



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

**ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE
D'ANTANANARIVO**

**DEPARTEMENT : GENIE ELECTRIQUE – GENIE
MECANIQUE PRODUCTIQUE**



*Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de licence-ès sciences techniques
en génie industriel*

REBOBINAGE D'UN MOTEUR ASYNCHRONNE MONOPHASE

Présentée par: Mlle RAKOTOMIHARIVO Rova Famenontsoa

Encadré par : Monsieur ANDRIANAHARISON Yvon

Antananarivo-ESPA

Date de soutenance : 14 Avril 2011

-2011-



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE

D'ANTANANARIVO



**DEPARTEMENT : GENIE ELECTRIQUE – GENIE MECANIQUE
PRODUCTIQUE**



*Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de licence-ès sciences techniques
en génie industriel*

REBOBINAGE D'UN MOTEUR ASYNCHRONNE MONOPHASE

Présentée par : RAKOTOMIHAJARIVO Rova Famenontsoa

Membres du jury :

Président : Monsieur RAKOTONIAINA Solofohery
Maitre de conférences

Directeur de mémoire : Monsieur ANDRIANAHARISON Yvon
Professeur -titulaire

Examineurs : Monsieur RANDRIAMORA Edmond
Enseignant-Chercheur
Monsieur RAMAROZATOVO Vonjy
Enseignant-Chercheur
Monsieur RATOVOHARISOA
Professeur -titulaire

Antananarivo-ESPA

-2011-

REMERCIEMENT

Cet ouvrage a pu être réalisé grâce à la bénédiction et à la bienveillance de notre seigneur Dieu, à qui mes louanges ne cesseront.

En préambule à ce mémoire, je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire :

- Monsieur **ANDRIANARY Philippe**, Directeur de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo qui a bien voulu me permettre de procéder la soutenance du mémoire de fin d'étude en vue d'obtention du diplôme de Licence-ès sciences techniques en Génie Industriel.
- Monsieur **ANDRIANAHARISON Yvon** qui, en tant qu'encadreur de mémoire, s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation à cette fin, et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.
- Monsieur **RAKOTONIAINA Solofohery**, chef de département en Génie Electrique, qui a bien voulu présider la présente mémoire.
- J'exprime toute ma gratitude à Monsieur **RANDRIAMBOLOLONA Albert Bruno**, pour l'assistance nécessaire à l'élaboration de la réalisation de ce travail et à tous mes Enseignants, qui nous ont formé tous au long de ces trois années d'étude
Je remercie très sincèrement les membres du jury d'avoir bien voulu accepter de faire partie de la commission d'**examineur**.
- Je n'oublie pas mes **parents** pour leur contribution leur soutien et leur patience.
- Enfin, j'adresse mes plus sincère remerciement à tous **mes proches et amis**, qui m'ont toujours soutenue et encouragé au cours de la réalisation de ce mémoire.

Merci à toutes et à tous !

Table des matières

REMERCIEMENT	i
LISTE DES FIGURES :	v
LISTE DES TABLEAUX	vi
NOTATIONS	vii
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I: NOTIONS GENERALES SUR LES MACHINES ASYNCHRONE	3
I. CONSTITUTION ET PRINCIPE DE BASE	3
I.1. Vue éclatée	3
I.2. éléments constitutifs	4
I.2.1. stator	4
I.2.2. rotor	4
I.2.2.1. Rotor bobiné ou rotor à bague:	4
I.2.2.2. Rotor à cage d'écureuil ou en court-circuit	5
II. RAPPORT ENTRE MACHINE ASYNCHRONE MONOPHASE ET TRIPHASE	5
III. DEMARRAGE DES MACHINES ASYNCHRONES	8
III.1. Démarrage sous tension réduite	9
III.1.1. Démarrage étoile-triangle	9
III.1.2. Démarrage par autotransformateur	9
III.1.3. Démarrage résistif	10
III.2. Démarrage rotorique	10
IV. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	10
V. CIRCUIT MAGNETIQUE : GRANDEURS PHYSIQUES D'INFLUENCE	11
V.1. Champ magnétique tournant :	11
V.2. Force magnétomotrice	12
V.3. Glissement :	13
VI. CARACTERISTIQUES DES MACHINES ASYNCHRONES	13
VI.1. Couple en fonction du fréquence de rotation	13
VI.2. Variation des grandeurs caractéristiques du Moteur :	14
VI.3. Particularités des moteurs monophasés	16
VI.3.1. Les enroulements :	16
VI.3.2. Branchement d'un condensateur :	17
VI.4. Les domaines de fonctionnement	18
VII. FORME ET CALCUL DE BOBINAGE	18
VII.1. Type, Forme, et positionnement de bobinage	18

VII.1.1.	Formes de bobinage	18
VII.1.2.	type de bobinage.....	19
VII.1.3.	Positionnement	19
VII.2.	Principe de bobinage.....	19
VII.2.1.	Conducteurs	21
VII.2.2.	Section.....	21
VII.2.3.	pas d'une section.....	21
VII.3.	Exécution des schémas de bobinage :.....	21
CHAPITRE II : LES PARAMETRES ELECTRIQUES DU MOTEUR AVANT BOBINAGE		25
I.	Plaque signalétique	25
II.	Mesure et essai effectués	26
II.1.	Mesure du caractéristiques à vide et à court-circuit.....	26
II.2.	Mesure de résistance de l'enroulement principale et de l'inductance L.....	26
III.	Schémas de bobinage de l'enroulement :	27
Chapitre III : REDIMENSIONNEMENT DE LA MACHINE ASYNCHRONE		30
I.	Etude préliminaire.....	30
II.	Repérage du bobinage pour 24 encoches*	31
III.	Caractéristiques physiques du moteur :.....	32
IV.	Détermination des différents coefficients.....	33
IV.1.	Entrefer :.....	33
IV.2.	Coefficient d'entrefer :	33
IV.3.	Facteur de distribution :	33
IV.4.	Facteur de forme de la courbe d'induction :.....	34
IV.5.	Coefficient de flux :.....	34
IV.6.	Coefficient de remplissage	35
IV.7.	Coefficient dépendant du degré de saturation de la dent du Stator et du rotor :	35
IV.8.	Coefficient de remplissage de paquet de tôle	35
V.	Force Magnétomotrice Et induction magnétique :	35
V.1.	Induction magnétique dans l'entrefer :	35
V.2.	La force magnétomotrice qui crée le flux Φ_m	35
V.3.	Induction dans la dent :.....	36
V.4.	Induction dans la culasse :.....	36
VI.	Dimensionnement des enroulements et paramètres électriques du moteur	36
VII.	Calcul de la Capacité nécessaire pour créer le champ tournant :	40
VIII.	Raccordement sur plaque à borne	41

CHAPITRE IV : BILAN GENERAL ET ESSAI DU MOTEUR REBOBINE.....	44
I. Bilan de puissance	44
II. Calcul des pertes	44
II.1. Pertes dans le Fer :	44
II.2. Pertes Joule :	45
II.3. Pertes supplémentaires :.....	45
III. Calcul des échauffements :.....	47
III.1. Echauffement des bobinages du Stator :	47
III.2. Échauffement du cuivre par rapport au Fer.....	47
III.3. Échauffement des tôles par rapport à l'air de ventilation :	48
III.4. Échauffement de l'air de ventilation $\Delta\theta_{va}$:.....	49
III.5. Mesure de la nouvelle caractéristique du moteur asynchrone Mesure du caractéristiques à vide et à court-circuit	50
III.6. Mesure de résistance de l'enroulement principale et de l'inductance L.....	51
IV. Diagramme de cercle.....	51
IV.1. Valeurs des paramètres du diagramme de cercle avant bobinage :.....	51
IV.2. Lecture du diagramme de cercle.....	54
IV.3. Courbes caractéristiques :	55
CHAPITRE V : PROGRAMMATION : CALCUL DU DIAMETRE DE FILS EMAILLES DES MOTEURS ASYNCHRONES MONOPHASES.....	57
I. Objectif du logiciel :.....	57
I.1. Flux d'induction mutuelle :.....	57
I.2. Nombre de spires :	57
I.3. Diamètre du conducteur :	57
I.4. Section du conducteur :	58
I.5. Section du conducteur à loger dans l'encoche :	58
II. Présentation du logiciel :.....	58
CONCLUSION	60
BIBLIOGRAPHIE.....	61
ANNEXE 1:	62
ANNEXE 2.....	64
ANNEXE 3.....	65
ANNEXE4	66

LISTE DES FIGURES :

Figure 1 : Schéma d'une machine asynchrone éclaté	3	
Figure 2 : Stator	4	
Figure 3 : Enroulement d'un Rotor à bague.....	5	
Figure 4 : Cage d'un rotor en court-circuit	5	
Figure 5 : Montage en triangle et étoile.....	9	
Figure 6 : Sens des intensités B pour un réseau triphasé.....	11	
Figure 7 : Courbe caractéristique du Couple $C = f(N)$	14	
Figure 8 : Courbe caractéristique du courant en fonction de P_r	14	
Figure 9 : courbe caractéristique du facteur de puissance en fonction de P_r	15	
Figure 10: Courbe caractéristique du glissement en fonction de P_r Rendement	15	
Figure 11 : Courbe caractéristique du rendement en fonction de P_r	16	
Figure 12: Disposition d'enroulement	17	
Figure 13 : Courbe du domaine de fonctionnement de la Machine Asynchrone.....	18	
Figure 14: présentation des fils et leur connexion.....	20	
Figure 15 : Représentation panoramique.....	21	
Figure 16 : Développement Frontale des schémas de bobinage	22	
Figure 17 : Disposition des enroulements.....	31	
Figure 18 : connexion aux plaques à bornes	42	
Figure 19 : bilan de puissance	44	
Figure 21: Diagramme de cercle après rebobinage du moteur monophasé	53	
Figure 20 : Diagramme de cercle avant rebobinage du moteur monophasé.....	53	
Figure 22: Courbe caractéristique du moteur avant rebobinage.....	55	
Figure 23: Courbe caractéristique du moteur après rebobinage.....	55	
Figure 24 : schémas du moteur	Figure 25 : paramètres du moteur	58
Figure 26 : les différents coefficients	Figure 27 : calcul du flux magnétique	59
Figure 28 : dimensionnement de l'enroulement statorique	Figure 29 : Section du conducteur à loger dans l'encoche.....	59

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Comparaison entre bobinage monophasé et triphasé.....	8
Tableau 2 : <i>Terme technique utilisé au bobinage</i>	20
Tableau 3 : <i>Valeurs des paramètres à vide et à court-circuit</i>	26
Tableau 4: <i>Valeurs de résistance et de l'inductance</i>	27
Tableau 5: mesure des paramètres physiques du moteur.....	32
Tableau 6: Valeur du facteur de distribution	33
Tableau 7: Coefficient de flux.....	34
Tableau 8: dimensions des enroulements.....	37
Tableau 9: <i>paramètres électriques du moteur</i>	40
Tableau 10 : <i>paramètres du coefficient hc</i>	46
Tableau 11: φ_1 et φ_2 en fonction du nombre de couche	46
Tableau 12: paramètres de l'échauffement $\Delta\theta_{cf}$ et leur valeur	48
Tableau 13: <i>paramètres de l'échauffement $\Delta\theta_{fv}$ et leur valeur</i>	48
Tableau 14: <i>tableau de r-Roth</i>	49
Tableau 15: <i>Valeurs des paramètres électriques à vide et à court-circuit</i>	50
Tableau 16: <i>Valeurs de résistance et de l'inductance</i>	51
Tableau 17 : <i>Indication des paramètres sur les diagrammes</i>	54

NOTATIONS

δ	: Entrefer	[mm]
K_{δ}	Coefficient d'entrefer	
T_{z1}	pas dentaire	[mm]
K_d	Coefficient de distribution	
K_B	Facteur de forme de la courbe d'induction	
Φ_m	Flux Magnétique	[Wb]
P_{kw}	puissance celle figuré sur la plaque signalétique	[w]
P	nombre de pair de pôle	
σ_p	Coefficient de correction	
λ_d	Permeance de dispersion de flux de fuite différentielle	
λ_{fr}	Permeance de dispersion du partie frontale de l'enroulement statorique	
P_e	Perte Joule et perte supplémentaire dans la partie noyé de l'encoche	[w]
S	Surface de contact cuivre fer	[mm]
λ	Conductivité thermique du presspahn	[W /degré /cm ³]
λ'	Conductivité thermique de l'email	[W /degré /cm ³]
e_1	Epaisseur radiale de l'isolant général de l'encoche	[mm]
e_2	Epaisseur radiale de l'isolant individuel de l'email	[mm]
P_t	Somme des pertes de fer et pertes de cuivre noyés	[w]
S_r	Surface de refroidissement de l'encoche	[mm]
α	Coefficient d'émission d'air	
D_e	Diamètre extérieur du fer	[mm]
D	Alésage du stator	[mm]

n_v :	Nombre de canal de ventilation	
L :	Longueur total du fer	[mm]
h :	hauteur d'une conducteur d'une couche	[mm]
f :	fréquence du réseau	[Hz]
r_c :	largeur totale de conducteur d'une couche dans l'encoche	[mm]
λ_2 :	Somme des permeances de dispersion dans l'enroulement rotorique	
λ_e :	Permeance de dispersion dans l'encoche du rotor	
$\lambda_{é\ an}$:	Permeance de la partie frontale de l'enroulement des anneaux de court-circuitage	
λ_{d2} :	Permeance de la dispersion différentielle du rotor à cage d'écureuil	
Q_{air} :	débit d'air	[m ³ /mn]
$\Delta\theta_{cf}$:	échauffement du cuivre par rapport au Fer	[°C]
$\Delta\theta_{fv}$:	échauffement des tôles par rapport à l'air de ventilation	[°C]
$\Delta\theta_{va}$:	échauffement de l'air de ventilation	[°C]
ω_s :	la <i>vitesse angulaire de synchronisme</i> du champ statorique dans la machine	[rad/s]
ω :	la <i>vitesse angulaire de rotation</i> de la machine	[rad/s]
g :	glissement	[%]
N :	Nombre d'encoche	
U_n :	Tension nominale	[V]
P_{10} :	Puissance à vide du circuit	[W]

I_{10} :	Courant à vide du circuit	[A]
U_{10} :	Tension à vide du circuit	[V]
P_{cc} :	Puissance à court- circuit	[W]
I_{cc} :	Courant à court- circuit	[A]
U_{cc} :	Tension à court- circuit	[V]
P_{ccn} :	Puissance à court- circuit nominal	[W]
I_{ccn} :	Courant à court- circuit nominal	[A]
U_{ccn} :	Tension à court- circuit nominal	[V]
Z_{eff} :	Impédance efficace	[Ω]
I_{eff} :	Courant efficace	[A]
U_{eff} :	Tension efficace	[V]
L :	Inductance	[H]
$\cos\varphi_{cc}$:	Facteur de puissance en court-circuit	
$\cos\varphi_0$:	Facteur de puissance à vide	
D_w :	Diamètre du fil émaillé de la bobine de travail	[mm]
d_w :	Diamètre du fil émaillé du bobine de Démarrage	[mm]
b_e :	Largeur de l'encoche	[mm]
Q :	Nombre totale d'encoche par pôle	
H_{z1} :	Hauteur de dent du stator	[mm]
B_{z1} :	Induction magnétique dans les dents	[T]
μ_1 :	Perméabilité relative de l'Entrefer	[H / cm]
ξ :	Coefficient de variation de l'intensité d'induction	

L_{cl} :	Longueur de la portion	[mm]
H_{cl} :	intensité du champ magnétique dans la culasse du stator	[At]
h_2 :	hauteur de dent du rotor	[mm]
k_μ :	le coefficient de saturation magnétique de fer	
E_0 :	FEM à vide	[V]
N_p :	Nombre de spire par phase	
N_{pe} :	Nombre de spire par phase par encoche	
K_{bp} :	Facteur de distribution de l'enroulement principal	
τ :	Pas polaire	
m :	nombre de phase	
λ_d :	Coefficient de dispersion	
k_μ :	coefficient de saturation magnétique de fer	
I_0 :	Courant magnétisant à vide	
x_p :	Réactance de l'enroulement statorique	[Ω]
r_o :	Résistance du circuit à vide	[Ω]
r_m :	Résistance du circuit magnétisant	[Ω]
Z :	Impédance du circuit à vide	[Ω]
μ_0 :	perméabilité absolu dans le vide	[H / cm]
X_d :	Réactance de l'enroulement auxiliaire	[Ω]
k_{dp} :	Coefficient de dispersion	
x_m :	Réactance du circuit magnétisant	[Ω]
x_o :	Réactance du circuit à vide	[Ω]
d_{cu} :	Diamètre du conducteur à employer	[mm]
S_{cu} :	Section du conducteur	[mm ²]
P_f :	Pertes dans le fer à vide	[W]
P_0 :	Perte total à vide	[W]

P_j :	Perte Joule	[W]
P :	Perte supplémentaire	[W]
K_0 :	Coefficient de flux	
P_{kw} :	Puissance utile de la machine	[W]
A :	nombre d'Ampères conducteur par cm de périphérie	
AF :	Nombre d'Ampère fils	
Δ :	Densité moyenne de courant	[A/mm]
l :	longueur du conducteur noyé dans le fer	[mm]
l_{fr} :	longueur d'une tête de bobine	[mm]
r_c :	largeur totale de conducteur d'une couche dans l'encoche	[mm]
S :	nombre de couche	

INTRODUCTION GENERALE

Le moteur asynchrone de par sa robustesse et sa facilité de fabrication trouve un emploi très répandu dans divers applications comme les appareils électroménagers, perceuses, ventilateur, machines des meules...

