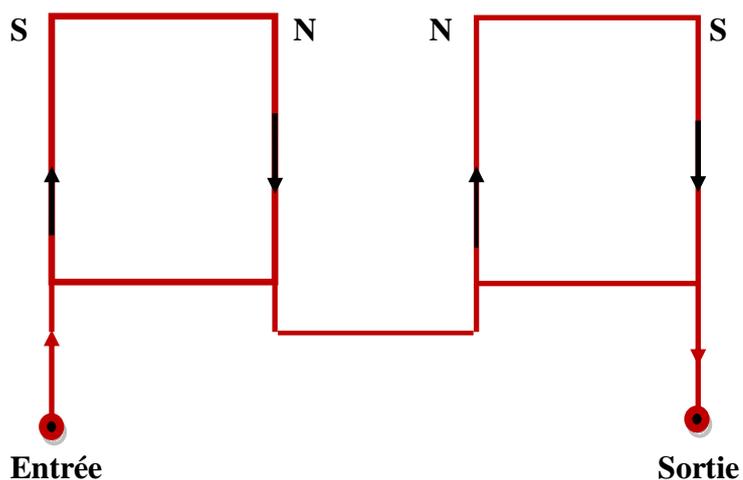


Fig. II. 3 : Enroulement ondulé de deux bobines en série

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:

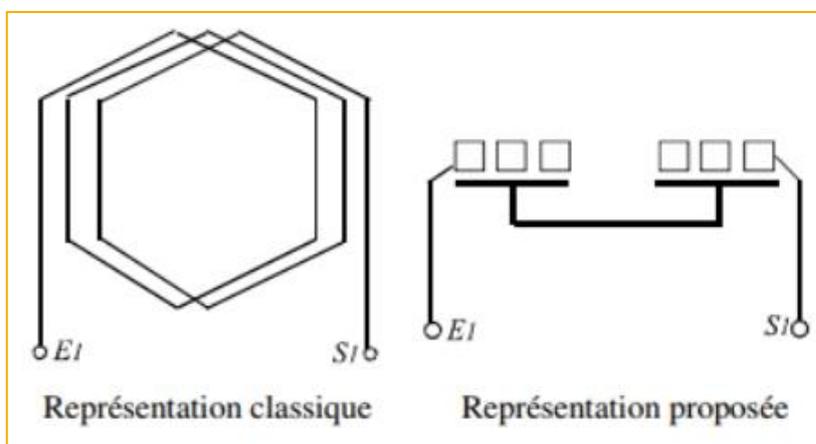


Fig. II. 4 : Bobine concentriques reliées en série

II.4.2 Bobines identiques reliées en série:

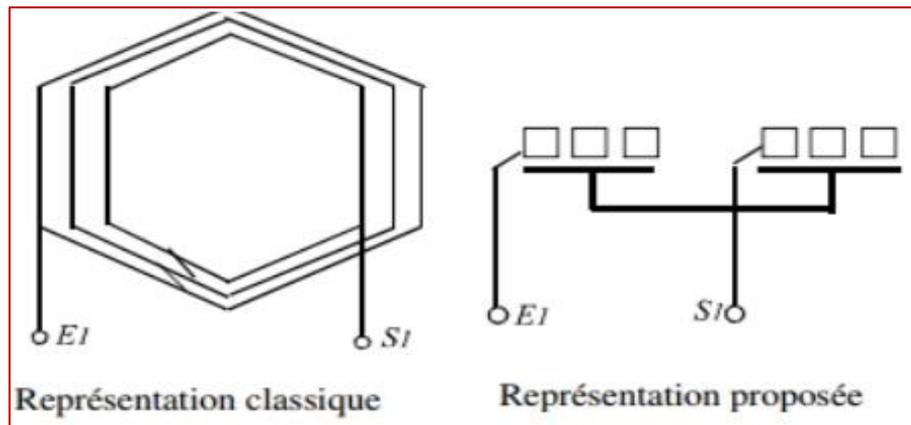


Fig. II. 5 : Bobines identiques ou "section" reliées en série

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 adoptés 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 sont séparés 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 :

$$Y = \frac{Z}{2p} \quad (\text{II.1})$$

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 inférieure 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

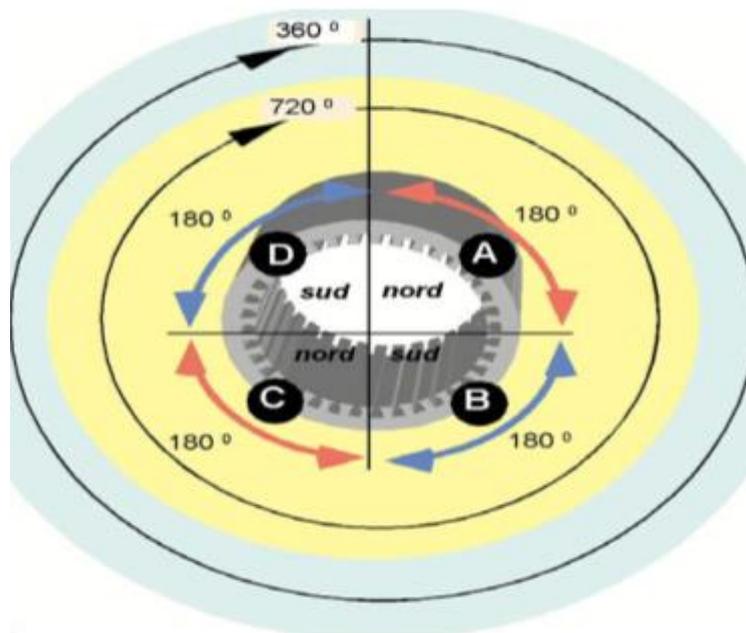


Fig. II. 7 : Angle géométrique et électrique pour une machine à 4 pôles

Dans une machine **bipolaire** 1 degré géométrique = 1 degré électrique.

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

II.4.6 Coefficient de bobinage kb:

Ce coefficient est nécessaire pour le calcul du flux inducteur dans les machines à courant alternatif, kb doit être toujours inférieur à 1 ($kb < 1$). $K_b = 1$ 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 progressant 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].

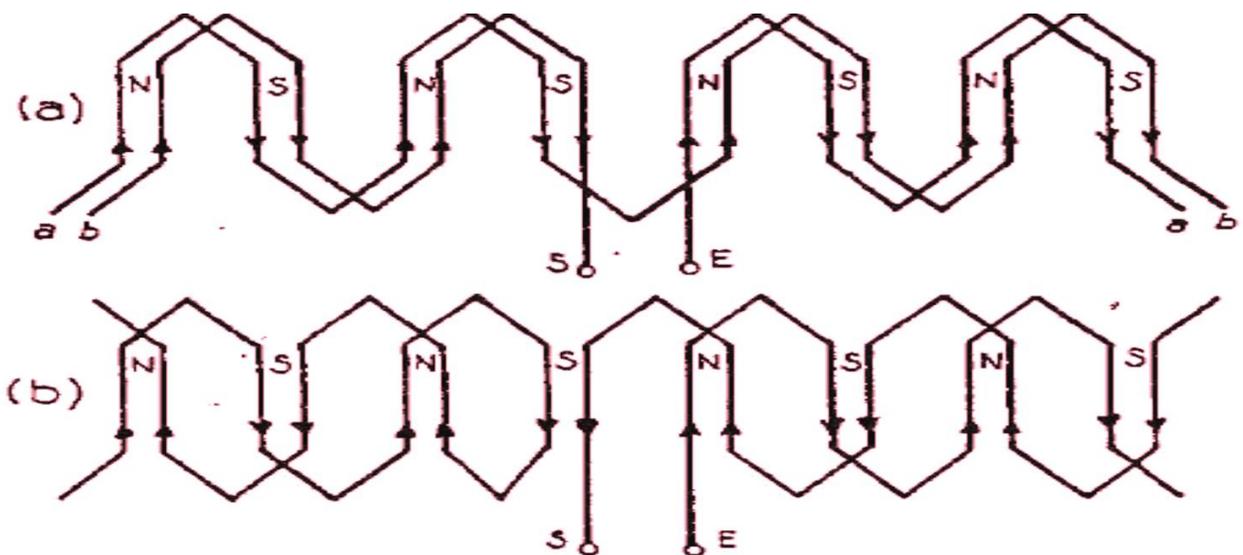


Fig. II. 8 : Représentation de deux types de bobinage ondulé (a: progressif et b : rétrograde)

Dans un enroulement polyphasé on a :

$$q = \frac{Z}{2p \times m} \text{ encoches par pôle et par phase [3]} \quad (\text{II.4})$$

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 paire de pôles ;

Y =pas d'enroulement (nombre d'encoches embrassées par une section) ;

K_b =coefficient de bobinage ;

K_r =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 à une couche :

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

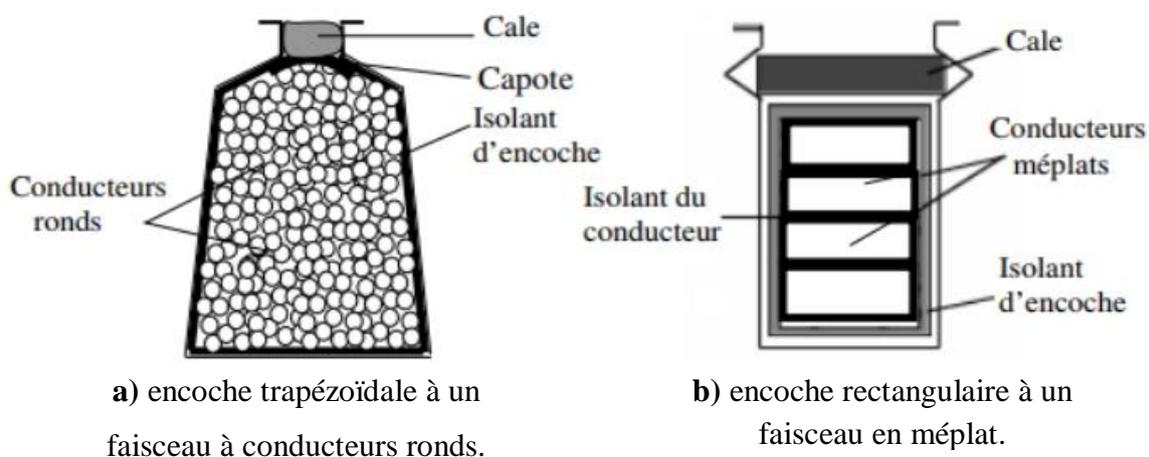


Fig. II. 9 : Enroulement à une couche

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].

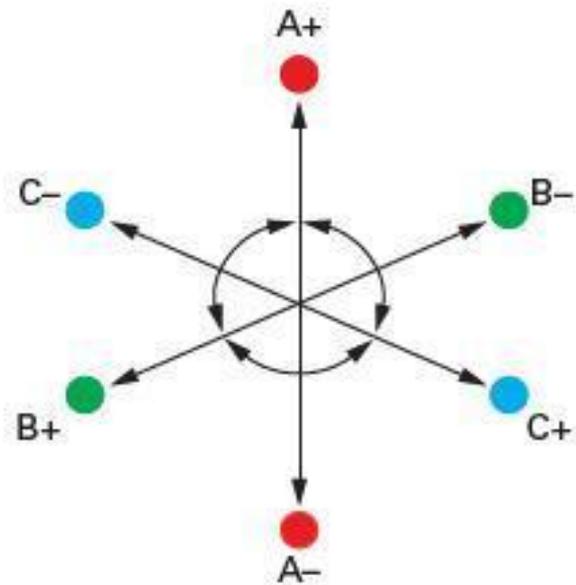


Fig. II. 10 : L'étoile de phase.

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 :

$\frac{2\pi}{m}$, soit $\frac{360}{3} = 120^\circ$ électrique triphasé (m = nombre de phase).

Pour ce type d'enroulement, le coefficient de bobinage k_b peut se calculer avec la formule

$$\text{suivante (3): } k_b = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}}$$

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

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

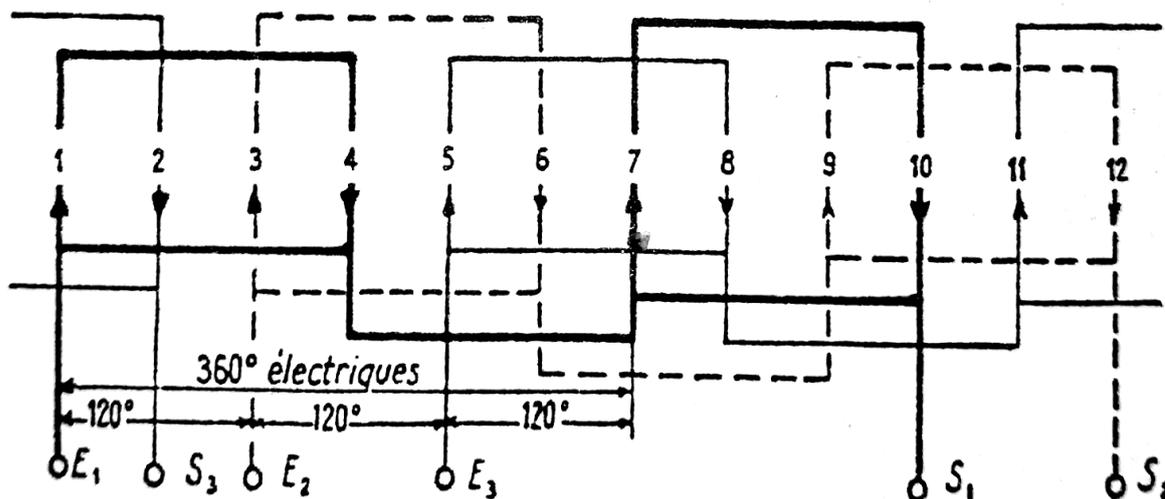


Fig. II. 11 : Bobinage d'une machine asynchrone ,4 pôles a nombre d'entier d'encoche

II.6.1.1.3 Enroulements semi - réguliers :

Ce type de bobinage ne répond 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.

