



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

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Machine Electrique

Réf. :

Présenté et soutenu par :
Ghamri Khaled

Le : dimanche 7 juin 2019

Technique De Bobinage D'un Moteur à Deux Vitesses

Jury :

Pr.	Titaouine bd Ennacer	Pr	Université de biskra	Encadreur
Dr.	Saadi Ramzi	MCA	Université de biskra	Président
Dr.	Rahoua Naima	MAA	Université de biskra	Examinatrice



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

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Machine Electrique

Présenté et soutenu par :
Ghamri Khaled

Le : dimanche 7 juillet 2019

Technique De Bobinage D'un Moteur à Deux Vitesses

Présenté par :

Ghamri Khaled Pr. **Titaouine AbdEnnacer** *Signature*

Avis favorable de l'encadreur :

Avis favorable du Président du Jury

Dr. Saadi Ramzi

Signature

Cachet et signature



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

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Machine Electrique

Présenté et soutenu par :

Ghamri Khaled

Le : dimanche 7 juillet 2019

Technique De Bobinage D'un Moteur à Deux Vitesses

Résumé(Arabe, anglais et Français)

نظرا الحاجة للاستعمال محرك بسرعتين بدون تغيير تليف الساكن, قمنا بدراسة تقنية على تليف الساكن بحيث نتحصل على سرعتين بتليف واحد, أي نقوم بتغيير عدد الأقطاب هذا الأخير من 6 إلى 9 أقطاب. وذلك حسب نوعية ربط الأقطاب نتحصل على محرك ذو سرعتين, سرعة صغيرة وسرعة كبيرة, مثلا 3000/1500 دورة في الدقيقة.

Due to the need to use a two-speed engine without changing the occupant's lattice, we have studied a technique on the housing of the occupant so that we can get two speeds with one coil, that is, we change the number of poles from 6 to 9 poles. Depending on the type of poles, we get a two-speed engine Large, for example 1500/3000 rpm.

En raison de la nécessité d'utiliser un moteur à deux vitesses sans changer le bobinage du stator, on a effectué une étude technique sur l'enroulement (bobinage) du stator, afin d'obtenir deux vitesses avec un seul enroulement. c'est à dire que nous modifions le nombre de pôles, on obtient un moteur à deux vitesses, petite vitesse et grande vitesse, par exemple 1500/3000 tr/min.

Mots clé : moteur asynchrone (MAS), la force magnéto motrices (FMM).

Remerciements

*Au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à notre cher professeur et encadrant **M.Titaouine Abd Ennacer** pour son suivi et pour son énorme soutien, qu'il n' cessé de nous prodiguer tout au long de la période du projet.*

Je tiens à remercier également mes professeurs de la département d'électrotechnique pour les précieuses informations qu'ils m'a prodigués avec l'intérêt et compréhension.

J'adresse aussi mes vifs remerciements aux membres des jurys pour avoir bien voulu examiner et juger travail.

Dédicaces

C'est avec un grand honneur que je dédie ce modeste travail :

A



Ma mère ;



Mes petite famille ma femme Kenza, mes deux anges Roeya et Romaiissa



Mes frères Abd Elkader, Messaoud et Ammar ;



Mes sœurs Houa et lamisse ;



Mes amies et mes collègues d'études ;



A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible.

Ghamri Khaled

Sommaire

Sommaire

Introduction générale	1
------------------------------------	----------

Chapitre I : Généralités sur les machines asynchrones

Introduction.....	3
I.1.Constitution de la machine asynchrone.....	3
I.2. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone.....	6
I.3.Régimes de fonctionnement	7
I.4.Procédés de démarrage des moteurs asynchrones.....	7
I.4.1.Moteur à rotor bobiné.....	7
I.4.2.moteur à rotor massif.....	8
I.4.3.Moteur à rotor à cage d'écureuil	8
I.5. Moteur à double cage et à encoches profondes.....	9
I.5.1. Moteur à double cage.....	12
I.5.2.Moteur à encoches profondes.....	14
I.6. Freinage des moteurs asynchrones.....	16
I.7. modification de la vitesse des machines asynchrone.....	17
I.7.1.modification de la vitesse par enroulement de pole.....	17
I.8.les avantages et les 'inconvenient de moteur asynchrone.....	18
I.9. Conclusion	19

Sommaire

Chapitre II : Modélisation des encoches et influence de l'effet pelliculaire

Introduction	20
II.1. Bobinage des machines tournantes à courant alternatif triphasés.....	20
II.2. Type de bobinage	21
II.2.1. Bobinage imbriqué à simple couche.....	21
II.2.2. Bobinage imbriqué à double couche.....	24
II.2.3. Bobinage ondulé.....	25
II.2.4. Bobinage concentrique.....	26
II.3. Les enroulements à plusieurs vitesses	28
II.4. Connexion les enroulements.....	29
II.5 Moteur à deux vitesses et un seul bobinage.....	30
II.6 Couple et puissance des moteurs à deux vitesses.....	30
II.5. Rappel sur les paramètres des enroulements des machines asynchrone.....	33
II.6. Conclusion.....	33

Chapitre III : Calcul des caractéristiques d'un moteur asynchrone

Introduction	34
III.1. Les paramètres de la machine.....	34
III.2 Calcul les dimensions principales.....	34
III.2.1 Le nombre de pôles.....	34
III.2.2 La hauteur préalable de l'axe de rotation h.....	34
III.2.3. le Diamètre extérieur D_a du stator	34
III.2.4 Le pas polaire.....	35
III.2.5 La puissance de calcul.....	35

Sommaire

III.2.6 Les charges électromagnétiques A et B_{δ}	35
III.2.7 Les valeurs préalables de α_i , K_b	35
III.2.8 La longueur de calcul de l'entrefer.....	36
III.2.9 Le rapport λ	36
III.3 La zone des dents du stator	36
III.3.1 Le pas dentaire t_1 du stator.....	36
III.3.2 Nombre d'encoche possible	37
III.3.3 Le pas dentaire.....	37
III.3.4 Nombre de conducteur efficace préalable.....	37
III.3.5 Nombre des spires d'une phase du stator.....	38
III.3.6 La charge linéaire	38
III.3.7 L'induction du champ magnétique dans l'entrefer.....	38
III.3.8 La section de fil efficace.....	38
III.3.9 La densité de courant.....	39
III.4 Calcul des dimensions de la zone de dents du stator et de l'entrefer.....	39
III.4.1 B_{z1} et B_a :	39
III.4.2 les dimensions de l'encoche réelle.....	41
III.4.3 La section de l'isolant par rapport à la masse.....	41
III.4.4 La section de partie de l'encoche occupée par les conducteurs.....	42
III.4.5 Le coefficient de remplissage de l'encoche	42
III.4.6 Calcul la largeur et la hauteur de calcul de dent	42
III.5 Calcul du rotor en court- circuit	43
III.5.1 Le nombre d'encoche du rotor	43
III.5.2 Le diamètre extérieur	43
III.5.3 Le pas dentaire	44
III.5.4 Le diamètre de l'arbre préalable	44
III.5.5 Le diamètre intérieur du noyau	44
III.5.6 Le courant dans la barre	44
III.5.7 La section de la barre	45
III.5.8 Les encoches du rotor sont le plus souvent ovales	45