Pour avoir une meilleure performance à charge, les enroulements de ces types de moteur électrique doivent être bien bobinés.

Ainsi, Le travail proposé concerne le rebobinage d'un moteur asynchrone mal dimensionné, causant à vide une valeur de température trop élevée. L'étude comporte une partie théorique et une réalisation pratique puis une programmation est associée à la démarche de bobinage, permettant de définir le diamètre appropriée de fil émaillé à chaque type de moteur monophasé.

Pour ce faire, des points ont été développés et analysés en détail, dont :

- Le premier chapitre concerne les notions générales sur les machines asynchrones.
- Le second chapitre traite les paramètres électriques du moteur avant rebobinage.
- Le troisième chapitre est consacré au calcul et au redimensionnement du moteur.
- Le quatrième chapitre présente le bilan général et essais du moteur rebobiné.
- Le dernier chapitre indique un logiciel de calcul du diamètre de fil émaillé des moteurs monophasés.

***CHAPITRE I : NOTIONS GENERALES SUR LES MACHINES
ASYNCHRONES***

CHAPITRE I: NOTIONS GENERALES SUR LES MACHINES ASYNCHRONE

La **machine asynchrone**, ou **machine à induction**, est une machine électrique à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor .Elle transforme l'énergie électrique en énergie mécanique ou l'énergie mécanique en électrique. Les courants qui y circulent dans le stator constituent l'unique source externe de champ magnétique : le rotor n'est pas relié à une source d'énergie électrique et soumis a un couple de forces magnétiques qui lui fait tourner à la vitesse $n < n_s$ (vitesse du synchronisme) donc n n'est pas synchronisée avec n_s d'où l'appellation de machine **ASYNCHRONE**.

I. CONSTITUTION ET PRINCIPE DE BASE

I.1. Vue éclatée

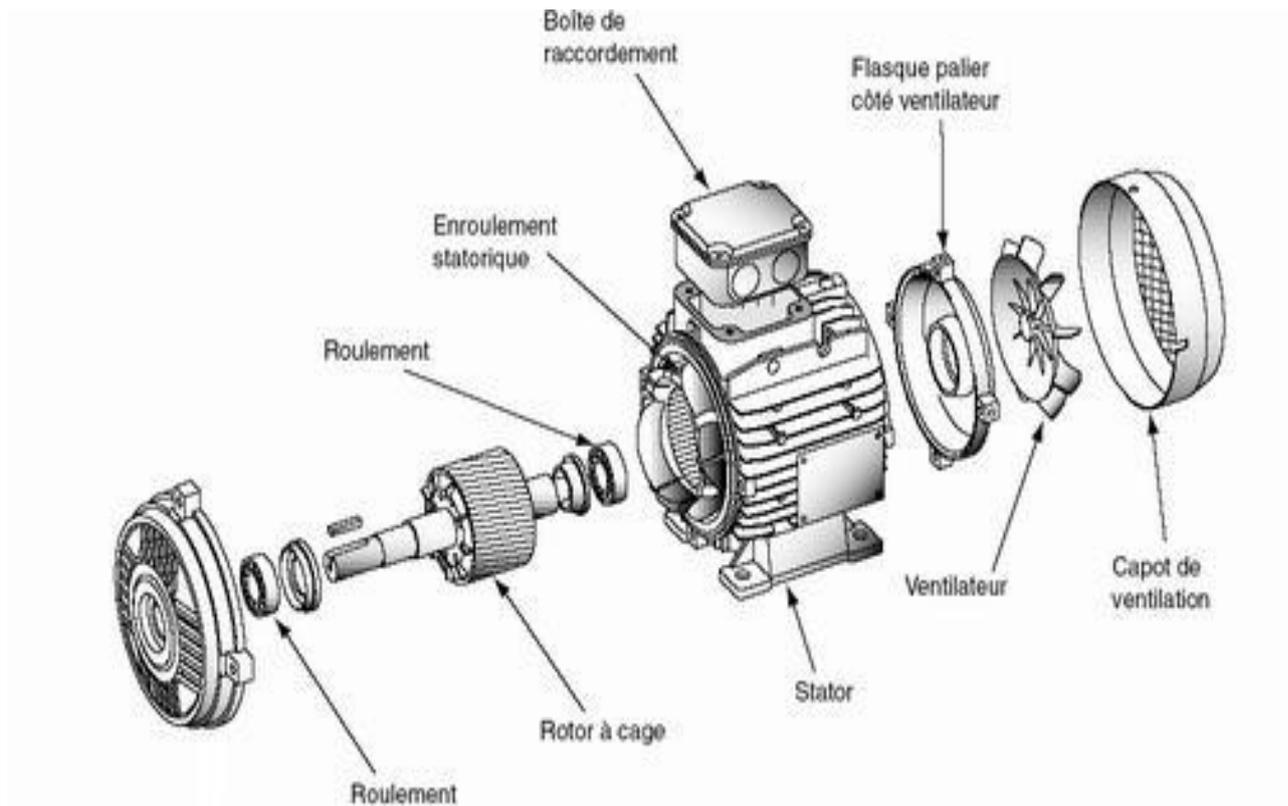


Figure 1 : Schéma d'une machine asynchrone éclaté

I.2. éléments constitutifs

I.2.1. stator

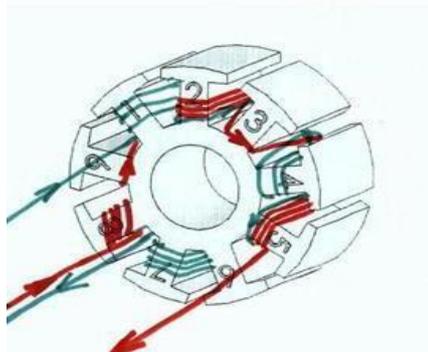


Figure 2 : Stator

Le stator est composé de disques en tôles d'acier de silicium feuilletés et poinçonnés pour former une couronne circulaire. Sa surface intérieure est munie d'encoches dans lequel sont logés des enroulements. Les pertes fer dans ce circuit magnétique est de l'ordre de 1,4 à 2,6W /Kg. Ces valeurs varient en fonction de la minceur de la tôle empilée ; plus l'épaisseur d'une tôle est minime et moins les pertes de fer sont soulignées.

I.2.2. rotor

Le rotor est constitué d'un tambour en tôle isolé et poinçonné afin de former des encoches qui serviront à loger le bobinage rotorique. L'enroulement statorique seul est branché sur le réseau ; le bobinage du rotor n'est relié à aucune source de courant. Ce qui permet de comparer le moteur à un transformateur dont le primaire est constitué par l'enroulement du stator et le secondaire à celle du rotor. On distingue 2 types de rotor selon la nature de l'enroulement dans l'encoche :

I.2.2.1. Rotor bobiné ou rotor à bague:

Le rotor bobiné doit présenter le même nombre de paires de pôles que le stator. En général, les enroulements sont couplés, en étoile sur une extrémité et les autres extrémités sont ramenées sur les trois bagues. Les balais assurent un contact frottant, de plus, certaines bagues possèdent des rainures en forme d'hélice afin d'assurer un auto nettoyage et un meilleur contact. La figure 3 nous montre le schéma électrique du rotor avec les balais.

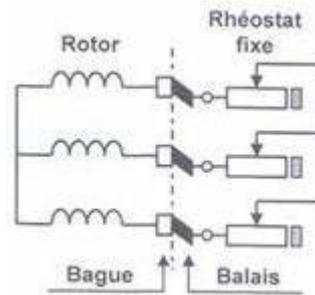


Figure 3 : Enroulement d'un Rotor à bague

I.2.2.2. Rotor à cage d'écureuil ou en court-circuit

La cage d'écureuil est obtenue par injection d'aluminium (ou de cuivre) au travers des encoches ou des perforations des tôles magnétiques constituant le rotor. L'oxydation de l'aluminium au contact des tôles magnétiques durant l'injection, a pour effet d'isoler la cage des tôles. La forme des encoches influe sur le couple, et le courant d'appel au démarrage. Plus les encoches sont effilés vers la périphérie du rotor moins le couple de démarrage et le courant d'appel sont importants, et inversement.

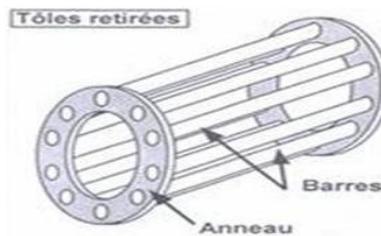


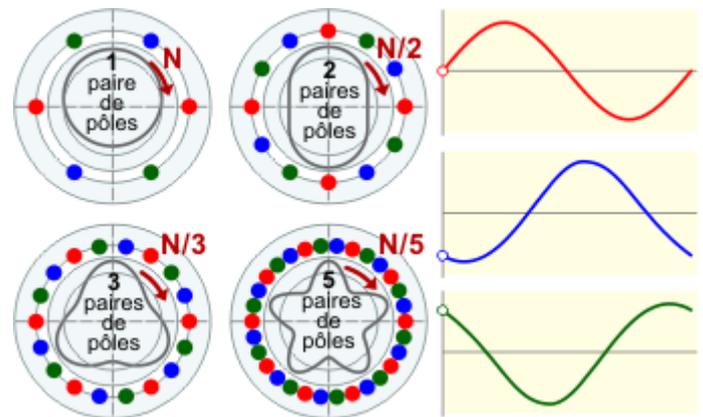
Figure 4 : Cage d'un rotor en court-circuit

II. RAPPORT ENTRE MACHINE ASYNCHRONE MONOPHASE ET TRIPHASE

Le bobinage des moteurs monophasé et triphasé ne sont pas tout à fait semblable. Le tableau suivant nous montre leur rapport.

REBOBINAGE D'UN MOTEUR ASYNCHROME MONOPHASE

	MAS Monophasé	MAS Triphasé
Les entrées des différentes phases	A 90° si l'on est en représentation frontale ou en sautant un quart des encoches pour chaque phase.	A 120° si l'on est en représentation frontale ou en sautant un tiers des encoches pour chaque phase. 2 entrées auront le même sens et la 3 ^{ème} aura un sens de courant inverse. Ceci est dû aux variations des polarités en alternatif triphasé
Nombre d'encoche occupée	Généralement il y aura 2/3 des encoches pour la phase, ou l'enroulement de travail. Le 1/3 servira, pour la phase de démarrage. Une exception : pour les moteurs dont le rapport : Nombre d'encoches divisé par le nombre de pôles n'est pas divisible par 3. Il faudra utiliser 1/2 des encoches pour l'enroulement de travail. Le 1/2 restant, servira, pour la phase de démarrage.	Généralement il y aura 1/3 des encoches pour chacune des phases. Si jamais on tombe sur un stator antique avec un nombre d'encoches non divisibles par 3. Il faudra laisser libres un nombre d'encoches, tel que ce qui reste soit enfin divisibles par 3. Par exemple : 40 encoches en tout. $40 = 36 + 4$, il faut laisser 4 encoches, que l'on répartira au mieux et utiliser le 1/3 des 36 qui reste. Soit : 12 encoches par phases.



REBOBINAGE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE MONOPHASE

Câblage du moteur	<p>En diphasé :</p> <p>l'enroulement de démarrage est monté en série avec un condensateur et monté en parallèle à l'enroulement de travail.</p>	<p>En triangle ou en étoile</p> <p>Dépendant de la puissance du moteur et des indications portés sur la plaque signalétique du moteur.</p>																		
Schémas de branchement	<div style="text-align: center;"> <p>Phase Neutre</p> <p style="text-align: center;">I_1 E.P</p> <p style="text-align: center;">I_2 E.S Coupleur centrifuge</p> </div> <p>Quand le moteur atteint le 2/3 de sa vitesse nominale, le circuit auxiliaire est ouvert par le coupleur centrifuge ;le moteur fonctionne alors en monophasé.</p>	<div style="text-align: center;"> <p style="text-align: center;">Couplage adopté : Δ</p> <p style="text-align: center;">Couplage adopté : Y</p> </div>																		
Variation du Vitesse de rotation	<p>Elle varie en fonction du nombre de paire de pôle puisque la fréquence est constante :</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th style="background-color: #e0e0e0;">Paires de pôles</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th style="background-color: #e0e0e0;">Nombre de pôles</th> <td>2</td> <td>4</td> <td>6</td> <td>8</td> <td>12</td> </tr> <tr> <th style="background-color: #e0e0e0;">N_0 [tr/min]</th> <td>3 000</td> <td>1 500</td> <td>1 000</td> <td>750</td> <td>500</td> </tr> </tbody> </table>		Paires de pôles	1	2	3	4	5	Nombre de pôles	2	4	6	8	12	N_0 [tr/min]	3 000	1 500	1 000	750	500
Paires de pôles	1	2	3	4	5															
Nombre de pôles	2	4	6	8	12															
N_0 [tr/min]	3 000	1 500	1 000	750	500															
Champ Tournant	<p><u>Leblanc</u> : « Un enroulement alimenté par un courant monophasé donne naissance à deux champ tournant égaux mais en sens inverse. »</p>	<p><u>Théorème de Ferraris</u> : Un bobinage polyphasé alimenté par un courant polyphasé donne naissance à un seul champ tournant d'induction B qui tourne à la vitesse de :</p> $n_s = \frac{f}{p}$																		

REBOBINAGE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE MONOPHASE

Rendement pour une même puissance	Plus faible en moteur monophasé face au moteur triphasé	
intérêts	Au-dessous de 1 kW, et notamment pour les usages domestiques (compresseurs de réfrigérateurs, de congélateurs, moteurs de machines à laver, pompes de chauffage central,...), on utilise des moteurs asynchrones monophasés	Pour moteur à grande puissance à employer surtout dans les usines industrielles
Glissement : toujours faible, de l'ordre de quelques pourcents	il peut atteindre 10 % pour les petites machines monophasées.	En général de 2à7%

Tableau 1 : Comparaison entre bobinage monophasé et triphasé

III.DEMARRAGE DES MACHINES ASYNCHRONES

Lors d'un démarrage d'une machine asynchrone, le courant peut atteindre 4 à 8 fois le courant nominal de la machine. On peut utiliser un variateur de vitesse, qui se chargera d'adapter les tensions appliquées à la machine afin de limiter ce courant. L'inconvénient est que le couple moteur est également diminué et que cela augmente la durée avant laquelle la machine atteint le régime permanent.

Il existe aussi d'autres moyens pour réduire ce courant tel que :

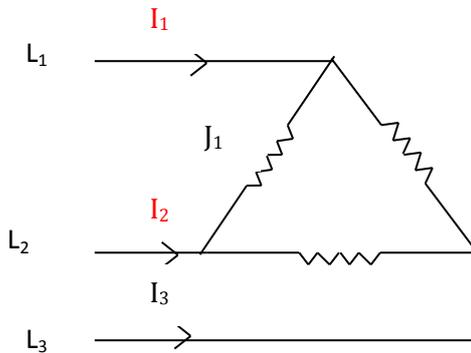
- démarrage sous tension réduite
- démarrage rotorique

III.1. Démarrage sous tension réduite

III.1.1. Démarrage étoile-triangle

Lors d'un démarrage étoile-triangle, la machine est d'abord connectée au réseau avec un couplage étoile, puis une fois démarrée, on passe au couplage triangle. Le fait de démarrer avec un couplage étoile permet de diviser par racine de trois la tension appliquée. Ainsi, le courant maximum absorbé est trois fois plus faible que lors d'un démarrage directement avec un couplage triangle

On a : Triangle



Etoile

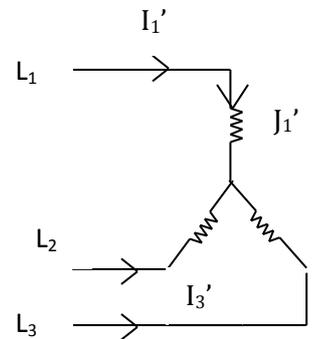


Figure 5 : Montage en triangle et étoile

Triangle : $I_1 = \sqrt{3} J_1$ Par fil de ligne $I_F = \sqrt{3} \frac{U_1}{Z_1}$
 $U_1 = V_1$

étoile $U_1 = \sqrt{3} V_1'$ Par fil de ligne $I_F' = J_1' = \frac{U_1}{\sqrt{3} Z_1}$
 $I_1' = J_1'$

En démarrage étoile-triangle: $I_F' = I_F$

$$\sqrt{3} I_1' = \frac{1}{\sqrt{3}} I_1 \iff I_1' = \frac{1}{3} I_1$$

III.1.2. Démarrage par autotransformateur

Dans ce mode de démarrage, le stator de la machine asynchrone est relié à un autotransformateur qui permet d'effectuer un démarrage sous tension variable. La tension est progressivement augmentée, l'intensité du courant ne dépassant pas la valeur maximale désirée.