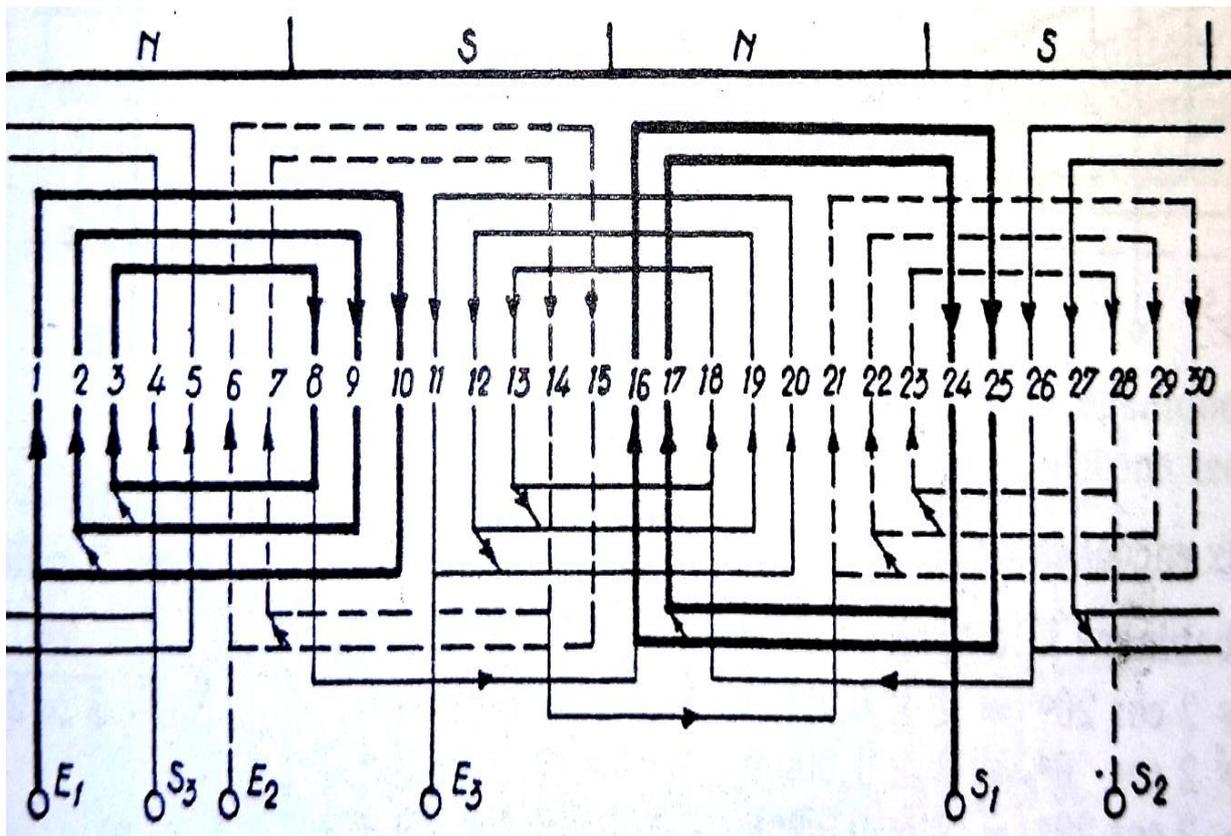


Fig. II. 12 : Bobinage semi-régulier à pas diamétral, 30 encoches 4 pôles

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 et 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°.

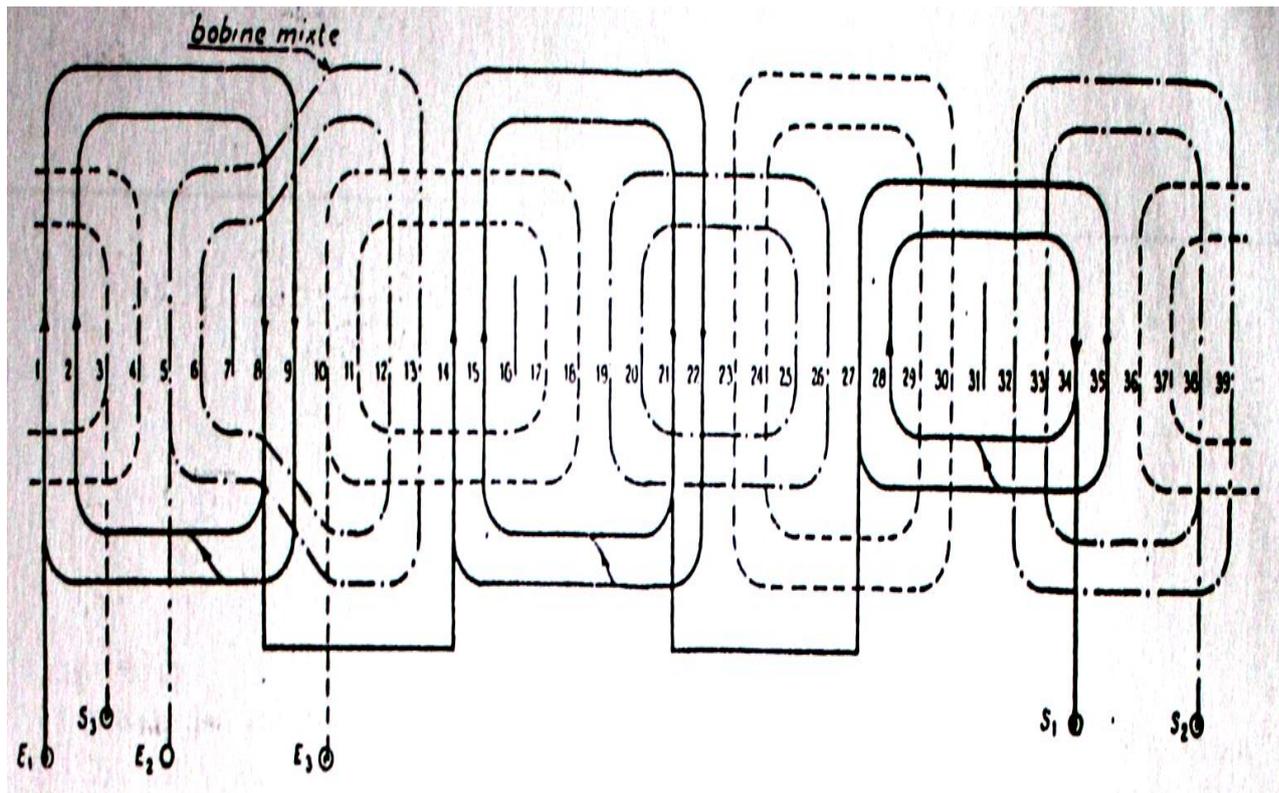


Fig. II. 13 : Schéma de bobinage d'un stator ,6pôles, 39 encoches 36 bobinés et 03 vide
(Bobinage a trous)

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 il appartenant 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 coté 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 laisser 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 et 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 $a = p$.

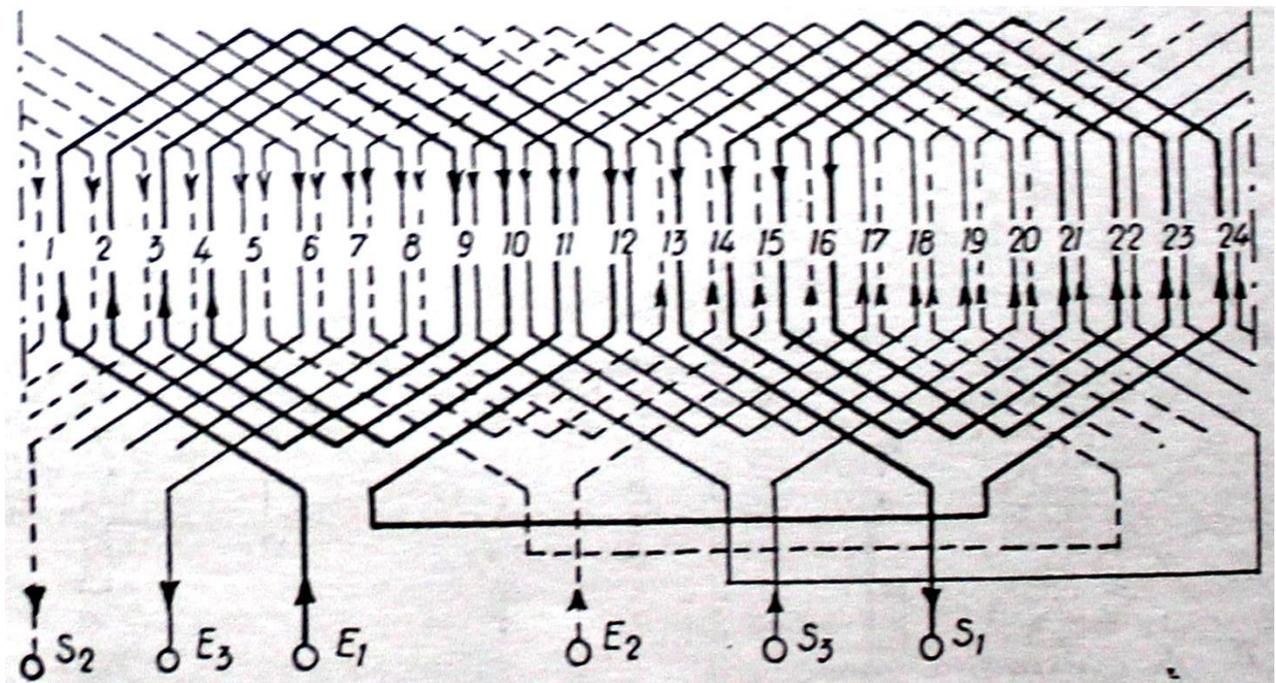


Fig. II. 14 : Bobinage imbriqué d'un stator de 24 encoches à deux faisceaux

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 se 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^e groupe de la 3^e phase, on continue, on plaçant les deux groupes de la seconde phase, ensuite dans la 4^e étape on place le second groupe de la 3^e 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 de $\frac{\pi}{2}$ (90°) 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 μ 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 = 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.

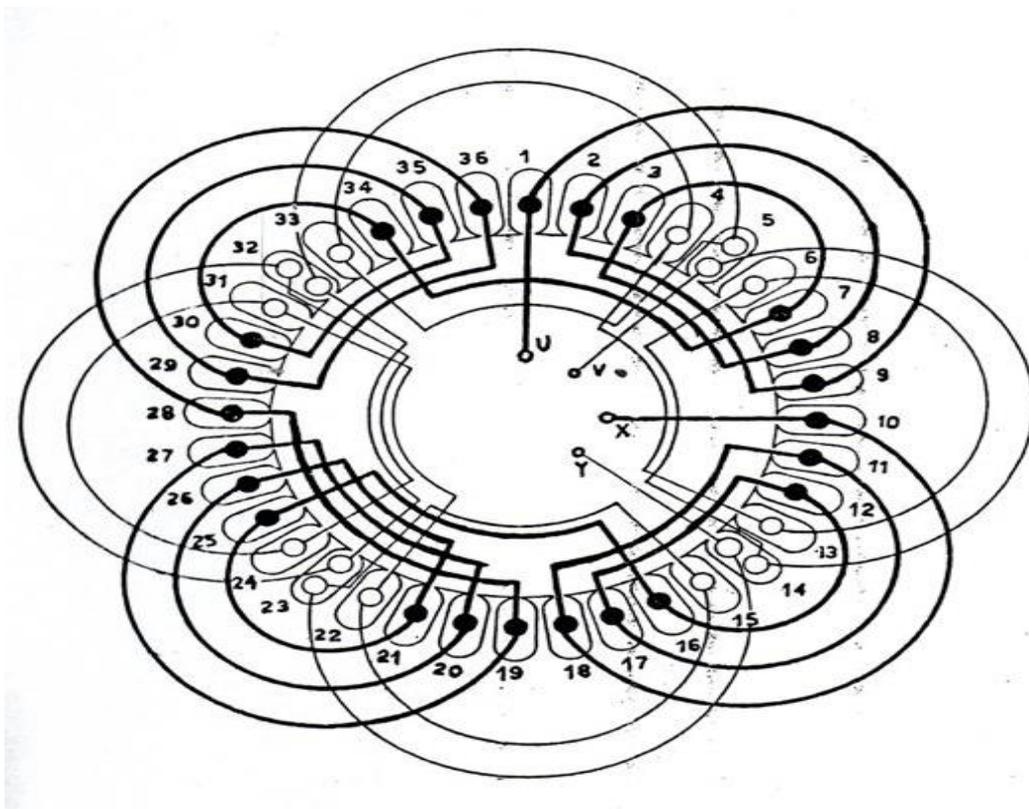


Fig. II. 15 : Schéma de bobinage d'un moteur asynchrone monophasé 36 encoches

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.6.3 L'enroulement diphasé :

Le diphasé a été utilisé au début de l'industrialisation pour produire un champ tournant pour les moteurs. Il se compose d'un neutre et de deux conducteurs "A" et "B" déphasés de 90° (en quadrature). Il a rapidement été remplacé par le courant triphasé qui a de nombreux avantages par rapport au diphasé, le bobinage doit comprendre un nombre identique de conducteur par phase [3].

