



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE
POLYTECHNIQUE D'ANTANANARIVO



Département de Génie Mécanique – Département de Génie Electrique

*« Mémoire de fin d'étude en vue d'obtention du diplôme de
Licences ès Science Techniques en Génie Industriel »*

TRANSFORMATION D'UN MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASE EN MONOPHASE

Présenté par : HERIKANY Abaina Augustin

Rapporteur : ANDRIANAHAHARISON Yvon

Date de soutenance : 12 Mai 2007

REMERCIEMENTS

Nous tenons à exprimer notre reconnaissance et à témoigner notre gratitude à :

- Monsieur RAMANANTSIZEHENA Pascal, Directeur de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo d'avoir bien voulu nous permettre la soutenance de ce mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de licence ès technique en Génie Industriel.
- Monsieur ANDRIANAHAHARISON Yvon, chef de département Génie Industriel de leur grande responsabilité envers cette filière, c'est aussi le directeur de ce mémoire qui m'a fait preuve d'une grande disponibilité de m'avoir encadré et encouragé durant ce travail.
- Monsieur JOELIHARITAHAKA Rabeatoandro, chef de département Génie Mécanique et Productiques.
- Monsieur RABENARIVO Michel d'avoir bien voulu accepter de présider cette soutenance.
- Tous les membres du jury qui vont porté leurs remarques et critiques constructives sur ce travail.
- Tous ceux qui ont de près ou de loin contribuer à la réalisation de ce mémoire.

J'exprime toute ma reconnaissance à mes parents qui m'ont encouragé tout au long de mes études, qu'ils reçoivent ici ma profonde gratitude pour leurs innombrables soutiens.

Liste des figures :

- Figure1.1: constitution d'un moteur asynchrone
- Figure1.2 : schéma d'enroulement d'un moteur à bague
- Figure1.3 : schéma d'une cage d'un rotor à bague
- Figure1.4 : champ tournant
- Figure1.5 : enroulement à bobine concentrique
- Figure1.6 : enroulement en manteau
- Figure1.7 : schéma de l'enroulement monophasé
- Figure1.8 : schéma d'un champ créé par les bobines
- Figure1.9 : FMM des deux groupes de bobines à pas raccourci
- Figure1.10 : courbe de couple en fonction de glissement
- Figure1.11 : schéma d'un moteur asynchrone triphasé
- Figure2.1 : schéma de démarrage étoile triangle
- Figure2.2 : disposition des bornes de l'enroulement statorique sur la plaque à bornes de la machine et leur connexion en étoile et triangle
- Figure2.3 : mise en marche à l'aide d'un autotransformateur
- Figure2.4 : démarrage à l'aide d'une bobine d'inductance
- Figure2.5 : schéma de l'essai à vide
- Figure2.6 : schéma de mesure de résistance statorique
- Figure2.7 : schéma de mesure de l'inductance
- Figure3.1 : circuit magnétique de la machine
- Figure3.2 : enroulement concentrique à pôles alternés
- Figure3.3 : courbe de coefficient de dispersion différentielle dans l'enroulement statorique
- Figure3.4 : forme d'encoche
- Figure3.5 : courbe de coefficient g_f en fonction de $\left(\frac{l_m}{\varepsilon}\right)$
- Figure3.6 : courbe de coefficient de dispersion dans l'enroulement rotorique
- Figure3.7 : schéma de branchement d'un moteur à condensateur
- Figure3.8 : schéma d'enroulement d'un moteur à condensateur
- Figure4.3 : diagramme circulaire monophasé

Liste des tableaux

- [1] : tableau des résultats à vide du moteur triphasé
- [2] : tableau des résultats à rotor calé du moteur triphasé
- [3] : tableau des valeurs lors du mesure de la résistance statorique
- [4] : tableau des valeurs lors du mesure de l'inductance
- [5] : tableau des valeurs moyennes des constantes à adopter
- [6] : tableau de facteur de distribution des enroulements monophasés
- [7] : tableau de Field
- [8] : tableau de valeurs lors de la mesure de la résistance statorique monophasé
- [9] : tableau de valeurs lors de la mesure de l'inductance
- [10] : tableau de résultats à vide du moteur monophasé
- [11] : tableau de résultats à rotor calé

Notations

ϕ : flux magnétique

f : fréquence du réseau

θ_p : nombre de spires par phase

k_d : facteur de distribution

m : nombre de phase

k_μ : coefficient de saturation magnétique du fer

k_δ : coefficient de l'entrefer

x_p : réactance de l'enroulement

k_{r1} : coefficient de remplissage

μ_0 : permittivité relative dans le vide

C_d : couple de démarrage

C : couple électromagnétique

l : longueur actif de l'entrefer

I_0 : courant magnétisant à vide

τ : pas polaire

g : glissement

λ_d : perméance de dispersion du flux de fuite différentielle

Q : nombre total d'encoche par pôle

$P_{ém}$: puissance électromagnétique

Z : nombre d'encoche

Z_0 : impédance du circuit à vide

x_0 : réactance du circuit à vide

r_m : résistance du circuit magnétisant

R : résistance de l'enroulement

D_{an} : diamètre moyen de l'anneau

q_{an} : section des anneaux de court-circuitage

r_{ean} : résistance ohmique des deux portions des anneaux de court-circuitage

p_0 : pertes totales à vide

p_f : perte dans le fer

W_j : perte joule

W : perte supplémentaire

F_a : force magnétomotrice

P_u : puissance utile

F_{a1} : force magnétomotrice dans la culasse du stator

F_{a2} : force magnétomotrice dans la culasse du rotor

$\cos\varphi_1$: facteur de puissance

η : rendement

k_e : facteur de forme

I_1 : courant nominal

$\Delta\theta_{cf}$: échauffement du cuivre par rapport à l'air

$\Delta\theta_{fv}$: échauffement des tôles par rapport à l'air de la ventilation

$\Delta\theta_{va}$: échauffement de l'air de la ventilation

$\Delta\theta_{cu}$: échauffement du bobinage du stator rapport à l'air ambiante

Q_{air} : débit d'air

S_r : surface de refroidissement

Table des matières

INTRODUCTION.....	1
Conclusion.....	63
Bibliographie.....	64
Annexe.....	65

INTRODUCTION

Grâce à l'énergie électrique, les machines asynchrones sont les plus utilisées dans le domaine industriel.

L'utilisation de la tension alternative monophasée est beaucoup plus fréquente d'où l'idée de la transformation de la machine asynchrone triphasée en monophasée.

Cependant, il y a le problème de démarrage car le champ tournant doit être en quadrature pour faire tourner le rotor à l'enclenchement.

Ce thème de ce mémoire a été choisi car la plupart des petites et moyennes entreprises ont besoin de cette machine asynchrone monophasée.

Le travail se divise en 4 chapitres :

Le premier chapitre : traite les généralités sur les machines asynchrones où l'on consacre le principe de fonctionnement et la constitution de la machine asynchrone à cage d'écureuil

Le second chapitre décrit le moteur asynchrone triphasé ;

Au troisième chapitre, on étudie la transformation du moteur asynchrone triphasé en monophasé ;

Le dernier chapitre est consacré aux mesures et essais de la machine asynchrone monophasée.

Chapitre I.GENERALITES SUR LES MACHINES ASYNCHRONES

Les machines asynchrones servent à transformer l'énergie électrique en énergie mécanique ou à transformer l'énergie mécanique en énergie électrique. Le rotor de ces machines ne tourne pas en synchrone au champ tournant d'où l'appellation de son nom 'Machine Asynchrone'.

I.1.Principaux éléments des machines asynchrones

La machine est constituée de deux éléments essentiels nécessaires au fonctionnement : le stator et le rotor, les deux parties sont constituées de circuit magnétique en tôles d'acières magnétique d'ordre de dizaine de millimètre d'épaisseur, isolées les unes des autres par une couche de vernis qui réduit les pertes par courant de Foucault.

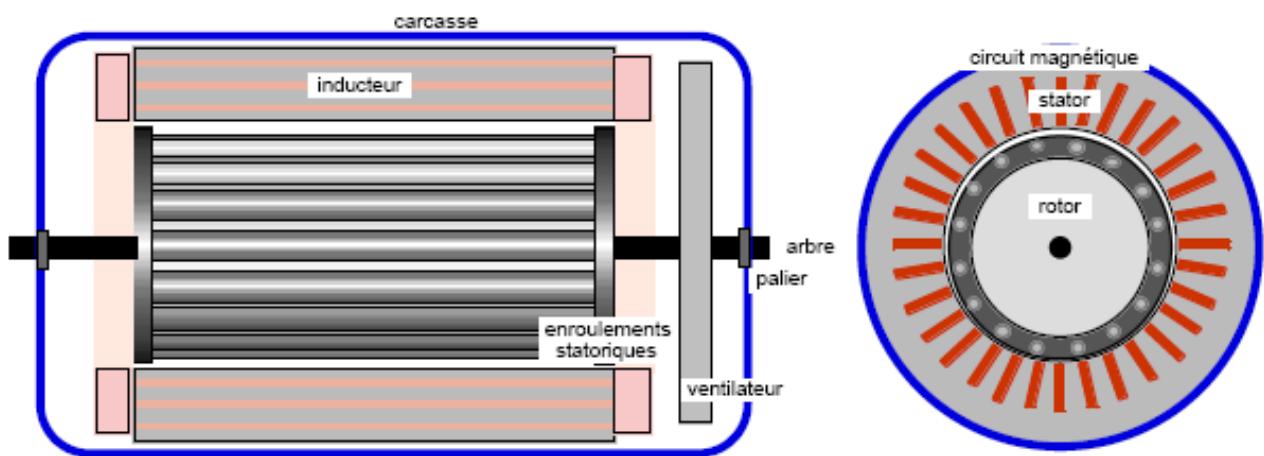


Figure 1.1 constitution d'un moteur asynchrone

I.1.1.Le Stator

Le circuit magnétique est un empilement de tôles fines minces d'acier découpées, faisant apparaître les différentes encoches statoriques. On utilise des tôles minces dont l'épaisseur varie entre 0,35 et 0,50 mm pour minimiser les pertes dans le circuit magnétique. De plus, afin de limiter l'effet des courants de Foucault, on isole habituellement les unes des autres d'une mince couche de vernis ou de silicate de soude.

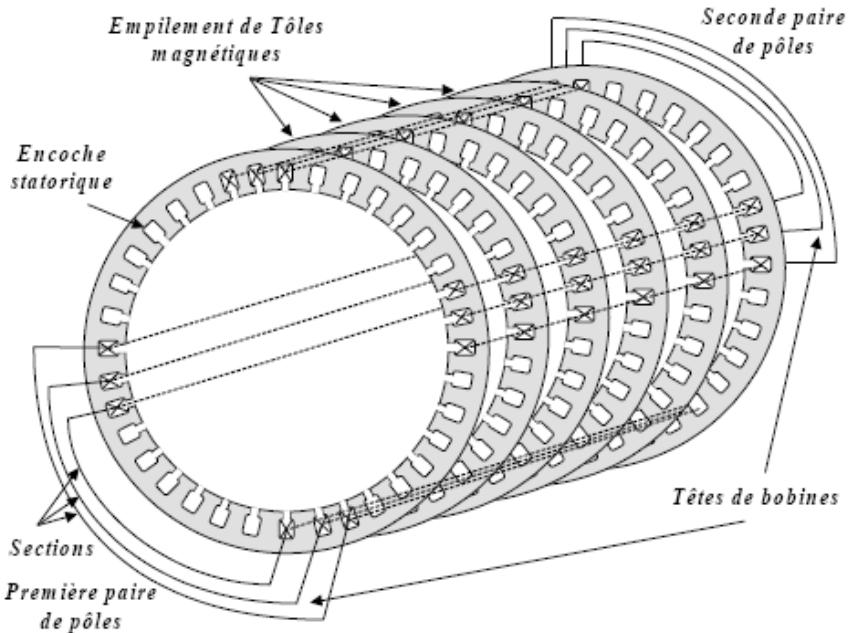


Figure 1.2 circuit magnétique d'un moteur asynchrone

I.1.2. Le Rotor

Le rotor est constitué de tôles empilées et habituellement du même matériau que le stator. Pour les petits moteurs, les tôles sont découpées dans une seule pièce et assemblées sur un arbre. Pour les gros moteurs, chaque laminage est constitué de plusieurs sections montées sur un moyeu.

I.1.3. Rotor bobiné

Le rotor bobiné dit également rotor à bague se compose d'un enroulement à conducteurs isolés, de même nombre de pôles que celui du stator, généralement triphasé et monté en étoile.

Les extrémités libres de cet enroulement sont amenées aux bagues calées sur l'arbre du rotor.

Les balais frottant sur les bagues relient l'enroulement rotorique à un rhéostat triphasé ce qui est d'une grande importance lors du démarrage du moteur.

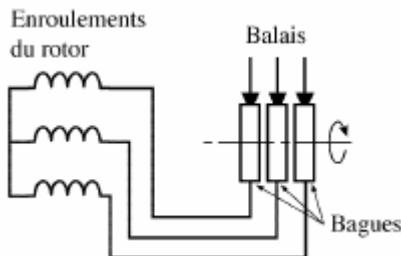


Figure 1.3 schéma d'enroulement d'un rotor à bague

I.1.4. rotor en court-circuit

Les enroulements sont constitués de barres court-circuitées par un anneau terminal placé à chaque extrémité du rotor. Les conducteurs sont généralement réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre ou, à l'occasion, en laiton préformées et frettées dans les tôles du rotor. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotorique et les tôles magnétiques. Leur résistance est suffisamment faible pour que les courants ne circulent pas dans les tôles, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre

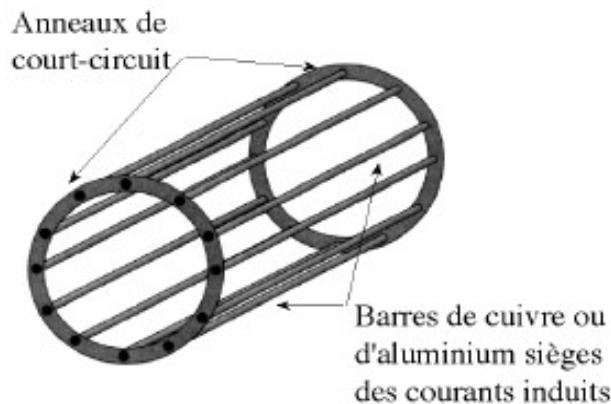


Figure 1.4 schéma d'une cage d'un rotor en court-circuit

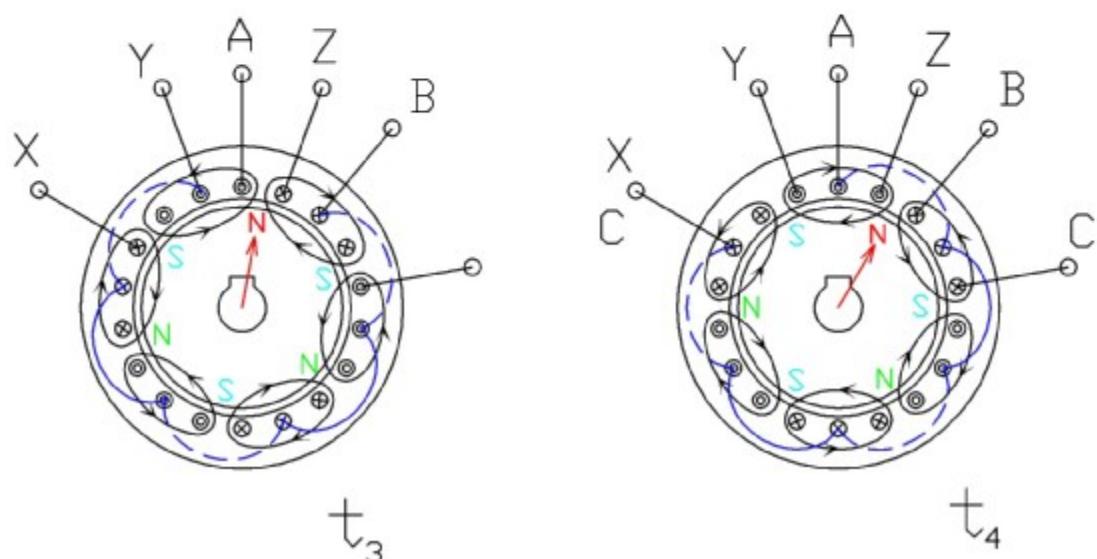
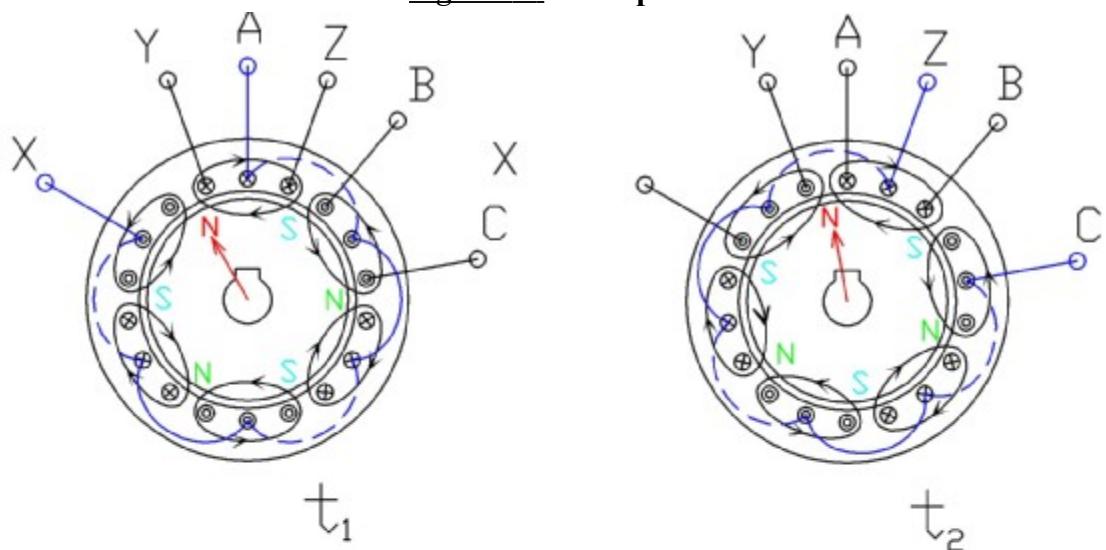
I.2. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone

L'enroulement statorique reçoit l'énergie depuis le réseau, le champ tournant crée dans la machine par les courants de l'enroulement statorique, induit des courants dans l'enroulement fermé du rotor. L'interaction de ces courants et du champ magnétique crée un couple moteur obligeant le rotor à suivre le champ et à produire un travail mécanique. Mais,

plus la vitesse du rotor N_2 est proche de la vitesse du champ tournant $N_1 = \frac{\omega}{p}$, plus petites sont les forces électromotrices induites par le champ dans le rotor et par conséquent plus petites sont les courants dans le rotor. La diminution des courants réduit le couple moteur agissant sur le rotor et c'est pour cette raison que ce dernier a une vitesse de rotation un peu inférieure à celle de la vitesse de synchronisme

La figure ci-dessous montre l'enroulement multipolaire du stator

Figure 1.5 : champ tournant



I.2.1.Pas d'enroulement

Pour le calcul de l'enroulement, la distance entre les cotés d'une spire de bobine est mesurée en fonction du pas polaire (ou en nombre de dents passées). La largeur de la spire est appelée pas d'enroulement y .