III.1.3. Démarrage résistif

Lors d'un démarrage résistif, on insère des résistances en série avec les enroulements statoriques ce qui a pour effet de limiter la tension à leurs bornes. Une fois le démarrage effectué, on court-circuite ces résistances.

III.2. Démarrage rotorique

Lors d'un démarrage rotorique, des résistances de puissance sont insérées en série avec les enroulements du rotor. Ce type de démarrage permet d'obtenir un fort couple de démarrage avec des courants de démarrage réduits mais il ne peut être mis en œuvre qu'avec des machines à rotor bobiné munis de contacts glissants (bagues et balais) permettant les connexions électriques des enroulements rotoriques.

IV. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Le stator étant relié à un réseau électrique : Les courants statoriques créent un champ magnétique tournant dans le stator. La fréquence de rotation de ce champ est imposée par la fréquence des courants statoriques, c'est-à-dire que sa vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence de l'alimentation électrique. Dans le cas du moteur triphasé, trois champs magnétiques sont ainsi créés. Compte tenu de la nature du courant sur le réseau triphasé, les trois champs sont déphasés et le champ magnétique résultant tourne à la même fréquence que le courant soit 50tr/s.

L'enroulement au rotor est donc soumis aux variations de flux (du champ magnétique). Une force électromotrice induite apparaît, crée des courants rotoriques. Ces courants sont responsables de l'apparition d'un couple selon la loi de Laplace¹. Comme le rotor est cylindrique, il est soumis à un couple moteur, tend à le mettre en mouvement afin de s'opposer à la variation de flux selon la Loi de Lenz². Le rotor se met donc à tourner pour tenter de suivre le champ statorique. Le rotor ne peut pas tourner à la même vitesse que le champ magnétique sinon la cage ne serait plus balayée par le champ tournant et il y aurait disparition des courants induits et donc des forces de Laplace et du couple moteur. Les deux fréquences de rotation ne peuvent donc pas être synchrones d'où le nom de **moteur asynchrone**.

¹Loi de Laplace : tout conducteur soumis à un courant i dans un champ magnétique est soumis à la force de Laplace.

²Loi de Lenz (Tout conducteur, présentant une surface dans un champ magnétique variable en court-circuit est le siège de courant induit i).

V. CIRCUIT MAGNETIQUE : GRANDEURS PHYSIQUES D'INFLUENCE

Le Circuit magnétique conduit le flux qui, dans l'entrefer, doit agir sur les courants circulant dans le circuit électrique. Pour concentrer le champ magnétique et faciliter la circulation du flux, on utilise des pièces en fer (acier). Le fer canalise le flux magnétique. L'ensemble de ces pièces en fer constitue **le circuit magnétique.**

V.1. Champ magnétique tournant :

Considérons un ensemble de trois bobines coplanaires et dont les axes concourent en un même point O . Ces axes forment entre eux des angles de 120° .

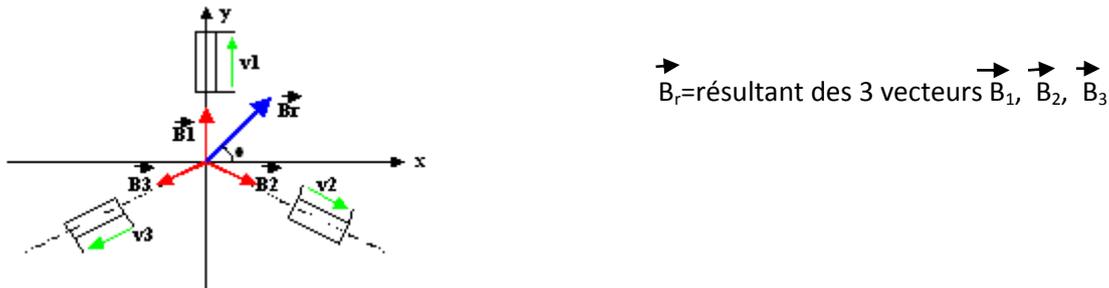


Figure 6 : Sens des intensités B pour un réseau triphasé

Chaque bobine est alimentée par une tension d'un système triphasé équilibré. Étudions la résultante \vec{B}_r des inductions créées par les trois bobines, décalé chacun l'un par rapport à l'autre de $2\pi/3$, au centre O .

Chaque bobine produit sur son axe une induction d'amplitude :

$$b_1 = B_m \cos \omega t$$

$$b_2 = B_m \cos(\omega t - 2\pi/3)$$

$$b_3 = B_m \cos(\omega t + 2\pi/3)$$

Soient B_x et B_y les composantes de B_r sur Ox et sur Oy :

$$|B_x| = B_{xm} \sqrt{3}/2 \cos(\omega t - 2\pi/3) - B_{xm} \sqrt{3}/2 \cos(\omega t + 2\pi/3)$$

$$|B_x| = B_{xm} \sqrt{3}/2 [-\frac{1}{2} \cos \omega t + \sqrt{3}/2 \sin \omega t + \frac{1}{2} \cos \omega t + \sqrt{3}/2 \sin \omega t]$$

$$|B_x| = (3B_{xm}/2) \sin \omega t \tag{1.1}$$

$$|B_y| = B_{ym} \cos \omega t - B_{ym}/2 \cos(\omega t - 2\pi/3) - B_{ym}/2 \cos(\omega t + 2\pi/3)$$

$$|B_y| = B_{ym} [\cos \omega t + 1/2 \cos \omega t - \sqrt{3}/2 \sin \omega t + 1/2 \cos \omega t + \sqrt{3}/2 \sin \omega t]$$

$$|B_y| = (3B_{ym}/2) \cos \omega t \tag{1.2}$$

De (1.1) et (1.2) on en déduit que :

$$\left(\frac{2B_x}{3B_{xm}}\right)^2 + \left(\frac{2B_y}{3B_{ym}}\right)^2 = 1 \quad \text{c'est l'équation d'une ellipse donc } \vec{B} \text{ tourne en décrivant une ellipse}$$

$$\text{Et si } B_{xm}=B_{ym} \text{ alors } B_x^2 + B_y^2 = \left(\frac{3}{2}B_m\right)^2$$

c'est l'équation d'un cercle donc l'extrémité de \vec{B} décrit un cercle de rayon $\frac{3}{2}B_m$

Alors le vecteur \vec{B}_r est de module constant $3B_m/2$ et que $\theta = -\omega t$ donc la direction de \vec{B} varie dans le temps. Donc le vecteur \vec{B}_r tourne à ω . Si l'alimentation est un système triphasé inverse, le sens de rotation du vecteur \vec{B}_r est inversé.

Le principe du champ tournant est la même à deux bobines déphasé de $\frac{\pi}{2}$.

V.2. Force magnétomotrice

La force magnétomotrice FMM est l'intensité du champ magnétique sur une longueur ligne de force magnétique. Cette force magnétomotrice dépend de l'aménagement de la bobine et se diffère selon que la bobine est multipolaire, bipolaire, à ouverture diamétrale ou non.

V.3. Glissement :

Les pertes par effet joule dans le rotor étant proportionnelles au glissement, une machine de qualité se doit de fonctionner avec un faible glissement

- On désigne par n_s la fréquence de rotation du champ statorique dans la machine.
- On désigne par n la fréquence de rotation de la machine.

Soit p le nombre de paires de pôles de la machine et f la fréquence de l'alimentation. On a :

$$n_s = \frac{f}{p} \quad f \text{ en [tr/s]} \quad \text{ou} \quad n_s = \frac{60.f}{p} \quad f \text{ en [tr/mn]}$$

Le glissement correspond à la différence de vitesse entre le rotor et le champ statorique exprimée sous la forme d'un pourcentage de la fréquence de rotation.

$$n_s - n = g.n_s, \text{ soit } g = \frac{n_s - n}{n_s}$$

Le glissement peut aussi être calculé à partir des vitesses angulaires :

$$g = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \quad \text{avec : } \omega_s \text{ la vitesse angulaire de synchronisme du champ statorique dans la machine.}$$

ω La vitesse angulaire de rotation de la machine

VI. CARACTERISTIQUES DES MACHINES ASYNCHRONES

VI.1. Couple en fonction du fréquence de rotation

Le couple varie avec la fréquence de rotation pour le moteur et pour la charge entraînée. Les caractéristiques du moteur et de la charge se croisent au point de fonctionnement pour lequel le couple moteur et résistant est identique. A vide, le couple utile est nul et il croît proportionnellement à la puissance utile. Cette courbe confirme le fait que le moteur asynchrone est un moteur à vitesse peu variable

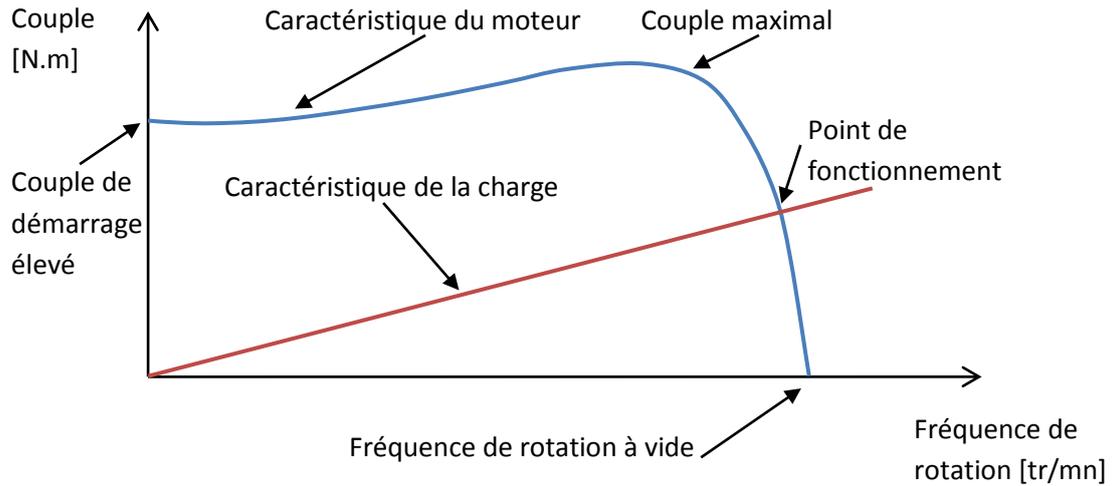


Figure 7 : Courbe caractéristique du Couple $C = f(N)$

VI.2. Variation des grandeurs caractéristiques du Moteur :

-Courant I_1 :

La courbe est croissante et commence par la valeur du courant à vide I_0 .

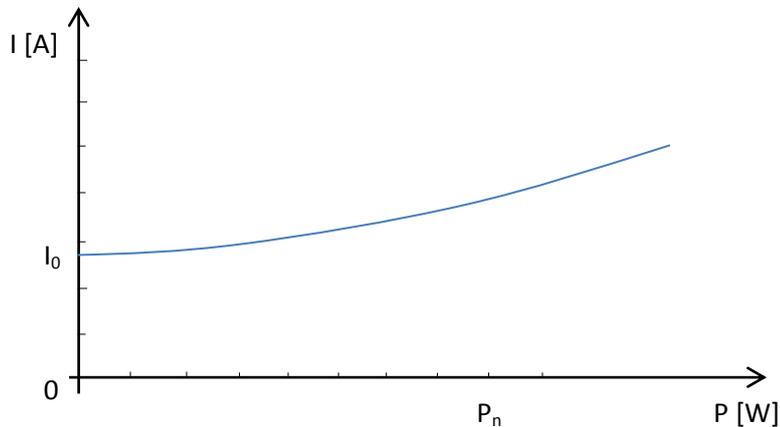


Figure 8 : Courbe caractéristique du courant en fonction de P_r

Facteur de puissance $\cos\varphi$:

Elle est croissante et commence par la valeur du courant à vide et augmente jusqu'à un maximum un peu plus élevé que la valeur nominale.

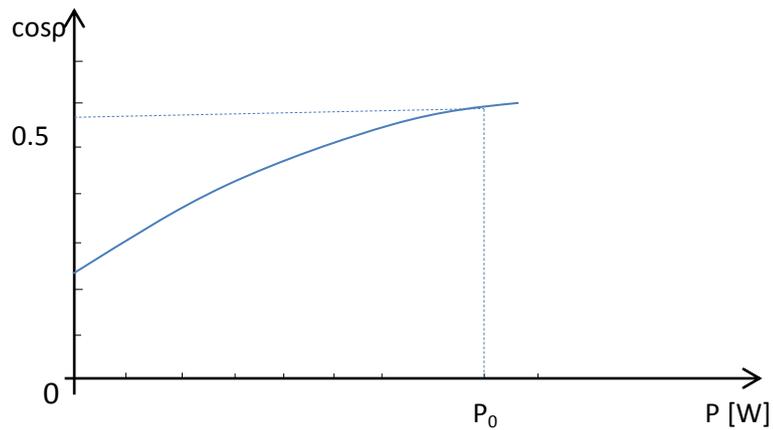


Figure 9 : courbe caractéristique du facteur de puissance en fonction de P_r

Glissement g :

La courbe est croissante, elle croît avec l'augmentation de la puissance et elle est presque linéaire dans les valeurs initiales.

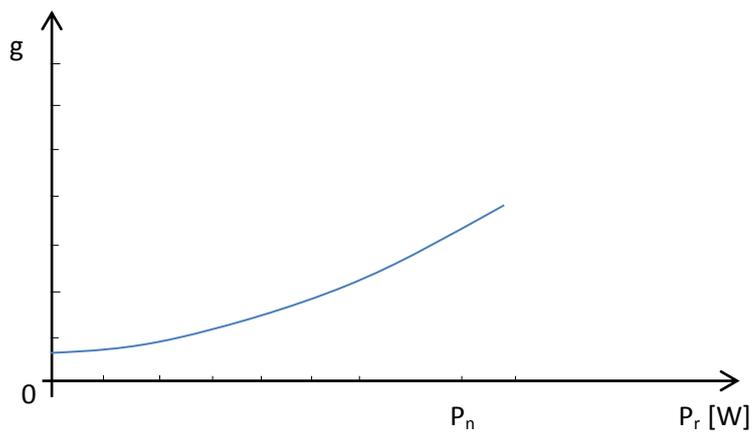


Figure 10: Courbe caractéristique du glissement en fonction de P_r Rendement

Rendement du Moteur :

La courbe atteint une valeur légèrement maximale proche de 75% de la valeur de la charge.