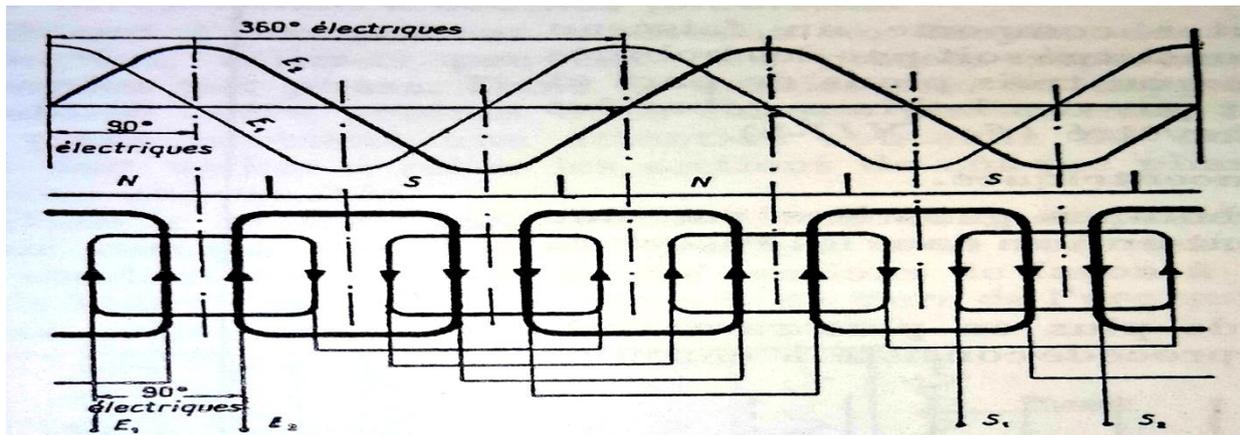


Fig. II. 17 : schémas d'enroulement diphasé à bobines concentriques disposées sur deux plans

On remarque dans la (fig. II.14), au départ que E1 se trouve en position maximum, alors que E2 est au point zéro, les positions sont inversées après un quart de période, le pas des bobines est déterminé par le nombre d'encoches par pôle et par phase il est égal à 4 dans le cas présent, ce qui oblige à laisser 2 encoches libres pour la phase suivante.

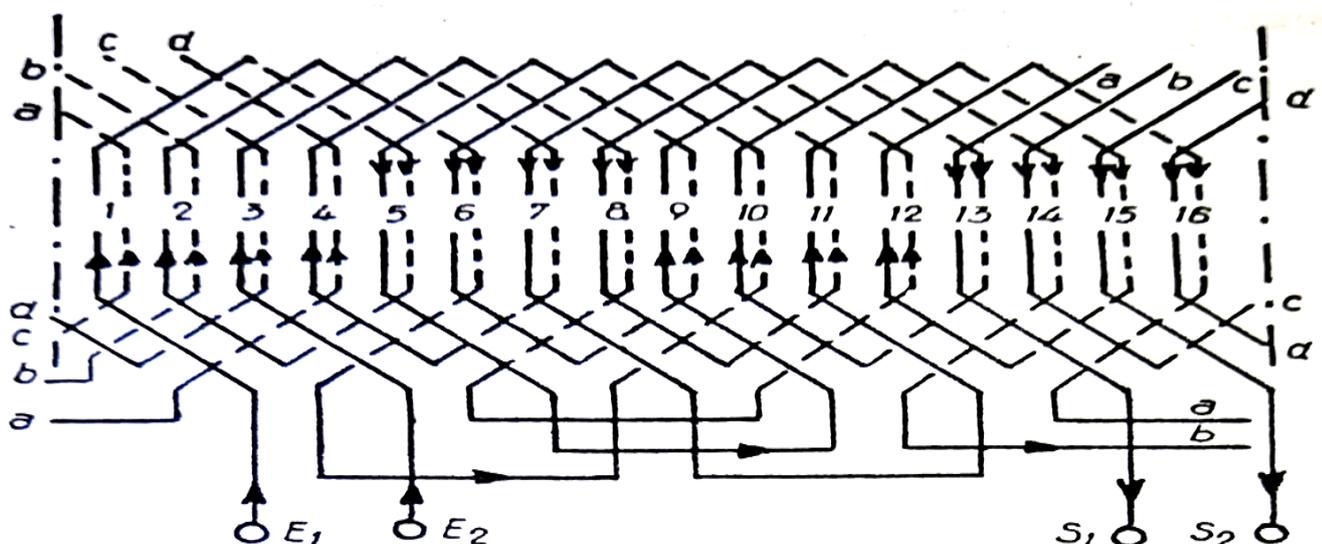


Fig. II. 18 : Schéma de bobinage d'un stator diphasé, 16 encoches à deux faisceaux.

Schéma de la (fig. II.15) représente un enroulement de type imbriqué, à deux faisceaux, à quatre pôles, les entrées E1 et E2 sont à 90° électriques l'une de l'autre, les séries de bobines de chaque phase branchés en série.

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 utilisés pour la mises en encoches, aussi que les différents liaisons entre bobines (séries, parallèles).

Chapitre III :
Bobinage des stators a deux
polarités

III.1 Généralité :

Il est possible de faire varier la vitesse d'un moteur en modifiant le nombre de pôles, pour arriver a 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 pôles de quatre a deux pôles, en crient une prise au milieu du bobinage de chaque phase,

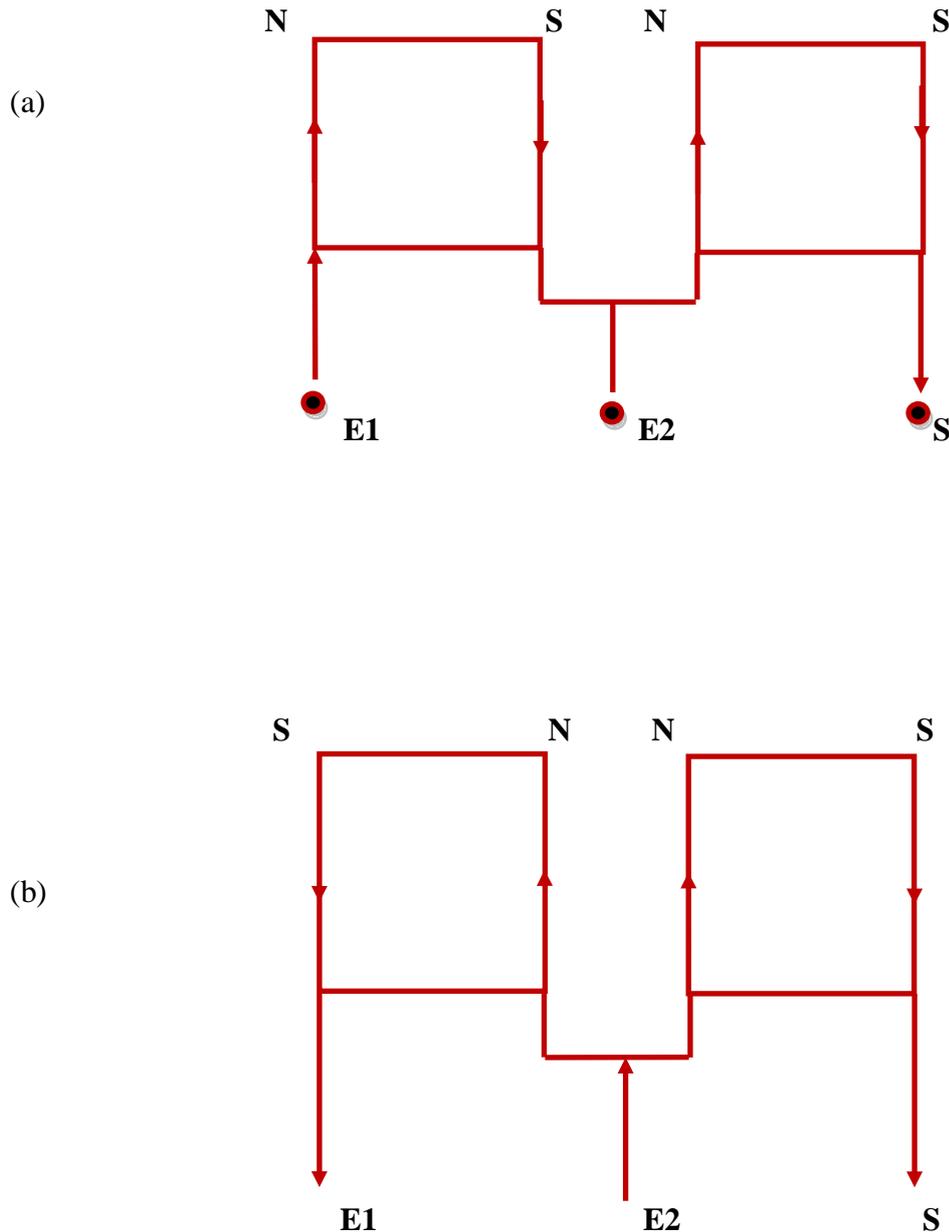


Fig. III. 1 : Schéma de bobinage d'une machine a deux vitesses

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 ;

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

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 dalhander 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 petite polarité (grande vitesse).

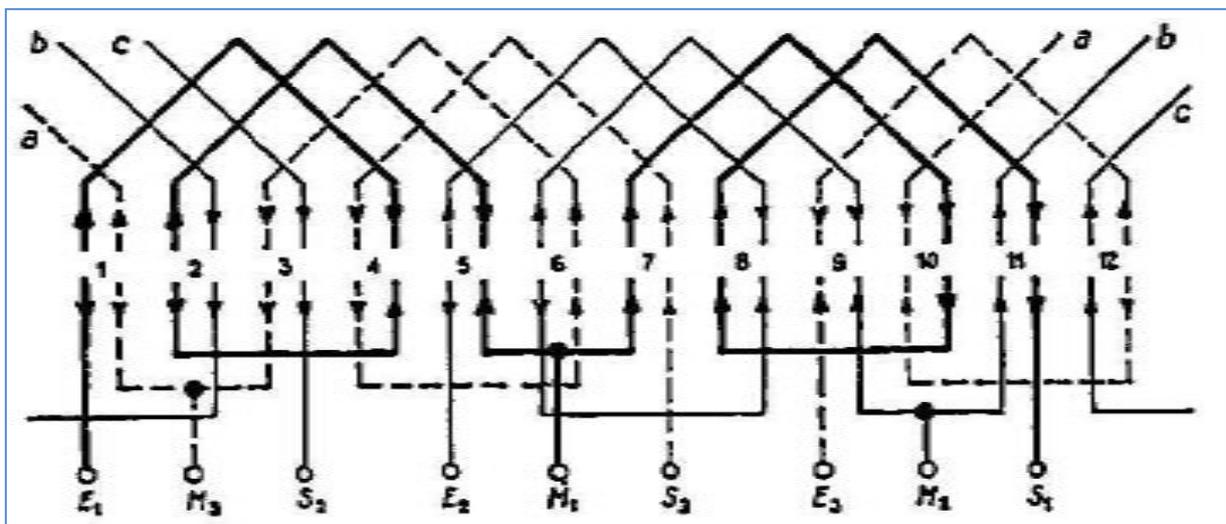


Fig. III. 2 : Schéma d'un bobinage a double faisceaux 2/4 poles .

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

Un pas de $\frac{12}{4} = 3$ 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 :

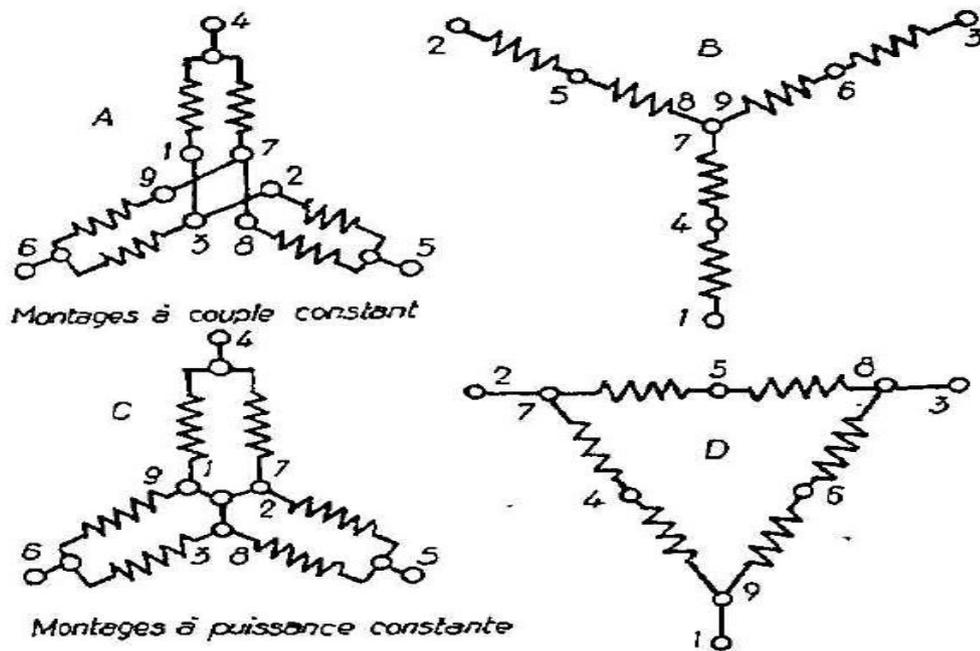


Fig. III. 4 : Schéma de couplage utilisés pour les moteur a deux vitesse

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 a la petite polarité (petit nombre de pôles), on utilise le groupement étoile-parallèle. Une étoile permanente est réalisé 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 8poles 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-parallèle) on connecte la ligne du réseau aux borne M1,M2,M3 et court-circuite les bornes E1,E2,E3au 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-parallèle, dans les deux moitiés de l'enroulement de chaque phase sont toujours connectées en parallèle.