Si

- $y = \tau$: l'enroulement est appelé pas diamétral,
- $y < \tau$: l'enroulement est appelé à pas raccourci.

Où τ : pas polaire.

Le nombre de bobines dans l'encoche est dit "nombre de couches".

Dans le cas de notre machine, ce nombre est égal à 1 car il n'y a qu'une couche dans l'encoche.

I.3.Forme d'enroulement

Les enroulements à courants alternatifs se distinguent de la façon suivante :

- A bobines séparées : par pôles conséquents ou bien par pôles ;
- A bobines enchevêtrées ou enroulements en manteau ;
- Avec barres.

a. Enroulement à bobines séparées

L'enroulement à bobines séparées est appelé également enroulement par phase ou à bobines concentriques. Les sections d'une même bobine sont concentriques ou coaxiales.

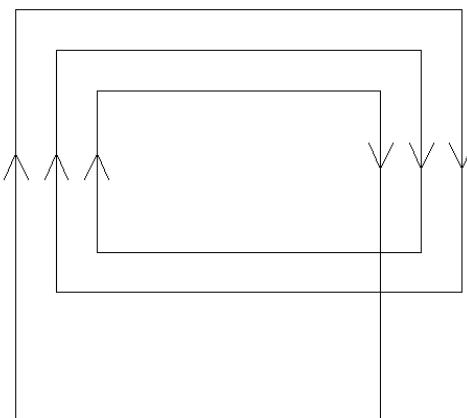
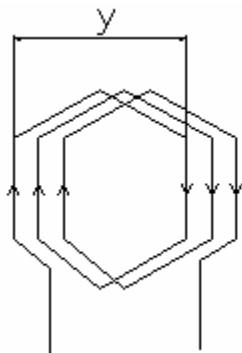


Figure 1.6 : Enroulement à bobine concentrique

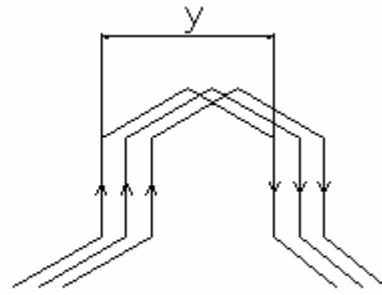
Les FEM maximales induites sont différentes d'une spire à l'autre mais elles ne sont pas décalées dans le temps et leur sommation doit se faire algébriquement.

b. Enroulement en manteau

Les sections de cet enroulement sont identiques. Il y a deux types : imbriqué ou ondulé, et qui est formé par des spires ayant toutes le même pas γ .



Enroulement en manteau enchevêtre



Enroulement en manteau ondulé

Figure 1.7 : Enroulement en manteau

Où γ : pas d'enroulement.

Les FEM maximales induites sont les mêmes dans toutes les spires, mais sont décalés dans le temps et leur sommation doit se faire géométriquement.

c. Enroulement monophasé

Le principe d'enroulement est le même, mais en supprimant une phase de la bobine triphasée en laissant 1/3 des encoches pour l'enroulement de démarrage et le 2/3 pour l'enroulement principale. Donc le nombre des conducteurs est égal à la 2/3 de celui de triphasé.

d. Coefficient de bobinage

Chaque côté de la bobine d'enroulement est généralement placé dans plusieurs encoches, le champ tournant traverse les brins de la bobine non simultanément et entre les forces électromotrices induites dans ces brins existe un certain déphasage. La valeur de ce déphasage dépend du nombre de paire de pôles P et du nombre d'encoches Z . Le déphasage

entre les forces électromotrices dans les brins de deux encoches voisines sera $\alpha = \frac{2\pi \cdot P}{Z}$.

Les forces électromotrices des deux brins qui forment une spire ne sont en phase, ce qui provoque une diminution de la force électromotrice de l'enroulement.

Lors du calcul de la force électromotrice de l'enroulement, on tient compte de ces deux facteurs en faisant intervenir le facteur de bobinage $k_b < 1$

$$\text{D'où } k_b = k_d = \frac{\sin \frac{\pi}{2m}}{q \sin \frac{\pi}{2mq}}.$$

Où m : nombre de phases,

q : nombre d'encoche par pôle et par phase.

Il a deux types de machine asynchrones :

- Machine asynchrone monophasée,
- Machine asynchrone triphasée.

La machine asynchrone triphasée possède des enroulements statoriques triphasés

identiques dont les entrées sont décalées de $\frac{2\pi}{3}$. Ces enroulements sont couplés soit en triangle, soit en étoile.

La machine asynchrone monophasée possède un enroulement statorique monophasé sur le réseau monophasé.

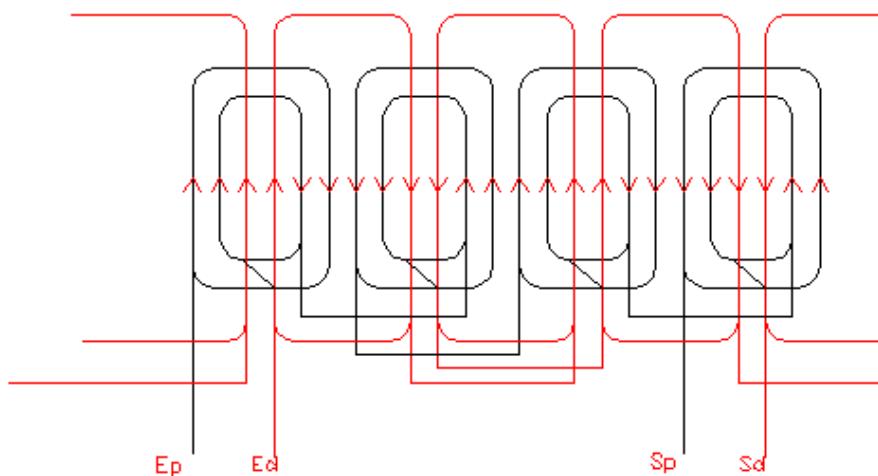


Figure 1.8 : Schéma de l'enroulement monophasé

I.4. Champ magnétique tournant

Il est possible de créer un champ tournant sans déplacement mécanique d'organe en utilisant des enroulements convenablement disposés et parcourus par des courants polyphasés. Considérons deux bobines A et A' parcourues par un courant sinusoïdal qui crée au point O un champ alternatif sinusoïdal de direction fixe et deux autres bobines B et B' identiques aux

bobines précédant mais décalées dans l'espace de l'angle $\frac{\pi}{2}$ et parcourues par un courant de

même grandeur et de même pulsation que celui qui traverse A et A' mais déphasé de $\frac{\pi}{2}$, Ils créent en O un champ sinusoïdal de direction fixe :

$$\bullet B_x = B_m \cos \omega t ;$$

$$\bullet B_y = B_m \cos(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

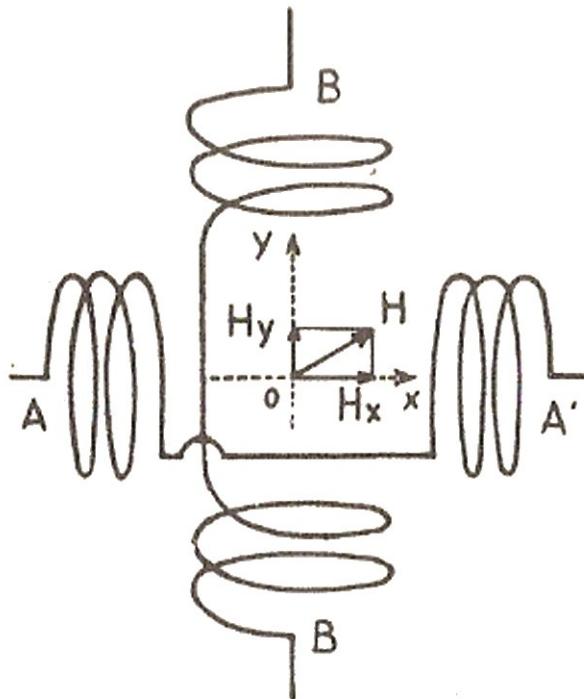


Figure 1.9: Schéma d'un champ créé par les bobines

La résultante des deux champs est constante :

$$B = B_m = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} \text{ et cette résultante fait avec } O_x \text{ l'angle } \alpha = \omega t \text{ car}$$

$$\tan \alpha = \frac{B_y}{B_x} = \tan \omega t.$$

On obtient un champ de grandeur constante tournant à la vitesse angulaire ω .

I.5. Force magnétomotrice

Le champ magnétique de l'enroulement est déterminé par sa force magnétomotrice qui dépend d'une part de l'aménagement de l'enroulement et des courants qui les parcourrent et d'autre part de la forme du circuit magnétique de la machine.

Nous prenons l'exemple de la *figure 1.10* : Il s'agit d'un enroulement étagé à deux couches représentent q bobines à pas total ($y = \tau$).

Les harmoniques fondamentaux des FMM de la couche supérieure F_{s1} et de la couche inférieure F_{i1} représentent les ondes sinusoïdales d'amplitudes F_{qt1} :

$$F_{pht1} = 2F_{qt1} \cdot K_{r1}$$

Où K_{r1} : facteur de raccourcissement pour l'harmonique fondamental

A l'aide de ces trois expressions suivantes :

$$F_{b1v} = \frac{4}{\pi} \frac{1}{v} \sin \frac{v\pi}{2}$$

$$F_{qt1} = F_{b1v} q \cdot K_{d1}$$

$$F_{dt1} = \frac{1}{2} \omega_b \cdot i_b$$

$$\text{On a } F_{pht1} = \frac{4}{\pi} q \cdot \omega_b \cdot k_{b1} \cdot i_b$$

$k_{b1} = k_{d1} \cdot k_{r1}$: facteur de bobinage

Lorsque tous les groupes de bobines sont connectés en série, le nombre de spire par phase sera :

$$\omega = 2p \cdot q \cdot \omega_b$$

Le courant dans la bobine est : $i_b = \sqrt{2} \cdot I \sin \omega t$

Où I est la valeur efficace du courant traversant la phase

L'expression générale de FMM en fonction du temps est :

$$F_{pht1} = F_{ph1} \sin wt$$

Où $F_{ph1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{\omega \cdot k_{b1}}{p} I$

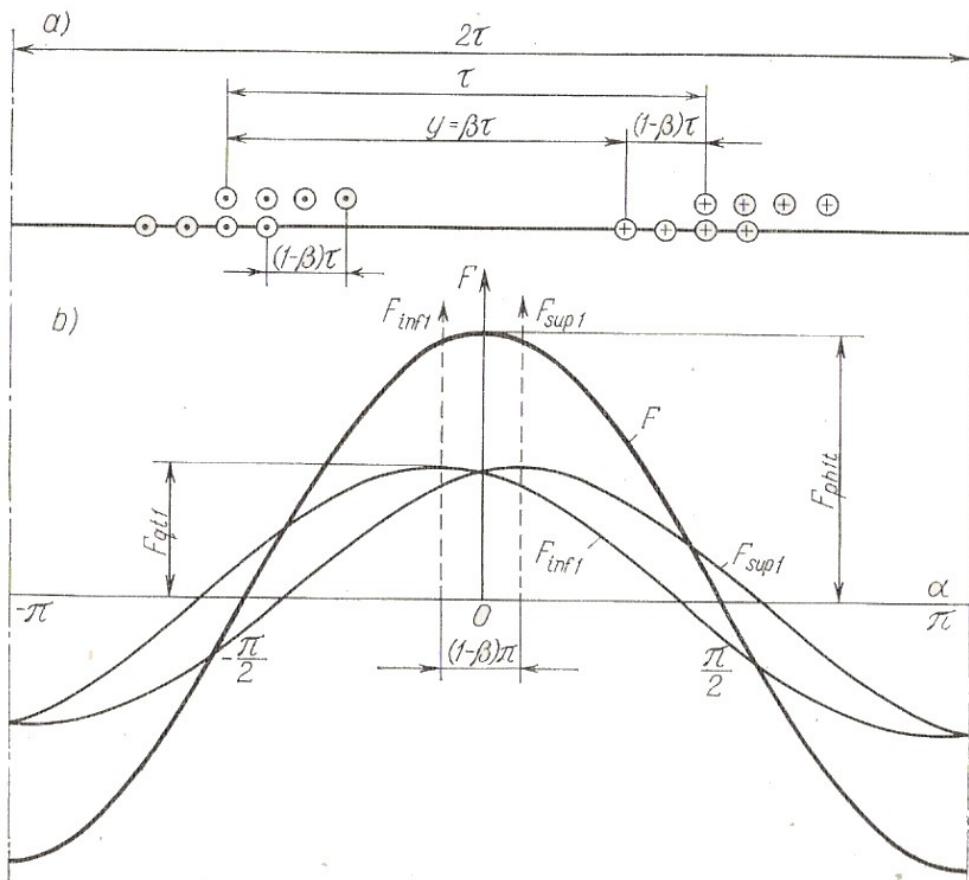


Figure 1.10 : FMM des deux groupes de bobines à pas raccourci

Pour le cas de FMM d'un enroulement triphasé

$$F_{pht1} = \frac{3}{2} F_{ph1} \sin(wt - a) = F_1 \sin(wt - a)$$

D'où $F_1 = \frac{m\sqrt{2}}{\pi} \frac{\omega \cdot k_{b1}}{p} I$

I.6. Caractéristiques d'une machine asynchrone

Les caractéristiques que nous étudions sont les caractéristiques en régime normal correspondant à l'alimentation sous tension et à la fréquence normale maintenue constante.

I.6.1.Caractéristique mécanique $C(N)$

La caractéristique mécanique d'un moteur est donnée par le graphe du couple moteur développé par le moteur en fonction de la vitesse N . L'allure de cette caractéristique sur la *figure 1.11*.indique le point de fonctionnement normale p à la rencontre du graphe de couple résistant $C_r(N)$. La marche du moteur est stable qu'entre le point de fonctionnement à vide N_s et le couple maximal M , Le glissement est proportionnel au couple et la vitesse est sensiblement constante.

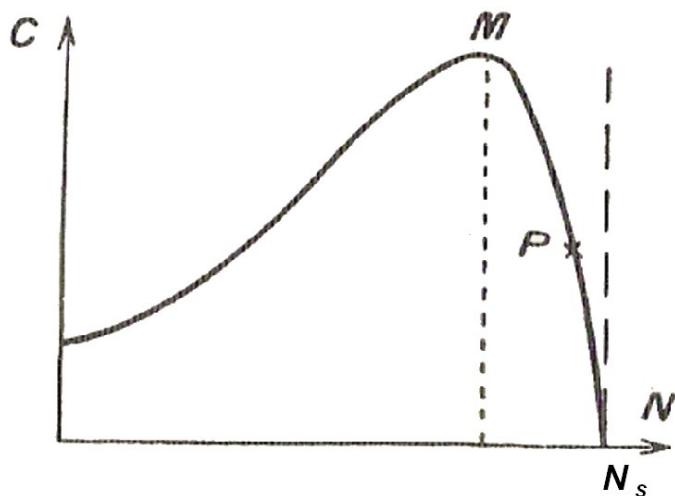


Figure 1.11 .graphe de $C(N)$

I.6.2.Graphe de courant absorbé $I(p_u)$

A partir de la marche à vide, la valeur de courant absorbé I_1 croit au fur et à mesure que la valeur du glissement augmente.

A l'arrêt, I est au voisinage de $\frac{I_c}{\sigma}$ où I_c :courant de pleine charge.

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_1 L_2} : \text{Coefficient de dispersion de Blondel ;}$$

M : inductance mutuelle entre phase du stator et du rotor ;

L_1 : Inductance propre d'une phase statorique ;

L_2 : Inductance propre d'une phase rotorique.

I.6.3.Graphe de facteur de puissance $\cos\varphi$ (p_u)

Dans les limites d'emploi du moteur, le facteur de puissance est très faible à vide et s'améliore en fonction de la charge.

A l'aide du diagramme de cercle, on peut suivre entre la marche à vide et l'arrêt du moteur, la variation du facteur de puissance en fonction de la puissance utile p_u passe par un maximum, puis décroît.

I.6.4.Courbe de rendement η (p_u)

Le rendement à vide est au voisinage de zéro et croît avec p_u , il doit avoir une valeur voisine de son maximum pour le fonctionnement nominal. Il diminue ensuite de plus en plus rapidement au voisinage de zéro à l'arrêt.

On remarque qu'un moteur en court-circuit alimenté sous tension constante est univariant, c'est-à-dire que ses caractéristiques sont immuables et, à chaque valeur de la puissance utile, correspond des valeurs bien déterminées du glissement, du rendement, du courant absorbé, du facteur de puissance.

Dans le cas d'un moteur à bagues qui est contraire à celle du moteur en court-circuit, on dispose d'une action sur la résistance du rotor ; ce qui permet de modifier les caractéristiques et par conséquent les variables d'exploitation.

I.6.5. Allure du glissement $g(c)$

Le glissement part d'une valeur très faible et augmente à peu près linéairement en fonction du puissance utile P_u , le glissement correspondant au maximum du couple utile donc à la limite de la zone stable est encore assez réduit. Après le passage au point où le couple est maximum, g croît rapidement et atteindra 1 se qui correspond à l'arrêt du moteur.