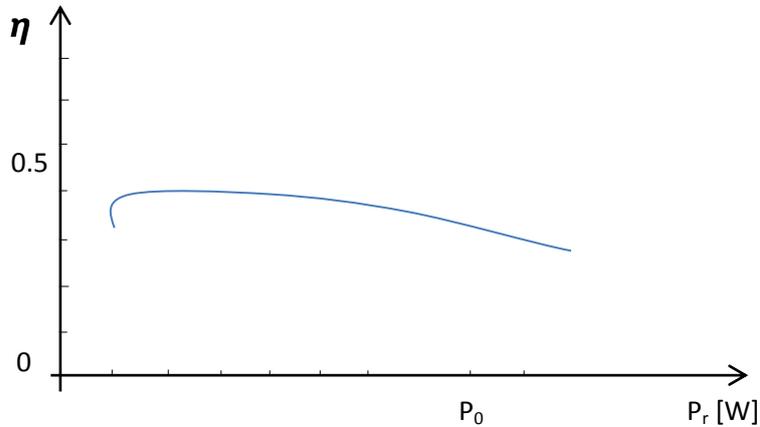


Figure 11 : Courbe caractéristique du rendement en fonction de P_r

VI.3. Particularités des moteurs monophasés

VI.3.1. Les enroulements :

Le moteur monophasé ne peut démarrer sans les avoir transformés en moteur diphasé en munissant le tiers de l'encoche statorique d'un enroulement auxiliaire plus fin et plus nombreux que l'enroulement principal. Cet enroulement crée une Force magnétomotrice d'amplitude voisine à celle du principal, permettant de faire tourner le rotor ; et puisqu'il n'intervient qu'au démarrage, Un coupleur centrifuge, ouvre la phase auxiliaire quand le tiers de la vitesse nominale est atteint. La disposition de l'enroulement auxiliaire par rapport au principal est montré sur le schémas de l'exemple suivant : $2p=4$ et $N=24$: Enroulement imbriqué

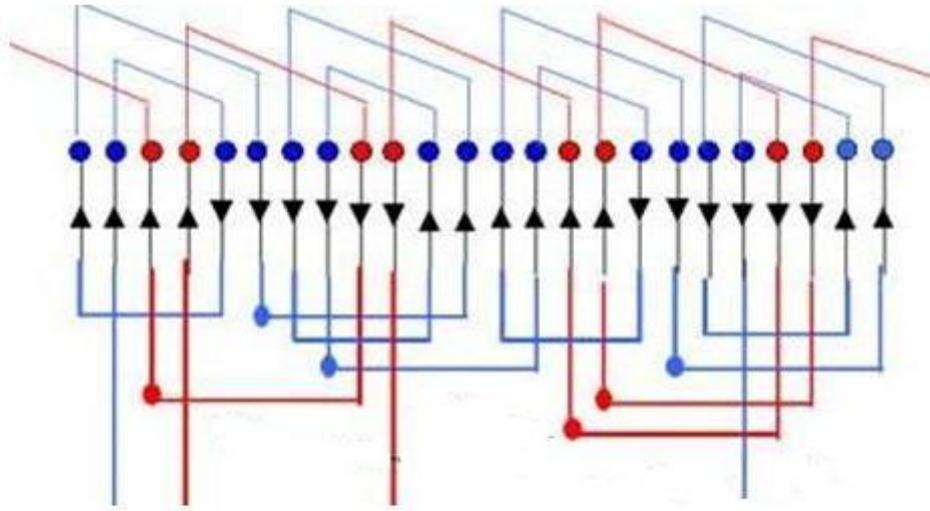


Figure 12: Disposition d'enroulement

E_p : Entrée de l'enroulement principal

E_d : Entrée de l'enroulement auxiliaire

S_p : Sortie de l'enroulement principal

S_d : Sortie de l'enroulement auxiliaire

VI.3.2. Branchement d'un condensateur :

Pour réduire l'appel du courant au démarrage, On procède à un démarrage en deux temps soit en mettant en série, avec l'enroulement auxiliaire, une inductance soit en reliant l'enroulement principal par une résistance.

Dans notre cas : On a mis en série avec la phase auxiliaire un condensateur dont la capacité nécessaire pour créer le champ tournant est :

$$C = \frac{I_{cc} \cdot \sin\varphi_{aux}}{\omega \cdot U_{aux}}$$

$$\text{Avec } \sin\varphi_{aux} = \frac{U_1}{U_c} \text{ or } U_c = \sqrt{U_p^2 + U_{aux}^2}$$

U_1 : Tension du réseau

U_p : Tension de l'enroulement principal

U_{aux} : Tension de l'enroulement auxiliaire

U_c : Tension du condensateur

La pulsation ω est : $\omega = 2\pi f$

D'après le principe du champ tournant, Il n'y a aucune rotation de l'induction \vec{B} sans décalage de la bobine d'induction magnétique d'un angle 120° pour l'enroulement triphasé

et 90° pour l'enroulement diphasé. Ainsi Le condensateur de capacité C assure le décalage des Forces Magnétomotrice du circuit magnétique dans le temps tandis-que la disposition des enroulements assure Ce décalage dans l'espace.

VI.4. Les domaines de fonctionnement

Le domaine d'usage permanent de la machine se situe entre C_n et $C_{em} = 0$. Le couple maximum C_{max} est de l'ordre de 2,5 à 3,5 C_n .

La machine est réversible.

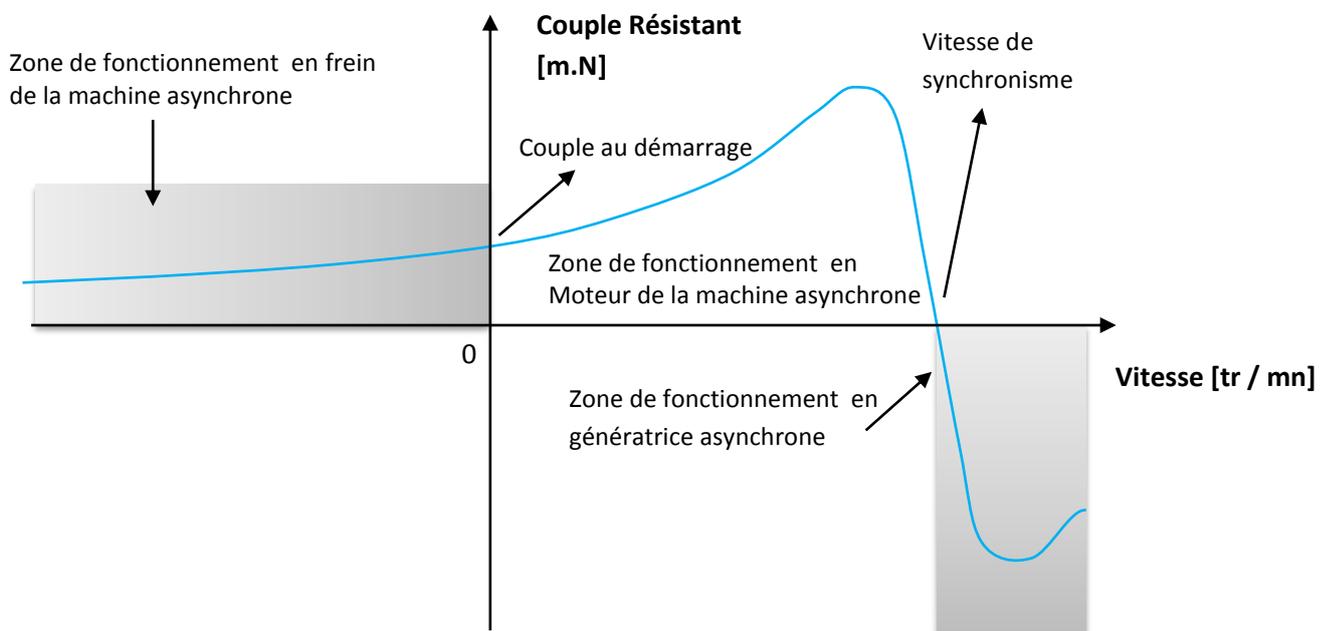


Figure 13 : Courbe du domaine de fonctionnement de la Machine Asynchrone

VII. FORME ET CALCUL DE BOBINAGE

VII.1. Type, Forme, et positionnement de bobinage

VII.1.1. Formes de bobinage

- Bobine concentrique à un faisceau par encoche ou par étage.
- Bobine enchevêtré ou Gabarié à un ou à deux faisceaux par encoche ou à un ou 2 étages.

VII.1.2. type de bobinage

-**ondulé ou à pôle conséquent** : comportant une bobine par paire de pôle par phase soit une bobine par 2pôles.

On a :

Ondulé : 1bobine /2 pôles/phase

Connexion: E-S-E-S....

-**imbriqué ou à pôle alterné** : nécessitant une bobine par pôle et par phase

On a :

Imbriqué : 1bobine/pôle/phase

Connexion : E-S-S-E-E-S

- **A pas diamétral** : Le plus long à réaliser, car il faut réaliser toutes les bobines une par une puis à les connecter suivant le mode « E-S-E-S... » Ils présentent **les meilleures caractéristiques électriques** du fait que les groupes sont constitués de bobines de diamètres identiques. Il est possible d'assembler les bobines phase par phase ou plusieurs bobines par phase.

VII.1.3. Positionnement

- Bobine décalé
- Bobine étagé
- Deux bobines en série et une isolé
- Bobinage en demi-encoche

VII.2. Principe de bobinage

Terme technique de bobinage

L'association des conducteurs d'une machine constitue le **bobinage**. Cette association varie essentiellement suivant le type de machine et sa puissance.

Les termes généraux utilisés dans la technique du groupement des conducteurs sont définis ci-dessous :

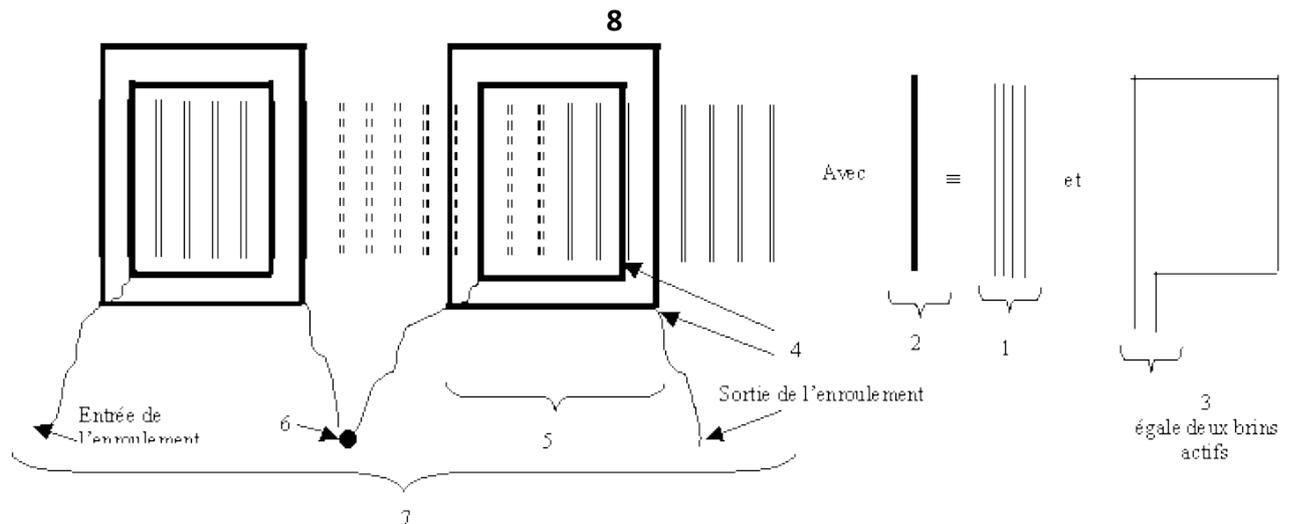


Figure 14: présentation des fils et leur connexion

1	Brins actifs	Conducteurs insérés dans une encoche
2	Faisceaux	Ensemble des brins actifs dans une encoche. parcourue dans le même sens par le courant d'une phase.
3	Spire	Deux brins actifs reliés d'une encoche à l'autre
4	Bobine (ou petite bobine, ou section)	Ensemble de spires
5	Groupe de bobines	Ensemble de bobines réalisées les une à la suite des autres sur un gabarit concentrique et reliées de fait en série.
6	Connexion	Liaison des groupe de bobines entre elles , en série ou parallèle.
7	Enroulement (ou phase)	Ensemble de groupes de bobines.

Tableau 2 : Terme technique utilisé au bobinage

VII.2.1. Conducteurs

Pour véhiculer un courant I , on peut utiliser un seul conducteur (massif ou creux) ou Plusieurs conducteurs raccordés en parallèle. La densité de courant admise dans un conducteur varie de 2 à 5 A/mm selon le type de refroidissement utilisé.

VII.2.2. Section

Une section est formée de 2 faisceaux reliés par la tête de bobine. Elle est caractérisée par son nombre de spire et son pas.

VII.2.3. pas d'une section

C'est l'écart entre 2 faisceaux d'une section et évalué en nombre d'encoche.

VII.3. Exécution des schémas de bobinage :

Le schéma de bobinage des stators des machines à courant alternatif peuvent se faire :

-soit par développement panoramique :

Les encoches sont représentées « à plat », la première se trouve donc dissociée de la dernière.

Cette représentation donne une idée de la position des différentes bobines et de leurs connections.

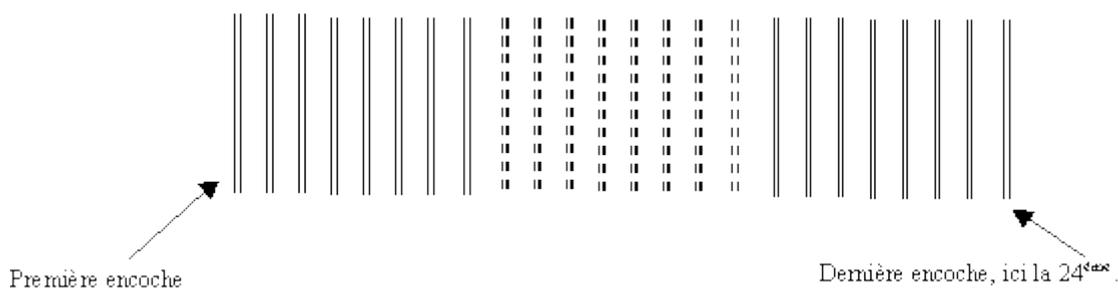


Figure 15 : Représentation panoramique

-soit par développement frontale

Cette représentation donne une idée de la position des "chignons", c'est à dire de la position des têtes des petites bobines en dehors des encoches.

REBOBINAGE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE MONOPHASE

Généralement, un des cotés du cylindre du stator est porteur de ces chignons et de toutes les connections. Ce cotés se nomme « coté connections », l'autre « coté chignons ».

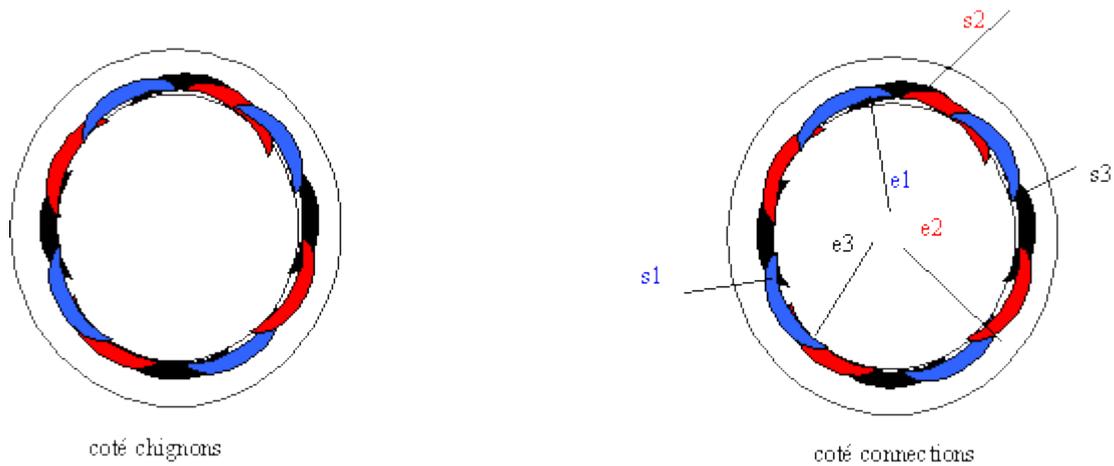


Figure 16 : Développement Frontale des schémas de bobinage

Avant d'établir les schémas, il faut connaitre :

- 1-le nombre d'encoche N
- 2-le nombre de pole $2p$
- 3-le nombre de faisceau par encoche
- 4-le type de bobinage
- 5-le nombre d'encoche occupé (cas de bobinage monophasé)

6-Calcul du nombre de groupes de bobines nécessaires :

- En ondulé, nombre de groupes = nombre de pôles / 2
- En imbriqué, nombre de groupes = nombre de pôles
- A pas diamétral,

Nombre de groupes par phase = nombre de pôles / 2

7-Pas de section = Pas de bobine = Pas des encoches

8-Calcul des faisceaux

Le nombre de faisceaux = nombre d'encoches par groupe de bobines / 2.

9-Pas polaire : $N_{enc} / 2p$

Bobinage non-réalisable :

A l'impossible nul n'est tenu, il arrive, que malgré tous les efforts possibles, il ne soit pas possible de réaliser un bobinage. Cela se constate :

- **Si les calculs du nombre de groupes donnent un nombre impair ou fractionnaire.**

- **Si les calculs du nombre d'encoches par groupes donnent un nombre impair ou fractionnaire.**

- **Si le nombre de pôles est trop grand, et le nombre d'encoches au total trop petit.**

- **Si le pas polaire ≤ 2**

***CHAPITRE II : LES PARAMETRES ELECTRIQUES DU
MOTEUR AVANT BOBINAGE***

CHAPITRE II : LES PARAMETRES ELECTRIQUES DU MOTEUR AVANT BOBINAGE

La constitution interne d'une machine asynchrone monophasée est la même que celle d'une machine triphasée à la différence près, que son stator est composé d'un enroulement et non de trois. Les machines asynchrones monophasées ont des caractéristiques (couple/puissance massique, rendement, facteur de puissance, etc.) plus faibles que leurs homologues multiphasées. Ces machines sont toujours utilisées en moteur et généralement limitées à des puissances de quelques kilowatts.