Sommaire

III.5.9 La largeur admissible des dents	45
III.5.10 Les dimensions de l'encoche	46
III.5.11 La hauteur totale de l'encoche	47
III.5.12 La section de la barre	47
III.5.13 La densité du courant dans la barre	47
III.5.14 La densité du courant dans les anneaux circuitagés	47
III.5.15 Les dimensions des anneaux circuitagés d'une cage d'écureuil.....	48
III.6 Calcul du circuit magnétique	48
III.6.1 Les valeurs de l'induction dans les dents du stator et du rotor	48
III.6.2 Les inductions dans les dos du stator et rotor	48
III.6.3 La FMM dans l'entrefer	49
III.6.4 La FMM de la zone du stator et rotor	50
III.6.5 Le coefficient de saturation de la zone dentaire	50
III.6.6 Les FMM des dos du stator et du rotor	50
III.6.7 Coefficient de saturation de CM	51
III.6.8 Le courant d'aimantation	51
III.6.9 La valeur relative	52
III.7 conclusion.....	52
Conclusion générale.....	53
Annexe	
Bibliographie	

Sommaire

Liste des symboles

Liste des symboles

Ω_s	La vitesse de champ tournant
P	Nombre de paires de pôles
Z	Nombre d'encoche
$2P$	Nombre de pole
m	Nombre de phase
q	Nombre d'encoche par pole par phase
D_1	Diamètre intérieur (mm)
D_a	Diamètre extérieur (mm)
f	La fréquence en (Hz)
U	La tension en volt
K_d	Rapport entre le diamètre extérieur et intérieur
h	La hauteur préalable de l'axe de rotation
τ	Le pas polaire
P'	La puissance de calcul (la puissance électromagnétique)
$\cos\varphi$	Coefficient de puissance
η	Le rendement
K_e	Coefficient
B_δ	Les charges électromagnétiques
A	La charge linéaire
K_{b1}	Le coefficient des enroulements préalable
K_δ	Le coefficient de l'entrefer
α_i	Valeur préalable
K_b	Valeur préalable

Liste des symboles

l_{δ}	Largeur de calcul de l'entrefer
ω	La pulsation rd/sec
n_s	La vitesse de synchronisme
n_r	La vitesse de rotation
λ	Un Rapport
t_1	Le pas dentaire du stator
U_{en}	Nombre conducteur efficace
I_{nom}	Le courant nominal
$W1$	Nombre de spires
Φ	Le flux magnétique
B_{δ}	L'induction du champ magnétique dans l'entrefer
S_{ef}	La section de fil
J_1	La valeur moyenne du produit AJ des moteurs asynchrones
B_a, B_{z1}	L'induction magnétique admissible du circuit magnétique
K_r	Le coefficient de remplissage du paquet du fer
h_a	La hauteur de dent statorique
S_{is}	La section de l'isolant par rapport à lamasse
l_1	La longueur de noyau du stator
b_z	Largeur de dent
h_z	La hauteur de calcul de dent
δ	L'épaisseur de l'entrefer
d_{is}	Diamètre isolé
Z_2	Nombre d'encoche du rotor
D_2	Le diamètre extérieur du rotor
D_{ar}	Le diamètre de l'arbre

Liste des symboles

K_{ar}	Coefficient
D_j	Le diamètre intérieur du noyau
I_2	Le courant dans la barre
D_i	Coefficient
S_b	La section de la barre
b_{z2}	Largeur admissible des dents
h_{en2}	La hauteur totale de l'encoche
h'_a	La hauteur de calcul du dos du stator
h'_j	La hauteur de calcul du dos du rotor
B_{z1}	L'Induction du stator
B_{z2}	L'induction du rotor
B_a	L'induction dans les dos du stator
B_j	L'induction dans les dos du rotor
m_{c2}	Nombre de rangs
d_{c2}	Le diamètre des canaux
K_δ	Coefficient de l'entrefer
F_{z1}	La FMM de la zone dentaire du stator
H_{z1}	La densité du champ magnétique dans les dents
$K_{\mu d}$	Coefficient de saturation de la zone dentaire
L_a	La longueur de la ligne moyenne magnétique du dos du stator
L_j	La longueur de la ligne moyenne magnétique du dos du rotor
h_j	La hauteur du dos du rotor
F_a, F_j	Les FMM des dos du stator et du rotor
F_Σ	La FMM par deux poles

Liste des symboles

F_{z2}	La FMM de la zone dentaire du rotor
I_{μ}	Le courant d'aimantation
I_{μ}^*	La valeur relatif
K_{μ}	Coefficient de saturation du C M
b_{z1}	Largeur de l'encoche
b_f	L'épaisseur de l'ouverture de l'entrefer

Tableau des figures

Tableau des figures

Chapitre I : Généralités sur les machines asynchrones

Fig. I.1	Vue éclaté de la machine asynchrone	3
Fig.I.2	Stator d'un moteur asynchrone	4
Fig. I.3	Rotor bobiné	5
Fig. I.4	Rotor à cage d'écureuil	5
Fig. I.5	Rotor massif lisse	6
Fig. I.6	Rotor massif rainuré	9
Fig.I.7	Encoche du rotor et structure d'une MAS à double cage	13
Fig.I.8	Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone	14
Fig. I.9	Différentes formes d'encoche profondes	15

Chapitre II : Les différents types d'enroulements d'un moteur asynchrone

Fig. II.1	Machine tournante à courant alternatif : coupe	20
Fig. II.2	Moteur triphasé à une paire de pôles, enroulement imbriqué à simple couche.	21
Fig. II.3	Diagramme d'enroulement imbriqué à une couche, une paire de pôles, 12 encoches.	22
Fig. II.4	Diagramme d'enroulement imbriqué à une couche, une paire de pôles, 24 encoches	23
Fig. II.5	Diagramme d'enroulement imbriqué à une couche, deux paires de pôles, 24 encoches	23
Fig. II.6	Équivalent au premier diagramme d'enroulement mais pour deux tours de fil et connexion en triangle	24
Fig. II.7	Schéma simplifié de comment se répartissent les bobinages dans l'encoche	24
Fig. II.8	Enroulement imbriqué double couche. Moteur à 3 phases, 4 pôles, 36 encoches. Pas fractionnaire de 7/9 (140° électriques). Enroulements à 120°élec	25

Tableau des figures

Fig. II.9	Enroulement ondulé d'une phase. Moteur à 4 pôles et 36 encoches.	26
Fig. II.10	Enroulement concentrique pour un moteur à une paire de pôles, 12 encoches	27
Fig. II.11	Enroulement concentrique. Moteur à une paire de pôles et 24 encoches	27
Fig. II.12	Les enroulements triphasés	28
Fig. II.13	schémas de connexion d'enroulement (Dahlander)	30
Fig II.14	Couplage à puissance constante	31
Fig. II.15	Couplage à couple constant	32

Chapitre III: Calcul des caractéristiques d'un moteur asynchrone

Fig. III.1	schéma d'un enroulement concentrique à une couche avec point médiane	
------------	--	--

Introduction générale

En 1889, MECHAIL DOLIVO-DOBROVOSKI électricien Allemand d'origine russe, invente le premier moteur asynchrone triphasé à cage d'écurueil qui sera construit industriellement à partir de 1891. Sa particularité est de fonctionner avec un induit en court-circuit, sur lequel il n'a pas besoin de connexion électrique [19].