La figure suivante montre les allures des toutes les courbes précédentes :

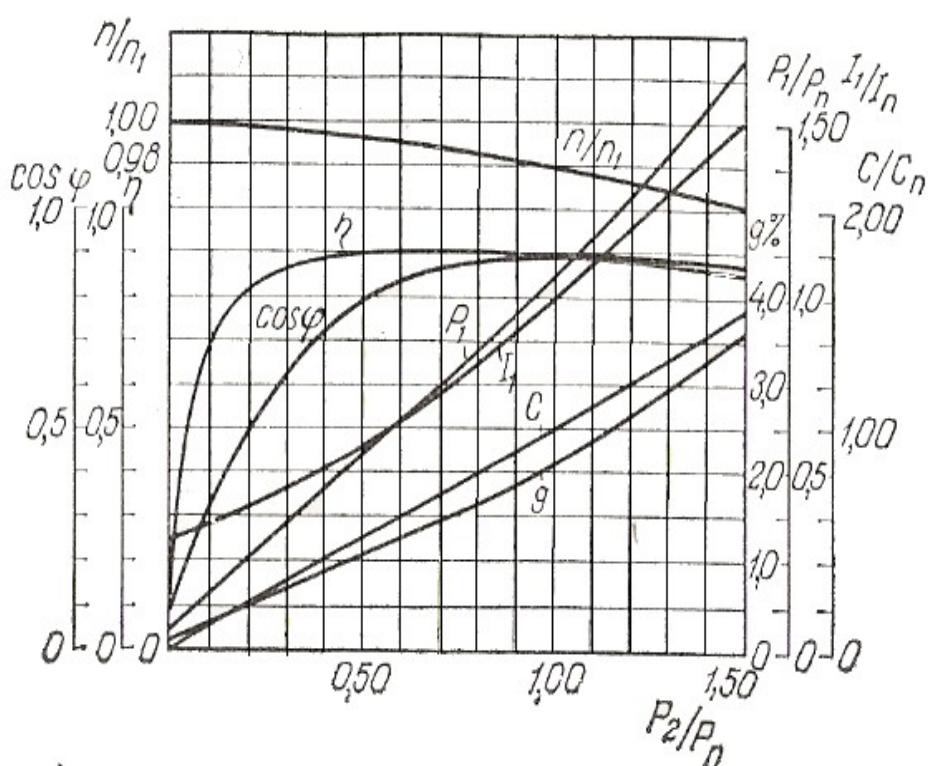


Figure 1.12 : courbe caractéristique d'un moteur asynchrone

Chapitre II. MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASE

II.1. Principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'une machine asynchrone est basé sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant. Par conséquent, l'interaction du flux engendré par le courant avec le flux du stator forme un flux résistant.

D'après la loi de Lenz, la force électromagnétique E_0 appliquée au conducteur a créé sur l'arbre de la machine un couple qui tend à faire tourner le rotor dans le sens de rotation du flux. L'ensemble de couples créés par chaque conducteur forme le couple résultant C , le rotor commence à tourner si le couple moteur vaincra le couple résistant C_r .

Le schéma du bobinage d'un moteur triphasé :

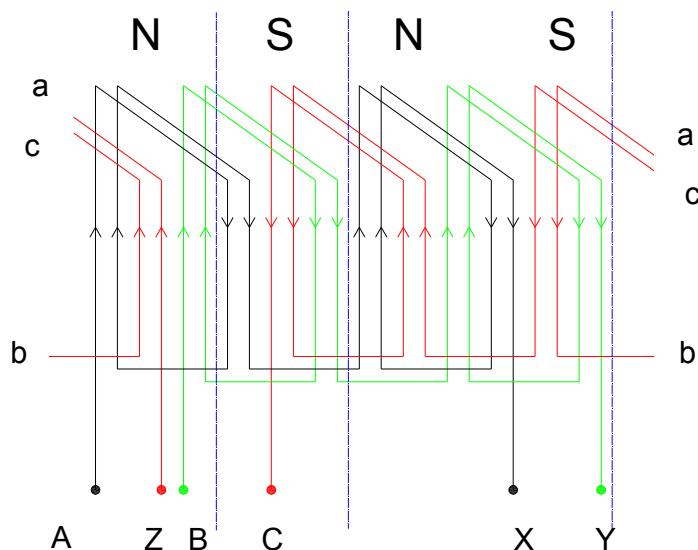


Figure 2.1 : schéma d'enroulement d'un moteur asynchrone triphasé

II.2. Démarrage

En général, le démarrage d'un moteur asynchrone triphasé est obtenu par la création du champ tournant créé par le réseau triphasé équilibré.

Les conditions de démarrage sont particulièrement défavorables car si le couple est faible, l'intensité de courant de démarrage atteint de l'ordre de 4 à 7 fois l'intensité du courant

nominal puisque le moteur se comporte au décollage comme un transformateur dont le secondaire est en court-circuit.

Il est possible d'améliorer le régime de démarrage en réduisant la valeur du courant de démarrage au moment de lancement en utilisant des modes spéciaux : autotransformateur ; démarrage étoile triangle ; rhéostat de démarrage ; rotor à double cage ou à encoche profondes.

II.2.1.1. Démarrage étoile triangle

La commutation de l'enroulement statorique de triangle en étoile est utilisée pour la mise en marche d'un moteur à rotor en court circuit de faible puissance $\leq 20Kw$ dont l'enroulement statorique est en triangle. Au démarrage, l'enroulement statorique est couplé en étoile et la tension simple est $\sqrt{3}$ fois plus petite. Le courant simple de démarrage diminuera environ dans la même proportion :

$$I_{sY} = \frac{U_C}{\sqrt{3}Z} \quad (2-1)$$

D'où U_C : tension composée ;

Z : Impédance de la phase.

Le courant composé de l'étoile est égal au courant simple :

$$I_{cY} = \frac{U_C}{\sqrt{3}Z} \quad (2-2)$$

Si l'enroulement était connecté en triangle, le courant composé serait :

$$I_{c\Delta} = I_{s\Delta} \sqrt{3} = \frac{U_c}{Z} \sqrt{3} \quad (2-3)$$

Les deux formules (2-2) et (2-3) donnent :

$$I_{c\Delta} = 3I_{cY} \quad (2-4)$$

D'après la formule (2.4), le courant de démarrage pris au réseau lors de la connexion de l'enroulement statorique en étoile est 3 fois plus grande que lors de la connexion en triangle.

Dans la pratique, la mise en marche se fait de la façon suivante :

On met le commutateur 2 dans la position <<démarrage>> et on ferme l'interrupteur à couteaux 1. Lorsque le moteur atteint une vitesse permanente, on fait passer rapidement le commutateur 2 dans la position <<marche>>. la fig. 2.2 indique la disposition des bornes de l'enroulement statorique sur la plaque à bornes.

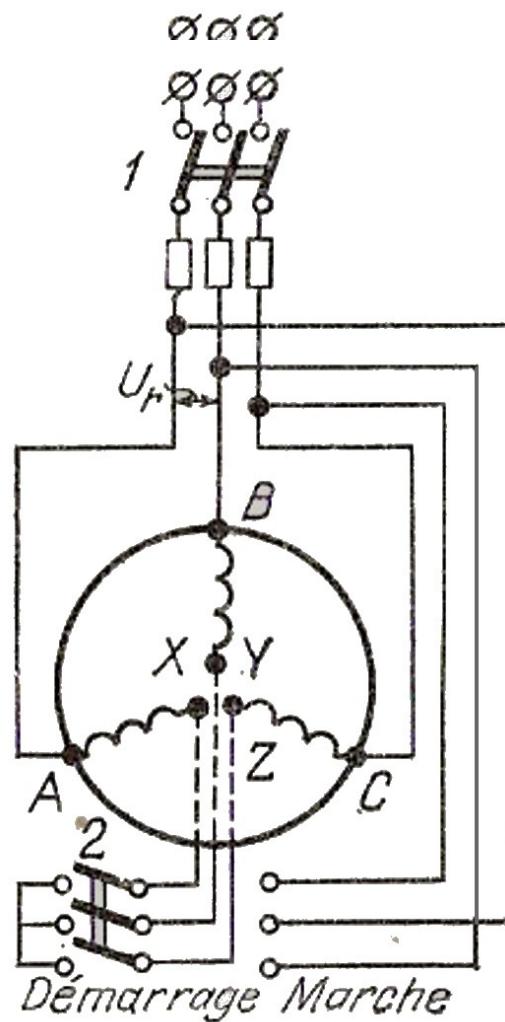


Figure.2.2 : Schéma de démarrage étoile triangle

Le schéma de branchement :

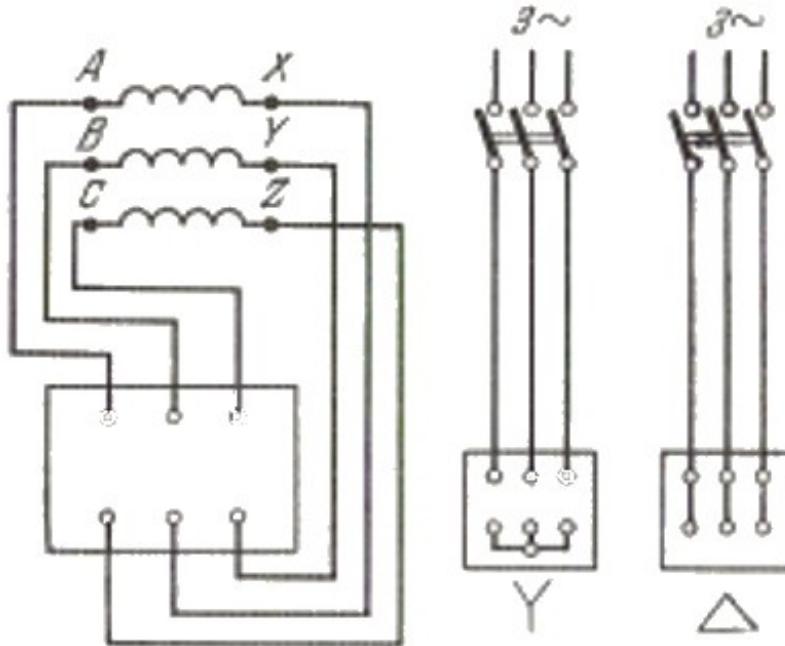


Figure 2.3 disposition des bornes de l'enroulement statorique sur la plaque à bornes de la machine et leur connexion en étoile et triangle

II.2.1.2. Démarrage à l'aide d'un autotransformateur

Ce mode permet de choisir la tension de décollage car la tension est appliquée successivement au cours du démarrage jusqu'à la tension normale laquelle l'autotransformateur n'est plus en service.

Soit U_c et I_d la tension et le courant de démarrage du réseau ; U_{dm} la tension aux bornes du moteur et I_{dm} le courant dans le stator du moteur; K_A le rapport de transformation de l'auto transformation et Z_{cc} l'impédance d'une phase du moteur.

Le courant et tension par phase :

$$U_{dm} = \frac{U_c}{K_A}$$

$$I_{dm} = \frac{U_{dm}}{Z_{cc}} = \frac{U_c}{K_A \cdot Z_{cc}} \quad (2-5)$$

Et $I_d = \frac{I_{dm}}{K_A} = \frac{1}{K_A^2}$

$$U_c = \frac{1}{K_A^2} I_{cc} Z_{cc} \quad (2-6)$$

Où I_{cc} est le courant de court-circuit du moteur sous la tension nominale.

D'après la relation (2.6), le courant de démarrage pris au réseau diminue de K_A^2 fois par rapport au courant de démarrage lors du branchement direct du moteur sur le réseau.

Le couple de démarrage :

$$C_d = \frac{m_1 I_{dm}^2 r'_2}{\Omega_1} \quad (2-7)$$

Le schéma de branchement sur l'autotransformateur est:

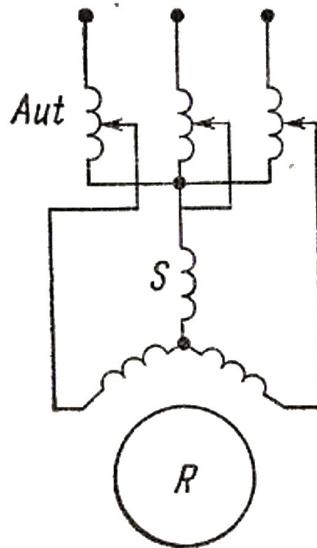


Figure 2.4. Mise en marche à l'aide d'un autotransformateur.

II.2.1.3. Démarrage à l'aide d'une bobine d'inductance dans le circuit statorique

Le schéma de démarrage est indiqué à la fig.2.5, où R_k désigne la bobine d'inductance. le courant de démarrage dans le réseau :

$$I_d = K_d I_n \quad (2-8)$$

Où K_d est le rapport du courant de démarrage au courant nominal.

Le couple de démarrage :

$$C_d = \frac{m_1 I_d^2 r'_2}{\Omega_1} \quad (2-9)$$

Ce mode de démarrage n'est acceptable que dans le cas où la valeur couple de démarrage n'a pas une grande importance.

Le schéma de branchement :

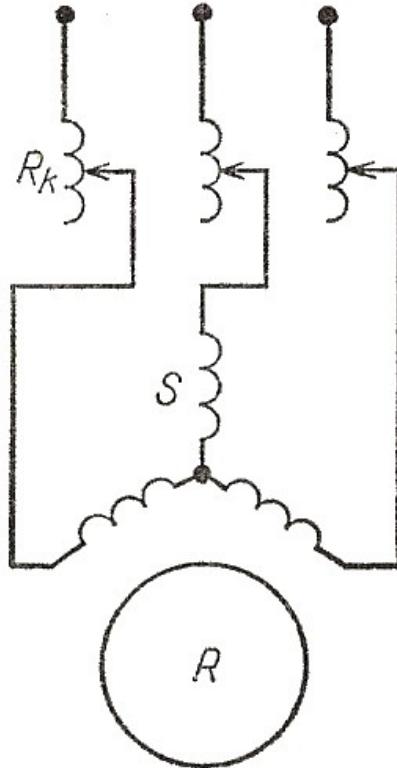


Figure.2.5.démarrage à l'aide d'une bobine d'inductance.

II.2.2.Utilisation

Le moteur à cage développe un faible couple de démarrage, dont il est préférable de démarrer à vide le moteur en utilisant un dispositif qui fonctionne comme une embrayage pour déconnecter la charge au démarrage et elle ne sera appliquée qu'au moment où le moteur tourne près de sa vitesse de régime.

Malgré ces inconvénients, c'est le type de moteur le plus employé car il présente plusieurs avantages en régime normal, de rendement excellent et de faibles entretiens. Du point de vue économique, ce moteur coûte moins cher par rapport aux autres.

11.3. Essai de la machine asynchrone triphasée et mesure des caractéristiques

11.1. Plaque signalétique du moteur

Puissance : 1/6 Ch.	Tension d'alimentation : 127/220 [V]
Triphasée	f : 50Hz
I _n : 1,7[A]	N : 1475tr/mn

11.2. Essai à vide

Alimenté sous tension et fréquence normales, le moteur tourne à vide, on mesure la puissance P₁₀ et le courant I₁₀ qu'il absorbe.

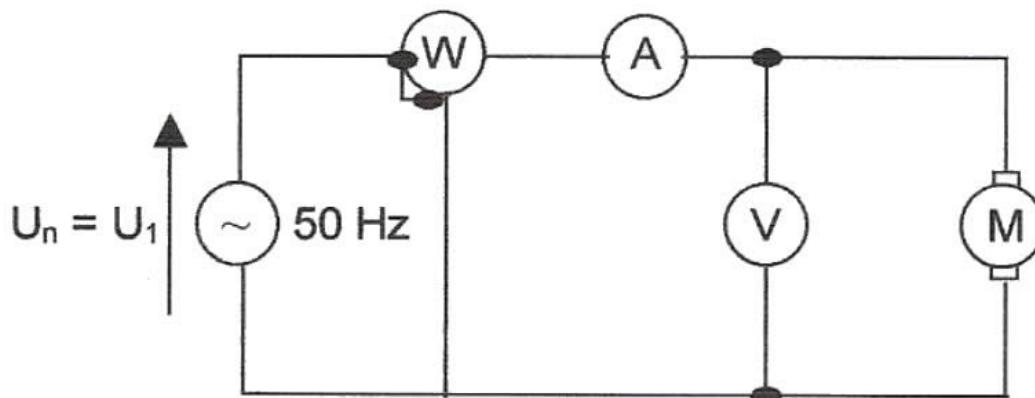


Figure.2.7. schéma de branchement avec Wattmètre.

Tableau I donne les données de l'essai à vide :

P ₁₀ [W]	I ₁₀ [A]
68,58	1.7

11.3. Essai à rotor bloqué

En bloquant le rotor, on applique aux bornes une tension réduite pour éviter le suréchauffement de l'enroulement puis on mesure le courant I'_{lc} voisin du courant de court-circuit nominal, on ramène les données de l'essai en court-circuit obtenues en valeur nominale.

$$I_{ccn} = I_{cc} \frac{U_n}{U_{cc}} \quad (2.10)$$

$$P_{ccn} = P_{cc} \left(\frac{U_n}{U_{cc}} \right)^2$$

Où I_{ccn} : courant nominal de court-circuit ;

P_{ccn} : Puissance nominal de court-circuit.

$I_{cc}[A]$	$U_{cc}[V]$	$P_{cc}[W]$
1,86	88	83

Tableau II : tableau de valeurs à tension réduite

En ramenant les valeurs à la tension nominale

$I_{ccn}[A]$	$U_{ccn}[V]$	$P_{ccn}[W]$
4,65	220	518,75

Tableau III : tableau de valeurs à tension nominale

11.4. Mesure de la résistance de l'enroulement statorique

Le moteur est alimenté sous une tension continue de 24 volts. On doit faire plusieurs mesures en variant le curseur du potentiomètre puis on mesure la tension et le courant aux bornes par le voltmètre et l'ampèremètre. En appliquant la loi d'ohm, on obtient la résistance de l'enroulement statorique.