III.3.2.1 Montage a la plaque à bornes

La plaque a bornes comporte six bornes, quoique 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-parallèle), on court-circuite les trois sommets du triangle sur 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.

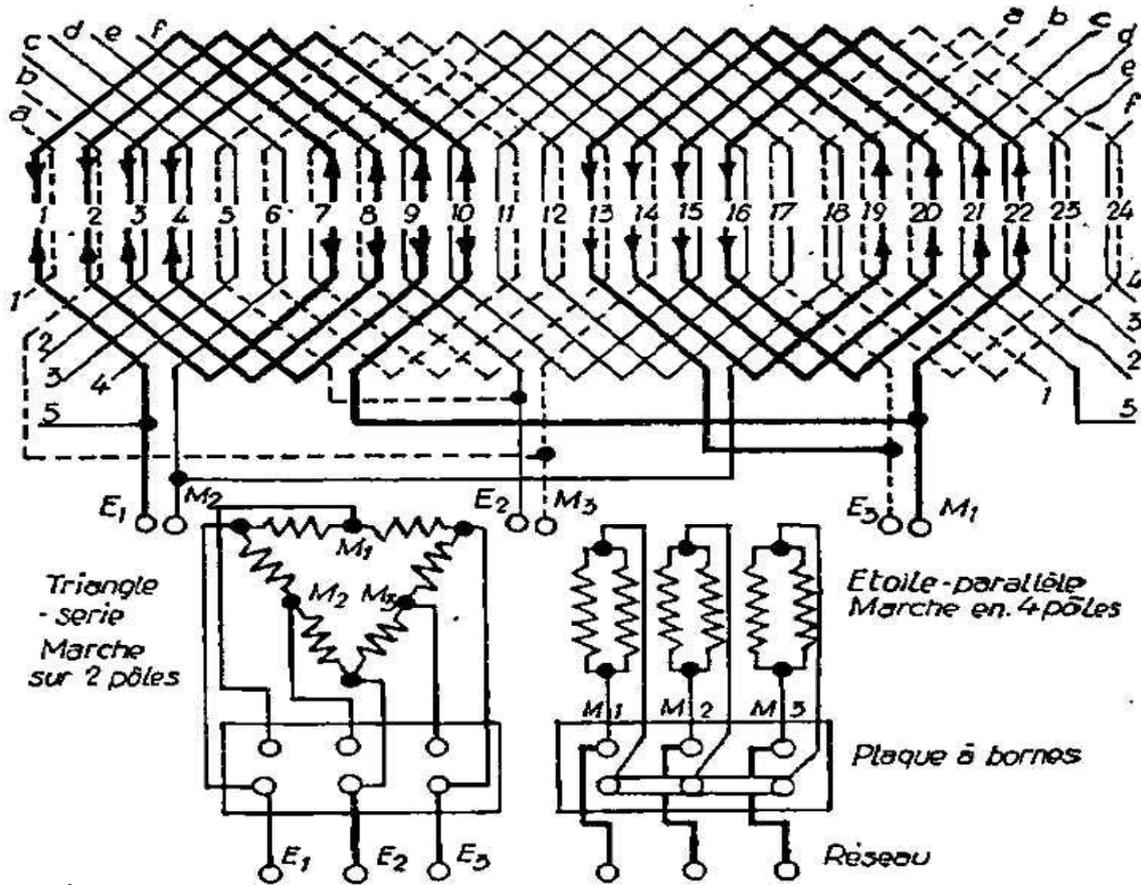


Fig. III. 5 : Couplage à puissance constante d'un stator 2/4 pôles, 24 encoches

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].

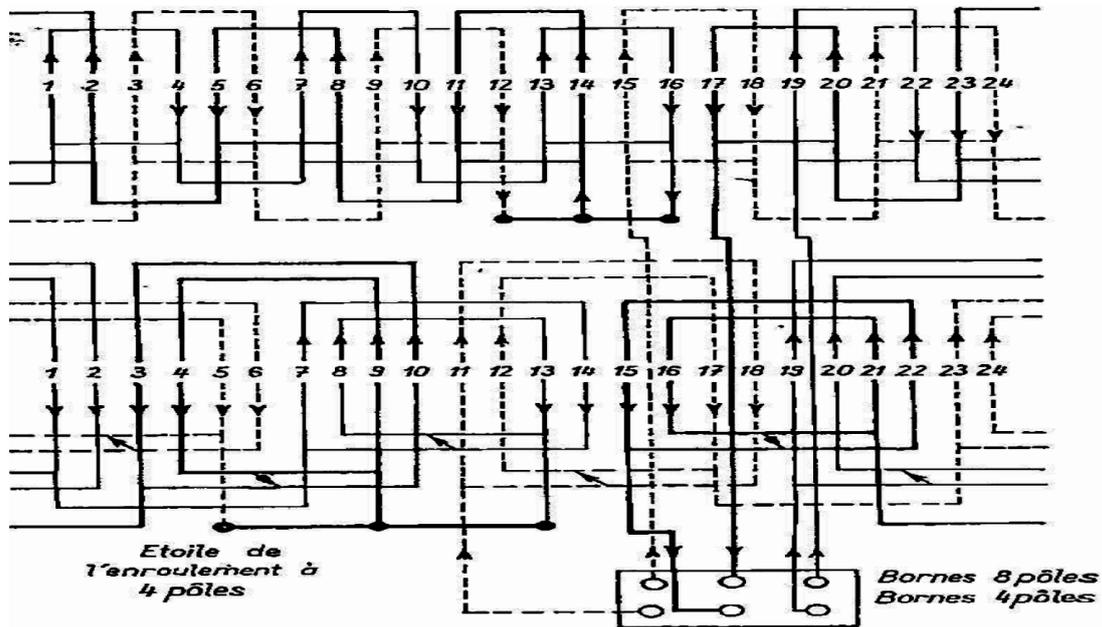


Fig. III.5 : Schéma de bobinage d'un moteur a deux vitesses, à deux enroulements distincts

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 bi tension 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 ;

I₁=intensité dans le stator à 220v, couplage en triangle (Δ).

I₂=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 à :

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

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 :

$$I_1' = I_1 \times \left(\frac{\text{anciennetension}(\Delta)}{\text{nouvelletension}(\Delta)}\right) = I_1 \times \frac{220}{115} = A. \quad (\text{III. 8})$$

Il revient au même d'utilisé 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 :

$$I_2' = I_2 \times \frac{220}{115} = I_2 \times \frac{380}{200} \quad (\text{III. 9})$$

Ou encore :

$$I_2' = I_1' \times \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (\text{III. 10})$$

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]:

$$I_1' = \frac{\text{puissance utile en watts}}{\sqrt{3} \times 115 \times \eta \times \cos \varphi} \quad \text{et} \quad I_2' = \frac{\text{puissance utile en watts}}{\sqrt{3} \times 200 \times \eta \times \cos \varphi} \quad (\text{III. 11})$$

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 :

$P = 2.2\text{kw}$ à la tension 220/380 v ;

$N = 53$ conducteurs par encoche au stator ;

$D = 1.24$ mm diamètre fil isolement compris

$d = 1.05$ mm diamètre nu ;

$R = 2.5\Omega$ résistance par phase du stator à 20°C;

$P_c = 2.9\text{kg}$ le poids total du fil du stator ;

$I_1 = 8.7\text{A}$ l'intensité au stator à 220 v ;

$I_2 = 5\text{A}$ 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 prend 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 :

$$\text{Diamètre fil nu} = 1.55\text{mm} \quad , \quad \text{Diamètre fil isolé} = 1.705\text{mm}$$

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

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

- **poids de fil total au stator :**

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

- **Intensité dans le stator :**

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

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

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 [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 ;

Pe= poids total des conducteurs du stator ;

IA= 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 :

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

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

III.5.2.1 Exemple de transposition à $U(v)$ constante et $P (kW)$ variable :

On a un moteur électrique [3] :

$P = 6 \text{ kW}$, $U = 220 \text{ V}$

$N = 32$ conducteurs par encoche au stator

$D = 1.81 \text{ mm}$ diamètre fil isolement compris

$d = 1.6 \text{ mm}$ diamètre nu

$R = 0.805 \Omega$ résistance par phase du stator à 20°C

$P_e = 5.82 \text{ kg}$ le poids total du fil du stator

I pour $220 \text{ V}_{\Delta} = 16.8 \text{ A}$

On désire réduire la puissance de ce moteur à 5 kW sous la même tension et couplage (220 V_{Δ}).

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

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

- **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 $d_{\text{nu}} = 1.5 \text{ mm}$.

- **La résistance à 20°C par phase sera :**

$$R' = R \times \frac{N'}{N} \times \left(\frac{d}{d'}\right)^2 = 0.805 \times \frac{35}{32} \times \left(\frac{1.6}{1.5}\right)^2 = 1 \Omega$$

- **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 :

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

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 : 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.2 Calcul simplifiés du bobinage:

IV.2.1 Calcul le facteur de remplissage :

IV.2.1.1 Formules et définition :

Le facteur de remplissage de l'encoche c'est le rapport entre la place occupé par les conducteurs et la surface utile S de l'encoche, il est d'environ 0.6 et varie, selon les cas de (0.5 à 0.7) [3].

Le rapport est donné par la formule suivante :

$$a = \frac{N \left(\pi \times \frac{d^2}{4} \right)}{S} \quad (\text{IV. 1})$$

S : la surface utile de l'encoche ;

N : le nombre de conducteurs par encoche ;

d : diamètres isolé d'un conducteur ;

$\pi \times \frac{d^2}{4}$ La section isolée du conducteur.

IV.2.1.2 Formules de calcul du bobinage:

Des formules sont nécessaire pour calculer la section du fils à utiliser et leur nombre dans les encoches, pour que le calcul sera exécuter en doit connaître les données suivantes [3] :

D_s =alésage du stator en mètre

L_s =longueur du stator en m(non compris les canaux de ventilation, quand il existe)

Z =nombre total d'encoches du stator

$2p$ =nombre de pôles

m =nombre de phase

U =tension aux bornes en triangle et en étoile

f =fréquence de courant en hertz du réseau

Y=pas polaire

a=facteur de remplissage

n_1 =nombre de spires en série par phase.

IV.2.1.3 Formules fondamentales :

$$\phi = \frac{E_1}{4.44 \times f \times n_1 \times K_1} \text{ en webers (1) et } \phi = a \times c \times l \times B \quad (\text{IV. 2})$$

a= facteur de remplissage des encoches égal à 0.7 isolement des fils compris

Y= pas polaire en mètres ,

$$Y = \frac{\pi \times D}{2p} \quad (\text{IV. 3})$$

B=l'induction dans l'entrefer, en teslas

K_b =coefficient de bobinage

4.44=constante, tirée de Eeff avec une spire, soit $\frac{2\pi}{\sqrt{2}}$

$$E_{eff} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \times n p \phi = 2.22 n p \phi \quad (\text{IV. 4})$$

n =nombre de tours par seconde

p =nombre de paires de pôles

ϕ =flux émis par un pole, en webers.

De (IV.2) et (IV.4) on tire

$$n_1 = (E_1) / (4.44 \times f \times k_b \times a \times c \times l \times B) \text{ spires par phase.} \quad (\text{IV. 5})$$

E_1 =F.E.M par phase à vide, en volts efficaces.

$$n_2 = \frac{2n_1 \times m}{N} \text{ conducteur en série par encoche.} \quad (\text{IV. 6})$$

En remplaçant Y (pas polaire) et n_1 par les valeurs obtenues précédemment, on a, par encoche :

$$n_2 = \frac{m}{3.487 \times f \times K_b \times a \times B} \times \frac{E_1 \times p}{D \times L \times N} \text{ conducteurs} \quad (\text{IV. 7})$$

En sortant la première partie de la formule [3], on a un coefficient :

$$k = \frac{m}{3.487 \times f \times K_b \times a \times B} \quad (\text{IV. 8})$$

Donc on peut écrire la formule ;

$$n_2 = k \frac{E_1 \times p}{D \times L \times N} \text{ Nombre de conducteurs en série par encoche.} \quad (\text{IV. 9})$$

IV.2.1.3.1 Exemple d'application de la formule sur un enroulement triphasé :

Dans la plupart des cas le coefficient bobinage $k_b=0.96$, pour une fréquence de $f=50$ Hz, l'induction B dans l'entrefer est d'environ 5000 gauss (0.5 tesla) pour les moteur de petite puissance, et de 6000 gauss (0.6 tesla) pour les gros moteurs.