I. Plaque signalétique

<u>Utilisation :</u>	moteur	<input checked="" type="checkbox"/>	alternateur	<input type="checkbox"/>
<u>Vitesse de rotation</u>	1475 [tr/mn]		phases : monophasé	
<u>Puissance :</u>	1/6 [cv]			
<u>Tension :</u>	220/380 [V]			
<u>Courant :</u>	3.5 /1.75 [A]			
<u>Fréquence :</u>	50 [HZ]			

REBOBINAGE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE MONOPHASE

II. Mesure et essai effectués

II.1. Mesure du caractéristiques à vide et à court-circuit

<u>Essais</u>	<u>Essai à vide</u>	<u>Essai à rotor bloqué</u>
Schémas de branchement	<p>50Hz $U_n=U_1$</p>	<p>Le moteur est immobilisé</p> <p>$f=50\text{Hz}$</p>
Valeurs du courant	$I_{10}= 0.78 \text{ [A]}$	$I_{cc}= 0.48 \text{ [A]}$
Valeurs du Tension	$U_{10}=220\text{[V]}$	$U_{cc}= 66 \text{ [V]}$
Valeur du Puissance	$P_{10}= 53\text{[w]}$	$P_{cc}=52\text{[W]}$
Valeur du courant nominale et puissance nominale	Les valeurs trouvés lors de l'essai sont déjà ramené au tension nominale.	$P_{ccn} = P_{cc} \left(\frac{U_n}{U_{cc}} \right)^2 \quad I_{ccn} = I_{cc} \cdot \frac{U_n}{U_{cc}}$ <p>il s'agit de rapporter les valeurs du courant et puissance en court-circuit à la tension nominale $U_{ccn}=220\text{[V]}$ d'où :</p> $I_{ccn}=3.3 \text{ [A]}$ $P_{ccn}=524 \text{ [W]}$

Tableau 3 : Valeurs des paramètres à vide et à court-circuit

II.2. Mesure de résistance de l'enroulement principale et de l'inductance L

Mésure	Résistance de l'Enroulement principale	Inductance
Principe	Les mesures se font par la methode voltampèremetrique sous la tension continue 24V.	On mesure la tension et le courant efficace aux bornes du moteur sous une tension de 25V alternatif. On applique la formule $Z = \frac{U_{eff}}{I_{eff}} = \sqrt{R^2 + (L\omega)^2}$ pour trouver l'inductance L

REBOBINAGE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE MONOPHASE

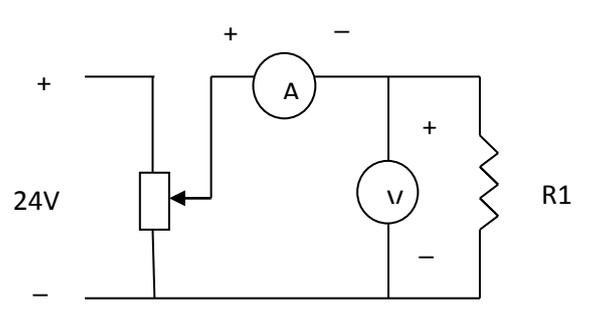
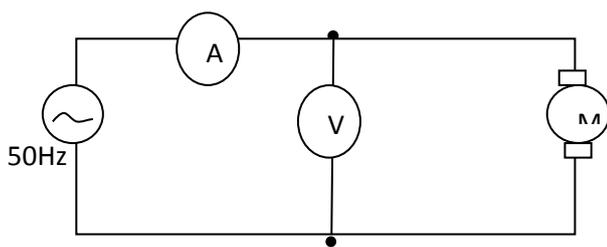
Schémas de branchement		
Valeur trouvée	<p>A CHAUD : $R_1=22.35\Omega$</p> <p>A FROID : cette résistance diminue à $R_2= 18 \Omega$</p>	<p>$U_{\text{eff}}=52 \text{ [V]}$ $I_{\text{eff}}=0.6 \text{ [A]}$</p> <p>$Z_{\text{eff}}=86.66 \text{ [\Omega]}$ D'où $L= 0.27\text{H}$</p>

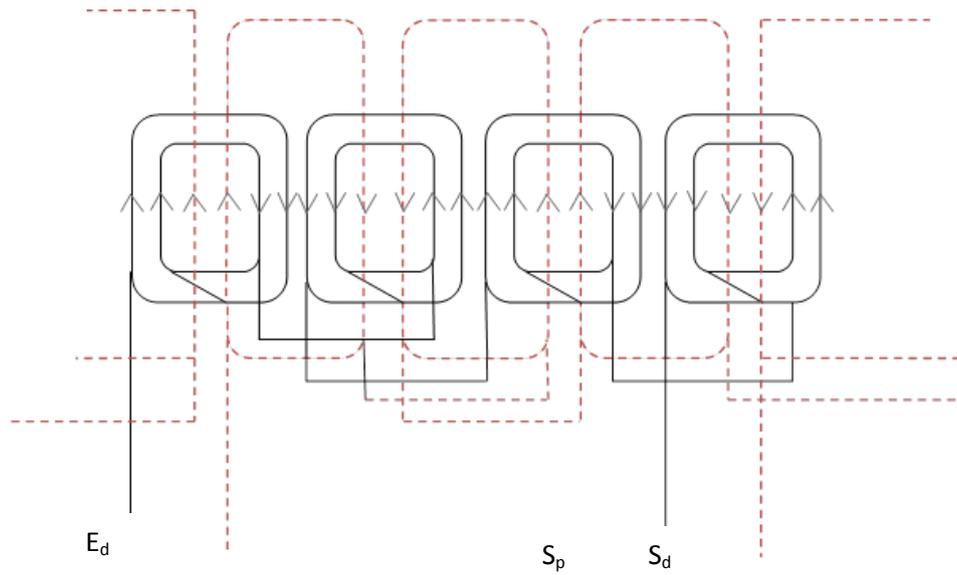
Tableau 4: Valeurs de résistance et de l'inductance

III. Schémas de bobinage de l'enroulement :

Dimensions des fils émaillés :

	Enroulement Principale	Enroulement auxiliaire
Diamètre du fil émaillé	$\frac{60}{100}$ ème	$\frac{50}{100}$ ème
Nombre de spires par Encoche	105 spires par encoche	128 spires par encoche
Section du conducteur loger dans l'encoche	45,5[mm ²]	32[mm ²]
nombre de faisceau par encoche	1	1
type de bobinage	imbriqué	imbriqué
nombre d'encoche occupé	16	8
<i>nombre de groupes de bobines</i>	8	4
<i>Pas polaire</i>	6	2

REBOBINAGE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE MONOPHASE



E_p

E_p : Entrée de l'enroulement principal

S_p : Sortie de l'enroulement principal

E_d : Entrée de l'enroulement auxiliaire

S_d : Sortie de l'enroulement auxiliaire

*Chapitre III : REDIMENSIONNEMENTS DE LA MACHINE
ASYNCHRONE*

Chapitre III : REDIMENSIONNEMENT DE LA MACHINE
ASYNCHROME

I. Etude préliminaire

1-le nombre d'encoches $N = 24$

2-le nombre de pôles : $2p = 4$ car $n = \frac{60f}{p}$ $p = \frac{60.f}{n} = \frac{50 \cdot 60}{1500}$ $p = 2$

3-le nombre de faisceau par encoche 1

4-le type de bobinage : imbriqué

5-le nombre d'encoche occupé

2/3 de l'encoche : **16** enroulements principaux

1/3 de l'encoche : **8 enroulements** de démarrage

6-Calcul du nombre de groupes de bobines

En imbriqué, nombre de groupes = nombre de pôles = 4

7-Calcul des faisceaux :

les faisceaux seront disposés phase par phase, par groupe Le nombre de faisceaux : =
nbre d'encoches par groupe de bobines / 2. = 4

8- pas polaire : 6

II. Repérage du bobinage pour 24 encoches*

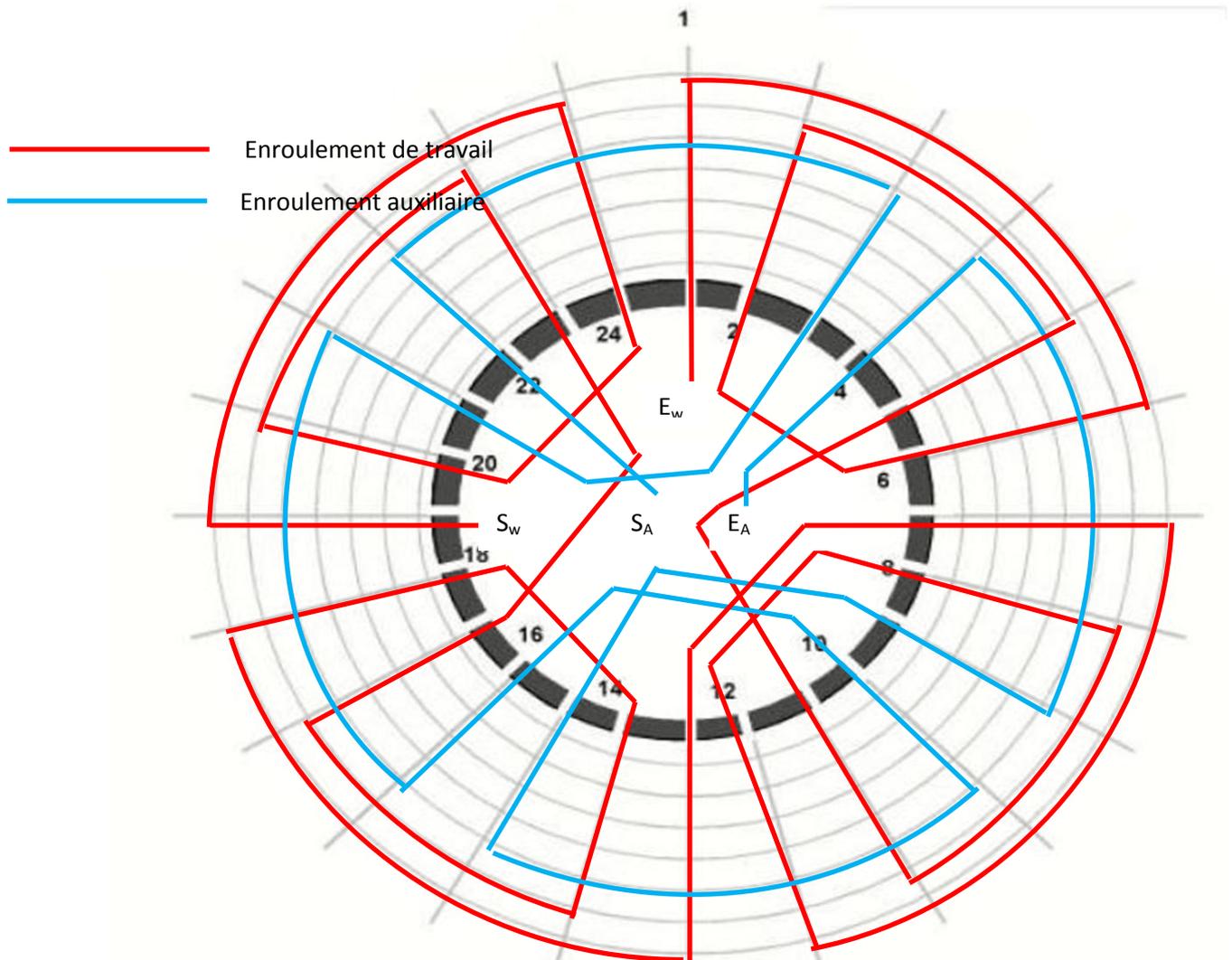


Figure 17 : Disposition des enroulements

E_w: Entrée de l'enroulement de travail

S_w : Sortie de l'enroulement de travail

E_A : Entrée de l'enroulement auxiliaire

S_A : Sortie de l'enroulement auxiliaire

III. Caractéristiques physiques du moteur :

Alésage du stator	$D=62\text{mm}$
Diamètre du rotor	$d=61\text{mm}$
Longueur du fer actif	$L=67\text{mm}$
Largeur de l'encoche	$b_e = 7\text{mm}$
Diamètre du fil émaillé du bobine de travail	$d_w=60 / 100 [\text{mm}]$
Diamètre du fil émaillé du bobine de Démarrage	$d_w = 50 / 100 [\text{mm}]$
Longueur d'empilage de tôle	$L_t = 66[\text{mm}]$
Epaisseur de la culasse	$e_c = 8[\text{mm}]$
Pas dentaire	$\Gamma_d= 8,11[\text{mm}]$
Largeur des dents	$b_d=3[\text{mm}]$
Section de l'encoche	$S_{enc}=45,84[\text{mm}]^2$
Masse de l'acier des dents	$M_d=0,4[\text{Kg}]$
Masse de l'acier de la culasse	$M_c=1[\text{Kg}]$
Pas polaire	$\tau = 48,69[\text{mm}]$

Tableau 5: mesure des paramètres physiques du moteur

IV. Détermination des différents coefficients

IV.1. Entrefer :

$$\delta = \frac{D-d}{2} \tag{3-1}$$

$$\delta = \frac{62-61}{2}$$

$$\delta = 0.5\text{mm}$$

IV.2. Coefficient d'entrefer :

$$K_{\delta} = \frac{Tz1}{Tz1 - Ce \cdot \delta} \tag{3-2}$$

Ou - Tz_1 : pas dentaire = $\frac{\pi D1}{Z1}$

$$= \frac{\pi \cdot 62}{24}$$

$$= 8.11\text{mm}$$

$$-Ce = \frac{\left(\frac{be}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{be}{\delta}} \quad Ce = 10.31 \tag{3-3}$$

d'après (2.1) $K_{\delta} = 2.74$

IV.3. Facteur de distribution :

Il est donné selon le tableau suivant :

Nombre totale d'encoche par pôle Q	3	4	4	5	5	6	6	6
Nbr totale d'encoche par pôle Q et phase q	2	2	3	2	3	2	3	4
k_d	0.866	0.925	0.804	0.953	0.872	0.966	0.910	0.833

Tableau 6: Valeur du facteur de distribution

Dans notre cas, d'après le Tableau :

Enroulement Principale : $k_d=0.833$

Enroulement Auxiliaire : $k_d=0.966$

IV.4. Facteur de forme de la courbe d'induction :

En tenant compte de la courbe sinusoïdale d'induction et de la faible saturation du circuit magnétique on a :

$$K_B = \frac{\pi}{2} \frac{\pi}{2} \quad (3-4)$$

$$K_B = 1.11$$

IV.5. Coefficient de flux :

Le tableau suivant donne le valeur du Coefficient de flux relatif à la puissance du moteur :

$K_0(\text{en } 10^{-2})$	Kw utile à 50hz	A	AF	$\Delta[\text{a/mm}^2]$
0.29 à 0.35	0 à 4	100 à 180	≤ 200	4.5 à 5.5
0.35 à 0.41	4 à 22	180 à 280	≤ 400	
0.41 à 0.47	22 à 110	280 à 340	≤ 600	4 à 5
0.47 à 0.55	110 à 120	340 à 380	≤ 800	
0.55 et plus	220 à 380	380 à 420	≤ 1200	4

Tableau 7: Coefficient de flux

Ou

K_0 : Coefficient de flux

Kw: Puissance utile de la machine

AF: Nombre d'Ampère fils

Δ : Densité moyenne de courant

A: nombre d'Ampère conducteur par cm de périphérie

IV.6. Coefficient de remplissage

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

IV.7. Coefficient dépendant du degré de saturation de la dent du Stator et du rotor :

$$\alpha_{\delta} = \frac{2}{\pi} \quad (3-5)$$

$$\alpha_{\delta} = 0,63$$

IV.8. Coefficient de remplissage de paquet de tôle

$$k_t = 0,93$$

V. Force Magnétomotrice Et induction magnétique :

V.1. Induction magnétique dans l'entrefer :

$$B_m = \frac{\Phi_m}{\alpha_{\delta} \cdot \tau \cdot L_t} \quad (3-6)$$

Φ_m : Flux d'induction mutuel

α_{δ} : Coefficient dépendant du degré de saturation des dents du stator

τ : pas polaire

L_t : Longueur d'empilage de tôle

$$B_m = \frac{7,43 \cdot 10^{-4}}{0,63 \cdot 48,69 \cdot 67 \cdot 10^{-6}}$$

$$B_m = 0,36 [T]$$

V.2. La force magnétomotrice qui crée le flux Φ_m

$$F_0 = B_m \cdot \frac{\delta \cdot k_{\delta}}{\mu_0} \quad (3-7)$$

$$F_0 = 0,36 \cdot \frac{0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 2,74}{4\pi \cdot 10^{-7}}$$

$$F_0 = 392,47 [\text{At}]$$

V.3. Induction dans la dent :

$$B_{z1} = \frac{B_m \cdot L \cdot \Gamma_d}{K_t \cdot L_t \cdot b_d} \quad (3-8)$$