Schéma de montage :

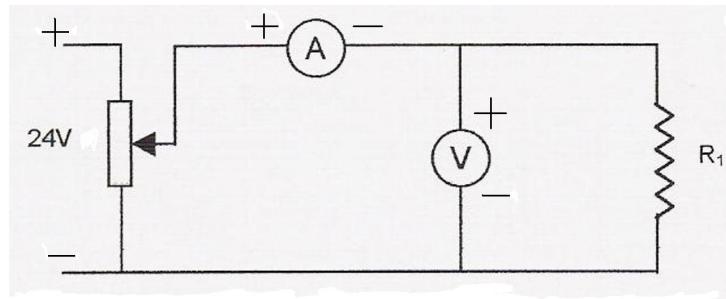


Figure 2.8. Schéma de montage pour la mesure de la résistance statorique

$U [V]$	$I[A]$	$R = \frac{U}{I} [\Omega]$
3	0,11	27,27

5,7	0,21	27,14
10,5	0,39	26,92

Tableau IV : tableau des valeurs de la résistance

D'après ce tableau, la résistance moyenne est:

$$R_{moy} = 27,11[\Omega]$$

11.5. Mesure de l'inductance

Pour mesurer l'inductance, on alimente le moteur sous une tension alternative réduite puis on mesure la tension et l'intensité efficace aux bornes du moteur.

L'impédance de l'enroulement est :

$$Z = \frac{U_{eff}}{I_{eff}} = \sqrt{R_1^2 + L_1^2 \omega^2} \quad (2-11)$$

Le schéma de montage :

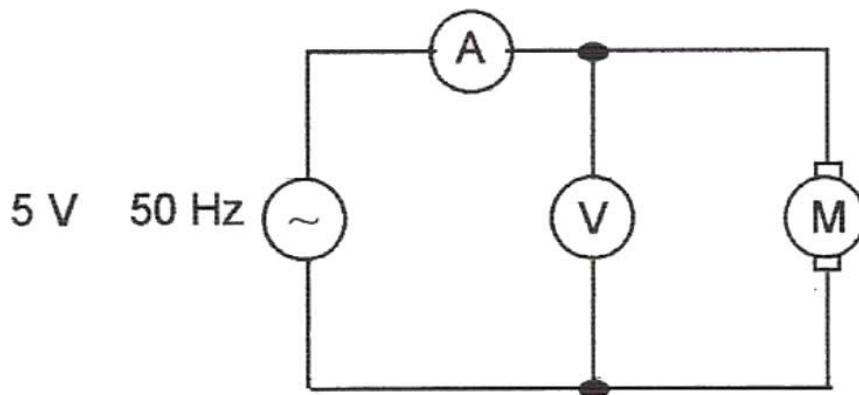


Figure.2.9. schéma de montage pour la mesure de l'inductance.

$U_{eff}[V]$	$I_{eff}[A]$	$Z_{eff}[\Omega]$
25	0,42	59,52

Tableau V : tableau des valeurs de l'impédance

D'où la valeur de l'inductance :

$$L = \frac{\sqrt{Z^2 - R_1^2}}{\emptyset} \quad (2-12)$$

D'où la valeur de $L = \frac{\sqrt{59,52^2 - 27,11^2}}{100\pi} = 0,17 \text{ Henry}$

1I.4.. Construction du diagramme circulaire

Connaissant les valeurs de courant à vide I_0 , en court-circuit I_{ccn} , \emptyset_0 et \emptyset_{ccn} , on peut tracer les vecteurs des courants I_0 et I_{ccn} .

Les calculs des différents points particuliers du diagramme sont :

- $\cos\emptyset_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}U_1I_0} = \frac{68,58}{\sqrt{3}220,1,7} = 0,106$
- $I_0 \cos\emptyset_0 = 1,7 \cdot 0,106 = 0,18[A]$
- $I_{ccn} \cos\emptyset_{ccn} = \frac{P_{ccn}}{\sqrt{3}U_1} = \frac{1524,2}{\sqrt{3}220} = 4[A]$
- $I_{ccn} \sin\emptyset_{ccn} = \sqrt{I_{ccn}^2 - I_{ccn}^2 \cos^2_{ccn}} = 6,23[A]$
- $\cos\emptyset_{ccn} = \frac{P_{ccn}}{\sqrt{3}U_1 \cdot I_{ccn}} = \frac{1524,2}{\sqrt{3}220 \cdot 7,4} = 0,541$
- $\emptyset_{ccn} = 57,29^\circ$
- $\cos\emptyset_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3}U_1 \cdot I_n} = \frac{123}{\sqrt{3}220 \cdot 3,7} = 0,190$
- $\emptyset_1 = 79^\circ$

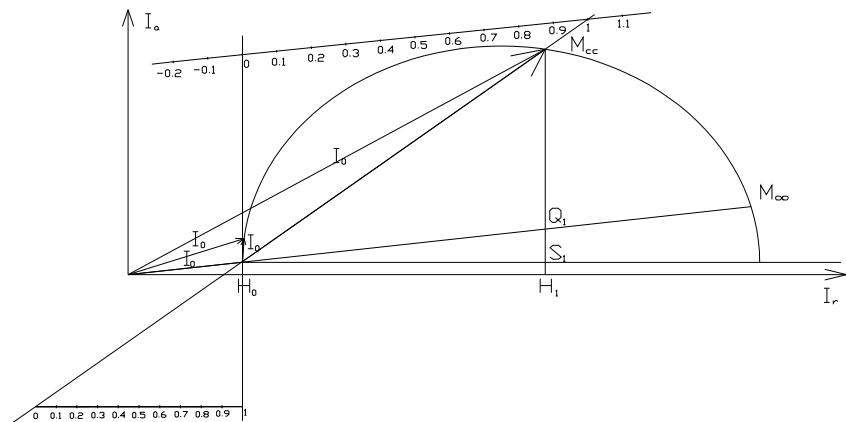
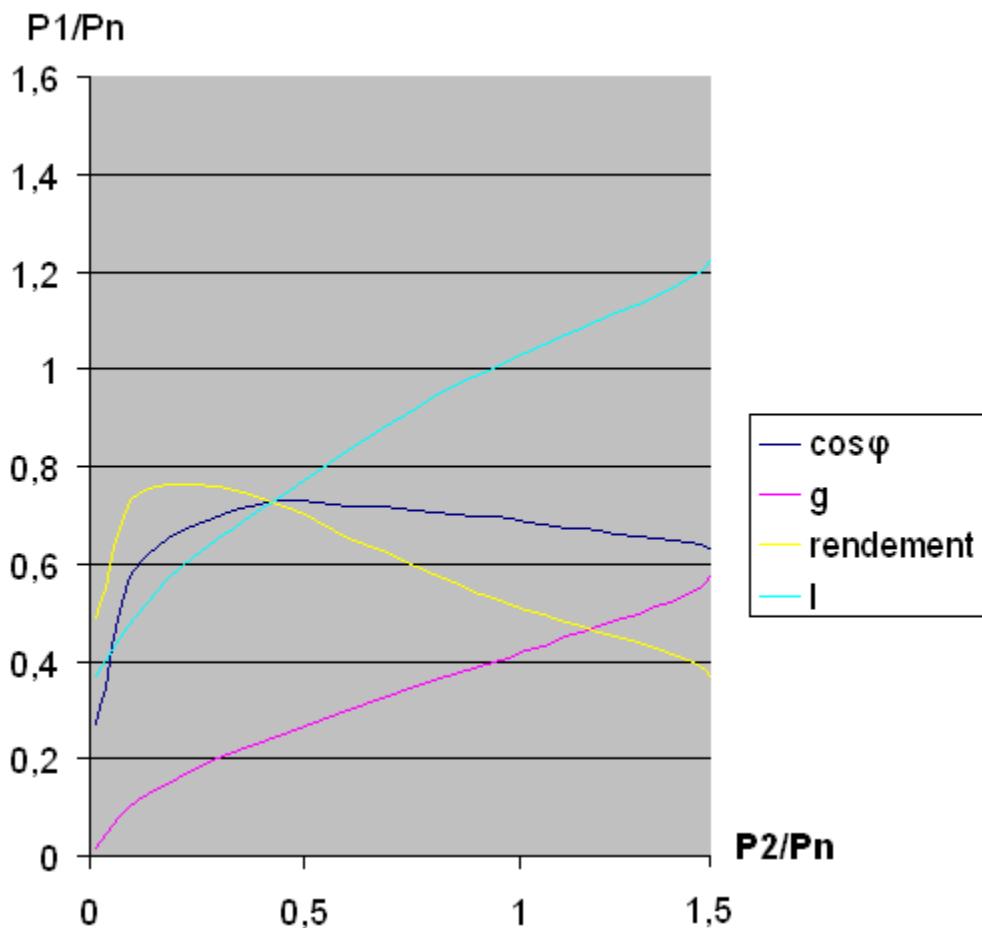


Figure 2.10 : Diagramme circulaire d'un moteur triphasé

- Facteur de puissance au primaire : $\cos\varphi_1 = \frac{MH}{0M}$;
- Puissance électrique absorbée : $P_1 = \sqrt{2} \cdot U \cdot 0M$;

- Perte fer stator : $P_{fs} = \sqrt{2} \cdot U \cdot SM$; Puissance électromagnétique traversant l'entrefer : $P_{em} = \sqrt{2} \cdot U \cdot MQ$;
- Couple électromagnétique : $C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_1}$;
- Puissance mécanique : $P_m = \sqrt{2} \cdot U \cdot MP$;
- Glissement : $g = \frac{PQ}{MQ}$;
- Rendement : $\eta = \frac{MP}{MH}$.

Courbe caractéristique du moteur asynchrone triphasé



CHAPITRE III.TRANSFORMATION D'UN MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASE EN MOTEUR ASYNCHRONE MONOPHASÉ

III.1.Introduction

Le but de cette étude est de transformer le moteur asynchrone triphasé en monophasé. Dans notre cas, il s'agit d'une machine à cage d'écureuil.

Le moteur sera maintenu à la même puissance $P_{kW} = 0,123[kW]$, les caractéristiques physiques restent les mêmes (pas dentaire, l'entrefer, nombre d'encoche,..., etc.).

La machine a $2p = 4$ pôles.

Dans ce travail, nous nous contentons de redimensionner l'enroulement statorique, de déterminer le nombre de spires à partir des encoches ainsi que la section du conducteur, le type d'enroulement à employer et le calcul de la valeur de la capacité nécessaire au démarrage du moteur.

III.2.. Etude préliminaire

Le dimensionnement de l'enroulement statorique est effectué en marche à vide. On détermine le courant magnétisant I_0 dans l'enroulement qui produit le champ magnétique tournant induisant dans l'enroulement le FEM E , ensuite, on pourra déterminer l'impédance principale du circuit de l'inducteur qui permet de déterminer et de dimensionner le cuivre à employer.

III.3.Méthode de calcul du circuit magnétique en marche à vide

Le calcul du circuit magnétique est basé sur la loi du courant total :

$$\frac{1}{2} \oint H \cdot dl = F_0 \quad (3-1)$$

Où H : l'intensité du champ magnétique ;

dl : Élément de ligne de force magnétique.

1.1. **Principe de calcul**

On remplace l'intégrale de ligne par une somme des tensions magnétiques agissant sur des portions qui caractérise le circuit magnétique.

$$\frac{1}{2} \oint H \cdot dl = F_\delta + F_{Z1} + F_{Z2} + F_{a1} + F_{a2} = F_0 \quad (3-2)$$

Avec F_δ : tension magnétique dans l'entrefer,

F_{z1} : Tension magnétique des dents du stator,

F_{z2} : Tension magnétique des dents du rotor,

F_{a1} : Tension magnétique de la culasse du stator,

F_{a2} : Tension magnétique de la culasse du rotor.

1.2. Circuit magnétique de la machine

Le circuit magnétique est l'ensemble d'élément de nature ferromagnétique dont le rôle est de canaliser le flux d'induction.

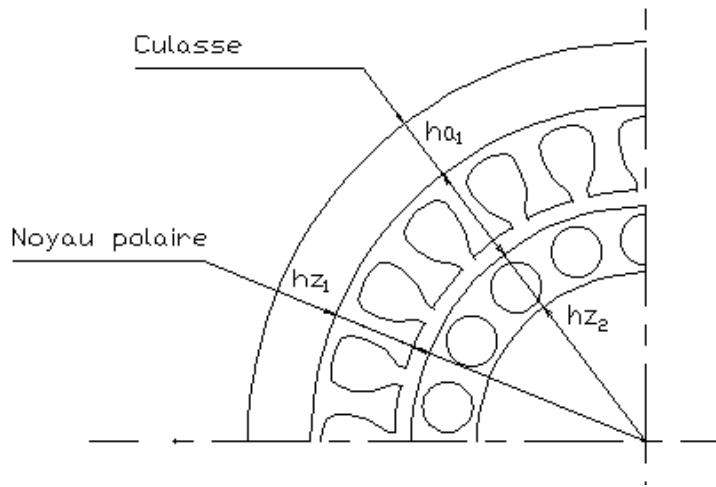


Figure.3.1. circuit magnétique de la machine.

1.3.. Détermination des différents coefficients

1.1.. Facteur de distribution

$$k_d = \frac{\sin \frac{\pi}{2m}}{q \cdot \sin \frac{\pi}{2mq}} \quad (3-3)$$

Avec $m = 1$: nombre de phases ;

q : Nombre d'encoches statoriques par pôle et par phase.

$q = 4$: Pour l'enroulement principal ;

$q = 2$: Pour l'enroulement de démarrage.

Le schéma de bobinage montre le nombre d'encoches par pôle et par phase

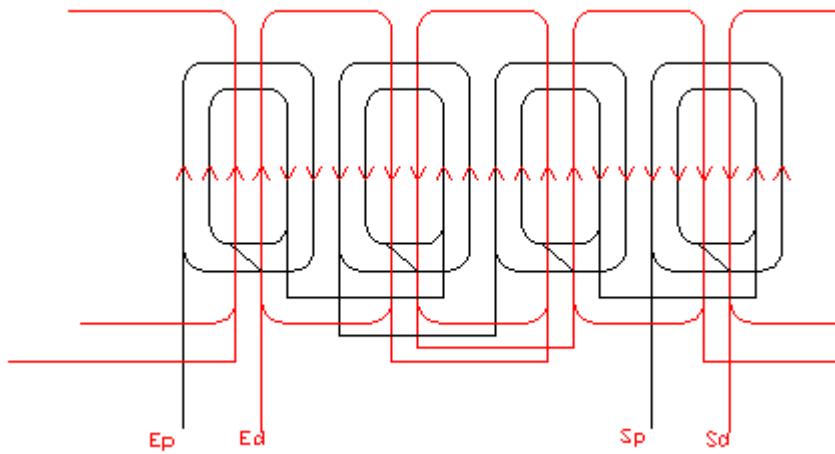


Figure 3.2. Enroulement concentrique à pôles alternés.

- L'enroulement coloré en rouge : l'enroulement principal.
- L'enroulement coloré en noir : l'enroulement auxiliaire

Le facteur de distribution des enroulements monophasés sont donnés par le tableau suivant :

Nombre total d'encoches par pôle Q	3	4	4	5	5	6	6	6
Nombre total d'encoches par pôle et par phase q	2	2	3	2	3	2	3	4
k_{d1}	0,866	0,925	0,804	0,953	0,872	0,966	0,910	0,833

D'après le tableau :

La valeur de $k_{d1}=0,833$ pour l'enroulement principal ;

$k_{d1}=0,966$ pour l'enroulement auxiliaire.

1.2. Facteur de forme

On a $k_e = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11$ pour la courbe sinusoïdale du champ

1.3. Coefficient d'entrefer

$$k_{\delta} = \frac{t_{Z1}}{t_{Z1} - C_e \delta} \quad (3-4)$$

Avec $t_{Z1Z} = \frac{\pi D_1}{Z_1} = 8,11mm$: pas dentaire ;

$$C_e = \frac{\left(\frac{b_e}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_e}{\delta}}$$

$b_e = 7mm$: Largeur d'encoche.

$\delta = 0,35mm$: Épaisseur de tôles magnétiques.

La valeur de coefficient d'entrefer : $k_{\delta} = 1,2$

1.4. Détermination de la FMM

La relation entre le courant total de la bobine $\omega_b i_b$ et l'intensité du champ H est déterminée par la loi du courant total :

$$\omega_b i_b = \oint \bar{H} \cdot dl = 2\delta H \quad (3-5)$$

D'où $F_a = \frac{1}{2} \omega_b i_b$: FMM nécessaire pour faire passer le flux magnétique une fois dans l'entrefer.

L'expression définitive est :

$$F_a = \frac{\mu_0 H}{\lambda_{\delta}} \quad (3-6)$$

D'où $\lambda_{\delta} = \frac{\mu_0}{\delta \cdot k_{\delta}}$: perméance de l'entrefer ;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} H/m = 1,26 \cdot 10^{-8} H/cm$: Permeabilité absolue ;

$k_{\delta} = \frac{B'_m}{B_m} = 1,2$: Coefficient de l'entrefer ;

B'_m : Induction dans l'entrefer dentée ;

B_m : Induction dans l'entrefer uniforme.

1.5.. FMM dans les dents du stator

$$F_{Z1} = \frac{B_{Z1}}{\mu_1} h_{Z1} \quad (3-7)$$

Avec B_{Z1} : induction magnétique dans les dents ;

h_{Z1} : Hauteur de dent du stator ;

μ_1 : Permittivité relative de l'entrefer.

1.5.1.. FMM dans la culasse du stator

$$F_{a1} = H_{a1} L_{a1} \xi \quad (3-8)$$

Avec $H_{a1} = \frac{B_{a1}}{\mu_1}$: l'intensité du champ magnétique dans la culasse ;

B_{a1} : Induction dans la culasse ;

ξ : Coefficient de variation de l'intensité d'induction.

1.5.2.FMM dans la culasse du rotor

$$F_{a2} = H_{a2} L_{a2} \xi \quad (3-9)$$

Avec $H_{a2} = \frac{B_{a2}}{\mu_1}$: l'intensité du champ magnétique dans la culasse du rotor ;

B_{a2} : Induction dans la culasse du rotor.

1.5.3.FMM dans les dents du rotor

$$F_{Z2} = H_{Z2} \cdot h_{Z2} \quad (3-10)$$

Avec $H_{Z2} = \frac{B_{Z2}}{\mu_1}$: l'intensité du champ magnétique dans les dents du rotor ;

h_{Z2} : Hauteur de dent du rotor.

La FMM F_a est la somme des FMM dans le rotor, l'entrefer et stator

$$\rightarrow F_a = F_\delta + F_{Z1} + F_{Z2} + F_{a1} + F_{a2} \quad (3-11)$$

Or $F_{Z1} = F_{Z2} = F_{a1} = F_{a2} = 0$ car $\mu_k = \infty$

D'où

$$F_a = F_\delta = H_\delta \cdot \delta \cdot k_\delta = \frac{B_m k_\delta k_\mu \delta}{\mu_0} \quad (3-12)$$

Avec k_μ : coefficient de saturation magnétique du fer.