Ceci fait de lui le moteur le plus utilisé dans l'ensemble des applications industrielles; mais aussi du fait de sa facilité de mise en œuvre, de son faible encombrement, de son bon rendement, de son excellente fiabilité, de son faible coût d'achat, de sa robustesse mécanique et de la quasi-absence de son entretien. Il est utilisé dans une large gamme de puissance allant de quelques centaines de Watts à plusieurs milliers de kilowatts [9] [11].

Malgré ses bonnes qualités, il est loin d'être parfait, son principal inconvénient c'est qu'il développe au démarrage un couple relativement faible par rapport au fort courant appelé, cela implique un temps de démarrage long pouvant provoquer un échauffement nuisible pour le moteur et pour le réseau [18].

Les effets de la fréquence sur les machines asynchrones sont connus depuis longtemps. Les moteurs à encoches profondes et à double cage exploitent ce phénomène pour améliorer les conditions de démarrage. Mais la réalisation de cette dernière augmente les dimensions de la machine [18].

En raison de leur bonne fiabilité, faible cout et rendement élevé, les moteurs à induction sont les moteurs les plus utilisés dans des applications industrielles. des applications s'étendent des appareils ménagers à vitesse élevée jusqu'à l'utilisation dans l'industrie du pétrole, industrie cimentière, les véhicules électrique, les systèmes de pompage.

En effet, le moteur asynchrone est le plus utilisé pour assurer la variation de la vitesse des mécanismes industriels car il présenté l'avantage d'être robuste, de construction simple et peu couteux.

Introduction générale

Notre travail est constitué de trois chapitres ; le premier chapitre traite des généralités sur les machines asynchrones à savoir la constitution, le principe de fonctionnement, les modes de démarrage, ainsi qu'une étude des moteurs à encoches profondes et à double cage, et les modes de freinage avec la variation de la vitesse ; le deuxième chapitre représente type de bobinage et les enroulements à plusieurs vitesses avec la connexion de ces dernier.

Le troisième est réservé aux méthodes des calculs les paramètres de la conception des moteurs asynchrones, on concentre l'attention sur le calcul des moteurs asynchrone à cage, et réalisation le schéma correspondant de l'enroulement qui à étudier.

Enfin, on terminera par une conclusion générale qui récapitule l'ensemble des résultats obtenus.

Chapitre I

Généralités sur les machines
asynchrones

Introduction

Les moteurs asynchrones sont souvent appelés moteurs à induction, pour leur principe de fonctionnement basé sur l'induction électromagnétique. Ils sont constitués de deux parties principales ; une partie fixe appelée stator ou inducteur et une partie tournante appelée rotor ou induit.

Ces machines sont utilisées dans tous les domaines de puissance ; pour les grandes puissances on utilise généralement des moteurs triphasés (polyphasés) et pour les petites puissances, on utilise des moteurs monophasés qu'on branche directement au réseau urbain [1].

On trouve généralement trois types de moteurs asynchrones dont la différence réside dans leurs rotors : le rotor bobiné, le rotor à cage d'écureuil et le rotor massif. Cependant, les moteurs à cage d'écureuil sont une composante clé de la plupart des industries, du fait de leur grande robustesse, leur coût et leur simplicité d'entretien.

Néanmoins, plusieurs problèmes régissent lors de leur fonctionnement à savoir le problème de démarrage.

Dans ce chapitre on donnera un aperçu général sur ces machines triphasées.

I.1. Constitution de la machine asynchrone

Les principaux éléments constituant la machine asynchrone (en exemple à cage d'écureuil) sont illustrés dans la Figure ci-dessous :

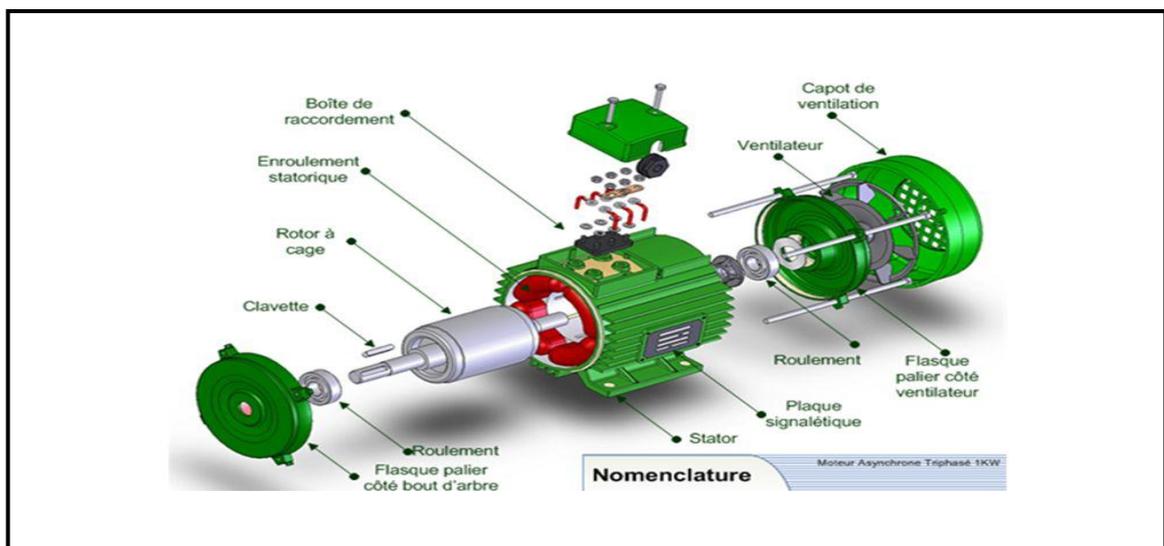


Fig. I.1. Vue éclatée de la machine asynchrone

a) **boîte à bornes** : elle renferme les bornes destinées aux différents couplages.

b) **Arbre moteur** : Il sert à transmettre le couple mécanique.

d) **Flasques** : Elles servent à positionner les paliers par rapport à la carcasse et protègent les organes internes de la machine.

c) **Paliers** : Ils assurent le guidage en rotation et limitent le déplacement axial.

e) **Ventilation** : Il sert à refroidir la machine.

f) **Stator** : Le stator consiste un empilage de tôles d'acier. Il a la forme d'un cylindre.

Les tôles comportent à leur périphérie intérieure des encoches dans lesquelles sont placés, à 120° l'un par rapport à l'autre, les enroulements d'un bobinage triphasé. Ces enroulements peuvent se raccorder en étoile ou bien en triangle [6].