On à aussi:

U_1 : tension aux bornes par phase, en volts efficaces (couplage en Δ) ;

E_1 : F.E.M par phase à vide, en volts efficaces.

E_1 : 0.95 U_1 pour les petits moteurs.

E_1 : 0.995 U_1 pour les moteurs de l'ordre de 125kw.

En remplaçant E_1 par U_1 dans les formules, on a ;

- ✓ Pour le cas d'un moteur jusqu'à 4 kW.

$$\text{Avec } B = 0.5 \text{ tesla} \quad k = \frac{3 \times 0.95}{3.487 \times 50 \times 0.96 \times 0.7 \times 0.5} = 0.0485$$

- ✓ Pour un moteur plus important on obtient.

$$\text{Avec } B = 0.6 \text{ tesla} \quad k = \frac{3 \times 0.995}{3.487 \times 50 \times 0.96 \times 0.7 \times 0.6} = 0.0424$$

Pour expression :

$$\text{Puissance jusqu'à 4 kw : } n_2 = 0.0485 \frac{U_1 \times p}{D \times L \times N} \text{ conducteurs en série par encoche.}$$

$$\text{Puissance de 5 à 25 kw : } n_2 = 0.0485 \text{ à } 0.0455 \frac{U_1 \times p}{D \times L \times N} \text{ conducteurs.}$$

$$\text{Puissance de 26 à 150 kw : } n_2 = 0.0455 \text{ à } 0.0424 \frac{U_1 \times p}{D \times L \times N} \text{ conducteurs.}$$

IV.2.1.3.2 Exemple d'application de la formule sur un moteur monophasé:

Pour une fréquence 50hz, le coefficient de bobinage $k_1=0.831$, dans ce cas le nombre de phase $m=1$, l'enroulement principale occupe 2/3 des totalités d'encoches.

- ✓ Pour une induction de $B=0.5$ tesla, on a :

$$k = \frac{1 \times 0.95 \times 1.5}{3.487 \times 50 \times 0.831 \times 0.7 \times 0.5} = 0.028$$

- ✓ Pour une induction de $B=0.6$ tesla, on a :

$$k = \frac{1 \times 0.95 \times 1.5}{3.487 \times 50 \times 0.831 \times 0.7 \times 0.6} = 0.0246$$

Ce qui donne, pour un moteur :

- ✓ Jusqu'à 4kw : $n_2 = 0.028 \frac{U_{1 \times p}}{D \times L \times N}$ conducteurs en série par encoche
- ✓ de 5 à 25kw : $n_2 = 0.028 \text{ à } 0.0265 \frac{U_{1 \times p}}{D \times L \times N}$ conducteurs.
- ✓ Puissance de 26 à 150kw : $n_2 = 0.0265 \text{ à } 0.0246 \frac{U_{1 \times p}}{D \times L \times N}$ conducteurs.

❖ **Le bobinage auxiliaire** des moteurs monophasés à un nombre de spires généralement **double** de celui de l'enroulement principal.

IV.2.1.3.3 Section des conducteurs :

Pour calculer la section d'un conducteur on doit connaître :

- ✓ le courant admissible et la dimension des encoches ;
- ✓ la densité du courant (de l'ordre de 5A par mm² de section de fil).
- ✓ La puissance de la machine.
- ✓ Le facteur de remplissage de l'encoche.

✚ Procédé du calcul :

On calcul la section des conducteurs en partant de la surface d'encoche en mm².

$$s = \frac{S a}{n_2} \quad (\text{IV. 10})$$

S : surface de l'encoche en mm² ;

s : section occupé par un conducteur isolé ;

n_2 : nombre de conducteur dans une encoche.

Le facteur de remplissage **a** tient compte de l'isolation de l'encoche et le vide qui se trouve entre les conducteurs dans l'encoche. La section du fil isolé étant connue, le diamètre est donné par la formule suivante ;

$$s = \frac{\pi d^2}{4} \quad \text{D'où, } d = \sqrt{\frac{4 \times s}{\pi}} \text{ mm.} \quad (\text{IV. 11})$$

On consultant le tableau pour avoir le diamètre du fil nu.

Tab. IV. 1 Tableau des diamètres des fils nus, émaillés, isolés soie et rayonne

Section du fil nu mm ²	Diamètre du fil nu mm	Diamètre à fort émaillage mm	Diamètre isolé 2 couches soie mm	Diamètre isolé 1 couche rayonne mm	Diamètre isolé 2 couches rayonne mm
0,0 314	0,20	0,225	0,285	0,29	0,36
0,0 380	0,22	0,25	0,305	0,31	0,38
0,0 453	0,24	0,27	0,325	0,33	0,40
0,0 490	0,25	0,28	0,335	0,34	0,41
0,0 572	0,27	0,30	0,355	0,36	0,43
0,0 625	0,28	0,31	0,365	0,37	0,44
0,0 706	0,30	0,33	0,385	0,39	0,46
0,0 754	0,31	0,34	0,395	0,40	0,47
0,0 804	0,32	0,355	0,405	0,41	0,48
0,0 907	0,34	0,375	0,425	0,43	0,50
0,0 962	0,35	0,385	0,435	0,44	0,51
0,1 075	0,37	0,405	0,46	0,46	0,53
0,1 134	0,38	0,415	0,47	0,47	0,54
0,1 256	0,40	0,44	0,49	0,49	0,56
0,1 385	0,42	0,46	0,51	0,51	0,58
0,1 520	0,44	0,48	0,53	0,53	0,60
0,1 661	0,46	0,50	0,55	0,55	0,62
0,1 809	0,48	0,52	0,57	0,57	0,64
0,1 963	0,50	0,545	0,59	0,59	0,66
0,2 119	0,52	0,565	0,61	0,61	0,68
0,2 375	0,55	0,595	0,64	0,64	0,71
0,2 640	0,58	0,625	0,67	0,67	0,74
0,2 827	0,60	0,655	0,69	0,69	0,76
0,3 017	0,62	0,675	0,71	0,71	0,78
0,3 318	0,65	0,705	0,74	0,74	0,81
0,3 630	0,68	0,735	0,77	0,77	0,84

IV.3 Réalisation pratique de bobinage:

Lorsqu'une machine doit être rebobinée, le nouvel enroulement doit être, impérativement identique au précédent, c'est-à-dire qu'à partir du premier enroulement qu'on détermine le second. Exemple d'un moteur asynchrone triphasé 50Hz, de 36kw à la tension 380v, 66A couplage en triangle, 2940tr/min. Après le démontage du moteur on a constaté que le bobinage est complètement grillé, donc le moteur est nécessite d'un rebobinage. Pour entamé cette opération en doit suivre les démarche suivante;



Trace de Charbon sur le bobinage

Fig. IV.1 : Stator grillé d'un moteur asynchrone triphasé 36 kW

IV.3.1 Repérage d'un bobinage :

Avant de couper une tête de bobines, il est nécessaire de bien d'observer et de prendre des notes utiles au repérage du câblage d'origine, pour le repérage il faut identifier, les fils d'entrées et de sorties de bobines, les connexions entre bobines, ainsi que le nombre totales de bobines,

on relève également le pas sur le fer, en comptant la première et la dernière encoche recevant les faisceaux de la bobine et le type de surveillance thermique installé, qui sert à protéger le bobinage [10].

Toutes les données doivent être relevées sur la fiche de bobinage.

IV.3.2 Retrait du cuivre dans les encoches :

Il faut faire chauffer l'ensemble du stator sur un brûleur afin d'élever la température (ce qui ramollit le cuivre imprégné de verni) 300/400° suivant la qualité des vernis. Une fois la température obtenue, il fixe solidement le stator afin d'extraire le cuivre en tirant du côté où le chignon de fils est resté [11].



Fig. IV.2 Débobinage du moteur

Cette opération sera réalisée après relevé des caractéristiques techniques sur la fiche de bobinage (section, classe d'isolation, nombre de spires, pas, connexion, etc.), le débobinage devra être réalisé en évitant tout risque de détérioration des caractéristiques magnétiques des tôles et déformation géométrique de l'ensemble.

Dans le cas d'un débobinage par chalumeaux, cela devra être effectué en n'assurant aucun point chaud localisé.

IV.3.3 Contrôle et nettoyage du circuit magnétique :

Nettoyage et vérification du circuit magnétique, après l'extraction des bobines, il faut donc vérifier leur état, rectifier et redresser celles qui sont déplacées, et si c'est nécessaire, passer une lime ou un outil approprié sur les parties douteuses de la tôle, ensuite vernissage du circuit magnétique avec un vernis anti flash dont l'avantage de protéger le fer contre les flashs et les décharges électrique invisible qui peuvent se produit à l'intérieur de la machine. Si l'état de circuit magnétique est douteux on applique un essai de fer pour avoir c'est la tôle comporte des points chauds.



Couche de Peinture anti flash

Fig. IV.3 Stator nettoyer et préparé après le débobinage

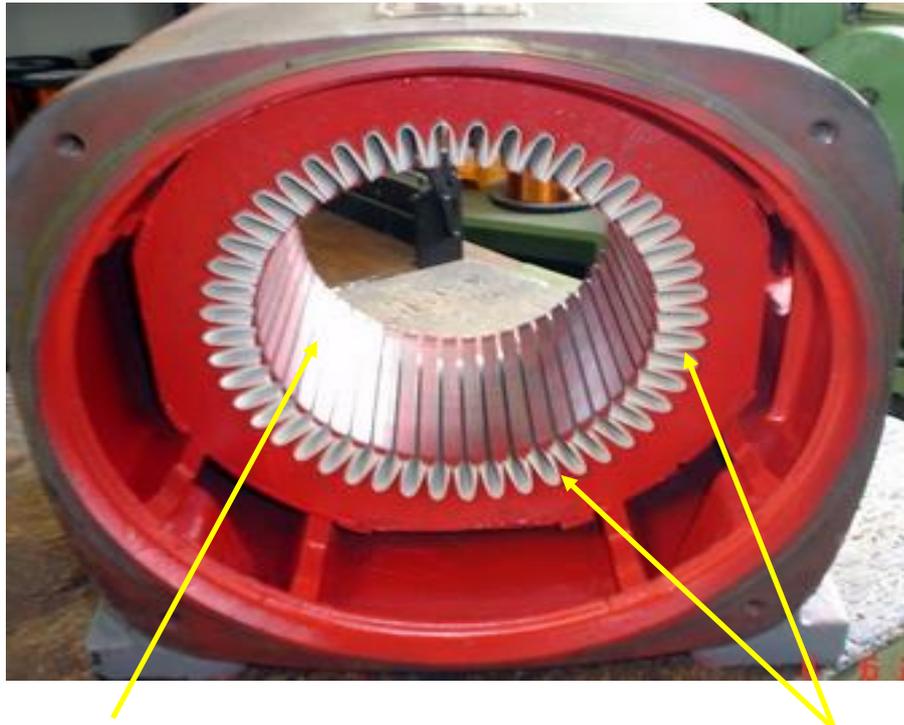
IV.3.4 Confection et montage des isolations d'encoche :

Il faut faire l'isolation de chaque encoche à l'aide d'un isolant rectangulaire dont la largeur correspond à la dimension de l'encoche et la longueur à la longueur de l'encoche, il existe plusieurs qualités d'isolants, chaque qualité correspond a une classe que l'on retrouve sur la plaque signalétique du moteur [10].

Ce **matériau isolant** est bien sûr sélectionné en fonction de ses **qualités** :

- ✓ **diélectriques**, qui sont rarement limitatives en basse tension

- ✓ **mécaniques**, car il doit résister au pliage, à l'abrasion, et aux agressions liées à l'empilage des tôles magnétiques, lesquelles peuvent être tranchantes si des bavures subsistent, ou si l'empilage n'est pas parfaitement aligné, ce qui est inévitable
- ✓ surtout, **thermiques**, conformément à la classe thermique d'utilisation de la machine, la durée de vie des isolants est en effet très fortement affectée par des températures dépassant leur limite, matérialisée par leur classe d'isolation (exemple : classe F) [4].



Circuit magnétique nettoyer et préparé

Papiers isolants

Fig. IV. 4 : Montage des isolants dans les encoches

IV.3.5 Comptage nombre fil par encoche :

Nécessite de récupérer soigneusement une tête de bobine afin de pouvoir compter aisément le nombre des conducteurs par faisceau, il peut y avoir plus d'une bobine par encoche, peut être que le bobinage adapté à la place disponible, ou moteurs spéciaux ou à plusieurs vitesses.



Fig. IV. 5 : Chignons récupéré après le débobinage du moteur

IV.3.6 Mesure et choix des fils :

La mesure du diamètre se fera à l'aide d'un micromètre ou d'un calibre dont la précision est au minimum de 1/10 de millimètre, l'épaisseur de la laque isolante pouvant varier suivant les fournisseurs de fils, il est nécessaire de la retirer pour mesurer le diamètre effectif du cuivre, on retire la laque en la brûlant au chalumeau, éventuellement en la grattant avec un cutter (couteau).