III.4. Dimensionnement

1.1.Méthode de calcul de dimensionnement

On calcul tous les paramètres à vides en fonction de la valeur du flux d'induction mutuelle ϕ_m

$$\phi_m = k_0 \sqrt{\frac{P_{kW}}{p}} \quad (3.13)$$

La puissance utile P_{kW} peut varier selon le besoin de l'utilisateur

1) Flux d'induction mutuelle :

$$\phi_m = k_0 \sqrt{\frac{P_{kW}}{p}}$$

2) Nombre de spires :

Par phase :

$$\theta_p = \frac{E_0}{4,44 \cdot f \cdot k_{bp} \cdot \phi_m}$$

Par encoche :

$$\theta_p = \frac{\theta_p}{2pq}$$

3) Calcul de coefficient de dispersion

$$\lambda_d = \frac{m \cdot q \cdot k_{bp}^2 \cdot \tau \cdot k_{dp}}{\pi^2 k_\delta k_\mu \delta} \quad (3-16)$$

$$\beta = \frac{2}{3} : \text{pour l'enroulement monophasé ;}$$

$$\beta = \frac{3}{3} = 1 : \text{pour l'enroulement triphasé ;}$$

4) Calcul des perméances de dispersion

Perméance de dispersion de la partie frontale de l'enroulement statorique

$$\lambda_{fr} = q \left(0,47 \cdot l_{fr} - 0,3 \frac{\tau}{l_{fr}} \right) \frac{l_{fr}}{l} \quad (3-17)$$

Perméance des champs de fuite dans l'encoche

$$\lambda_e = \frac{2h_1}{3(b_1 + b_3)} + 0,623 + \frac{h_4}{b_2} \quad (3-18)$$

Les paramètres h_1, h_4, b_1, b_2, b_3 et b_4 sont données par la forme de l'encoche.

5) Calcul de réactance de l'enroulement statorique

$$x_p = 4\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \frac{l \cdot \omega_p^2}{pq} \sum \lambda_x \quad (3.15)$$

6) Réactance du circuit magnétique

En monophasé :

$$x_m = 2\sqrt{2} \cdot f \cdot \frac{\mu_0 \cdot D_i \cdot l}{k_\delta \cdot k_\mu \cdot \delta} \cdot \frac{\omega_p^2 \cdot k_{bp}^2}{p^2} \quad (3-19)$$

En triphasé :

$$x_m = 2m \cdot f \cdot \frac{\mu_0 \cdot D_i \cdot l}{k_\delta \cdot k_\mu \cdot \delta} \cdot \frac{\omega_p^2 \cdot k_{bp}^2}{p^2} \quad (3-19)$$

7) Réactance du circuit à vide

$$x_0 = x_m + x_p \quad (3-20)$$

8) Résistance de l'enroulement statorique

$$R_p = \rho_{cu} \frac{L}{S_{cu}} \quad (3-21)$$

9) Calcul de diamètre du conducteur

$$d_{cu} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{enc} \cdot k_{r1}}{\pi \cdot \omega_{p1}}} \quad (3-22)$$

10) Section du conducteur

$$S_{cu} = \frac{\pi \cdot d_{cu}^2}{4} \quad (3-23)$$

11) Longueur totale du conducteur

$$L = \omega_{p1} \left[4(L_1 + L_2) + 3 \cdot \frac{7}{6} \tau \right] \quad (3-24)$$

Avec $L_1 = 2 \left(l + \tau + \frac{3}{4} \tau \right)$: longueur du conducteur d'une bobine à τ pas;

$L_2 = 2 \left(l + \frac{\tau}{2} + \frac{3}{4} \cdot \frac{3}{4} \tau \right)$: longueur du conducteur d'une bobine à $\frac{\tau}{2}$ pas.

12) Courant magnétisant à vide correspond à g=0

$$I_0 = \frac{U_1}{x_m \sqrt{\sigma^2 + \left(\frac{R_p}{x_m}\right)^2}} \quad (3-25)$$

1.2.Calcul de dimensionnement de l'enroulement de travail

L'enroulement statorique est dimensionné à vide, on part d'une formule analogue à celle employée aux alternateurs pour le calcul de flux.

En posant

$$\phi_m = k_0 \sqrt{\frac{P_{kW}}{p}} \quad (3-13)$$

Avec P_{kW} : puissance utile de la machine ;

k_0 : Coefficient de flux ;

p : Nombre de paire de pôles.

La valeur de k_0 est donnée par le tableau suivant qui donne les valeurs moyennes constantes à adopter, déduites de l'étude statique d'un grand nombre de machine modernes.

P_{kW}	k_0 (en 10^{-2})	AF	$\Delta_1 [A/mm^2]$
0 à 4	0,29 à 0,35	≤ 200	4,5 à 5,5
4 à 22	0,35 à 0,41	≤ 400	
22 à 110	0,41 à 0,47	≤ 600	4 à 5
110 à 220	0,47 à 0,55	≤ 800	
220 à 380	0,55 et plus	≤ 1200	4

Tableau [5] : tableau des valeurs moyennes

Avec $\Delta_1 [a/mm^2]$: Densité de courant ;

AF : Nombre d'ampères fils par encoche.

La puissance de la machine : $P_{kW} = 0,123[kW]$;

k_0 compris entre 0,29 à 0,35 ;

par interpolation linéaire, on trouve $k_0 = 0,292 \cdot 10^2$

$$\text{d'où la valeur du flux : } \phi_m = k_0 \sqrt{\frac{P_{kW}}{p}} = 0,292 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{0,123}{2}} = 7,24 \cdot 10^{-4} [Wb]$$

1.1.Calcul de nombre de spires

- Nombre de spires par phase

On a

$$E_0 = 4,44 \cdot \omega_p \cdot f \cdot k_{bp} \cdot \phi \quad (3.14)$$

Où $E_0 = 220[V]$: FEM à vide ;

$k_{bp} = 0,833$: facteur de distribution pour l'enroulement principal ;

ϕ : flux magnétique ;

$f = 50[Hz]$: fréquence du réseau ;

ω_p : Nombre de spires par phase.

$$\text{D'où } \omega_p = \frac{E_0}{4,44 \cdot f \cdot k_{bp} \cdot \phi} = \frac{220}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,833 \cdot 7,24 \cdot 10^{-4}} = 1643 \text{ spires}$$

- **Nombre de spires par encoche**

On répartit ω_p dans $2pq = 16$ encoches :

$$\omega_{p1} = \frac{1643}{16} = 103 \text{ spires par encoche.}$$

1.2.Calcul de réactance de l'enroulement principale

$$x_p = 4\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \frac{l \cdot \omega_p^2}{pq} \sum \lambda_x \quad (3.15)$$

Avec $\sum \lambda_x$: somme des perméances de dispersion ;

$l = 66mm$: longueur active de l'entrefer ;

$q = 4$: nombre d'encoches par pôle et par phase ;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} H/m = 1,26 \cdot 10^{-8} H/cm$: permittivité relative dans le vide.

$\omega_p = 1643 \text{ spires}$: Nombre de spires par phase ;

$f = 50[Hz]$: fréquence du réseau.

Calcul des perméances et coefficient de dispersion

- Coefficient de dispersion différentielle

Les valeurs de coefficient de dispersion différentielle k_{dp} sont déterminées en fonction du pas relatif β et des valeurs de q qui sont données par les courbes sur la figure 3.3.

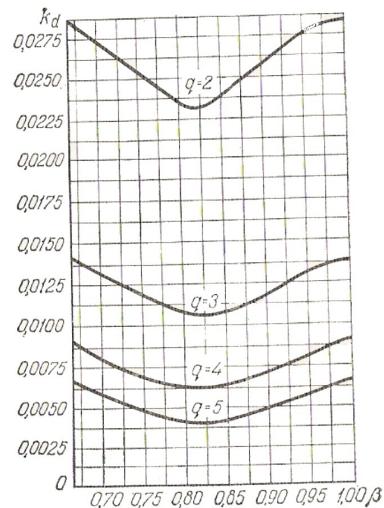


Figure 3.3. : Courbe du coefficient de dispersion différentielle.

D'après la courbe pour $q = 4$ et $\beta = 1$, on a $k_{dp} = 0,0092$

- Perméance de dispersion du flux de fuite différentielle

$$\lambda_d = \frac{m \cdot q \cdot k_{bp}^2 \cdot \tau \cdot k_{dp}}{\pi^2 k_\delta k_\mu \delta} \quad (3-16)$$

Avec $m = 1$: nombre de phases ;

$k_\mu = 1,1$: coefficient de saturation magnétique du fer.

$k_\delta = 1,2$: coefficient de l'entrefer.

$$\text{D'où la valeur de } \lambda_d = \frac{1.4.0.833^2.4.87.0.0092}{\pi^2.1.2.1.1.0.035} = 0,27$$

- Perméance de dispersion de la partie frontale de l'enroulement statorique

$$\lambda_{fr} = q \left(0,47 \cdot l_{fr} - 0,3 \frac{\tau}{l_{fr}} \right) \frac{l_{fr}}{l} \quad (3-17)$$

Avec $l_{fr} = \frac{5\tau}{2} = 122\text{mm}$: longueur de la partie frontale ;

l : longueur active de l'entrefer ;

τ : pas polaire.

$$\rightarrow \lambda_{fr} = 4 \left(0,47 \cdot 12,2 - 0,3 \frac{4,87}{12,2} \right) \frac{12,2}{4,87} = 3,51$$

- **Perméance des champs de fuite dans l'encoche**

La Perméance d'encoche dépend de la forme d'encoche :

$$h_1 = 9mm$$

$$h_4 = 0,5mm$$

$$b_3 = 5mm$$

$$b_1 = 7,5mm$$

$$b_2 = 1,8mm$$

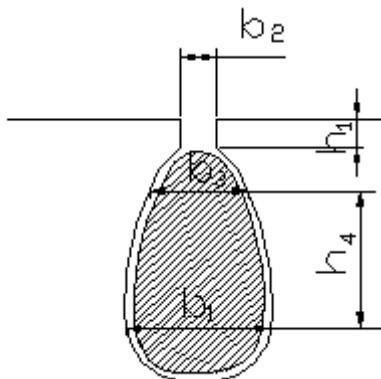


Figure 3.4 : forme d'encoche.

$$\lambda_e = \frac{2h_1}{3(b_1 + b_3)} + 0,623 + \frac{h_4}{b_2} \quad (3-18)$$

$$\text{D'où } \lambda_e = \frac{2,9}{3(7,5+5)} + 0,623 + \frac{0,5}{1,8} = 1,06$$

La somme des perméances de dispersion :

$$\sum \lambda_x = \lambda_e + \lambda_d + \lambda_{fr} = 1,06 + 0,27 + 3,51 = 4,84$$

$$\rightarrow x_p = 4\pi \cdot 50 \cdot 1,26 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{6,6 \cdot 1643^2}{2,4} \cdot 4,84 = 85,33 [\Omega]$$

1.3. Réaction du circuit magnétisant

$$x_m = 2\sqrt{2} \cdot f \cdot \frac{\mu_0 \cdot D_i \cdot l}{k_\delta \cdot k_\mu \cdot \delta} \cdot \frac{\emptyset_p^2 \cdot k_{bp}^2}{p^2} \quad (3-19)$$

Avec $D_i = 62mm$: diamètre intérieur du stator ;

$$\rightarrow x_m = 2\sqrt{2} \cdot 50 \cdot \frac{1,26 \cdot 10^{-8} \cdot 6,2 \cdot 6,6}{1,2 \cdot 1,1 \cdot 0,035} \cdot \frac{1643^2 \cdot 0,833^2}{2^2} = 739,07 [\Omega]$$

1.4.Réactance du circuit à vide

$$x_0 = x_m + x_p \quad (3-20)$$

$$\rightarrow x_0 = 739,07 + 85,33 = 824,4[\Omega]$$

1.5.Résistance de l'enroulement principal

$$R_p = \rho_{cu} \frac{L}{S_{cu}} \quad (3-21)$$

Avec $\rho_{cu} = 0,0169\Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$: résistivité du cuivre à 20°C (293 Kelvin) ;

$S_{enc} = 45,84\text{mm}^2$: section d'encoche ;

L : longueur totale du fil conducteur.

1.1.Calcul de diamètre du conducteur à employer

$$d_{cu} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{enc} \cdot k_{r1}}{\pi \cdot \omega_{p1}}} \quad (3-22)$$

Avec $\omega_{p1} = 103 \text{ spires}$: nombre de spires par encoche ;

$k_{r1} = 0,6$: coefficient de remplissage ou coefficient qui compte de l'isolation de l'encoche et du vide entre les conducteurs.

k_{r1} est l'ordre de 0,5 pour les fils nus et de 0,6 à 0,7 pour les fils émaillés.

$$\rightarrow d_{cu} = \sqrt{\frac{4 \cdot 45,84 \cdot 0,6}{\pi \cdot 103}} = 0,58\text{mm}$$

1.2.Section du conducteur

$$S_{cu} = \frac{\pi \cdot d_{cu}^2}{4} \quad (3-23)$$

$$\rightarrow S_{cu} = \frac{\pi \cdot 0,58^2}{4} = 0,26\text{mm}^2$$

1.3.Longueur totale du conducteur à employer

$$L = \omega_{p1} \left[4(L_1 + L_2) + 3 \cdot \frac{7}{6} \tau \right] \quad (3-24)$$

Avec $L_1 = 2 \left(l + \tau + \frac{3}{4} \tau \right) = 2 \left(66 + 48,69 + \frac{3}{4} \cdot 48,69 \right) = 302,42\text{mm}$: longueur du conducteur

d'une seule bobine à pas τ ;

$L_2 = 2 \left(l + \frac{\tau}{2} + \frac{3}{4} \cdot \frac{3}{4} \tau \right) = 2 \left(66 + \frac{48,69}{2} + \frac{3}{4} \cdot \frac{3}{4} \cdot 48,69 \right) = 235,47 \text{ mm} :$ longueur du conducteur d'une seule bobine à pas $\frac{\tau}{2}$.

$$\text{D'où } L = 103 \left[4(302,42 + 235,47) + 3 \cdot \frac{7}{6} 48,69 \right] = 239163,42 \text{ mm}$$

La valeur de la résistance dans les bobines principales :

$$\rightarrow R_p = 0,0169 \frac{239,16}{0,26} = 15,55 [\Omega]$$

1.6. Courant magnétisant à vide

$$I_0 = \frac{U_1}{x_m \sqrt{\sigma^2 + \left(\frac{R_p}{x_m} \right)^2}} \quad (3-25)$$

Avec $\sigma_p = 1 + \frac{x_p}{x_m} = 1 + \frac{85,33}{739,07} = 1,12$: coefficient de correction ;

$$\text{D'où } I_0 = \frac{220}{739,07 \sqrt{1,12^2 + \left(\frac{15,55}{739,07} \right)^2}} = 0,26 [A]$$

1.7. L'impédance du circuit à vide

$$Z_0 = \frac{U_1}{I_0} \quad (3-26)$$

$$\text{D'où } Z_0 = \frac{220}{0,26} = 830,19 [\Omega]$$

1.8. Résistance du circuit à vide

$$r_0 = \sqrt{Z_0^2 - x_0^2} \quad (3-27)$$

$$\text{D'où } r_0 = \sqrt{830,19^2 - 824,4^2} = 97,88 [\Omega]$$

1.9. Résistance du circuit magnétisant

$$r_m = r_0 - R_p \quad (3-28)$$

$$\text{D'où } r_m = 97,88 - 15,55 = 82,33 [\Omega]$$

III.3.2. Dimensionnement de l'enroulement auxiliaire

Le dimensionnement de l'enroulement auxiliaire se fait de la même façon que l'enroulement principal, en utilisant la formule (3-14) :

$$\phi = k_0 \sqrt{\frac{P_{kW}}{p}}$$

$$\text{On a } \phi = k_0 \sqrt{\frac{P_{kW}}{p}} = 0,292 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{0,123}{2}} = 7,24 \cdot 10^{-4} [Wb]$$

1.1. Calcul de nombre de spires

- **Nombre de spires par phase**

$$\text{On a } E_0 = 4,44 \cdot \omega_d \cdot f \cdot k_{bd} \cdot \phi$$

$$\text{Où } E_0 = 220 [V] : \text{FEM à vide} ;$$

$k_{bd} = 0,966$: facteur de distribution pour l'enroulement principal ;

ϕ : flux magnétique ;

$f = 50 [Hz]$: fréquence du réseau ;

ω_d : Nombre de spires par phase.

$$\text{D'où } \omega_d = \frac{E_0}{4,44 \cdot f \cdot k_{bd} \cdot \phi} = \frac{220}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,966 \cdot 7,24 \cdot 10^{-4}} = 1417 \text{ spires}$$

- **Nombre de spires par encoche**

On répartit ω_p dans $2pq = 8$ encoches :

$$\omega_{d1} = \frac{1417}{8} = 177 \text{ spires par encoche.}$$

1.2. Calcul de réactance de l'enroulement auxiliaire

$$x_d = 4\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \frac{l \cdot \omega_d^2}{pq} \sum \lambda_x$$

Avec $\sum \lambda_x$: somme des perméances de dispersion ;

$l = 66mm$: longueur active de l'entrefer ;

$q = 2$: nombre d'encoche par pôle et par phase ;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} H/m = 1,26 \cdot 10^{-8} H/cm$: perméabilité absolue.

$\omega_d = 1417 \text{ spires}$: nombre de spires par phase ;

$f = 50 [Hz]$: fréquence du réseau.

1.3.Calcul des perméances et coefficient de dispersion

- **Coefficient de dispersion différentielle**

Les valeurs de coefficient de dispersion différentielle k_{dp} sont déterminées en fonction du pas relatif β et des valeurs de q qui sont données par les courbes sur la figure 3.3 précédent. D'après la courbe pour $q = 2$ et $\beta = 1$, on a $k_{dd} = 0,028$

- **Perméance de dispersion du flux de fuite différentielle**

$$\lambda_d = \frac{m \cdot q \cdot k_{bd}^2 \cdot \tau \cdot k_{dd}}{\pi^2 k_\delta k_\mu \delta}$$

Avec $m = 1$: nombre de phase ;

$k_\mu = 1,1$: coefficient de saturation magnétique du fer.