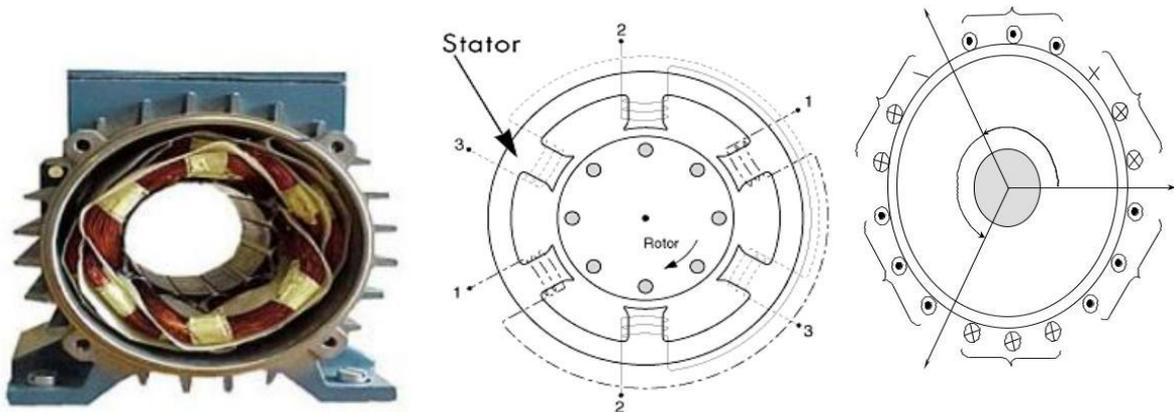


Fig.I.2. Stator d'un moteur asynchrone

g) **Rotor** : Le rotor est constitué d'une pile de tôles formant un cylindre plein ; ces tôles comportent à leurs périphéries extérieures des encoches destinées à recevoir les conducteurs. Un mince entrefer sépare le rotor du stator [6].

Les encoches rotoriques sont inclinées par rapport à l'axe longitudinal pour diminuer les harmoniques supérieures d'espace et réduire la réactance liée à la position de la variation angulaire rotor/stator.

On reconnaît trois types de rotor :

- le rotor bobiné : Aussi appelé rotor à bague, l'enroulement triphasé relié en étoile ou en triangle, est connecté à trois bagues qui le rendent accessible de l'extérieur par l'intermédiaire des balais. On peut ainsi le court-circuiter comme cela se produit en

marche normale, insérer des résistances dans le circuit lors du démarrage et dans certains cas spéciaux de fonctionnement ou y raccorder un convertisseur de courant à thyristors afin de régler le courant de démarrage et la vitesse en marche.

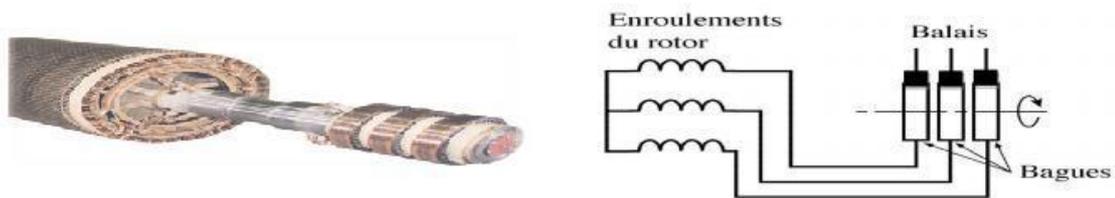


Fig. I.3. Rotor bobiné

- Le rotor à cage d'écureuil : Les encoches de ce type de rotor comportent des barres en cuivre ou en aluminium réunies (court-circuitées) entre elles par des anneaux. Dans le cas des moteurs de faible et de moyenne puissance, les cages sont en aluminium coulé sous vide partiel et pression. Ce procédé permet d'éviter la présence néfaste de bulles d'air dans les barres et d'obtenir en une seule opération les barres, les anneaux de chaque extrémité et parfois même les ailettes de ventilation [11].

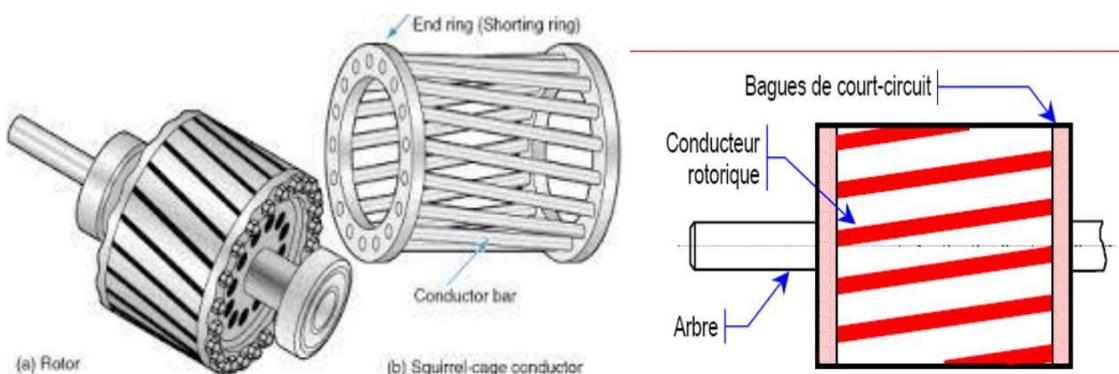


Fig. I.4. Rotor à cage d'écureuil

- Le rotor massif : Le rotor cylindrique massif est formé d'un noyau cylindrique en matériau ferromagnétique dont la présence est très intéressante et les performances du moteur sont optimales lorsque le diamètre de ce noyau vaut environ 80 à 90% de celui du rotor [14].

L'utilisation d'un rotor massif, en acier 35CD4, est l'alternative la plus simple et la moins chère pour des applications à grandes vitesses. Elle permet également d'obtenir des performances mécaniques avec une très bonne fiabilité. Toutefois ces avantages ont un impact sur le rendement qui, est en dessous des autres types de moteurs asynchrones.

Ces moteurs sont principalement utilisés pour l'entraînement de compresseurs et de pompes [15].



Fig. 1.5. Rotor massif lisse

I.2. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone

Les courants statoriques de pulsation ω_s créent un champ tournant à la vitesse dite de synchronisme $\Omega_s = \frac{\omega_s}{p}$ où p le nombre de paires de pôle du moteur. Ce champ traverse le bobinage rotorique et y induit des forces électromotrices (f e m). ces forces produisent des courants vuque le bobinage de rotor est en court-circuit. L'action du flux tournant sur les courants qu'il a lui-même induits crée le couple ; d'où son nom de machine induction [1].

Si le rotor tourne à la vitesse de synchronisme Ω_s , soit aussi rapidement que le flux tournant, le flux à travers chaque bobine rotorique sera constant .les forces électromotrices induites n'existant plus au rotor donc plus de courant ni de couple. Il faut donc que Ω_r vitesse de rotation du rotor défère de Ω_s vitesse de synchronisme pour qu'il y ait un couple ; d'où le nom de machine asynchrone [1].