Fig. IV. 6 : micromètre (palmer) pour mesure le diamètre fil

Fiche de Bobineur

<i>Date</i>	Biskra
<i>Lieu</i>	16-05-2019
<i>Marque</i>	ABB
<i>N° Série</i>	3512057
<i>Type</i>	M3jp200MLCEEExd
<i>Puissance</i>	36 kW
<i>Tension</i>	380V
<i>Intensité</i>	68.4A
<i>Vitesse</i>	2940 Tr/min
<i>Couplage</i>	Δ

<i>Etat de L'ancien bobinage</i>			<i>Originale/Refait</i>		
<i>Type de roulement coté charge</i>			Roulement a : bille, cylindrique, conique...etc.		
<i>Type de roulement coté ventilateur</i>			Roulement a : bille, cylindrique, conique...etc.		
<i>Nombre d'encoche</i>	36	<i>N^{br} de pôles</i>	2	<i>Diamètre Alésage</i>	190 mm
<i>Pas</i>	15	<i>Faisceaux</i>	1	<i>Longueur fer</i>	235 mm
<i>N^{br} fil/encoche</i>	111	<i>Type matériaux</i>	Cuivre	<i>Diamètre fer extérieur</i>	320 mm
<i>Diamètre fil 1</i>	1.20mm ²	<i>Nfil1</i>	3	<i>Diamètre fond d'encoche</i>	236 mm
<i>Diamètre fil 2</i>	1.15mm ²	<i>Nfil2</i>	1	<i>Hauteur d'encoche</i>	23 mm
<i>Diamètre fil 3</i>	1.12mm ²	<i>Nfil2</i>	1	<i>Largeur d'encoche</i>	13 mm
<i>Type de liaison</i>	parallèle			<i>Largeur dent</i>	7 mm

Le bobineur identifie les caractéristiques des éléments électriques à l'aide de la feuille de bobinage, du plan, ... ou de l'ancien bobinage.

Avant de remplir la fiche, le bobineur il doit vérifiez la conformité des informations et évitez toutes mesures erronées pouvant éventuellement nuire aux performances de la machine, en plus des pertes de matériaux (cuivre, isolant, vernis...etc.), ainsi que la perte du temps qui peut perturber la continuité de la production.

IV.3.7 Calcul des différents paramètres du moteur et établissement le schéma de bobinage :

L'établissement du schéma de bobinage permet de déterminer le coefficient de remplissage de l'encoche, le coefficient de bobinage, le nombre d'encoche par pôle et par phase, le pas d'entrée, la section de cuivre, le poids du cuivre, la résistance ohmique d'une phase, le calcul sera achevé après la préparation du stator. Tous les résultats de calculs ont été résumés dans un tableau au ci-dessous :

Tab. IV. 3 Tableau des résultats de calculs

Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
Puissance (kW):	36 kW	I (AMP) : U (volts) :	66.8 A 380 v	Couplage :	Δ
Nr d'encoche :	36 encoches	2P :	2poles	Diamètres du stator:	190mm
Pas :	15	Faisceaux:	1	Longueur du stator :	235mm
Nr fil/encoche:	110 conducteurs	Nr encoche/ph:	12 encoches	B induction:	0.62 tesla
Diamètrefil1 :	1,2mm	Nr fil1:	3 fils	Coefficient de bob :	0.924
Diamètrefil2 :	1,15mm	Nr fil2 :	1 fil	facteur de remplissage :	0.399
Diamètrefil3 :	1,12mm	Nr fil3:	1 fil	Poids cuivre :	30 kg
Section de (cv) :	10.834 mm ²	Nr bobine/ph:	2	Résistance ohmique/ph :	0.222 Ω

le moteur utilise les fils émaillés en cuivre de différents diamètres (1.12mm, 1.15mm, 1.2mm) c'est les matériaux dont la résistivité est la plus faible.

Résistivité à 20 ± Celsius en ohm-mètre, $1.72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$

le cuivre sont isolés grâce à différents vernis d'émaillage, concernant principalement la classe de température, en effet la température conditionne toutes les autres caractéristiques :

Diélectriques, Mécaniques, Chimique, vieillissement.

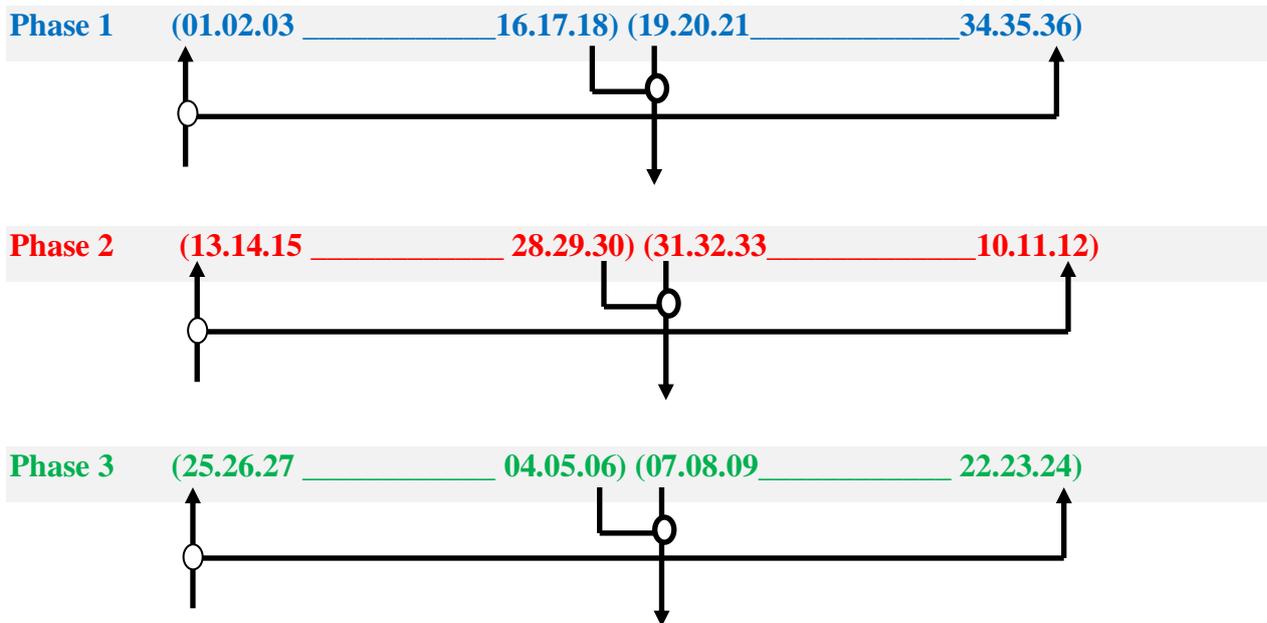
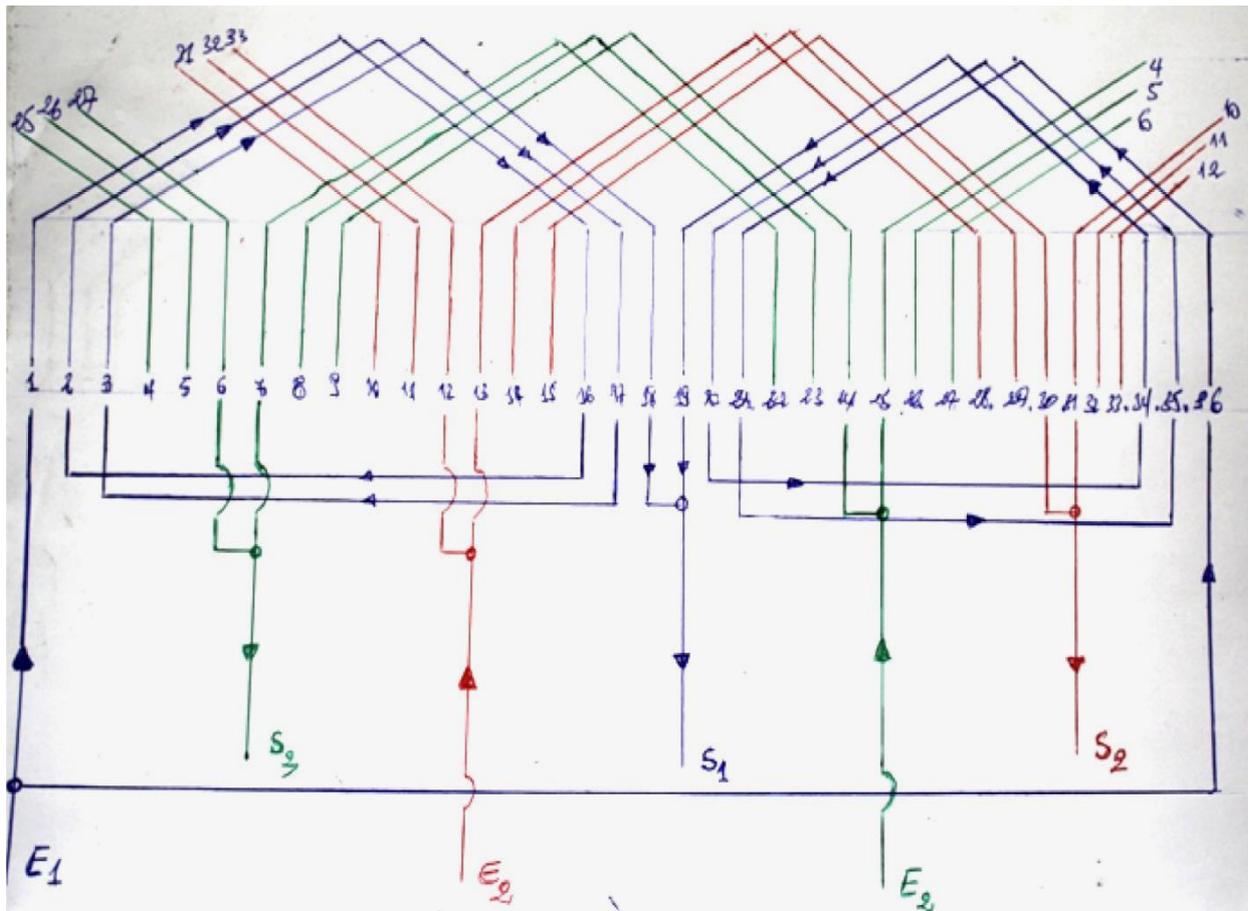


Fig. IV. 7 : Schéma de bobinage

IV.3.8 Confection des bobines :

Les bobines sont enroulées, grâce à une machine spécifique, l'orsque on confectionne les bobines, il faut respecter ;

- ✓ Le nombre de spires par bobine ;
- ✓ La section du fil ;
- ✓ La position ou les fils de liaison changent de bobine ;
- ✓ Une réserve de longueur pour les fils d'entrée et de sortie ;
- ✓ Essayer d'aligner au mieux les fils dans le gabarit pour facilité le montage ultérieur des bobines dans les encoches ;
- ✓ Mettre des attaches pour maintenir les fils ensemble.



Fig. IV. 8: Machines de confection des bobines

IV.3.9 Insertion du bobinage dans la machine :

L'opération d'insertion consiste à faire pénétrer, en une seule ou en plusieurs fois, les bobines dans les encoches, L'insertion devra être réalisée en prenant toutes les précautions nécessaires afin d'éviter tout risque de blessure de l'émail des enroulements lors de l'introduction dans les encoches l'outillage, grâce à des formes soigneusement étudiées, force les bobines à pénétrer progressivement dans les encoches à travers leur ouverture, tout en tirant l'ensemble des enroulements par leurs têtes de bobines, du côté opposé aux connexions, lors de cette opération,

ces têtes de bobines sont soumises à certaines contraintes, puisqu'elles supportent tout l'effort de traction, de même, les parties droites des bobines glissent en frottant sur le fond d'encoches.

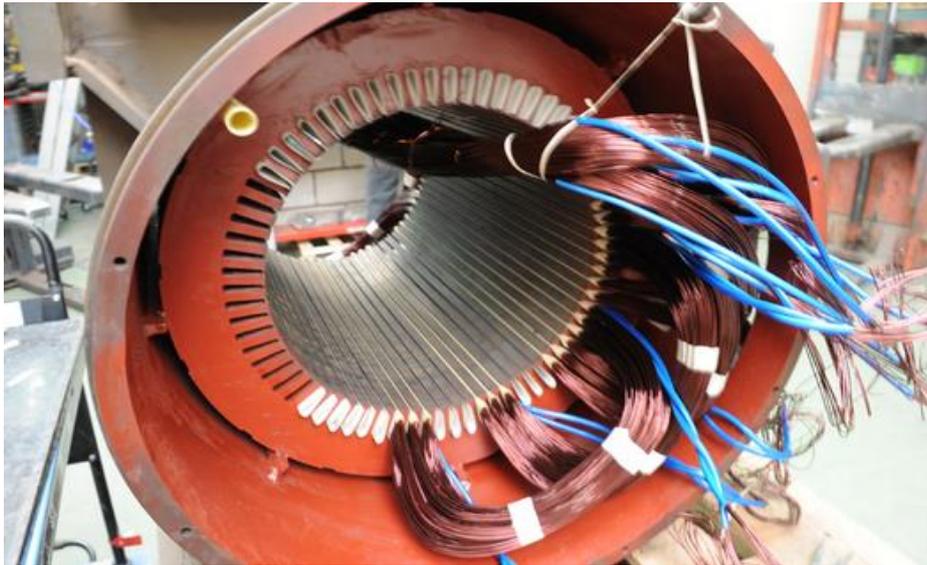
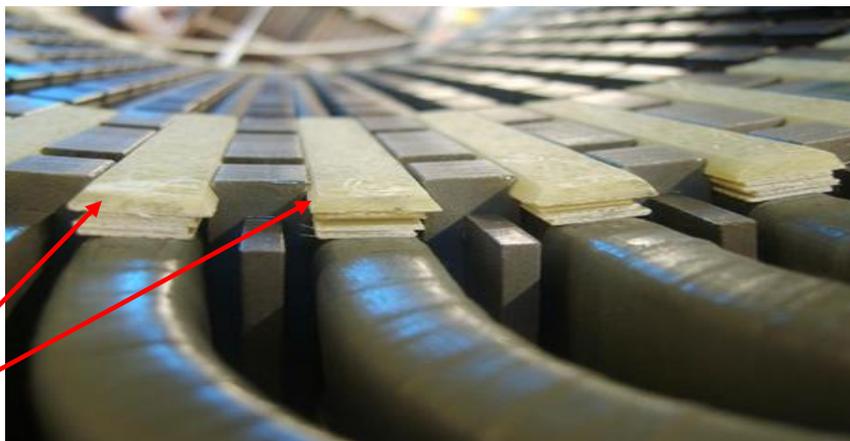


Fig. IV. 9: montages des bobines dans le stator

IV.3.10 Fermeture d'encoche ou calage d'encoche :

Son but est d'interdire que les conducteurs ne quittent les encoches, soit pendant le processus, soit aussi lors du fonctionnement de la machine sous l'effet des forces centrifuges s'il s'agit d'un bobinage tournant ou de forces d'origine électromagnétique, en Particulier lors de régimes accidentels.