Γ_d : Pas dentaire

$$B_{z1} = \frac{0,36 \cdot 67,8 \cdot 11}{0,93 \cdot 66,3}$$

$$B_{z1} = 1,06 [\text{T}]$$

V.4. Induction dans la culasse :

$$B_c = \frac{\Phi_m}{2 \cdot e_c \cdot L_t \cdot K_t} \quad (3-9)$$

e_c : épaisseur de la culasse

$$B_c = \frac{7,43 \cdot 10^{-4}}{2,8 \cdot 66 \cdot 0,93 \cdot 10^{-6}} \quad B_c = 0,75 [\text{T}]$$

VI. Dimensionnement des enroulements et paramètres électriques du moteur

Grandeurs	Formules utilisés	notations	ENROULEMENT DE TRAVAIL	L'ENROULEMENT AUXILIAIRE
flux d'induction mutuelle Φ_m	$\Phi_m = K_o \frac{P_{kw}}{P}$ <p>(3-10)</p>	<p>P_{kw} : la puissance celle figurée sur la plaque signalétique</p> <p>P : nombre de paire de pôles</p> <p>K_o : coefficient de flux</p>	$\Phi_m = 0,003 \frac{0,123}{2}$ $\Phi_{m1} = 7,43 \cdot 10^{-4} [\text{Wb}]$	$\Phi_m = 0,003 \frac{0,123}{2}$ $\Phi_{m2} = 7,43 \cdot 10^{-4} [\text{Wb}]$

REBOBINAGE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE MONOPHASE

Nombre de spires : Par phase	$N_s = \frac{E_o}{4,4.f.K_d.p.\Phi_m}$ (3-11)	K_d : coefficient de distribution E_o = FEM à vide	$N_{s1} = 1601$ [spires]	$N_{s2} = 1381$ [spires]
Nombre de spires : Par encoche :	$N_{se} = \frac{N_p}{2pq}$ (3-12)		$N_{se1} = 100$ [spires /encoche]	$N_{se2} = 173$ [spires /encoche]
Diamètre du conducteur	$d_{cu} = \frac{4S_{enc} K_r1}{\pi N_{se}}$ (3-13)		$d_{cu1} = 0.64$ [mm] <u>norme</u> $d_{cu1} = 0.65$ [mm]	$d_{cu2} = 0.49$ [mm] <u>norme</u> : $d_{cu2} = 0,50$ [mm]
Longueur totale du conducteur	$L = N_{se}[(l_1 + l_2) + 3 \cdot \frac{7}{6} \tau]$ Avec : $L_1 = 2(l_1 + \tau + \frac{3}{4} \tau)$ $L_2 = 2(l_2 + \frac{\tau}{2} + \frac{3}{4} \tau)$ (3-14)	- L_1 : Longueur de conducteur d'une bobine à τ pas - L_2 : Longueur du conducteur d'une bobine à $\frac{\tau}{2}$ pas	$L_1 = 100 \times [(2(66 + 48,69 + \frac{3}{4} \cdot 48,69)) + 2(66 + \frac{48,69}{2} + \frac{3}{4} \cdot 48,69)] + 3 \cdot \frac{7}{6} \cdot 48,69$ $L_1 = 232194$ [mm]	$L_2 = 173 \cdot [(2(66 + 48,69 + \frac{3}{4} \cdot 48,69)) + 2(66 + \frac{48,69}{2} + \frac{3}{4} \cdot 48,69)] + 3 \cdot \frac{7}{6} \cdot 48,69$ $L_2 = 401696$ [mm]
Section du conducteur	$S_{cu} = \frac{\pi d_{cu}^2}{4}$ (3-15)		$= \frac{3,14 \cdot 0,65^2}{4}$ [mm ²] $S_{cu1} = 0,3318$ [mm ²]	$S_{cu2} = 0,1963$ [mm ²]

Tableau 8: dimensions des enroulements

REBOBINAGE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE MONOPHASE

PARAMETRE ELECTRIQUE DU MOTEUR

Grandeurs	Formules utilisés	notations	<u>ENROULEMENT DE TRAVAIL</u>	<u>L'ENROULEMENT AUXILIAIRE</u>
<u>Coefficient de dispersion :</u>	$\lambda_d = \frac{m \cdot q \cdot K^2 \cdot b_p \cdot \tau \cdot K_{dp}}{\pi^2 \cdot k_\delta \cdot k_\mu \delta}$ <p style="text-align: center;">(3-16)</p>	<p>ou τ : pas polaire m : nombre de phase = 1 k_δ : coefficient de l'entrefer = 1.2 k_μ : coefficient de saturation magnétique de fer = 1.1</p>	$\frac{1.4 \cdot 0,0092 \cdot 48,69 \cdot 0,833^2}{\pi^2 \cdot 1,2 \cdot 1,1 \cdot 0,5}$ <p>$\lambda_{d1} = 0,20$</p>	$\lambda_{d2} = \frac{1.2 \cdot 0,028 \cdot 48,69 \cdot 0,966^2}{\pi^2 \cdot 1,2 \cdot 1,1 \cdot 0,5}$ <p>$\lambda_{d2} = 0,02$</p> <p>pour $q=2$ et $\beta=1$ $k_{dp} = 0,028$</p>
<u>Permeance du partie frontale de l'enroulement statorique:</u>	$\lambda_{fr} = q(0,47l_{fr} - 0,3 \frac{\tau}{l_{fr}} \frac{l_{fr}}{1})$ <p style="text-align: center;">(3-17)</p>	<p>l_{fr} : longueur de la partie frontale = $\frac{5}{2} \tau = 122\text{mm}$</p>	$\lambda_{fr1} = 4(0,47 \cdot 12,2 - 0,3 \cdot \frac{4,869}{12,2} \cdot \frac{12,2}{6,6})$ <p>$\lambda_{fr1} = 41,51$</p>	$\lambda_{fr2} = 2(0,47 \cdot 12,2 - 0,3 \cdot \frac{4,869}{12,2} \cdot \frac{12,2}{6,6})$ <p>$\lambda_{fr2} = 20,77$</p>
<u>Permeance des champs de fuite dans l'encoche :</u>	$\lambda_e = \frac{2h_1}{3(l_2+l_3)} + 0,623 + \frac{h_2}{l_1}$ <p style="text-align: center;">(3-18)</p>	<p>l_1 : largeur de l'entrée de l'encoche = 1.8mm l_2 : largeur min de l'encoche = 5mm l_3 : largeur max de l'encoche = 7.5mm h_1 : hauteur de l'ouverture de l'encoche = 9mm h_2 : hauteur dû entre la largeur max et min de l'encoche = 0.5mm</p>	$\lambda_{e1} = \frac{2 \cdot 9}{3(5+7,5)} + 0,623 + \frac{0,5}{1,8}$ <p style="text-align: center;">$\lambda_e = 1,38$</p>	<p>$\lambda_{e2} = 1,38$</p>

REBOBINAGE D'UN MOTEUR ASYNCHRON MONOPHASE

la somme des permeances	$\lambda_x = \lambda_e + \lambda_{fr} + \lambda_d$ (3-19)		$\lambda_{x_1} = 1.38 + 41.51 + 0.20$ $\lambda_{x_1} = 43,09$	$\lambda_{x_2} = 20,77 + 1,38 + 0,02$ $\lambda_{x_2} = 21,85$
<u>Réactance de l'enroulement</u>	$X_p = 4\pi f \mu_0 \frac{LN_s^2}{pq} \lambda_x$ [Ω] (3-20)	μ_0 : perméabilité absolue dans le vide : $1,26 \cdot 10^{-8}$ H / cm W : nombre de spire par phase	$x_p = 4\pi \cdot 50 \cdot 1,26 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{6,6 \cdot 1601^2}{2,4} \cdot 43,09$ $X_p = 721$ [Ω]	$X_d = 4\pi \cdot 50 \cdot 1,26 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{6,6 \cdot 1381^2}{2 \cdot 2} \cdot 21,85$ $X_d = 544$ [Ω]
<u>Réactance du circuit magnétisant :</u>	$X_m = 2 \frac{\bar{D}}{2} \cdot f \cdot \frac{\mu_0 \cdot D_i \cdot l}{k_\delta \cdot k_\mu \cdot \delta} \frac{W_{encoche}^2 \cdot K_d}{p^2}$ (3-21)	Di est le Diamètre intérieur du stator	$X_{m_1} = 2 \frac{\bar{D}}{2} \cdot 50 \cdot \frac{1,26 \cdot 10^{-8} \cdot 6,2 \cdot 6,6}{1,2 \cdot 1,1 \cdot 0,5} \cdot \frac{1601^2 \cdot 0,833^2}{2^2}$ $X_{m_1} = 49.12$ [Ω]	$X_{m_2} = 2 \frac{\bar{D}}{2} \cdot 50 \cdot \frac{1,26 \cdot 10^{-8} \cdot 6,2 \cdot 6,6}{1,2 \cdot 1,1 \cdot 0,5} \cdot \frac{1381^2 \cdot 0,966^2}{2^2}$ $X_{m_2} = 14.86$ [Ω]
<u>Réactance du circuit à vide :</u>	$X_0 = X_m + X_p$ (3-22)		$X_{01} = 49.12 + 721$ $X_{01} = 770$ Ω	$X_{02} = 14.86 + 544$ $X_{02} = 558,86$ [Ω]
<u>Courant magnétisant à vide :</u>	$I_0 = \frac{U_1}{X_m \sigma_p^2 + \left(\frac{R_p}{X_m}\right)^2}$ (3-23) Avec σ_p : coefficient de correction = $1 + \frac{X_p}{X_m}$ = 14,7 (principale)		= $\frac{220}{49.12 \cdot 14,7^2 + \left(\frac{11.83}{49.12}\right)^2}$ $I_{01} = 0.22A$	$\frac{220}{14.86 \cdot 37.60^2 + \left(\frac{34.58}{14.86}\right)^2}$ $I_{02} = 0,39A$

REBOBINAGE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE MONOPHASE

	=35,60(auxiliaire)			
<u>Impédance du circuit à vide</u>	$Z_0 = \frac{U_1}{I_0}$ (3-24)		$= \frac{220}{0,22}$ $Z_{01}=917 [\Omega]$	$= \frac{220}{0,39}$ $Z_{02} = 564,10[\Omega]$
<u>Résistance du circuit à vide</u>	$R_0 = \frac{U_1^2}{Z_0^2 - X_0^2}$ (3-25)		$= \frac{1000^2 - 965^2}{}$ $R_{01} = 262 \Omega$	$R_{02} = \frac{564,10^2 - 558,86^2}{}$ $R_0 = 76,70[\Omega]$
<u>Résistance dans les bobines</u>	$R_p = \rho_{cu} \frac{L}{S_{cu}}$ (3-26)	ρ_{cu} : Résistivité du cuivre à 20°C:0,0169Ωmm ² /m S_{cu} :Section de cuivre L :longueur totale du fil conducteur	$R_{p1} = \frac{232194}{0,3318} \cdot 0,0169 \cdot 10^{-3}$ $R_{p1}=11,83[\Omega]$	$R_{p2} = \frac{401695}{0,1963} \cdot 0,0169 \cdot 10^{-3}$ $R_{p2}=34,58[\Omega]$
<u>Résistance du circuit magnétisant</u>	$R_m = R_0 - R_p$ (3-27)		$=262 - 11.83$ $=250 [\Omega]$	$R_m = 76,70 - 34,58$ $R_m= 42,12 [\Omega]$

Tableau 9: paramètres électriques du moteur

VII. Calcul de la Capacité nécessaire pour créer le champ tournant :

Pour avoir le décalage de force Magnétomotrice suffisant pour la création d'un champ tournant,

la valeur de la capacité du condensateur de démarrage doit être suffisante :

$$C = \frac{I_{cc} \cdot \sin\varphi_{aux}}{\omega \cdot U_{aux}} \quad (3-28)$$

$$\sin\varphi_{aux} = \frac{U_1}{U_c} \quad \text{or} \quad U_c = \sqrt{U_p^2 + U_{aux}^2} \quad (3-29)$$

$$U_c = \sqrt{219,98^2 + 220^2}$$

$$= 311,1[V]$$

D'où $\sin\varphi_{aux} = 0,707$

La pulsation ω est : $\omega = 2\pi f$

d'après mesure $I_{cc} = 9,6 [A]$

$$C = \frac{9,6 \cdot 0,707}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 220}$$

$$C = 98,2[\mu F]$$

VIII. Raccordement sur plaque à borne

E.BT : Entrée de la bobine de travail

E.BA : Entrée de la bobine auxiliaire

C.C : Coupleur centrifuge

S.BT : Sortie de la bobine de travail

S.BA : Sortie de la bobine auxiliaire

REBOBINAGE D'UN MOTEUR ASYNCHROME MONOPHASE

C : Condensateur de démarrage

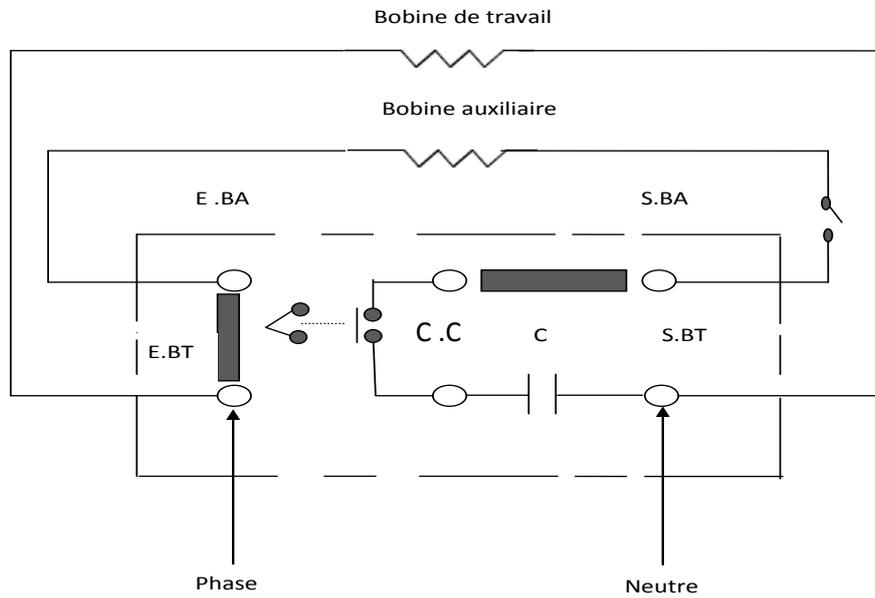


Figure 18 : connexion aux plaques à bornes

***CHAPITRE IV : BILAN GENERAL ET ESSAI DU MOTEUR
REBOBINE***

CHAPITRE IV : BILAN GENERAL ET ESSAI DU MOTEUR REBOBINE

I. Bilan de puissance

Pour une machine fonctionnant en moteur

Le schéma ci-dessous représente la transmission de la puissance à travers la machine :

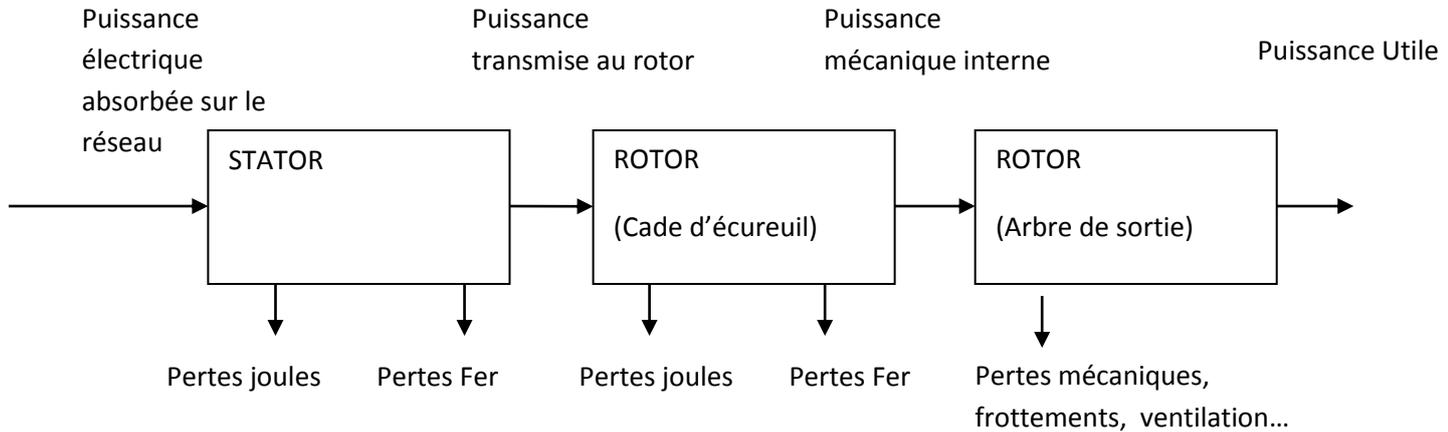


Figure 19 : bilan de puissance

Pour une machine fonctionnant en génératrice

Par rapport au cas précédent, la puissance utile devient la puissance électrique fournie au réseau et la puissance mécanique est la puissance absorbée.