Le fonctionnement du moteur est caractérisé par l'écart relatif entre ces deux vitesses : il s'agit du glissement g défini par : $g = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s}$

On montre que la pulsation des courants rotoriques est $g\omega_s$.de plus quel que soit g , les champs dus aux courants statoriques et rotoriques tournent à la même vitesse, par rapport au stator. En pratique, ils se composent pour créer dans l'entrefer le flux tournant réel .l'interaction entre le stator et le rotor crée un couple.

Au synchronisme, $g = 0$, le couple est nul. Au démarrage, $g=1$, il vaut C_d et il est au maximum pour g_{cmax} .

La zone de fonctionnement normal de la machine pour une alimentation

à tension et fréquence fixes est comprise entre $g = 0$ et $g = g_n < g_{cmax} \cdot g_n$ est le glissement nominal du moteur donné par le constructeur. il est généralement de 1.5 à 5% [1].

I.3.Régimes de fonctionnement de la MAS

Si $0 \leq \omega r \leq \omega s$: C'est-à-dire que la vitesse de la machine est comprise entre 0 (arrêt) et la vitesse de synchronisme. Les fondamentales de la physique indique que, dans ce cas, le champ du stator tend à accélérer le rotor pour l'amener au synchronisme, la machine fonctionne en moteur [13].

Si $g < 0$ et $\omega r > \omega s$: Le champ tournant statorique tendra alors à ramener la vitesse de l'arbre au synchronisme, un fonctionnement à glissement négatif suppose, par conséquent, la machine reçoit de l'énergie sur son axe conformément à nos notations, la puissance mécanique P_m et le couple C_{em} sont donc tous les deux négatifs. Il en résulte que la machine fonctionne en

Si $g > 1$ et $\omega r < 0$ et: Dans ce cas le rotor tourne en sens inverse du sens du champ tournant. Le champ statorique tend à amener le rotor à tourner dans son propre sens, on dit alors que la machine fonctionne en frein [13].

I.4.Procédés de démarrage des moteurs asynchrones

La machine asynchrone de par sa large exploitation dans les différents domaines (industriel, urbain ...etc.) présente les inconvénients nuisibles à son fonctionnement, tel est le cas du démarrage.

Quel que soit le type de moteur il est nécessaire, au démarrage, de limiter le courant d'appel et de conserver un couple de démarrage suffisamment important.

Les procédés sont évidemment différents pour les moteurs à rotor à cage d'écureuil, à rotor bobiné et à rotor massif [2].

I.4.1.Moteur à rotor bobiné

Dans un rotor bobiné, l'enroulement triphasé, relié en étoile ou en triangle, est connecté à trois bagues qui le rendent accessible de l'extérieur par l'intermédiaire des balais et permettent d'insérer des résistances dans le circuit du rotor lors du démarrage.

On insère donc au rotor des rhéostats de démarrage qui permettent d'augmenter le couple de démarrage tout en diminuant le courant appelé. Dans l'hypothèse d'un couple

résistant constant, on insère une résistance de manière à amener le couple de démarrage en C_d supérieur au couple résistant [2].

❖ **Avantages**

- ✓ Son courant de démarrage est moins élevé que celui du moteur à cage, lorsqu'on intercale trois résistances extérieures dans l'enroulement triphasé du rotor.
- ✓ Son couple de démarrage est alors supérieur à celui du moteur à cage ordinaire.
- ✓ Sa vitesse peut être réglée au moyen de résistances extérieures [7].

❖ **Inconvénients**

- ✓ Plus onéreux et moins robuste qu'un moteur à cage.
- ✓ Enroulement rotor plus vulnérable.
- ✓ Entretien des bagues et balais [2].

❖ **Emplois**

- ✓ Ce démarrage extrêmement souple (possibilité d'ajuster la valeur et le nombre des résistances) convient pour les machines démarrant à pleine charge et dans le cas où les pointes des courants doivent être de faible amplitude. Dans tous les cas difficiles nécessitant des démarrages longs et fréquents aux machines démarrant une mise en vitesse progressive [3].

I.4.2.moteur à rotor massif

Pour améliorer les caractéristiques des moteurs à rotor massif, plusieurs méthodes ont été suggérées telles que: prolongement du rotor ; prévoir des bagues (anneaux) aux extrémités du rotor, ces bagues sont constituées par un très bon matériau conducteur tel que le cuivre ; couvrir le rotor avec une couche très mince composée de cuivre, de fer et de cobalt ; creuser des rainures longitudinales parallèles à l'axe du rotor massif [14].

On distingue donc deux types de moteurs à rotor massif à savoir :

- ✓ Le moteur à rotor massif lisse : qui possède un couple de démarrage meilleur que celui du moteur asynchrone classique, mais ses caractéristiques électriques se dégradent considérablement aux faibles glissements et les raisons sont à la fois électriques et magnétiques.
- ✓ Le moteur à rotor massif rainuré (amélioré) qui présente une géométrie très complexe. L'analyse des courants et des champs induits dans le rotor dépend de plusieurs facteurs liés aux paramètres géométriques, électriques et magnétiques. Le rainurage

modifie considérablement la réluctance du circuit magnétique constitué par le fer le long de la rainure et de l'air à travers l'encoche. Les rainures augmentent cette réluctance et par conséquent, améliorent les performances du moteur [14].

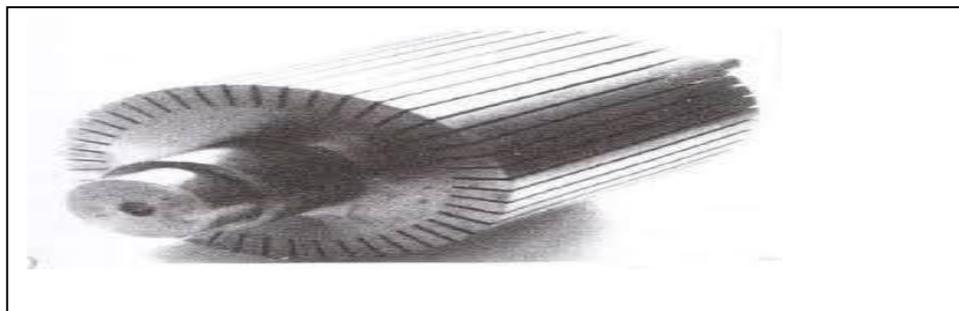


Fig. I.6. Rotor massif rainuré

I.4.3. Moteur à rotor à cage d'écureuil

Pour ce type de moteur, le démarrage s'effectue selon plusieurs procédés :

➤ **Démarrage direct**

C'est le principe de démarrage le plus simple, les enroulements du stator sont couplés directement sur le réseau, le moteur démarre et atteint sa vitesse nominale [3].

❖ **Avantages**

- ✓ Simplicité de l'appareillage.

❖ **Inconvénients**

- ✓ Appel de courant très important : $I_d = (4 \text{ à } 8) I_n$.
- ✓ Démarrage brutal.

❖ **Emplois**

Moteurs de moyenne et faible puissances ($P \leq 1,5 \text{ kW}$) ou dans le cas des moteurs monophasés.