Son rôle est aussi, et on peut presque dire surtout, d'éviter que des fils situés près de l'ouverture ne puissent se glisser entre le U d'isolation d'encoches, qui se termine à proximité, et l'empilage magnétique.

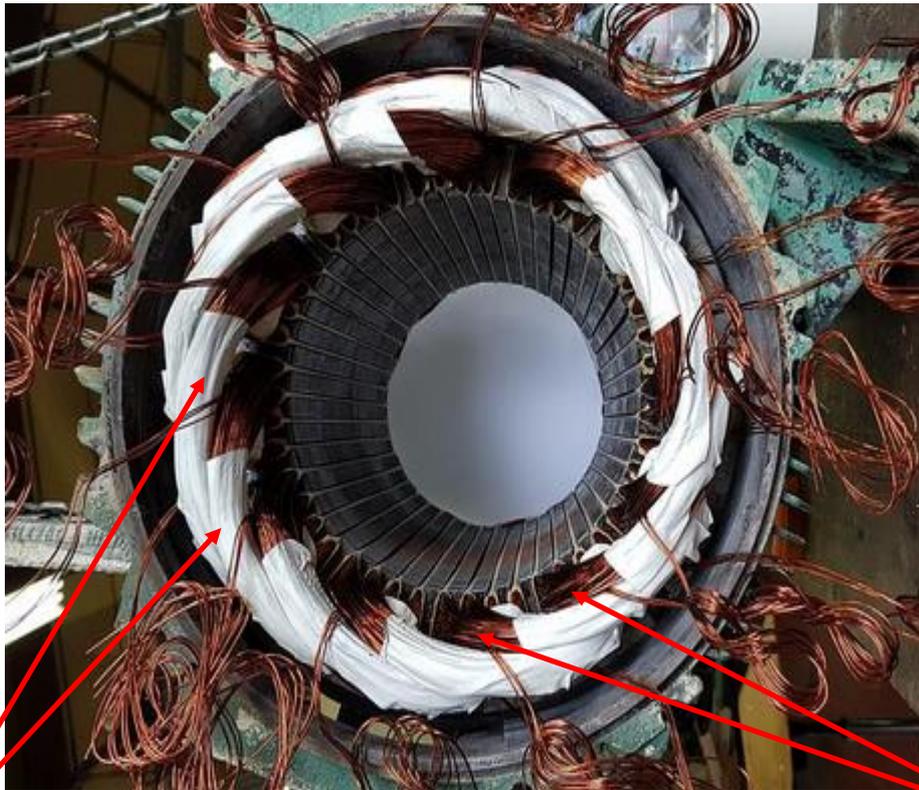


Des cales

Fig. IV. 10: cales de fermeture d'encoche

IV.3.11 Isolation entre phase :

L'isolation entre phases n'a lieu d'être que dans la région des têtes de bobines, entre bobines, ou entre bobines et connexions de liaison ou d'entrée et sortie, qu'il ne faut pas oublier les isolations entre bobines seront réalisées par l'interposition d'isolant en feuille, semblable à celui qui a servi à isoler les encoches, la forme de ces feuilles devra être optimisée pour assurer une séparation totale, qui de plus ne sera pas affectée par les opérations ultérieures de formage et de ficelage des têtes de bobines, elles devront cependant être limitées au juste nécessaire, pour ne pas pénaliser le refroidissement de ces parties, lequel est parfois assez critique[2]



Papiers isolants

bobines

Fig. IV.11 : Montages et isolations des bobines

IV.3.12 Brasage des connexions :

Le mode de raccordement s'effectue au fer et à l'étain ;

- ✓ torsader les fils sur une longueur suffisante suivant la section des fils
- ✓ protéger les isolations avec une toile humide (risque qu'elles prennent feu)
- ✓ placer le fer sous les parties à souder
- ✓ assurer une fine pellicule d'étain sur la connexion

IV.3.13 Frettages et positionnement des sondes de protection thermique :

Avant d'entamer le frettage du bobinage, il est nécessaire de placer les sécurités thermiques sur les phases, il y aura une sécurité placée dans une bobine de chaque phase, ensuite on entame le bandage en respectant le sens d'enroulement de la ficelle. Les conducteurs sortant des encoches doivent former un bloc compact et robuste, afin de maintenir les têtes de bobines qui risquent de se déformer sous l'effet de la force centrifuge et les effets électromagnétique qui peuvent se produire à l'intérieur de la machine.

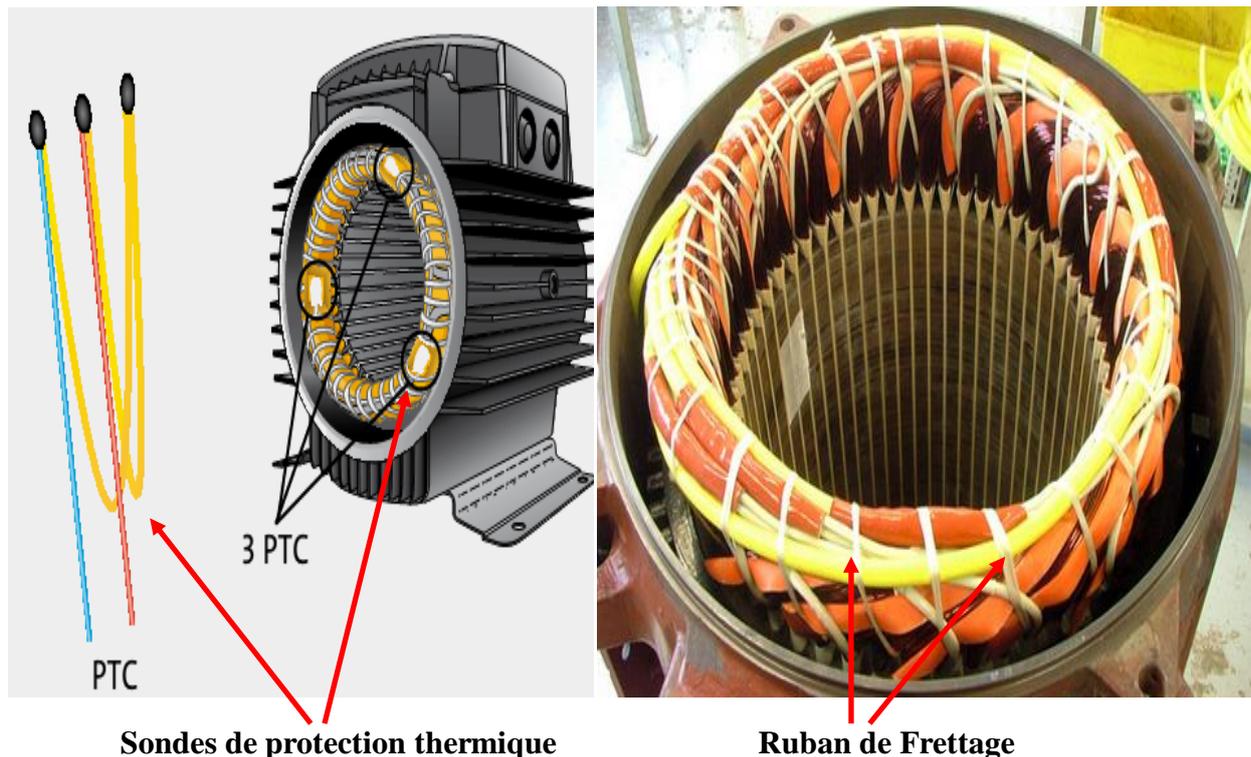


Fig. IV. 12: Frettages et positionnement des sondes de protection thermiques

IV.3.14 Test du moteur avant imprégnation :

Avant d'imprégner le nouveau bobinage, des essais complets permettent d'obtenir les caractéristiques de bobinage correctes et l'excellente isolation du système, tous les stators fabriqués en usine ont des bobinages qui possèdent un nombre de tours correct et des dimensions de fils appropriés, conformément aux cahiers des charges techniques respectifs. Des essais de résistance du bobinage, des essais d'isolation et des tests de surtension sont effectués sur tous les stators afin d'obtenir des bobinages dotés des caractéristiques correctes, toutes les extrémités de

bobine des stators sont également contrôlées, afin d'assurer leur conformité aux tolérances dimensionnelles.

Chaque appareil sera suivi par une “fiche de vie” sur laquelle sera indiqué l'ensemble des indications nécessaires au bon fonctionnement de l'appareil.

- Numéro de l'appareil
- Fréquence d'étalonnage
- Date de/des étalonnage(s)
- Date du futur étalonnage
- Relevé des valeurs d'étalonnage

✓ **Teste1 : Mesure de la résistance ohmique du bobinage :**

Cette procédure a pour but de vérifier, L'égalité des résistances ohmiques du bobinage entre eux, ainsi que la continuité (pas de coupure), effectuer la mesure selon le mode d'emploi de l'appareil utilisé.

La valeur d'une résistance est fonction de sa température, donc pour pouvoir effectuer des comparaisons, il est nécessaire de la corriger en la ramenant à une température de référence, en général **20°C**.

$$R (20^{\circ}\text{C}) = \frac{R(Tx)(235 + 20)}{235 + Tx}$$

R(Tx)= valeur de la résistance mesurée à la température Tx en °C

Appareil de mesure utilisé **microhomètre** température initiale = **27.4°C**

Röhm ph1=146.2 m Ω / Röhm ph2=145.9 m Ω / Röhm ph3=146.1 m Ω

✓ **Teste 2 : Mesure la résistance d'isolement du bobinage :**

Il s'agit notamment de **mesurer la résistance d'isolement** entre deux éléments conducteurs. cette mesure s'appuie sur la loi d'Ohm : En appliquant une tension continue de valeur connue, puis en mesurant le courant circulant, il est possible de déterminer simplement la valeur de la résistance. La mesure de la résistance est réalisée au moyen d'un contrôleur d'isolement appelé mégohmmètre.

Le mégohmmètre affichera une résistance d'isolement exprimée en $K\Omega$, $M\Omega$ ou $G\Omega$ voire en $T\Omega$ pour certains modèles. Plus la résistance est élevée plus l'isolant est considéré comme de bonne qualité mais cette valeur de résistance ne doit pas être infinie. Elle exprime la qualité de l'isolement entre deux points électriques et fournit une bonne indication sur les risques de circulation de courants de fuite durant la période d'exploitation d'un équipement ou d'une installation électrique [12].

Appareil de mesure utilisé **mégohmmètre** température initiale = **27.4°C**

ph1-ph2=5GΩ / ph2-ph3=6.3GΩ / ph3-ph1=8.7GΩ

(ph1- ph2 - ph3) / Terre = 40 GΩ

DAR=1.74 (**DAR** : rapport d'absorption), indice sur la qualité de l'isolation [13]

Pour des installations ou des équipements comportant des isolants où le courant d'absorption décroît rapidement, le relevé des résistances d'isolement à 30 secondes et 60 secondes peut suffire pour qualifier l'isolement. Le DAR est défini comme suit :

DAR = R isolement à **60 secondes** / R isolement à **30 secondes**

Tab. IV. 2 Tableau différent valeur du DAR

Valeur du DAR	Condition d'isolement
< 1.25	Insuffisante
< 1.6	OK
> 1.6	Excellente



Fig. IV. 13: Mégohmmètre C.A 6547 chauvin Arnoux

✓ **Teste 3 : Test de rigidité diélectrique :**

Le but de ce test est de vérifier c'est on applique une haute tension, dont sa valeur est définie par la norme (NF C51-111) [14], ne produit aucun claquage de la barrière isolante.

L'essai est effectué sur les machines qui sont totalement ou partiellement rebobiné Tension appliqué : $U_{test} = 2 \times U_n + 1000V$ Pour les machines $< 10\ 000kw$.

On obtient donc : $U_{test} = 2 \times 380 + 1000V = 1800V$

Appareil utilisé : THUMM, type : THPG de 0 à 5000V.

L'essai doit être commencé avec une tension ne dépassant pas la moitié de la tension d'essai (1800V), la tension doit être ensuite augmenté jusqu'à la pleine tension d'essai, d'une manière progressive ou par échelons ne dépassants pas 5% de la pleine valeur, le temps permis pour l'augmentation de la tension de la moitié jusqu'à la pleine valeur n'étant pas inférieur à 10 secondes.

la pleine tension d'essai doit être alors maintenue pendant 1min conformément à la norme (AFNOR : NF C51-111).