$k_\delta = 1,2$: coefficient de l'entrefer.

D'où la valeur de $\lambda_d = \frac{1.2.0.966^2.4.87.0.028}{\pi^2.1.2.1.1.0.035} = 0,56$

- **Perméance de dispersion de la partie frontale de l'enroulement statorique**

$$\lambda_{fr} = q \left(0,47 \cdot l_{fr} - 0,3 \frac{\tau}{l_{fr}} \right) \frac{l_{fr}}{l}$$

Avec $l_{fr} = \frac{5\tau}{2} = 122mm$: longueur de la partie frontale ;

l : longueur active de l'entrefer ;

τ : pas polaire.

$$\rightarrow \lambda_{fr} = 2 \left(0,47 \cdot 12,2 - 0,3 \frac{4,87}{12,2} \right) \frac{12,2}{4,87} = 1,75$$

- **Perméance des champs de fuite dans l'encoche**

La perméance d'encoche la même que dans l'enroulement principal

D'où $\lambda_e = 1,06$

La somme des perméances de dispersion :

$$\sum \lambda_x = \lambda_e + \lambda_d + \lambda_{fr} = 1,06 + 0,56 + 1,75 = 3,37$$

$$\rightarrow x_d = 4\pi \cdot 50 \cdot 1,26 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{6,6 \cdot 1417^2}{2,2} \cdot 3,37 = 88,39[\Omega]$$

1.4.Réactance du circuit magnétisant

$$x_m = 2\sqrt{2}\pi \cdot f \cdot \frac{\mu_0 \cdot D_i \cdot l}{k_\delta \cdot k_\mu \cdot \delta} \cdot \frac{\omega_d^2 \cdot k_{bd}^2}{p^2}$$

Avec $D_i = 62\text{mm}$: diamètre intérieur du stator ;

$$\rightarrow x_m = 2\sqrt{2} \cdot 50 \cdot \frac{1,26 \cdot 10^{-8} \cdot 6,26,6}{1,2 \cdot 1,1 \cdot 0,035} \cdot \frac{1417^2 \cdot 0,966^2}{2^2} = 739,29[\Omega]$$

1.5.Réactance du circuit à vide

$$x_0 = x_m + x_d$$

$$\rightarrow x_0 = 739,29 + 88,39 = 827,68[\Omega]$$

1.6.Résistance de l'enroulement auxiliaire

$$R_p = \rho_{cu} \frac{L}{S_{cu}}$$

Avec $\rho_{cu} = 0,0169\Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$: résistivité du cuivre à 20°C;

$$S_{enc} = 45,84\text{mm}^2 : \text{section d'encoche} ;$$

L : longueur totale du fil conducteur.

1.1.Calcul de diamètre du conducteur à employer

$$d_{cu} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{enc} \cdot k_{r1}}{\pi \cdot \omega_{d1}}}$$

Avec $\omega_{d1} = 177\text{spires}$: nombre de spires par encoche ;

$k_{r1} = 0,6$: coefficient de remplissage ou coefficient qui compte de l'isolation de l'encoche et du vide entre les conducteur.

k_{r1} est l'ordre de 0,5 pour les fils nus et de 0,6 à 0,7 pour les fils émaillés.

$$\rightarrow d_{cu} = \sqrt{\frac{4 \cdot 45,84 \cdot 0,6}{\pi \cdot 177}} = 0,44\text{mm}$$

1.2.Section du conducteur

$$S_{cu} = \frac{\pi \cdot d_{cu}^2}{4}$$

$$\rightarrow S_{cu} = \frac{\pi \cdot 0,44^2}{4} = 0,15\text{mm}^2$$

1.3. Longueur totale du conducteur à employer

$$L = 4 \cdot \varnothing_{d1} 2 \left(l + \tau_{\cdot} + \frac{3}{4} \tau \right) + 3 \cdot \frac{7}{6} \tau \quad (3-29)$$

$$\text{D'où} \quad L = 4.177.2 \left(66 + 48,69 + \frac{3}{4} 48,69 \right) + 3 \cdot \frac{7}{6} \cdot 48,69 = 214280,24 \text{ mm}$$

La valeur de la résistance dans les bobines principales :

$$\rightarrow R_p = 0,0169 \frac{214,28}{0,15} = 24,14 [\Omega]$$

1.7. Courant magnétisant à vide

$$I_0 = \frac{U_1}{x_m \sqrt{\sigma^2 + \left(\frac{R_p}{x_m} \right)^2}}$$

$$\text{Avec } \sigma_p = 1 + \frac{x_p}{x_m} = 1 + \frac{88,39}{739,29} = 1,12 : \text{ coefficient de correction ;}$$

$$\text{D'où} \quad I_0 = \frac{220}{739,29 \sqrt{1,12^2 + \left(\frac{24,14}{739,29} \right)^2}} = 0,26 [A]$$

1.8. L'impédance du circuit à vide

$$Z_0 = \frac{U_1}{I_0}$$

$$\text{D'où} \quad Z_0 = \frac{220}{0,26} = 830,19 [\Omega]$$

1.9. Résistance du circuit à vide

$$r_0 = \sqrt{Z_0^2 - x_0^2}$$

$$\text{D'où} \quad r_0 = \sqrt{830,19^2 - 827,68^2} = 64,51 [\Omega]$$

1.10. Résistance du circuit magnétisant

$$r_m = r_0 - R_d$$

$$\text{D'où} \quad r_m = 64,51 - 24,14 = 40,37 [\Omega]$$

III.4.2. Détermination des paramètres du circuit équivalent corrigé en L d'un moteur asynchrone monophasé à rotor en court-circuit

1.1. Réactance ramenée de l'enroulement rotorique

$$x_2 = 2\pi \cdot \mu_0 \cdot f \cdot I_r \cdot \sum \lambda_2 \quad (3-30)$$

Avec $\sum \lambda_2 = \lambda_e + \lambda_{e.an} + \lambda_{d2}$: somme des perméances de dispersion dans l'enroulement rotorique ;

λ_e : perméance de dispersion de l'encoche du rotor ;

$\lambda_{e.an}$: perméance de la partie frontale de l'enroulement des anneaux de court-circuitage ;

λ_{d2} : perméance de la dispersion différentielle du rotor à cage d'écureuil.

- **Perméance de dispersion de l'encoche du rotor**

D'après la forme d'encoche :

$$\lambda_e = 0,623k_c + \frac{h_1}{b_1} \quad (3-31)$$

Avec $h_1 = 0,5\text{mm}$;

$b_1 = 0,5\text{mm}$;

$k_c = 1$: coefficient qui tenir compte du blindage des champs de fuites.

$$\text{D'où } \lambda_e = 0,623 \cdot 1 + \frac{0,5}{0,5} = 1,62$$

- **Perméance de dispersion de la partie frontale de l'enroulement des anneaux de court-circuitage**

$$\lambda_e = \frac{N_2}{2pm_1} \cdot \frac{\tau}{l} gf \quad (3-32)$$

Avec gf : coefficient de dispersion frontale, déterminé d'après les courbes sur la figure 3.5

pour différents rapports de $\frac{\tau}{l_m}$ en fonction de $\frac{l_m}{\varepsilon}$, où $\varepsilon = 0,223(h_{an} + b_{an})$

$h_{an} = 12\text{mm}$: hauteur de l'anneau de court-circuitage ;

$b_{an} = 5\text{mm}$: épaisseur de l'anneau de court-circuitage ;

$l_m = 35,72\text{mm}$: distance entre les parties frontales stator et rotor.

$$\frac{l_m}{\varepsilon} = \frac{35,72}{3,35} = 10,66 ;$$

$$\frac{\tau}{l_m} = \frac{48,69}{35,72} = 1,36.$$

La courbe de $gf = f\left(\frac{l_m}{\varepsilon}\right)$:

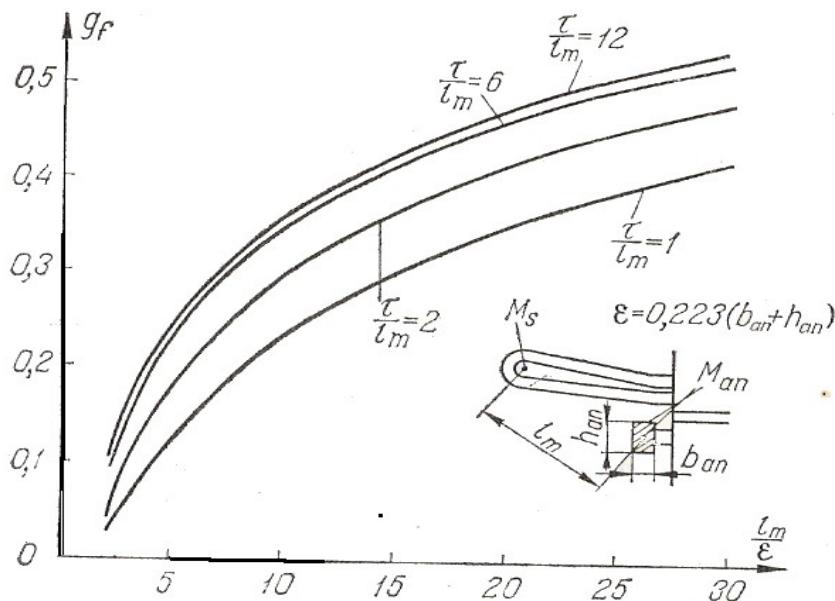


Figure 3.5. courbes de $gf = f\left(\frac{l_m}{\varepsilon}\right)$

D'après la courbe, $gf = 0,24$

$$\text{D'où } \frac{18.4,87.0,24}{2.2.1.6,6} = 0,81$$

- **Perméance de dispersion différentielle**

$$\lambda_{d2} = \frac{Z \cdot k_{b1} \cdot \tau \cdot k_d}{2p\pi^2 \cdot k_\delta \cdot k_\mu \cdot \delta} \quad (3-33)$$

Avec $Z = 18$: nombre d'encoches du rotor ;

k_{d2} : coefficient de dispersion de l'enroulement rotorique, déterminé d'après la courbe de la figure 3.6 .

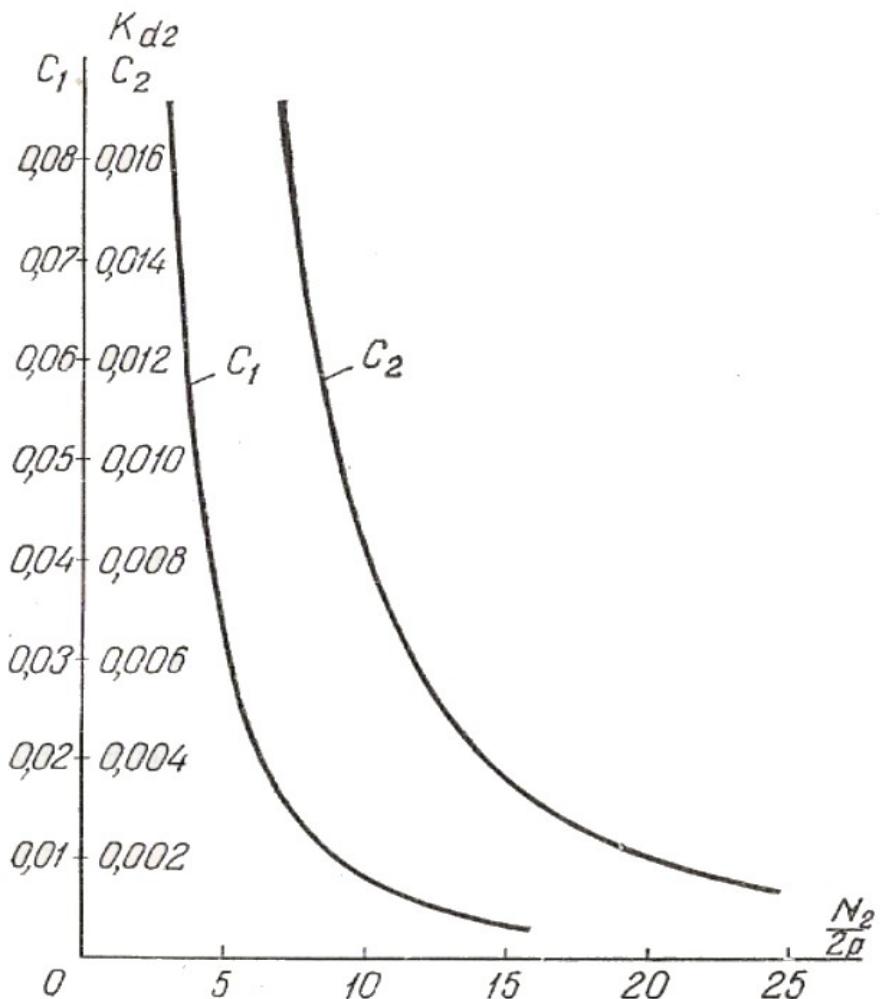


Figure 3.6. courbes de $k_{d2} = f\left(\frac{N_2}{2p}\right)$

$$\frac{N_2}{2p} = \frac{18}{4} = 4,5, \text{ on trouve la valeur de } k_{d2} = 0,043$$

$$\text{D'où } \lambda_{d2} = \frac{18 \cdot 0,833^2 \cdot 4,87 \cdot 0,07}{2,2\pi^2 \cdot 1,2 \cdot 1,1 \cdot 0,035} = 1,43$$

La somme des perméances de dispersion de l'enroulement rotorique.

$$\lambda_2 = 1,62 + 0,81 + 1,43 = 3,86$$

La réactance de l'enroulement court-circuité du rotor :

$$x_2 = 2\pi \cdot 1,26 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \cdot 6,6 \cdot 3,86 = 1 \cdot 10^{-3} [\Omega]$$

1.2. Coefficient de réduction de l'enroulement secondaire du rotor à l'encoche primaire du stator

$$k = \frac{4m_1(\omega_p \cdot k_{bp})^2}{N_2} \quad (3-34)$$

$$\text{D'où } k = \frac{4 \cdot 1 \cdot (1643.0,833)^2}{18} = 416248,44$$

1.3. Réactance de l'enroulement du rotor réduite à l'enroulement du stator

$$x' = x_2 \cdot k \quad (3-35)$$

$$\text{D'où } x' = 1,24 \cdot 10^{-4} \cdot 416248,44 = 51,61 [\Omega]$$

1.4. Résistance d'une barre de la cage du rotor

$$r_b = \rho_{20} \frac{l_b}{qb} \quad (3-36)$$

Avec $b = 5,64 \text{ mm}$: diamètre de la barre ;

$\rho_{20} = 0,0169 \Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$: résistivité du cuivre à 20°C .

$$\text{D'où } r_b = 0,0169 \frac{66}{\pi \frac{5,64^2}{4}} = 4,46 \cdot 10^{-5} [\Omega]$$

1.5. Résistance ohmique des deux portions des anneaux de court-circuitage de la cage d'écureuil

$$r_{ean} = \rho_{20} \frac{l_{ean}}{q_{an}} \quad (3-37)$$

$l_{ean} = 2\pi \frac{D_{an}}{N_2}$: longueur des deux portions adjacentes de l'anneau ;

$D_{an} = 44,5 \text{ mm}$: diamètre moyen de l'anneau ;

$q_{an} = h_{an} \cdot b_{an} = 10,5 = 50 \text{ mm}^2$: section des anneaux de court-circuitage ;

$$\text{D'où } r_{ean} = 0,0169 \frac{153}{100} = 2,59 \cdot 10^{-6} [\Omega]$$

1.6. Résistance des deux portions des anneaux de court-circuitage rapportée à la résistance d'une barre de la cage

$$r'_{ean} = \frac{r_{ean}}{4 \sin^2 \frac{\pi \cdot p}{N_2}} \quad (3-38)$$

$$\text{D'où } r'_{ean} = \frac{2,59 \cdot 10^{-6}}{4 \sin^2 \frac{\pi \cdot 2}{18}} = 5,54 \cdot 10^{-6} [\Omega]$$

1.7. Résistance d'une barre avec deux portions adjacentes des anneaux de court-circuitage

$$r_2 = r_b + r'_{ean} \quad (3-39)$$

$$\text{D'où } r_2 = 4,46 \cdot 10^{-5} + 5,54 \cdot 10^{-6} = 5,014 \cdot 10^{-5} [\Omega]$$

1.8. Résistance de l'enroulement secondaire rapportée à l'enroulement primaire

$$r'_2 = r_2 \cdot k \quad (3-40)$$

$$\text{D'où } r'_2 = 5,014 \cdot 10^{-5} \cdot 416248,44 = 20,87 [\Omega]$$

1.9. Les paramètres du circuit principal d'un moteur monophasé

- $r_p = 15,55 [\Omega]$;
- $R_p = \sigma_1 \cdot r_p = 1,12 \cdot 15,55 = 17,42 [\Omega]$;
- $r'_2 = 20,87 [\Omega]$;
- $R_2 = \sigma_1^2 \cdot r'_2 = 26,18 [\Omega]$;
- $x_p = 85,33 [\Omega]$;
- $X_1 = \sigma_1 \cdot x_p = 95,57 [\Omega]$;
- $x'_2 = 51,61 [\Omega]$;
- $X_2 = \sigma_1^2 \cdot x_2 = 64,74 [\Omega]$;
- $R_{cc} = R_p + R_2 = 43,6 [\Omega]$;
- $X_{cc} = X_1 + X_2 = 160,31 [\Omega]$;
- $Z_{cc} = \sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2} = 166,13 [\Omega]$.