➤ **Démarrage étoile triangle**

Il s'applique aux moteurs dont le stator est destiné à un couplage triangle. Au démarrage le stator est couplé en étoile, si bien que la tension par enroulement est $\frac{1}{\sqrt{3}}$. Le couple est donc trois fois plus faible que lorsque le stator est connecté en triangle et l'appel du courant au réseau est également divisé par 3. Lorsque le moteur a atteint une vitesse suffisante on passe automatiquement au couplage triangle qui ramène le moteur sur sa caractéristique normale [2].

❖ **Avantages**

- ✓ Appel de courant en étoile réduit à un tiers de valeur en direct.
- ✓ Appareillage simple [3].

❖ **Inconvénients**

- ✓ Couple réduit au tiers de sa valeur en direct.
- ✓ Coupure entre les positions étoile et triangle d'où apparition de phénomènes transitoires [3].

❖ **Emplois**

- ✓ Machines démarrant à vide : machine à bois, ventilateurs, machines où outil à un couple résistant faible [3].

➤ **Démarrage par résistances statoriques**

Ce démarrage se fait en plaçant temporairement un ou plusieurs groupes de résistances en série avec le stator. Ce système fonctionne suivant le principe de chute de tension dans les résistances insérées en série avec le stator. A la fin du démarrage. Les résistances seront court-circuitées.

❖ **Avantages**

- ✓ Le courant est fortement réduit au moment du démarrage.
- ✓ Lorsque le moteur s'accélère, le courant dans les résistances statoriques diminue ceci entraîne une réduction de la chute de tension aux bornes de ces résistances donc un meilleur couple qu'avec une tension constante comme c'est le cas dans un montage étoile/triangle [3].

❖ **Inconvénient**

- ✓ Au décollage la tension statorique U_2 est divisé par K , l'appel de courant est divisé par K alors que le couple est divisé par K . L'appel de courant est proportionnellement moins réduit que le couple [3].

❖ **Emplois**

Il convient aux machines dont le couple de démarrage est plus faible que le couple nominal de fonctionnement. C'est le cas des machines à bois, machines à outils (celles utilisées en médecine), ventilateurs. On peut adapter la valeur des résistances au couple de démarrage à obtenir [3].

➤ Démarrage par autotransformateur

Dans ce mode de démarrage, le stator est relié à un autotransformateur qui permet d'effectuer un démarrage sous tension variable.

Dans une première étape l'autotransformateur joue son rôle normal. Si son rapport de Transformation vaut ($m < 1$), la tension est multipliée par m , le couple par m^2 , et le courant primaire aussi puisque l'impédance vue du primaire est divisée par m^2 .

Dans une deuxième étape on ouvre la connexion du neutre : on est ramené au cas d'une inductance en série, qui peut être éliminée sans coupure [2].

❖ Avantages

- ✓ Possibilité de choisir le couple de démarrage.
- ✓ Réduction dans le même rapport, du couple et de l'appel de courant.
- ✓ Les phénomènes transitoires sont supprimés [3].

❖ Inconvénient

- ✓ Prix d'achat élevé [3].
- ✓ Encombrement [2].
- ✓ Ce mode de démarrage n'est possible que lorsqu'on a un couple résistant faible au démarrage, dans le cas contraire le moteur ne démarrera pas. Cette solution est également abandonnée au profit de solutions électroniques d'un coût inférieur [9].

❖ Emplois

- ✓ Ce système présente le plus d'avantage technique. Il est utilisé, en général, pour les machines de puissance supérieure à 100 W et convient bien pour les compresseurs rotatifs à piston, les pompes, les ventilateurs [3].

➤ Démarrage par gradateur

Un gradateur à thyristors permet de faire varier progressivement la tension en réglant l'angle de retard de l'amorçage. La consigne de démarrage permet de régler la pente d'un signal en forme de rampe. Cette consigne est étalonnée en secondes. A la fin du démarrage, le stator du moteur est sous tension nominale, les thyristors sont alors en pleine conduction. Pour une charge donnée, le réglage de la pente permet de faire varier la durée de démarrage, donc le temps de mise en vitesse progressive de l'association moteur/charge.

Ce type de démarrage est moins encombrant et moins couteux par rapport à celui par autotransformateur, mais le grand inconvénient est la présence des harmoniques qui peuvent avoir un impact sur le comportement du moteur et sur le réseau électrique.

➤ **Démarrage rotorique**

L'augmentation de la résistance des moteurs à cage ne s'effectue que par leurs nouvelles formes qu'on appelle moteurs à double cages et moteurs à encoches profondes. Cette façon de procéder se verra tous au long de notre étude [3].

➤ **Avantages**

- ✓ L'appel de courant est pour un couple de démarrage donné le plus faible par rapport à tous les autres modes de démarrage.
- ✓ Possibilité de choisir par construction, le couple et le temps de démarrage.

➤ **Inconvénients**

- ✓ Complications de fabrication.

Augmentation du volume de la machine.

I.5.Moteur à double cage et à encoches profondes

Lorsque les conditions de démarrage sont difficiles (couple exigé important), on utilise le moteur à double cage et celui à encoches profondes. Ces moteurs robustes viennent pallier les inconvénients des autres moteurs, des conditions de démarrage plus favorables sont obtenues grâce au phénomène dit effet pelliculaire ou effet couronne ou encore effet de peau qu'utilisent les machines à encoches profondes ou la différence de résistances et réactances des barres des moteurs à double cages.

I.5.1. Moteur à double cage

C'est un moteur à rotor en court-circuit à deux cages. Son stator est identique à celui du moteur ordinaire, mais son rotor est à double cage d'écureuil. On distingue à cet effet :

Une cage extérieure : située plus près de l'entrefer est en matériaux à grande résistivité tel que le laiton, le bronze ou l'aluminium. Elle possède une faible dispersion magnétique (réactance de dispersion faible) [2].

Une cage intérieure : est en matériaux à faible résistivité tel que le cuivre. Elle possède une grande dispersion magnétique, sa réactance de dispersion est de beaucoup supérieurs à celle de la cage extérieure.

Les deux cages sont séparées l'une de l'autre par des fentes étroites des encoches. Elles peuvent avoir un anneau de court-circuitage commun, ou chacune avec un anneau de court-circuit propre. Pratiquement, on utilise les moteurs à anneaux séparés, car les deux cages s'échauffent de manière différente au démarrage donc elles peuvent s'allonger librement et indépendamment [3].

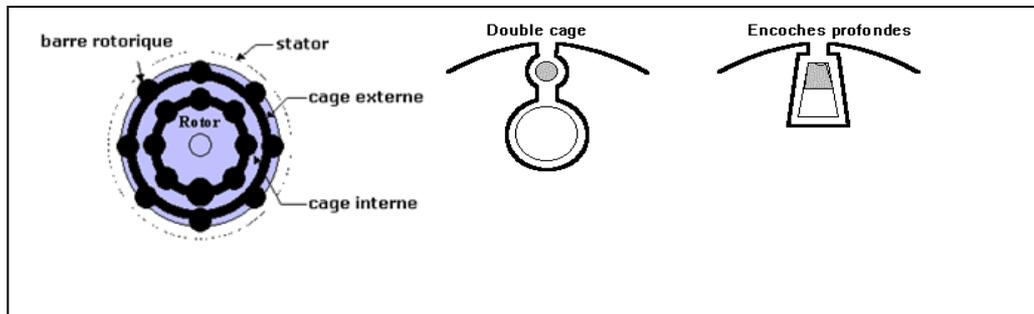


Fig.I.7.Encoche du rotor et structure d'une MAS à double cage

➤ **Principe de fonctionnement :**

Au démarrage, la fréquence du courant rotorique est égale à la fréquence f du réseau d'alimentation. Ce courant se répartit de façon inversement proportionnelle aux réactances des cages, qui sont alors très grandes devant leurs résistances. Dans ces conditions, c'est la cage externe qui est parcourue par le maximum du courant et comme sa résistance est relativement grande, l'appel de courant est réduit et le couple est augmenté. C'est pour cette raison qu'elle est appelée cage de démarrage [2].