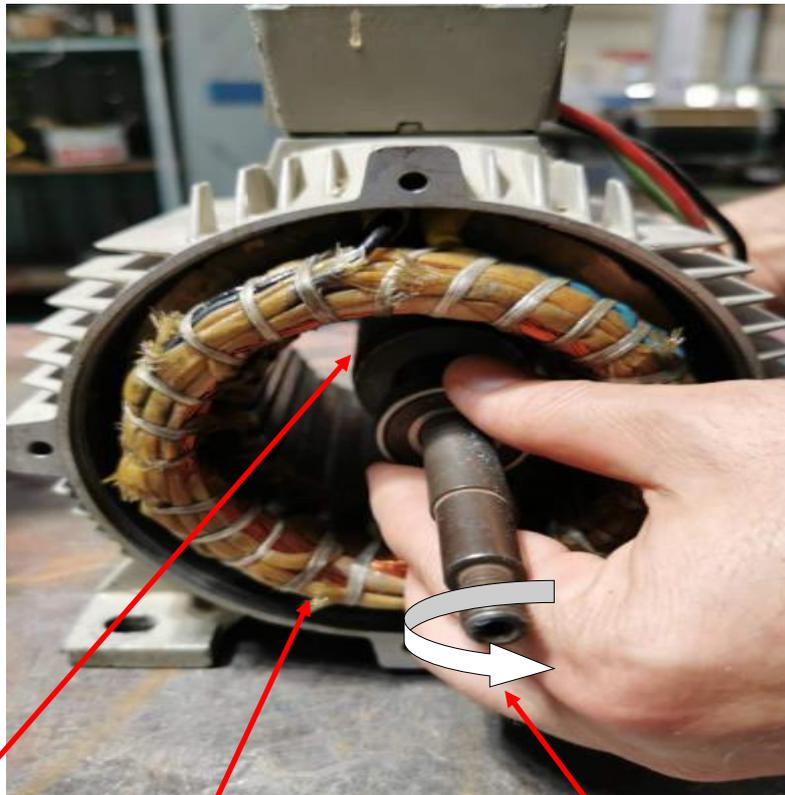


Fig. IV. 14: Test de rigidité diélectrique avec générateur de choc THUMM

✓ **Teste 4 : Test dynamique a une tension réduite (essai de champ et connexion) :**

Don la mesure ou l'on dispose un bon d'essai de test permettant de choisir la tension (variateur de tension triphasé) et d'un petit rotor, on alimente l'enroulement statorique à son courant nominal ($I_n = 66A$), avec stator nu sans rotor, on introduit le petit rotor dans la culasse en le tenant par l'extérieure de ses roulements, afin de vérifier la présence du champ tournant et de contrôler les soudures des connexions effectuées.

Pour ce test, il est nécessaire de mettre les ponts (barrettes) sur la plaque à bornes pour obtenir un câblage en étoile ou en triangle. Cette opération ne prend pas beaucoup de temps pour éviter l'échauffement du bobinage.



Rotor récupéré

stator rebobiné sous tension

rotation du rotor

Fig. IV. 15: Teste dynamique

IV.3.15 Vernissage du bobinage :

Les techniques d'imprégnation utilisées comme les gouttes à goutte et le trempage avec un traitement thermique permettent d'obtenir un remplissage massif de résine et d'éliminer les poches d'air autour du bobinage, ceci donne une isolation compacte et homogène, avec un remplissage de résine en tout point entre les conducteurs, ce qui réduit le risque de décharges partielles dans le bobinage. Leur rôle aussi est d'augmenter la tenue mécanique du bobinage, la dissipation calorifique, la protection par rapport à l'environnement et la tenue diélectrique pour les moyennes et hautes tensions, ces polymères sont de natures différentes selon principalement la gamme de température d'utilisation.

IV.3.16 Remontage du moteur :

Avant le remontage du moteur, on doit retirer des restes d'imprégnations, une fois que le stator est bien nettoyé et préparé en entame l'opération du remontage (il est recommandé après un rebobinage de changer les roulements du rotor). Les roulements sont montés à l'aide d'un chauffe roulement régulé en T°

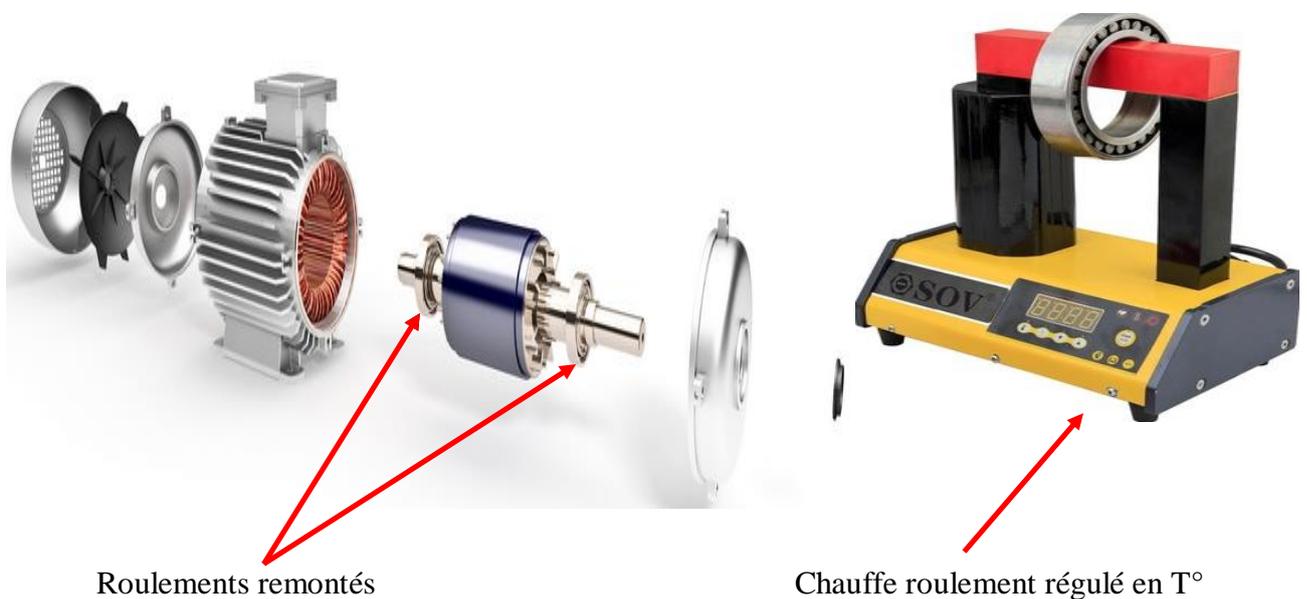


Fig. IV. 16: Remontage des roulements à l'aide d'un Chauffe roulement régulé en T°

Les roulements seront remplacés par des roulements neufs, de mêmes caractéristiques que ceux d'origine. Le montage sera réalisé après **chauffage par induction** à une température maximum de **100°C**, ils seront montés en utilisant des “ jet de montage ” adaptés.

Les roulements ouverts seront graissés avec de la graisse préconisée par le fournisseur, la mise en place du rotor se fera en prenant toutes les précautions afin d'éviter tout risque de blessure du bobinage stator.

IV.3.17 Essai à vide :

Sert à connaître l'état mécanique du moteur, échauffements, vibration etc..., ainsi que le comportement du bobinage, l'essai a été effectués sur une plate forme d'essai équipé par une source d'alimentation à courant alternatif (banc d'essai), ce procédé permet au moteur de démarrer progressivement tout en diminuant l'appel du courant.

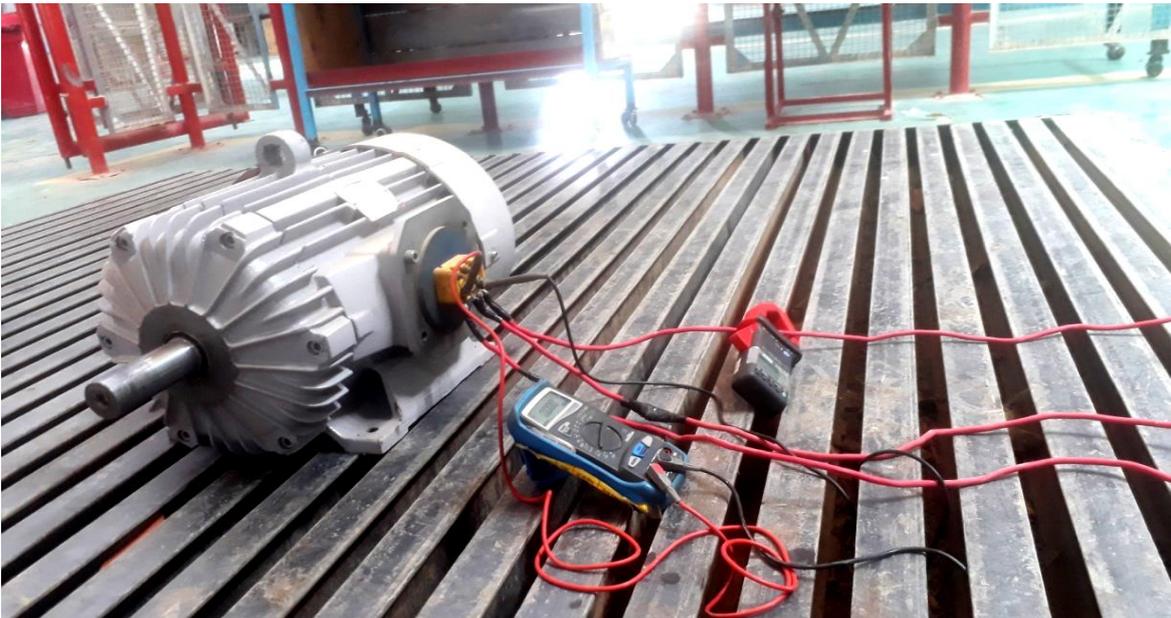


Fig. IV. 17 : test à vide du moteur après le remontage

Instruments de mesures :

- **Thermomètre numérique** INFRATHERME D.261C.CHAUVIN ARNOUX
- **Multimètre numérique** métrix MX24
- **Pince Ampère métrique** F15, CHAUVIN ARNOUX
- **Tachymètre** CA 25, CHAUVIN ARNOUX

➤ **Valeurs mesurés :**

$$U_0 \text{ (ph1)} = 379.5 \text{ v}$$

$$I_{01} = 15.72 \text{ A}$$

$$U_0 \text{ (ph2)} = 380.2 \text{ v}$$

$$I_{02} = 15.62 \text{ A}$$

$$\text{vitesse} = 2988 \text{ Tr/min}$$

$$U_0 \text{ (ph3)} = 379.8 \text{ v}$$

$$I_{03} = 16.00 \text{ A}$$

- **Échauffement** du moteur après une heure de marche :

Température initiale = 24.5°C

Stator (bobinage) = 30.1°C

Palier coté accouplement = 37.2°C

Palier coté ventilateur = 38.4 °C

IV.3.18 Essai en charge (sur site):

- **Valeurs mesurés :**

Température initial = 35.7 °c

U_1 (ph1) = 381.2 v I_1 = 65.8 A

U_2 (ph2) = 380.2 v I_2 = 66.10 A

U_3 (ph3) = 379.8 v I_3 = 66.30 A

IV.3. 19 Interprétation :

- ✓ **A vide :**

Dans ce fonctionnement le rotor tourne pratiquement à une vitesse proche de synchronisme, l'intensité du courant I_0 de 20 % du courant nominal et le facteur de puissance faible, il s'agit essentiellement d'un courant réactif ou magnétisant qui crée le champ magnétique.

- ✓ **En charge :**

Pendant le processus de mesure, le courant dans les trois phases est équilibré, ceci est la preuve que la résistance ohmique entre les phases est équilibrée.

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 réponsus, pourront cependant être facilement généralisés à tout autre nombre de phases, que l'on rencontre au stator des machines synchrones et asynchrones.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail nous avons essayé de rassembler quelques éléments qui rapprochent au procédé aux techniques de bobinage des stators des machines tournante à courant alternatif.

Vue la diversité de ces procédures et la complexité d'un grand nombre d'entre eux, nous nous sommes intéressés qu'à l'analyse de quelque une de ces méthodes et l'étude de quelques facteurs prépondérants intervenants lors de la conception d'un bobinage.

Nous avons mis l'accent sur Les causes d'apparition de la défaillance des enroulements statoriques qui provoquant à l'arrêt partiel ou total d'une machine, car la durée de vie d'un enroulement est limitée par les conditions de fonctionnement de la machine à laquelle sont soumis les isolants, plus les conditions sont mauvaises plus la durée de vie est réduite.

Pour un rebobinage fiable, les méthodes de calcul des paramètres de bobinage et de sélection de la qualité du fil et de la section nécessaire sont très importantes, car les exigences des marchés sont très variées, ce qui impose de faire un choix adéquat.

Les techniques de rebobinage des machines à courant alternatif diffèrent, suite leur type et la nature de chaque équipement, ce dernier demande une précision et une performance lors de la mise en place des bobines dans les encoches, la qualité du papier isolants et du verni d'imprégnations conditionne également la rigidité de la machine.

En outre lorsqu'une machine doit être rebobinée, 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 rebobinage, afin d'avoir un produit fiable et rentable.

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

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