III.7.Calcul des couples et Puissances maximale

- **Glissement $g = g_m$ qui correspond au maximum de $P_{ém}$**

$$g_m = \frac{R_2}{\sqrt{R_p^2 + X_{cc}^2}} \quad (3-41)$$

$$\rightarrow g_m = \frac{26,18}{\sqrt{17,42^2 + 160,31_{cc}^2}} = 0,16$$

- **Puissance électromagnétique maximale**

$$P_{ém} = \frac{m_1 U_1^2}{2(R_1 + \sqrt{R_p^2 + X_{cc}^2})} \quad (3-42)$$

$$P_{ém} = \frac{220^2}{2(17,42 + \sqrt{17,42^2 + 160,31^2})} = 135,44[W]$$

- **Couple électromagnétique maximal**

$$C_{\max} = \frac{pm_1 U_1^2}{2.2\pi \cdot f_1 \left(R_p + \sqrt{R_p^2 + X_{cc}^2} \right)} \quad (3-43)$$

$$\rightarrow C_{\max} = \frac{2.220^2}{2.2\pi \cdot 50 \left(17,42 + \sqrt{17,42^2 + 160,31^2} \right)} = 0,863[Nm]$$

- **Couple de démarrage**

Pour $g = 1$

$$C_d = \frac{pm_1 U_1^2 R_2}{2\pi \cdot f_1 \left(R_{cc}^2 + X_{cc}^2 \right)} \quad (3-44)$$

$$\rightarrow C_d = \frac{2.220^2 \cdot 26,18}{2\pi \cdot 50 \left(43,6^2 + 160,31^2 \right)} = 0,292[Nm]$$

- **Glissement maximal $g = g_p$ qui correspond à la valeur maximal de la puissance mécanique $P_{méc}$**

$$g_p = \frac{R_2}{R_2 + Z_{cc}} \quad (3-45)$$

$$\rightarrow g_p = \frac{26,18}{26,18 + 166,13} = 0,14$$

- **Puissance mécanique maximale**

$$P_{mec.\max} = \frac{m_1 U_1^2}{2(R_{cc} + Z_{cc})} \quad (3-46)$$

$$\rightarrow P_{mec.\max} = \frac{220^2}{2(43,6 + 160,31)} = 118,68[W]$$

III.8. Détermination de la valeur de capacité nécessaire pour créer le champ tournant.

Pour assurer les meilleures conditions de démarrage : $C_{ém} > C_{résist\,tan\,t}$, on doit y créer un champ tournant. Pour cela, il faut introduire dans l'enroulement auxiliaire pour laquelle les FMM F_{aux} et F_p , créent par les enroulements auxiliaire et principal forment un système diphasé symétrique, c'est-à-dire qu'elles seraient égales en valeur et décalées l'une par rapport à l'autre de $\frac{\pi}{2}$ dans l'espace et dans le temps.

Le décalage des FMM dans l'espace est assuré par la disposition correspondant des enroulements sur le stator tandis que le décalage des FMM dans le temps est assuré par la capacité C .

Condition de création d'un champ tournant :

- $\bar{U}_p = j\bar{U}_{aux}$;
- $\bar{I}_p = j\bar{I}_{aux}$;
- $\bar{F}_p = j\bar{F}_{aux}$;
- $\bar{U}_p = j\frac{\varnothing_p \cdot k_{bp}}{\varnothing_{aux} \cdot k_{aux}} \bar{U}_{aux}$ pour $\varnothing_p k_{bp} \neq \varnothing_{aux} k_{aux}$.

La tension aux bornes du condensateur :

$$U_c = \sqrt{U_p^2 + U_{aux}^2} \quad (3-47)$$

$$\rightarrow U_c = \sqrt{219,98^2 + 220^2} = 311,1[V]$$

La valeur de la capacité est déterminée en fonction de courant I'_{cc} dans l'enroulement de démarrage pour $g = 1$.

D'après l'essai en court circuit, on trouve :

$$\rightarrow I_{cc} = 3,23[A]$$

La valeur de la capacité nécessaire :

$$C = \frac{I_{cc} \cdot \sin \varphi_{aux}}{\omega \cdot U_{aux}} \quad (3.48)$$

Avec $\omega = 2\pi \cdot f$: pulsation ;

$$\sin \varphi_{aux} = \frac{U_1}{U_C} = 0,707.$$

$$\rightarrow C = \frac{3,23 \cdot 0,707}{2\pi \cdot 50 \cdot 220} = 33,04 \approx 33[\mu F]$$

le branchement d'un moteur avec le condensateur est :

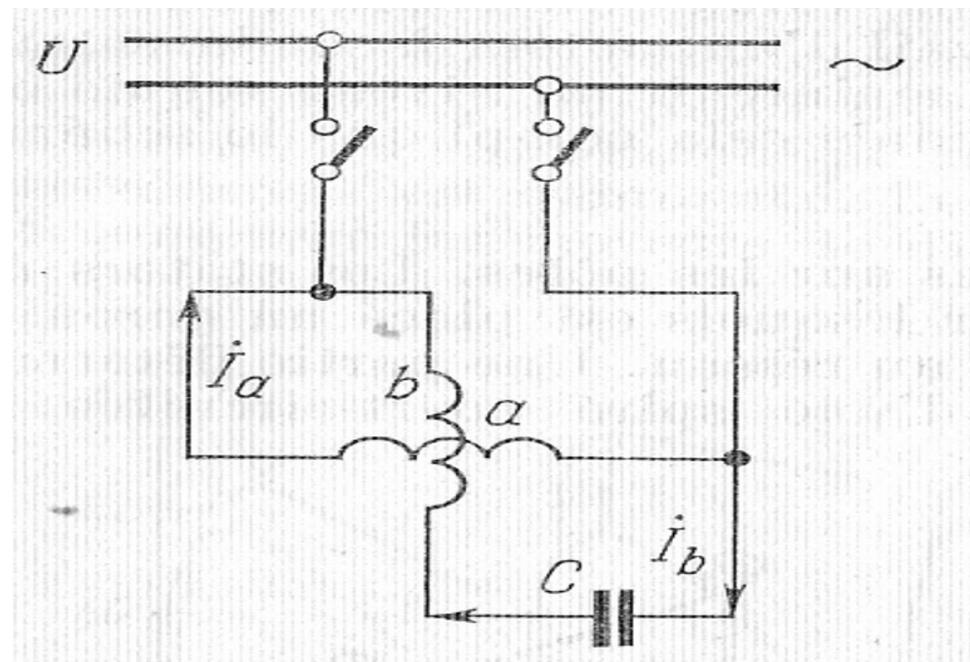


Figure 3.7. branchement de condensateur avec l'enroulement auxiliaire

III.9. Calcul des pertes

1.1. Calcul des pertes

- Pertes dans le fer

D'après le schéma équivalent en L, on peut déterminer les pertes à vide :

$$P_f = \sqrt{2} \cdot I_0^2 \cdot r_m \quad (3-49)$$

$$\rightarrow P_f = \sqrt{2} \cdot 0,26^2 \cdot 82,33 = 7,87 [W]$$

- Pertes totales à vide

$$P_0 = \sqrt{2} \cdot I_0^2 \cdot (r_m + R_p) \quad (3-50)$$

$$\rightarrow P_0 = \sqrt{2} \cdot 0,26^2 \cdot (82,33 + 15,55) = 9,35 [W]$$

- Pertes joule.

$$W_j = \sqrt{2} \cdot R_p \cdot I_0^2 \quad (3-51)$$

$$\rightarrow W_j = \sqrt{2} \cdot 15,55 \cdot 0,26^2 = 1,49 [W]$$

- Perte supplémentaire.

$$W = \frac{W_j}{l + l_{fr}} [l \cdot \varepsilon_{moy} + l_{fr}] \quad (3-52)$$

Avec ε_{moy} : coefficient de majoration ;

l : longueur du conducteur noyé dans le fer ;

l_{fr} : longueur d'une tête de bobine.

- Détermination de ε_{moy} :

On le calcule par la méthode de Field, en commençant par le calcul d'un coefficient :

$$h_c = \frac{h}{7,6} \sqrt{\frac{f \cdot r_c}{r}} \quad (3-53)$$

Avec h : est la hauteur du conducteur d'une couche ;

f : fréquence du réseau ;

r_c : largeur totale de conducteurs d'une couche dans l'encoche.

$$\rightarrow h_c = \frac{0,9}{7,6} \sqrt{\frac{50,6}{6,05}} = 0,83$$

Le coefficient de majoration ε_{moy} d'une couche :

$$\varepsilon_{moy} = \varphi_1 + \frac{\varphi_2 (S^2 - 1)}{1,5} \quad (3-54)$$

Où $S = 1$: nombre de couches ;

φ_1 et φ_2 sont donnés par le tableau suivant en fonction de h_c :

h_c	φ_1	φ_2
1	1,02	0,17
1,1	1,075	0,24
1,2	1,15	0,325
1,3	1,325	0,43
1,4	1,31	0,55
1,5	1,4	0,7
1,6	1,48	0,87
1,7	1,57	1,05
1,8	1,66	1,24
1,9	1,76	1,42
2	1,86	1,6

Tableau 8 : Tableau de Field

Pour $h_c < 1$, on prend $\varphi_1 = 1$ et $\varphi_2 = \frac{h_c^4}{6} = 0,079$

$$\rightarrow \varepsilon_{moy} = 1 + \frac{0,079 (S^2 - 1)}{1,5} = 1$$

$$\text{D'où } W = \frac{1,49}{6,6 + 12,2} [6,6 \cdot 1 + 12,2] = 1,49 [W]$$

1.2.Calcul des échauffements

3.1.Echauffement du bobinage du stator

Cet échauffement peut être calculé par la formule suivante :

$$\Delta \theta_{cu} = \Delta \theta_{cf} + \Delta \theta_{fv} + \Delta \theta_{va} \quad (3-55)$$

Avec $\Delta \theta_{cf}$: échauffement du cuivre par rapport au fer ;

$\Delta \theta_{fv}$: échauffement des tôles par rapport à l'air de ventilation ;

$\Delta \theta_{fa}$: échauffement de l'air de ventilation.

- **Echauffement du cuivre par rapport au fer.**

$$\Delta \theta_{cf} = \frac{W_e}{S} \left(\frac{e_1}{\lambda} + \frac{e_2}{\lambda'} \right) \quad (3-56)$$

Avec $W_e = 1,49[W]$: les pertes joules et pertes supplémentaires dans la partie noyée de l'encoche ;

S : surface de contact cuivre fer ;

$\lambda = 1,6 \cdot 10^{-3} W / \text{deg ré} / \text{cm}^3$: conductivité thermique du presspahn (papier isolant séparent le cuivre et le fer);

$\lambda' = 2 \cdot 10^{-3} W / \text{deg ré} / \text{cm}^3$: conductivité thermique de l'émail ;

$e = 0,25 \text{ cm}$: épaisseur radiale de l'isolant général de l'encoche (presspahn) ;

$e' = 0,0025 \text{ cm}$: épaisseur radiale de l'isolant individuel de l'émail.

$$\text{D'où } \Delta \theta_{cf} = \frac{1,49}{15,76} \left(\frac{0,25}{1,6 \cdot 10^{-3}} + \frac{0,0025}{2 \cdot 10^{-3}} \right) = 14,89 \approx 15^\circ C$$

3.2. Echauffement des tôles par rapport à l'air de la ventilation.

Cet échauffement dépend de la somme des pertes dans les encoches, de la surface de refroidissement et de la vitesse de l'air de ventilation.

$$\Delta \theta_{fv} = \frac{W_{f+e,n}}{S_r \alpha} \quad (3-57)$$

Avec S_r : surface de refroidissement de l'encoche ;

$W_{f+c,n}$: somme des pertes fer et des pertes cuivre noyées ;

α : coefficient d'émission d'air.

- **Surface de refroidissement**

$$S_r = \frac{\pi}{4} (D_e^2 - D^2)(n_v + 2) + 2\pi \frac{D}{2} l \quad (3-58)$$

Avec $D_e = 102\text{mm}$: diamètre extérieur du fer ;

$D = 62\text{mm}$: alésage du stator ;

n_v : nombre de canal de ventilation ;

l : longueur total du fer.

La figure (3.9) montre la surface de refroidissement :

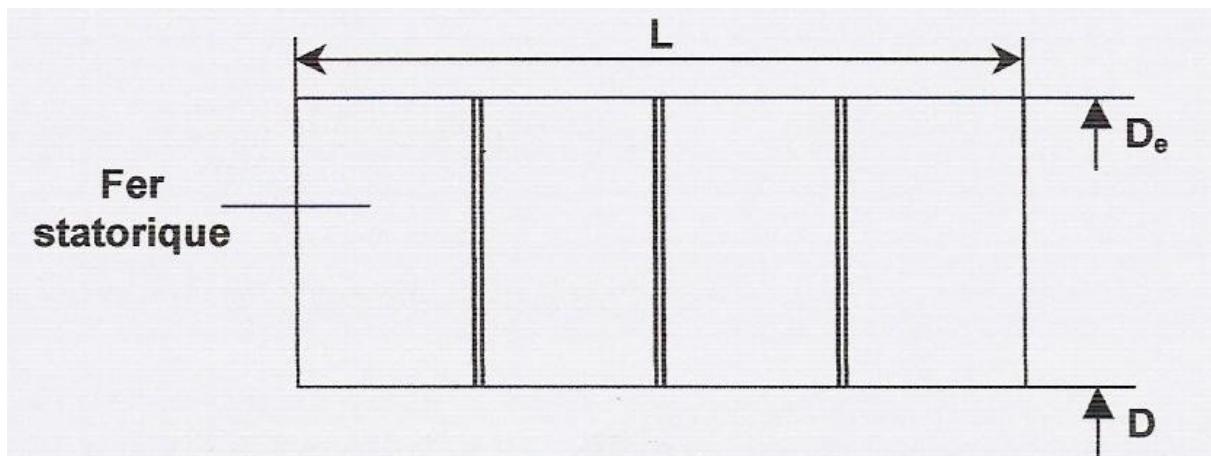


Figure 3.9. Surface de refroidissement

$$\text{D'où } S_r = \frac{\pi}{4} (10,5^2 - 6,5^2) \cdot 2 + 2\pi \frac{6,5}{2} 6,6 = 241,59 \text{cm}^2$$

- **Détermination du coefficient d'émission dans d'air**

D'après R.Roth α varie en fonction de la vitesse de l'air (m/s) suivant le tableau suivant :

$V(m/s)$	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26
$\alpha (10^{-3})$	2	3,2	4,45	5,5	6,6	7,5	8,45	9,3	10	10,65	11,15	11,6	12	12,3

Tableau 9 : Tableau de R-Roth

V doit être prise égale $\frac{1}{4}$ de la vitesse tangentielle V_t de rotation.

$$\text{On a } V_t = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{60}$$

Avec $N = 1500t_r / mn$;

$$D = 62mm.$$

$$\rightarrow V_t = \frac{\pi \cdot 62 \cdot 1500}{6000} = 48,69m/s$$

$$\text{D'où la vitesse de l'air : } V = \frac{1}{4} V_t$$

$$\rightarrow V = \frac{1}{4} 48,69 = 12,7 \approx 12m/s$$

D'après le tableau de Roth $\alpha = 8,45 \cdot 10^{-3}$

La valeur de l'échauffement des tôles par rapport à l'air de ventilation :

$$\Delta \theta_{fv} = \frac{10,85}{241,59 \cdot 8,45 \cdot 10^{-3}} = 5,31^\circ C$$

3.3. Echauffement de l'air de la ventilation.

$$\Delta \theta_{VA} = \frac{W_{tot}}{20 \cdot Q} \quad (3-59)$$

Avec $Q_{air} = S_r \cdot V$: débit d'air.

$$\rightarrow Q_{air} = 241,59 \cdot 12 \cdot 10^{-4} \cdot 60 = 17,39 [m^3/mn]$$

$$\text{D'où } \Delta \theta_{VA} = \frac{10,85}{20 \cdot 17,39} = 0,03^\circ C$$

D'où l'échauffement du bobinage du stator par rapport à l'air ambiant:

$$\Delta \theta_{cu} = \Delta \theta_{cf} + \Delta \theta_{fv} + \Delta \theta_{va}$$

$$\rightarrow \Delta \theta_{cu} = 15 + 5,31 + 0,03 = 20,34^\circ C$$

Chapitre IV. MESURES ET ESSAIS DE LA MACHINE

ASYNCHRONIE MONOPHASEE

IV.1. Mesure de la résistance et de l'inductance de l'enroulement statorique.

Les mesures sont effectuées de la même façon qu'aux paragraphes 2.3 précédent.

- **Mesure de la résistance**

- a. Schéma de montage :

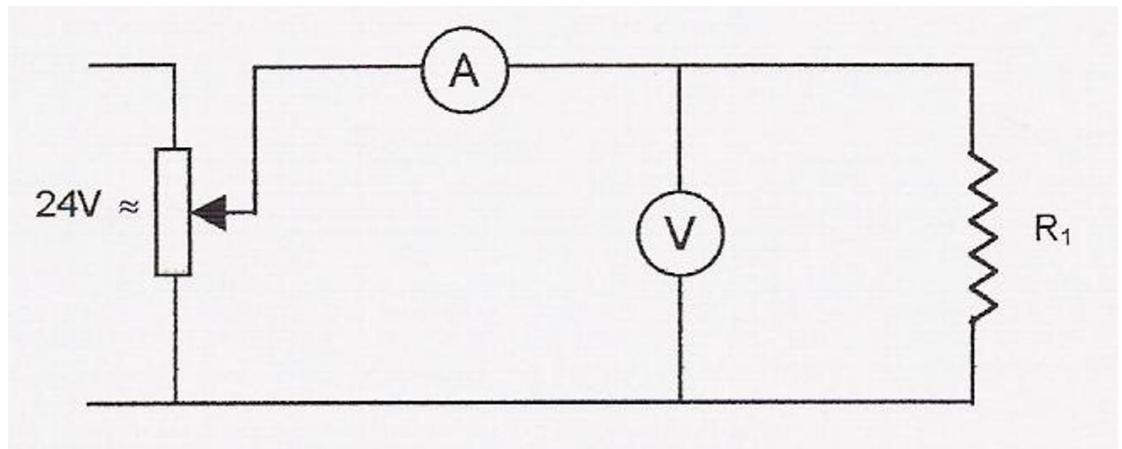


Figure 4.1 Schéma de montage pour la mesure de la résistance statorique

Tableau VI : tableau de valeurs de différente mesure

$U[V]$	$I[A]$	$R = \frac{U}{I} [\Omega]$
15,3	0,85	18
4,8	0,27	17,78
2,4	0,14	17,14

En faisant la moyenne, on trouve :

$$R_{moy} = 17,64[\Omega]$$

- Mesure de l'inductance :

- a. Schéma de montage :

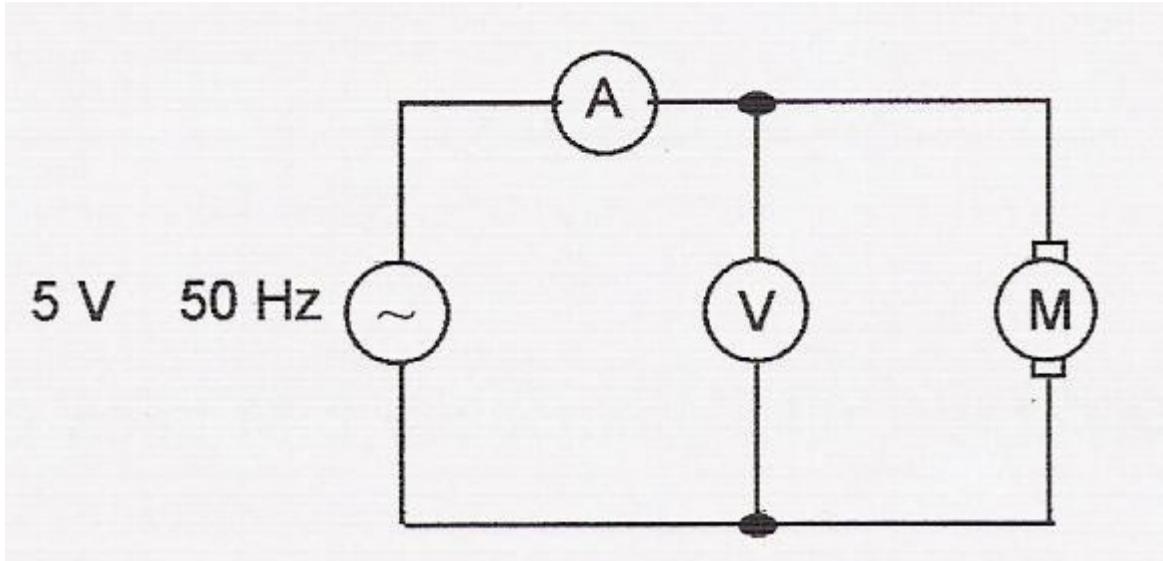


Figure. 4.2 Schéma de montage pour la mesure de l'inductance

Tableau VII : tableau de valeurs de mesure d'impédance:

$U_{eff}[V]$	$I_{eff}[A]$	$Z = \frac{U_{eff}}{I_{eff}} [\Omega]$
50	0,6	83,33

On a $U = Z_L \cdot I$

$$\rightarrow L = \frac{\sqrt{Z^2 - R^2}}{\omega} = \frac{\sqrt{83,3^2 - 17,64^2}}{100\pi} = 0,26 \text{ Henry}$$

IV.2. Essais de la machine

IV.2.1. Essai à vide

Le principe est le même qu'en triphasé.