- P_a : puissance absorbée = puissance mécanique fournie à la machine (en général, absorbée au niveau du rotor)
- P_u : puissance utile = puissance électrique transmise au réseau (transmise par le stator).

Les pertes sont les mêmes que pour le fonctionnement en moteur.

II. Calcul des pertes

II.1. Pertes dans le Fer :

Elle se calcule d'après la donnée : pertes par kilogramme pour une quantité et une épaisseur de tôles, venant des fournisseurs :

Dans notre cas : Pour la dent : $P_{dent}/Kg = 1,23 [W/kg]$

Pour la culasse : $P_{culasse}/kg = 0,76 [W/kg]$

Or la masse de la dent est : $m_{z1}=0,4\text{kg}$

la masse de la culasse est : $m_c=1\text{kg}$

Donc la perte de fer est : $W_{\text{fer}}=1,23.0,4 + 0,76.1$

$$W_{\text{fer}}= 1,25[\text{w}]$$

II.2. Pertes Joule :

$$P_j = \bar{2} R_p I_1^2 \quad (4-1)$$

$$I_1 = \Delta \cdot S \quad (4-2)$$

avec Δ : densité moyenne du courant en a/mm^2 : d'après le tableau des

coefficient de flux : $\Delta=4,5[\text{a/mm}^2]$ et $S=0,3318 [\text{mm}^2]$

$$I_1 = 4,5 \cdot 0,3318$$

$$I_1 = 1,5[\text{A}]$$

$$= \bar{2} \cdot 11,83 \cdot 1,5^2$$

$$= 37,64[\text{W}]$$

II.3. Pertes supplémentaires :

$$P_s = \frac{P_j}{l+l_{tt}} \cdot l_n \cdot \epsilon_{\text{moy}} \quad (4.3)$$

l_n : longueur du conducteur noyé dans le fer 66[mm]

l_{tt} : longueur d'une tête de bobine 75[mm]

ϵ_{moy} : Coefficient de majoration moyenne

Détermination de ϵ_{moy} :

1-Par la méthode de Field :

$$\epsilon_{\text{moy}} = \varphi_1 + \frac{\varphi_2}{1,5} S^2 - 1 \quad (4-4)$$

S : nombre de couche en partant du fond de l'encoche

Dans notre cas $S = 1$

REBOBINAGE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE MONOPHASE

φ_1 et φ_2 sont des coefficients donnés par le tableau de Field en fonction de h_c

Calcul du coefficient h_c

$$h_c = \frac{h}{7,6} \sqrt{\frac{f \cdot r_c}{r}} \quad (4-5)$$

Fréquence du réseau	f	[Hz]	valeurs
hauteur d'un conducteur d'une couche	h	[cm]	1,2
Largeur totale de conducteur d'une couche dans l'encoche	r_c	[mm]	6,5
Largeur d'encoche	r	[mm]	7

Tableau 10 : paramètres du coefficient h_c

$$h_c = \frac{1,2}{7,6} \sqrt{\frac{50 \cdot 6,5}{7}}$$

$h_c = 1.07$

φ_1 et φ_2 sont donnés par le tableau suivant :

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 11: φ_1 et φ_2 en fonction du nombre de couche

pour $h_c=0.86$ prenons $\varphi_1=1,02$ et $\varphi_2=hc^4/6$

$$\varphi_2 = 0.091$$

$$\epsilon_{moy} = 1,02 + \frac{0,091}{1,5} S^2 - 1$$

$$= 1,02$$

$$P_s = \frac{37,64}{66+75} \cdot 66 \cdot 1,02$$

$$\text{De (2.4.1) } P_s = 17,97[\text{W}]$$

III. Calcul des échauffements :

III.1. Échauffement des bobinages du Stator :

L'échauffement de cuivre par rapport à l'air ambiant est la somme des échauffements de cuivre, des tôles et de l'air de ventilation dont la formule est :

$$\Delta\theta_{cu} = \Delta\theta_{cf} + \Delta\theta_{fv} + \Delta\theta_{va} \quad (4.6)$$

Ou $\Delta\theta_{cf}$: échauffement du cuivre par rapport au Fer

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

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

III.2. Échauffement du cuivre par rapport au Fer

$$\Delta\theta_{cf} = \frac{Pe}{S} \left(\frac{e_1}{\lambda} + \frac{e_2}{\lambda'} \right) \quad (4.7)$$

Grandeur	Symbole	Unité	Valeur numérique
Pertes Joule supplémentaire dans la partie noyé de l'encoche	Pe	W	17,97
Surface de contact cuivre fer*	S	Cm ²	15.84
Conductivité thermique du presspahn	λ	W /degré /cm ³	$1,6 \cdot 10^{-3}$
Conductivité thermique de l'email	λ'	W /degré /cm ³	$2 \cdot 10^{-3}$

REBOBINAGE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE MONOPHASE

Epaisseur radiale de l'isolant général de l'encoche	e_1	Cm	0.025
Epaisseur radiale de l'isolant individuel de l'email	e_2	Cm	0.0025

Tableau 12: paramètres de l'échauffement $\Delta\theta_{cf}$ et leur valeur

$$\Delta\theta_{cf} = \frac{17,97}{15,84} \left(\frac{0,025}{1,6 \cdot 10^{-3}} + \frac{0,0025}{2 \cdot 10^{-3}} \right)$$

$$\Delta\theta_{cf} = 19,06[^\circ\text{C}]$$

III.3. Échauffement des tôles par rapport à l'air de ventilation :

$$\Delta\theta_{fv} = \frac{P_t}{S_r \alpha} \quad (4.8)$$

Avec P_t : Somme des pertes fer et pertes cuivre noyé.

S_r : Surface de refroidissement de l'encoche

Calcul de S_r :

$$S_r = \frac{\pi}{4} (D_e^2 - D^2) (n_v + 2) + 2\pi \frac{D}{2} l \quad (4.9)$$

Grandeur	Symbole	valeur
Surface de refroidissement de l'encoche	S_r	241.6cm ²
Diamètre extérieur du fer	D_e	102mm
Alésage du stator	D	62mm
Nombre de canal de ventilation	n_v	0
Longueur total du fer	L	66mm

Tableau 13: paramètres de l'échauffement $\Delta\theta_{fv}$ et leur valeur

*S est connu d'après la forme d'encoche $S = L \cdot H$ (H : Hauteurs totale du cuivre en contact avec les paroi d'encoche 2,4 cm)

$$S_r = \frac{\pi}{4} (10,2^2 - 6,2^2) (0+2) + 2\pi \frac{6,2}{2} 6,6$$

REBOBINAGE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE MONOPHASE

$$S_r = 231,6 \text{ cm}^2$$

Détermination du coefficient d'émission d'air α

Le Tableau de r-Roth suivant montre la variation de α en fonction de la vitesse de l'air V .

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 14: tableau de r-Roth

Cette vitesse de l'air doit être prise égale à 1 /4 de la vitesse tangentielle de rotation :

$$V = \frac{1}{4} V_t \quad (4.10)$$

$$\text{or } V_t = \frac{\pi}{60} D N = 48,69 \text{ m/s}$$

Donc $V = 12 \text{ m/s}$

D'où $\alpha = 8,45 \cdot 10^{-3}$

$$\begin{aligned} \text{Alors de (3.2) } \Delta\theta_{fv} &= \frac{19,22}{8,45 \cdot 10^{-3} \cdot 231,6} \\ &= 9,82 \text{ [}^\circ\text{C]} \end{aligned}$$

III.4. Échauffement de l'air de ventilation $\Delta\theta_{va}$:

$$\Delta\theta_{va} = \frac{W_{total}}{20 \cdot Q} \quad (4.11)$$

avec débit d'air : $Q_{air} = S \cdot V$ A.N $Q_{air} = 231,6 \cdot 12 \cdot 10^{-4} \cdot 60 = 16,67 \text{ [m}^3/\text{mn]}$

W_{total} : Perte totale du moteur = 56,86 [W]

$$\text{D'où } \Delta\theta_{va} = \frac{56,86}{20 \cdot 16,67} \quad \Delta\theta_{va} = 0,17 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Alors l'échauffement total de bobinage du stator est :

$$\text{Alors } \Delta\theta_{cu} = 19,06 + 9,82 + 0,17$$

$$\Delta\theta_{cu} = 29,05 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

III.5. Mesure de la nouvelle caractéristique du moteur asynchrone
Mesure du caractéristiques à vide et à court-circuit

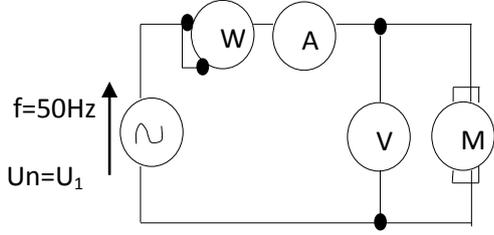
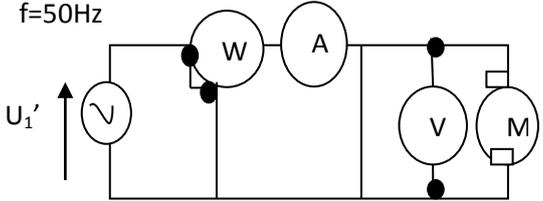
Essais	Essai à vide	Essai à rotor bloqué
Schémas de branchement		<p>Le moteur est calé</p> 
Valeurs du courant	$I_{10} = 1.1 [A]$	$I_{cc} = 1.4 [A]$
Valeurs du Tension	$U_{10} = 216 [V]$	$U_{cc} = 120 [V]$
Valeur du Puissance	$P_{10} = 174 [W]$	$P_{cc} = 250 [W]$
Valeur du courant nominale et puissance nominale	Les valeurs trouvées lors de l'essai sont déjà ramener au tension nominale.	$P_{ccn} = P_{cc} \left(\frac{U_n}{U_{cc}} \right)^2 \quad I_{ccn} = I_{cc} \cdot \frac{U_n}{U_{cc}}$ <p>il s'agit de rapporter les valeurs du courant et puissance en court-circuit à la tension nominale $U_{ccn} = 220 [V]$ d'où :</p> $I_{ccn} = 3.4 [A]$ $P_{ccn} = 724 [W]$

Tableau 15: Valeurs des paramètres électriques à vide et à court-circuit

III.6. Mesure de résistance de l'enroulement principale et de l'inductance L

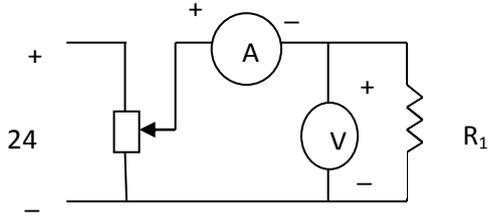
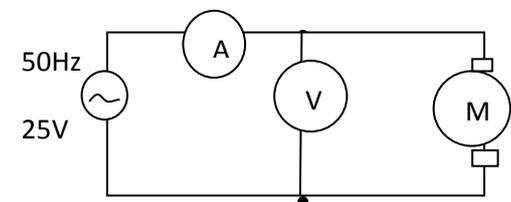
Mésure	Résistance de l'Enroulement principale	Inductance
principe	Les mesures se font sous une tension continue de 24V. On fait varier le curseur du potentiomètre et on mesure le courant et tension correspondant. La résistance s'obtient en appliquant la loi d'ohm $U=R.I$	On mesure la tension et le courant efficace aux bornes du moteur sous une tension de 25V alternatif. On applique la formule $Z = \frac{U_{eff}}{I_{eff}} = \sqrt{R^2 + (L\omega)^2}$ pour trouver l'inductance L
Schémas de branchement		
Valeur trouvé	$R_2 = 14,5 \Omega$	$U_{eff} = 25 [V]$ $I_{eff} = 0.66 [A]$ $Z_{eff} = 37,87 [\Omega]$ D'où $L = 0,11 [H]$

Tableau 16: Valeurs de résistance et de l'inductance

IV. Diagramme de cercle

IV.1. Valeurs des paramètres du diagramme de cercle avant bobinage :

A vide :

- Courant à Vide $I_{10} = 0.78 [A]$
- Facteur de puissance à vide $P_{10} = \sqrt{2} \cdot U \cdot I_{10} \cdot \cos \varphi_{10} \iff \cos \varphi_{10} = \frac{P_{10}}{U \cdot I_{10}}$
 $P_{10} = 53 [W]$
D'où $\varphi_{10} = 77^\circ$

REBOBINAGE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE MONOPHASE

A court-circuit:

- Facteur de puissance à court-circuit $P_{cc} = \sqrt{2} \cdot U \cdot I_{cc} \cdot \cos \varphi_{cc} \Leftrightarrow \cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{U \cdot I_{10}}$

$$P_{cc}=524[\text{W}]$$

$$\text{D'où } \varphi_{cc} = 70,38^\circ$$

- $I_{ccn}=3,3[\text{A}]$
Echelle : 1cm représente $\frac{1}{4}[\text{A}]$

Valeurs des paramètres du diagramme de cercle après bobinage :

A vide :

- Courant à Vide $I_{10} = 1,1[\text{A}]$
- Facteur de puissance à vide $P_{10} = \sqrt{2} \cdot U \cdot I_{10} \cdot \cos \varphi_{10} \Leftrightarrow \cos \varphi_{10} = \frac{P_{10}}{U \cdot I_{10}}$

$$P_{10}=174[\text{W}]$$

$$\text{D'où } \varphi_{10} = 65,38^\circ$$

A court-circuit:

- Facteur de puissance à court-circuit $P_{cc} = \sqrt{2} \cdot U \cdot I_{cc} \cdot \cos \varphi_{cc} \Leftrightarrow \cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{U \cdot I_{10}}$

$$P_{cc}=724[\text{W}]$$

$$\text{D'où } \varphi_{cc} = 56^\circ$$

- $I_{ccn}=3,4[\text{A}]$
Echelle : 1cm représente $\frac{1}{2}[\text{A}]$

IV.2. Lecture du diagramme de cercle

Le diagramme circulaire est un diagramme de courant sur lequel toutefois peuvent être effectués des lectures d'autres grandeurs très intéressantes comme la puissance et le couple du moteur.

Courant :

Courant absorbé I et Courant de réaction I'

Courant rotorique I_2 si on connaît le rapport de transformation K puisque : $I_2 = k \cdot I'$

Puissance :

Puissance active $P = \bar{U} \cdot I \cdot \cos\varphi$

Puissance réactive $Q = \bar{U} \cdot I \cdot \sin\varphi$

Somme des pertes fer et mécaniques : $P_m + P_f = \bar{U} \cdot I \cdot \cos\varphi_0$

Perte en court-circuit :-Perte de fer

-Perte en cuivre du stator

Couple :

puissance transmise $P_t = C \cdot W_0$, pour $W_0 = \frac{2\pi f}{p}$ un coefficient constante, C varie proportionnellement à P_t pouvant être lu sur le diagramme.

Ce tableau nous montre l'indication des paramètres sur les deux diagrammes :

	Notation sur le Diagramme	
	Figure 15	Figure 16
Puissance active	OH'	OM ₁
Puissance réactive	M ₀ M	OA
Somme des pertes fer ET mécaniques	OS'	OB''
Pertes en court-circuit	H'M _{cc}	A'M ₁
Pertes de cuivre du stator en court-circuit	S ₁ Q ₁	B'C'
Pertes de fer en court-circuit	H ₁ S ₁	A'B'

Tableau 17 : Indication des paramètres sur les diagrammes

IV.3. Courbes caractéristiques :

A partir du diagramme de cercle, On peut déduire les caractéristiques typiques du moteur Asynchrone en fonction du puissance délivrée. (Voir annexe 4 pour les valeurs des points du courbes).