Lorsque le moteur atteint son régime de fonctionnement nominal, caractérisé par un faible glissement et une fréquence basse du courant rotorique (f), ce sont les résistances qui contrôlent la répartition du courant, ce qui favorise la cage interne de faible résistance. C'est pour cette raison qu'elle est appelée cage de travail.

Il est également intéressant de représenter la caractéristique mécanique de ce moteur. A cet effet, on peut la construire point par point (Fig. I.8.) en faisant la somme des couples développée par les deux cages [11].

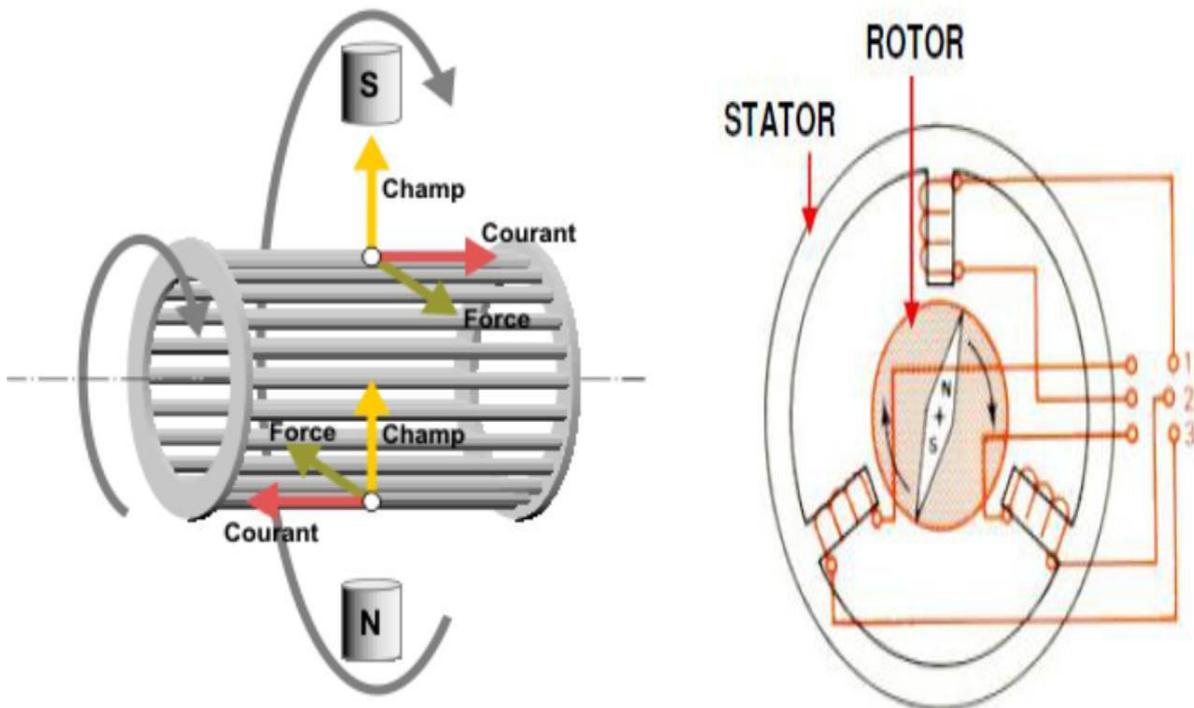


Fig.I.8. Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone

I.5.2 Moteur à encoches profondes :

Le rotor à double cage est difficile à construire, donc d'un coût élevé. On peut pallier cet inconvénient, tout en gardant une partie des avantages de ce type de rotor, en construisant une cage rotorique unique avec des barres très plates s'enfonçant profondément dans le circuit magnétique. Le principe se base sur l'effet pelliculaire. Pour que cet effet soit sensible il faut que le moteur ait des encoches suffisamment profondes [2].

❖ **Définition de l'effet pelliculaire :**

Ce phénomène est couramment utilisé afin d'améliorer les caractéristiques de démarrage (augmentation du couple, diminution du courant) pour des glissements compris entre 1 et 0.5 sans pénaliser le fonctionnement permanent par des pertes ohmiques. Il repose sur le déplacement du courant à la périphérie d'un conducteur quand la fréquence augmente. Un accroissement de la résistance apparente rotorique très marqué au décollage ayant pour effet de limiter le courant d'une part et d'augmenter le couple de démarrage d'une autre part, puis moins prononcé au fur et à mesure que le moteur prend de la vitesse[11].

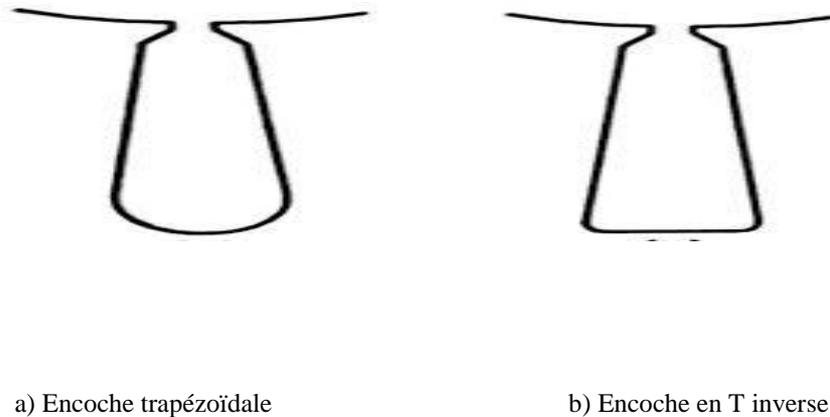


Fig. I.9 Différentes formes d'encoche profondes

En première approximation, à partir de l'entrefer, le courant alternatif n'existe que sur une profondeur appelée profondeur d'effet pelliculaire :

: Profondeur de pénétration du champ alternatif en mètre [m] ;

: Résistivité du matériau de la cage en Ohm-mètre [Ω .m] ;

: Perméabilité du matériau de la cage en Henry par mètre [H/m] ;

f : Fréquence du champ alternatif en Hertz [Hz] ;

: Pulsation du courant dans les encoches [rad/s] ;

I.6.Freinage des moteurs asynchrones

Pour exécuter correctement le processus de production, de nombreuses installations exigent un freinage rapide et progressif du moteur [3].