Tableau VIII : tableau de valeurs de mesure à vide

$P_{10}[W]$	$I_{10}[A]$
54,12	0,78

IV.2.2. Essai à rotor bloqué

Le principe est le même qu'en triphasé.

Tableau IV : tableau de valeur de mesure en court circuit

$P_{ccn}[W]$	$I_{ccn}[A]$
573,63	3,23

Construction du diagramme circulaire

Le principe de construction est le même qu'en triphasé.

- Courant à vide : $I_0 = 0,78[A]$
- Courant de court-circuit : $I_{cc} = 0,78[A]$
- Facteur de puissance à vide : $\cos\varphi_0 = \frac{54,12}{\sqrt{2.220.0,78}} = 0,223 \approx 77,23^\circ$
- Facteur de puissance en court-circuit : $\cos\varphi_{cc} = \frac{96}{\sqrt{2.220.1,23}} = 0,233 \approx 76,5^\circ$
- La droite des couples est repérée par : $2\psi = \arctg \frac{2I_0r_1}{U_1} = \arctg \frac{2.0,78.17,64}{220} = 7,13^\circ$

Traçage du diagramme :

Echelle de courant : $1cm \longrightarrow : \frac{1}{4}[A]$;

Echelle du glissement : $1cm : \frac{GK}{10}$;

Avec GK : droite du glissement

$$\triangleright I_0 = 3,12cm ;$$

$$\triangleright I_{ccn} = 12,9cm .$$

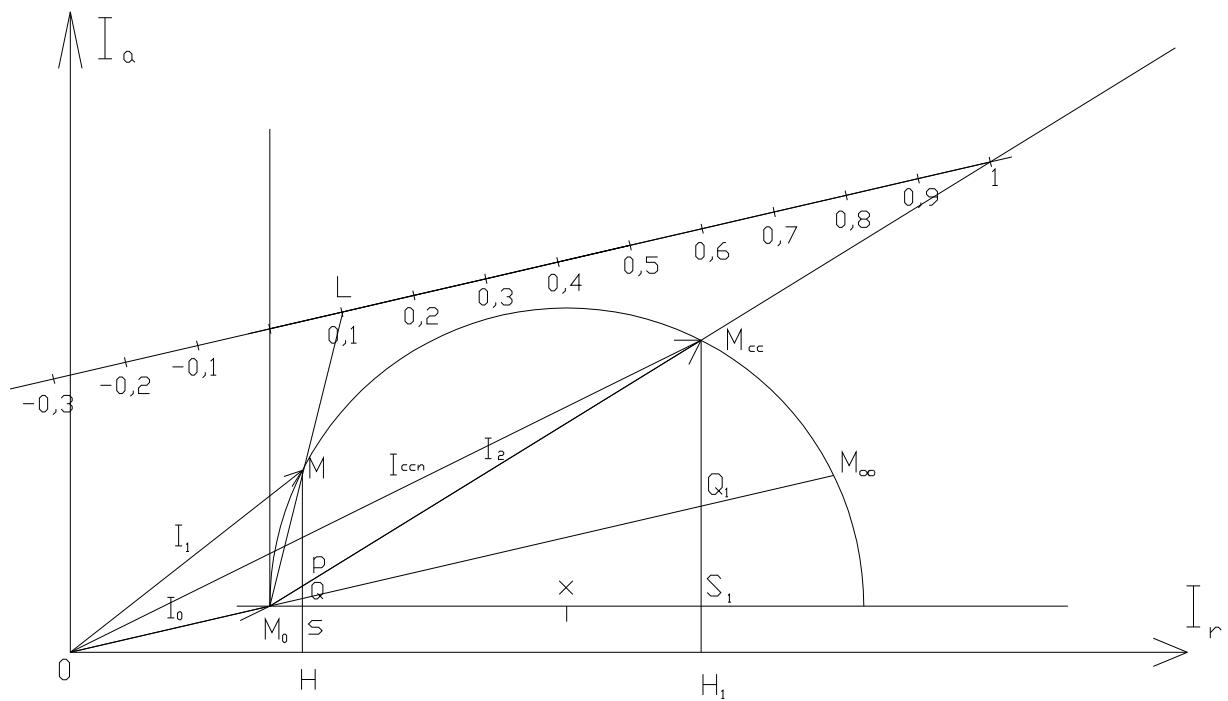


Figure4.3 : Diagramme circulaire monophasé

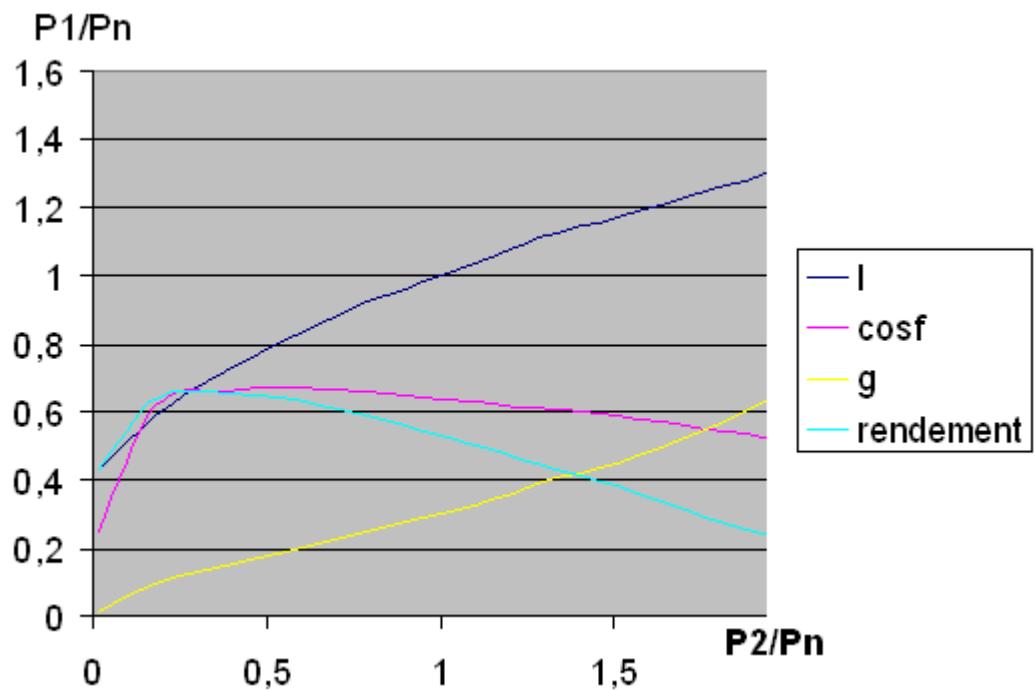
IV.3.Caractéristiques de la machine

Exploitation du diagramme au point M en fonction du glissement

- Courant de l'enroulement rotorique : $I_1 = M_0 M$;
- Courant rotorique : $I_2 = M_0 M \left(\frac{n_1}{n_2} \right)$;
- Facteur de puissance au primaire : $\cos \varphi_1 = \frac{MH}{0M}$;
- Puissance électrique absorbée : $P_1 = \sqrt{2}U.0M$;
- Perte fer stator : $P_{fs} = \sqrt{2}U.SM$;
- Perte joule statorique : $P_{js} = \sqrt{2}U.QS$;
- Puissance électromagnétique traversant l'entrefer : $P_{em} = \sqrt{2}U.MQ$;
- Couple électromagnétique : $C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_1}$;
- Perte joule rotor : $P_{jr} = \sqrt{2}U.PQ$;
- Puissance mécanique : $P_m = \sqrt{2}U.MP$;
- Rendement : $\eta = \frac{MP}{MH}$.

IV.4.Plaque signalétique

Puissance : 1/6 ch	Tension d'alimentation : 220 [V]
Monophasée	f : 50 Hz
I_n: 0,78 [A]	N : 1474 [T_r / mn]

Courbes caractéristiques du moteur asynchrone monophasé

CONCLUSION

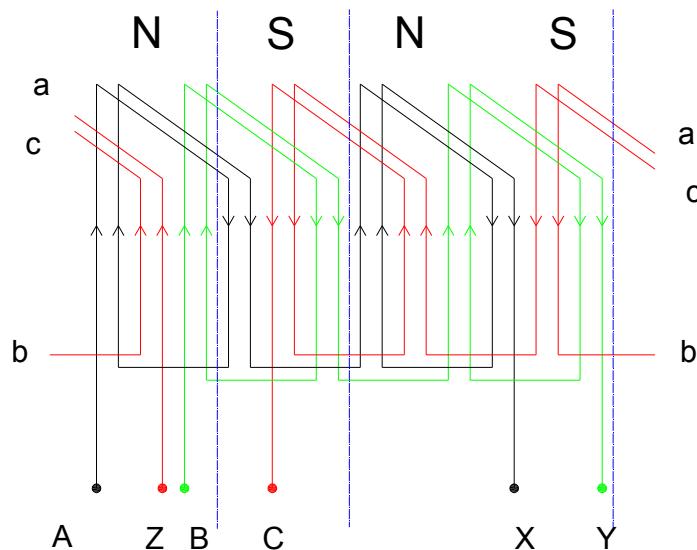
En effet, ce travail consiste à faire la transformation de l'enroulement statorique triphasé en monophasé et maintenir la puissance utile inscrite sur la plaque signalétique et les caractéristiques données par le constructeur. On a réalisé de nouveau circuit inducteur de la machine en monophasé moins encombrant qui sert à augmenter la surface de refroidissement mais cela ne suffisait pas car ce moteur nécessitera un meilleur système de refroidissement pour pouvoir fonctionner normalement.

.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] :A.Fouillé : Machines électriques à courants alternatifs ; Année 1985-Edition Dunob,
- [2] Istvan Berkes : Les bases de l'électrotechnique ; Année 1998-Edition Vuibert supérieur,
- [3] A.Kassatkine et M Pérékaline : Cours d'électrotechnique ; Année 1967-Edition Mir,
- [4] M.Kostenko et L.Piotrovski : Machines électriques ; Année 1969-Edition Mir,
- [5] Simon LOUTZKY : Calcul pratique des alternateurs et des machines asynchrones Année 1969-Edition Eyrolles.

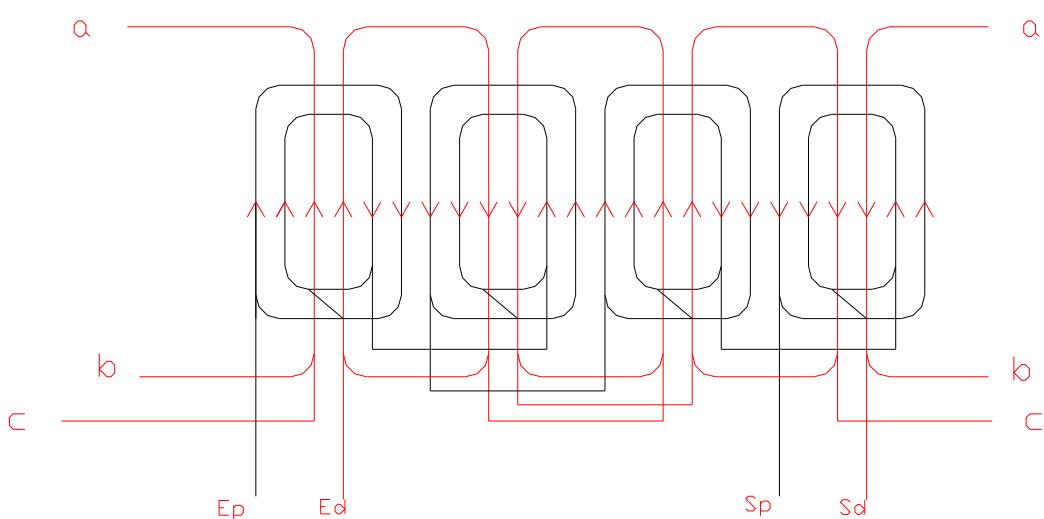
ANNEXE

Schéma du bobinage en triphasé

Les enroulements sont différenciés par des couleurs et les entrés sont repérés par : A ;B :C et les sorties sont : X ;Y ;Z.



Nombre de conducteur par encoche=99 spires par encoche,



Diamètre de conducteur=0.58mm.

Schéma du bobinage en monophasé

- ◆ nombre de conducteur par encoche de l'enroulement principal=103 spires,
- ◆ Diamètre du conducteur employé=58mm,
- ◆ Nombre de conducteur par encoche de l'enroulement auxiliaire=177spires,
- ◆ Diamètre de conducteur employé=44mm.

Poids du cuivre

Enroulement de travail :

On a $d_{cu} = 58mm$

$$S_{cu} = 0,26mm^2$$

Volume du conducteur :

$$\begin{aligned} V_{cu} &= S_{cu} \cdot L \\ &= 0,26 \cdot 239163,42 = 62182,42mm^3 \end{aligned}$$

D'où la masse du cuivre :

$$\begin{aligned} m_{cu} &= \rho_{cu} V_{cu} \\ m_{cu} &= 8,90 \cdot 10^3 \cdot 62,18 \cdot 10^3 \cdot 10^{-9} = 0,56[Kg] \end{aligned}$$

Enroulement auxiliaire :

$$d_{cu} = 44mm$$

$$S_{cu} = 0,15mm^2$$

Volume du conducteur :

$$V_{cu} = 32142,04mm^3$$

La masse du cuivre :

$$m_{cu} = 0,29[Kg]$$

TABLEAU DE VALEURS DES COURBES CARACTERISTIQUES DU MOTEUR
ASYNCHRONE MONOPHASE

P_1/P_n	P_1/P_n	I	cosf	g	Rendement (h)
0,53	0,013	0,43	0,25	0,017	0,43
1,84	0,18	0,59	0,62	0,1	0,64
2,49	0,38	0,72	0,66	0,15	0,653
2,92	0,58	0,82	0,67	0,2	0,635
3,18	0,79	0,92	0,66	0,25	0,587
3,33	1	1	0,64	0,3	0,532
3,39	1,18	1,07	0,62	0,35	0,477
3,39	1,31	1,12	0,61	0,4	0,437
3,35	1,51	1,17	0,59	0,45	0,38
3,2	1,76	1,25	0,55	0,55	0,29
3,01	1,96	1,31	0,52	0,65	0,23
2,82	2	1,35	0,49	0,75	0,15

TABLEAU DE VALEURS DES COURBES CARACTERISTIQUES MOTEUR
ASYNCHRONE TRIPHASE

P_2/P_n	P_1/P_n	cosφ	g	rendement(h)	I
0,015	0,3	0,27	0,017	0,49	0,37
0,09	0,58	0,56	0,1	0,72	0,47
0,18	0,8	0,65	0,15	0,763	0,57
0,3	1	0,7	0,2	0,76	0,65
0,452	1,07	0,73	0,25	0,72	0,74
0,6	1,33	0,72	0,3	0,655	0,83
0,76	1,46	0,71	0,35	0,597	0,92
0,94	1,57	0,697	0,4	0,531	1
1,11	1,66	0,677	0,45	0,48	1,07
1,417	1,78	0,64	0,55	0,39	1,2
1,455	1,85	0,63	0,65	0,3	1,3
1,47	1,89	0,61	0,75	0,2	1,39

TITRE: TRANSFORMATION D'UN MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASE EN MONOPHASE

Auteur : HERIKANY *Abaina Augustin*

Encadreur : ANDRIANAHAHARISON *Yvon*

Résumé :

Pour les petits moteurs, il est préférable d'utiliser la tension 220 [V] au lieu d'une source triphasée qui nécessite un compteur et disjoncteur triphasé.

Mot clés : Moteur asynchrone monophasé, Moteur asynchrone triphasé, condensateur de démarrage, stator, rotor, bobinage, pas polaire, force magnétomotrice, pas dentaire, entrefer, perméance de dispersion, enroulement statorique, encoche.

Nombre de pages : 60

Nombre de figure : 31

Nombre de tableaux : 11

Adresse de l'auteur : Lot 110 SALAZAMAY SUD P/celle : 14/22 TOAMASINA (501)
Tél. : 033 12 095 15 / 033 12 608 88