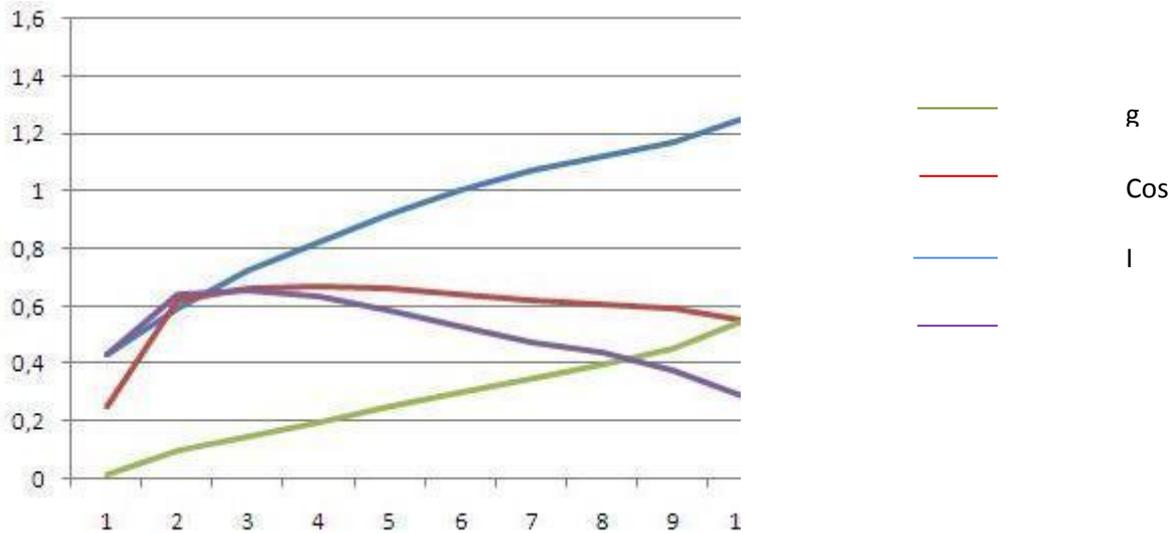


Figure 22: Courbe caractéristique du moteur avant rebobinage

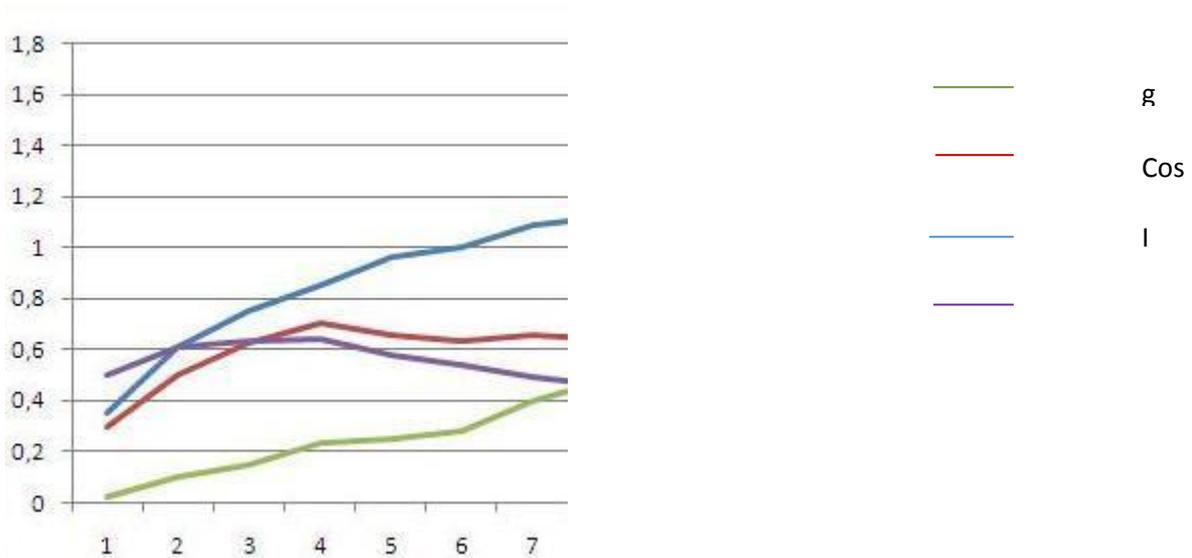


Figure 23: Courbe caractéristique du moteur après rebobinage

***CHAPITRE V : PROGRAMMATION : CALCUL DU
DIAMETRE DE FILS EMAILLES DES MOTEURS
ASYNCHRONES MONOPHASES***

**CHAPITRE V : PROGRAMMATION : CALCUL DU DIAMETRE DE FILS
EMAILLES DES MOTEURS ASYNCHRONES MONOPHASES**

I. Objectif du logiciel :

Ce logiciel permet de calculer les paramètres pour bobiner une machine asynchrone monophasé .Il inclut deux parties : pour calculer le diamètre de fil émaillé à employer et pour vérifier si le bobinage est possible.

Les grandeurs calculées sont les suivant :

- **Le flux magnétique du moteur**
- **Nombre de spire par phase et par encoche**
- **Le diamètre et la section du fil émaillé à employé**
- **La longueur et le poids du fil émaillé**
- **La section de conducteur à logger dans l'encoche**

Selon les formules suivant:

I.1. Flux d'induction mutuelle :

$$\Phi_m = K_o \frac{P_{kw}}{P} \quad (5-1)$$

I.2. Nombre de spires :

- Par phase: $N_s = \frac{E_o}{4,4 \cdot f \cdot K_d \cdot \Phi_m}$ (5-2)

- Par encoche : $N_{se} = \frac{W_p}{2pq}$ (5-3)

I.3. Diamètre du conducteur :

$$d_{cu} = \frac{4S_{enc} K_{r1}}{\pi N_{se}} \quad (5-4)$$

$$K_{r1} = 0.7$$

I.4. Section du conducteur :

$$S_{Cu} = \frac{\pi d_{cu}^2}{4} \quad (5-5)$$

I.5. Section du conducteur à loger dans l'encoche :

$$S_{cond} = \frac{N_{se} * S_{Cu}}{K_{r1}} \quad (5-6)$$

Finalement, le logiciel informe si le bobinage est réalisable ou non :

Bobinage possible :

Si $S_{cond} < S_{enc}$ avec : S_{cond} section du conducteur et S_{enc} : Section d'encoche

II. Présentation du logiciel :

Fenêtre1 :



Figure 24 : schémas du moteur

Fenêtre2 :



Figure 25 : paramètres du moteur

REBOBINAGE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE MONOPHASE

- fenêtre3 :

LES DIFFERENTS COEFFICIENTS

coefficient dependant du degre de saturation	0.63
Coefficient de bobinage	0.96
Coefficient d'entrefer	2.76
Coefficient de remplissage des paquets de tôles ferromagnetiques	0.93
coefficient de majoration des pertes pour les dents du Stator	1.8
Coefficient de remplissage de l'encoche	0.7
Coefficient de majoration des pertes pour les culasse du stator	1.4

Navigation: <<PRECEDENT, EFFACER, SUIVANT>>

Figure 26 : les différents coefficients

- fenêtre4 :

CALCUL DU FLUX MAGNETIQUE

COEFFICIENT DE FLUX	0.003
PUISSANCE UTILE DU MACHINE	0.123 [kw]
NOMBRE DE PAIRE DE POLE	2
FLUX MAGNETIQUE	[wb]

Navigation: <<<PRECEDENT, CALCULER, EFFACER, SUIVANT>>>

Figure 27 : calcul du flux magnétique

Remarques : les valeurs affichés sont choisi par défaut mais on peut les remplacer au gré de l'utilisateur

- fenêtre5 :

DIMENSIONNEMENT DE L'ENROULEMENT STATORIQUE

FLUX MAGNETIQUE	0.000743 [wb]	FORCE ELECTROMOTRICE FEM à Vole	230 [V]
FACTEUR DE DISTRIBUTION k_{dp}	0.833	FREQUENCE DU RESEAU F	50 [Hz]
NOMBRE D'ENCOCHES OCCUPE	16	NOMBRE DE SPIRES PAR PHASE W_p	1560 [Spire/phase]
NOMBRE DE PHASES	1 [monophasé]	NOMBRE DE SPIRE PAR ENCOCHE W_e	100 [Spire/encoche]
COEFFICIENT DE REMPLISSAGE	0.7	SECTION DE L'ENCOCHE	47.38 [mm²]
VALEUR THEORIQUE DU DIAMETRE	0.64863557 [mm]	NORME Diamètre du conducteur à employer d_{cu}	0.85 mm
Section du conducteur à employer SELON leu NORME	0.3318205 mm²	LONGUEUR DU FER ACTIF	56 mm
PAS POLAIRE	48.63 [mm]	POIDS DU DIAMETRE NORMALISE	2.363 g/m
LONGUEUR TOTALE DU CONDUCTEUR à EMPLOYER	222193 [mm]	POIDS DU CONDUCTEUR Cu à EMPLOYER	585 g

Navigation: <<PRECEDENT, CALCULER, EFFACER, SUIVANT>>

Figure 29 : dimensionnement de l'enroulement statorique

- fenêtre6 :

CALCUL DU SECTION DE CONDUCTEUR A LOGER DANS L'ENCOCHE

Section du conducteur à employer S_{cu}	0.3318 [mm²]	NBR DE SPIRE PAR ENCOCHE	100
COEFFICIENT DE REMPLISSAGE	0.7		
Section du conducteur à loger dans l'encoche S_{cond}	47.4 [mm²]		
section de l'encoche	47.38 [mm²]		

Bobinage réalisable!

Navigation: <<<PRECEDENT, Nouveau Calcul, Bobinage possible?, CALCUL de la Section du conducteur à loger dans l'encoche, DIMENSIONNEMENT DE L'AUXILIAIRE, Quitter, EFFACER

Figure 28 : Section du conducteur à loger dans l'encoche

CONCLUSION

Au terme de cette étude, nous avons pu améliorer l'excès anormal d'échauffement du Moteur Asynchrone Monophasé pour qu'il puisse fonctionner normalement grâce au rebobinage de la Machine. L'étude nous a permis de connaître comment concevoir et optimiser les moteurs asynchrones de faible puissance en rebobinant l'enroulement statorique.

Pourtant, la manque de matériel tel le tour à bobiner... qui est de ce fait remplacé par le tournage à la main n'est pas très optimiste pour la réalisation du travail. Aussi, puisqu'il s'agit d'un même moteur, Ces paramètres physiques limitent les valeurs à adopter lors de la rebobinage pas très loin des valeurs avant rebobinage. En perspective, il serait plus adapté de transformer ce moteur monophasé en triphasé afin de passer au démarrage sans aucune intervention d'artifices comme le condensateur, diminuant ainsi le coût de bobinage, et pour avoir des moteur électriques à performance stable et à longue vie, il est nécessaire de les entretenir périodiquement.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Dominique Ruch : Guide pratique de rebobinage des moteurs Asynchrones. octobre 1999, édition : cremine
- [2] Simon Loutzky : calcul pratique des alternateurs et des Machines Asynchrones. Année1969 Edition Eyrolles
- [3] HERIKANY Abaina Augustin : Transformation d'un Moteur Asynchrone Triphasé en monophasé.2006
- [4] TOJO TOLOTRA Heritiana : Manuel d'entretien et de dépannage des Machines électriques
- [5] A IVANOV SMOLENSKI : Machines Electriques .1983
- [6] E.MAUREIN : L'électricien d'usine.1982
- [7] Les Techniques de l'ingénieur
- [8] Guy Seguier et Francis Notelet, *Électrotechnique industrielle,*

ANNEXE 1:

Fil de cuivre émaillé :Diamètre normalisé et poids respectif

Φfil norm. D en mm	Ohm/m à20°	Section [mm ²]	Poids g/m
0.150	0.9673	0.01767	0.1571
0.180	0.6718	0.02545	0.2262
0.200	0.5441	0.03142	0.2793
0.224	0.4338	0.03941	0.3503
0.250	0.3482	0.04909	0.4364
0.280	0.2776	0.06158	0.5474
0.315	0.21930	0.07793	0.6928
0.355	0.1727	0.09898	0.8799
0.375			
0.400	0.1360	0.1257	1.117
0.425			
0.450	0.1075	0.1590	1.414
0.470			
0.500	0.08706	0.1963	1.746
0.530	0.07748	0.2206	1.961
0.560	0.06940	0.2463	2.190
0.600	0.06046	0.2827	2.514
0.630	0.05484	0.3117	2.774
0.650	0.05151	0.3318	2.953
0.670	0.04848	0.3526	3.134
0.710	0.04318	0.3959	3.520

0.750	0.03869	0.4418	3.932
0.800	0.03401	0.5027	4.474
0.850	0.03012	0.5674	5.050
0.900	0.02687	0.6362	5.662
0.950	0.02412	0.7098	6.309
1.000	0.02176	0.607854	6.990
1.060	0.01937	0.8825	7.854
1.120	0.01735	0.9852	8.768
1.180	0.01563	1.094	9.733
1.250	0.01393	1.227	10.92
1.320	0.01249	1.368	12.18
1.400	0.01110	1.539	13.70
1.500	0.009673	1.767	15.71
1.600	0.008502	2.011	17.87
1.700	0.007531	2.270	20.18
1.800	0.006718	2.545	22.62
1.900	0.006029	2.83.5	25.21
2.000	0.005441	3.142	27.93

ANNEXE 2

EQUIVALENCE ENTRE CONDUCTEUR CUIVRE ET ALUMINIUM

- Pour des T° et Intensité identique :
Diamètre de l'AL=dcu . 1,19
Section de l'AL=Scu . 1,42
Poids de l'AL=Pcu . 0,40
- Pour la même chute de tension (Conductance)
Diamètre de l'AL= dcu . 1,27
Section de l'AL= Scu . 1,63

Poids de l'AL= Pcu . 0,50

PROPRIETE PHYSIQUE DU CUIVRE POUR ETRE EMAILLE

Poids Atomiques :	63.57
Nombre atomique :	29
Poids Spécifique à 20°C :	8.89g/cm ³
Point de fusion :	1083°C
Point d'ébullition :	2310°C
Chaleur spécifiques de 18°C à 100°C :	0.093cal/g
Chaleur latente de fusion :	43.3cal/g
Coefficient de dilatation linéaire de 18°C à 100°C :	0.000017par°C
Résistivité électrique à 20°C :	0.017241mm ² /m
Coefficient de Résistivité pour T° à 20°C :	0.00393 par°C
Conductivité calorifique :	340Kcal/mh°C
Resistance à la traction de 0.04 à 0.50 mm Φ :	24 - 31Kg/mm ²
Resistance à la traction de 0.51à 3.00 mm Φ :	19 - 27 Kg/mm ²
Resistance à la traction de 3.01à 6.00 mm Φ :	16 - 24Kg/mm ²

ANNEXE 3

CARACTERISTIQUES DES FILS EMAILLES RONDS

- Résistant à haute température
- Excellente résistance aux agents chimiques
- très bonnes aptitudes au bobinage
- Norme CEI 60317-13-certification UL E 192088

Classe C - 200°C –Grade 2

Polyester-Imide + Polyamide -Imide

Utilisation :

Moteur de puissance, Groupes hermétiques,Transformateurs,electro-freins...

ANNEXE4

Tableau de caractéristique avant bobinage

$\frac{p_2}{p_n}$	$\frac{p_1}{p_n}$	Courant absorbé I	Facteur de puissance $\cos \varphi$	Glissement g	Rendement η
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 caractéristique après bobinage

$\frac{p_2}{p_n}$	$\frac{p_1}{p_n}$	Courant absorbé I	Facteur de puissance $\cos \varphi$	Glissement g	Rendement η
0,55	0,016	0,35	0,3	0,021	0,5
1,23	0,20	0,61	0,5	0,1	0,61
2,30	0,34	0,75	0,62	0,15	0,63
2,23	0,55	0,85	0,7	0,23	0,71
3,10	0,79	0,96	0,65	0,25	0,58
3,40	1	1	0,63	0,28	0,54
3,52	1,2	1,09	0,65	0,4	0,49
3,33	1,34	1,12	0,64	0,48	0,46
3,35	1,54	1,17	0,56	0,58	0,39
3,15	1,78	1,31	0,6	0,68	0,32
3,06	1,91	1,65	0,53	0,69	0,28
2,40	2	1,45	0,5	0,54	0,18

Auteur :

RAKOTOMIHAJARIVO Rova Famenontsoa

Adresse :

Lot AMB159 Ambohimarina Ambatolampy Tsimahafotsy

Téléphone:

034 12 635 11- 032 56 086 52

E-mail:

rovafameno@gmail.com

Filière:

Génie Industriel

Titre: « Calcul de rebobinage d'un moteur Asynchrone monophasé »

Mot clés : Rebobinage, Moteur Asynchrone Monophasé, enroulement, échauffement.

Nombre de page: 82

Nombre de figure : 29

Nombre de tableau : 17

Résumé

Dans cet ouvrage, l'étude porte sur le rebobinage d'un moteur asynchrone monophasé où l'échauffement est excessif à vide. Une grande amélioration a été obtenue et le moteur présente une meilleure performance après rebobinage des enroulements.

Abstract

In this work, the study carries on the rewinding of an asynchronous motor single-phase current where the heating is excessive without load. A great improvement was obtained and the engine presents a better performance after rewinding.