Le freinage peut être réalisé mécaniquement ou électriquement, mais le freinage électrique présente plusieurs avantages, surtout lorsqu'il faut régler de façon précise l'instant d'arrêt et la progressivité de l'opération [3].

On connaît trois méthodes principales de freinage électrique des moteurs asynchrones à savoir : le freinage par contre-courant ou régime de frein électromagnétique, freinage en génératrice asynchrone et le freinage par injection de courant continu ou régime de freinage dynamique.

➤ **Freinage par contre-courant**

Ce mode de freinage est obtenu par inversion de deux phases. Au moment de l'inversion, le glissement vaut presque deux, il se réduit ensuite rapidement sous l'effet du couple inverse par rapport au sens de rotation. Généralement, un dispositif électrique de coupure déconnecte le moteur du réseau au moment du passage à la vitesse nulle ($=1$). Le couple de freinage moyen est, en général, supérieur au couple de démarrage pour des moteurs asynchrones à cage. La variation du couple de freinage dépend fortement de la conception de la cage rotorique. ce mode de freinage implique un courant absorbé important, approximativement constant et légèrement supérieur au courant de démarrage [9].

➤ **Freinage par injection de courant continu**

Dans ce mode de freinage, le moteur asynchrone est couplé au réseau et le freinage est obtenu par coupure de la tension alternative et application d'une tension continue au stator. Quatre couplages des enroulements sur la tension continue peuvent être réalisés [9].

➤ **Freinage en génératrice asynchrone**

Ce mode de freinage s'applique aux moteurs multi-vitesses lors du passage à la vitesse inférieure ou aux moteurs alimentés en fréquence variable lorsque celle-ci descend. Il est impossible d'obtenir l'arrêt complet du moteur par ce procédé [3].

➤ **Freinage mécanique**

Des freins électromagnétiques (excitation en courant continu ou en courant alternatif) peuvent être montés à l'arrière des moteurs. Ils peuvent venir en complément d'un freinage électrique pour l'arrêt complet du moteur et son maintien en position sans alimentation. Ces freins sont toujours à manque de courant, c'est à dire que le freinage se fait en l'absence d'alimentation du frein [3].

I.7. Modification et variation de la vitesse des MAS

Le moteur alimenté par des tensions de fréquence f . Le moteur triphasé ayant $2P$ pôles tourne normalement à une vitesse

Peu inférieure à la vitesse synchrone

Pour changer la vitesse à f donné il faut changer le nombre de pôles.

Pour obtenir une variation continue de il faut faire varier sans discontinuité

Le glissement ou, ce qui est préférable la fréquence ce d'alimentation.

I.7.1 Modification de la vitesse par enroulement de pole

On peut modifier le nombre de pôles $2P$ d'un enroulement en modifiant les connexions de ses bobines. La multiplication ou la division par deux de $2P$.

On peut construire aussi des moteurs à quatre vitesses grâce à deux enroulements statorique séparé, donnant chacun deux vitesses.

Remarque :

Les moteurs à plusieurs vitesses sont des moteurs à cage

❖ **Variation de la vitesse :**

Puisque la vitesse est égale à $n = \frac{60f}{p}$ pour la faire varier de façon continue on peut

- Soit faire varier le glissement g .
- Soit faire varier la fréquence f d'alimentation

❖ **Variation du glissement :**

➤ **Pour le moteur à cage :**

La seule façon de faire varier le glissement g c'est de varier la tension d'alimentation

➤ **Les inconvénients de cette méthode :**

- L'intervalle de variation de la vitesse est limité
- En augmentant le g on augmente les pertes joule rotorique
- Instabilité de la machine

➤ **Pour le moteur à rotor bobiné :**

La façon la plus simple de faire varier la vitesse en charge du moteur à rotor bobiné est d'utiliser un rhéostat secondaire

➤ **Les inconvénients de cette méthode :**

- L'intervalle de variation de la vitesse est limité.
- En augmentant le g on augmente les pertes joule rotorique

❖ **Réglage de la vitesse par convertisseur de fréquence**

Généralement dans les systèmes d'entraînement a vitesse variable on utilise des

convertisseur de fréquence notamment les onduleurs MLI les cyclconvertisseurs

I.8. Les avantages et les inconvénients du moteur asynchrone

➤ **Les avantages :**

Comparé au moteur shunt, le moteur asynchrone a l'avantage d'être alimenté directement par le réseau triphasé. Son prix d'achat est moins élevé, il est beaucoup plus robuste car il ne nécessite pratiquement pas d'entretien.

Ses deux qualités fondamentales (prix et solidité) résultent du fait qu'il n'a pas de collecteur.

En effet, le collecteur est un organe coûteux et fragile qui nécessite un entretien fréquent :
Changement des balais.

➤ **Les inconvénients :**

A l'exception du démarrage et de l'inversion du sens de marche que l'on peut résoudre de façon satisfaisante, le moteur asynchrone a des performances très médiocres par rapport à celles du moteur shunt. En effet jusqu'à ces dernières années, l'entraînement idéal était réalisé par le léonard formé un moteur shunt alimenté par un convertisseur de tension.

➤ Domaine d'utilisation :

Les machines asynchrones sont les machines alternatives les plus répandues en les utilise dans nombreux dispositifs :

- Les stations de pompage.
- Les appareils de levage.
- Les ascenseurs.
- Les machines outils de base pour le travail des métaux ou du bois.
- Les dispositifs de manutention comme les tapis roulants.
- La ventilation des locaux climatiques.

I.9 Conclusion

Dans ce premier chapitre on a pu présenter quelques généralités sur les machines asynchrones de par leurs constitutions, leurs principes de fonctionnement, leurs modes de démarrage, leurs modes de freinage et la variation de leurs vitesses. On a pu s'appuyer aussi sur quelques aménagements et constructions du rotor de ces machines à savoir le rotor massif, le rotor à bague le rotor à d'écureuil (à encoches profondes et double cage).

Chapitre II

**Les différents types
d'enroulements d'un moteur
asynchrone**

Introduction :

Les différents type de moteur asynchrone ne se distinguent que par le rotor dans tous les cas le stator est reste identique, au moins dans son principe. Il est constitué d'un enroulement réparti dans les encoches du circuit magnétique statorique dont l'objectif de crée un champ tournant. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans les quelles sont découpées des encoches parallèle à l'axe de la machine afin de canaliser le flux magnétique.

II.1 Bobinage des machines tournantes à courant alternatif triphasés

Les bobinages décrits ici sont ceux que l'on rencontre au stator des machines synchrones et asynchrones, ainsi qu'au rotor des machines asynchrones à bagues. Ils sont destinés à créer, lorsqu'on les alimente par un système de tensions ou de courants triphasés, un champ magnétique tournant. On pourrait naturellement transposer les mêmes principes à des schémas développés à plat, pour créer un champ magnétique glissant, utilisable dans des moteurs linéaires par exemple. Les aspects qualitatifs, puis quantitatifs, et enfin pratiques sont successivement abordés. Pour une meilleure compréhension, la plupart des schémas sont représentés développés, de manière à simplifier la représentation des connexions frontales. Quant au schéma en coupe, il se présente de manière générale comme sur la figure (II.1). [5]

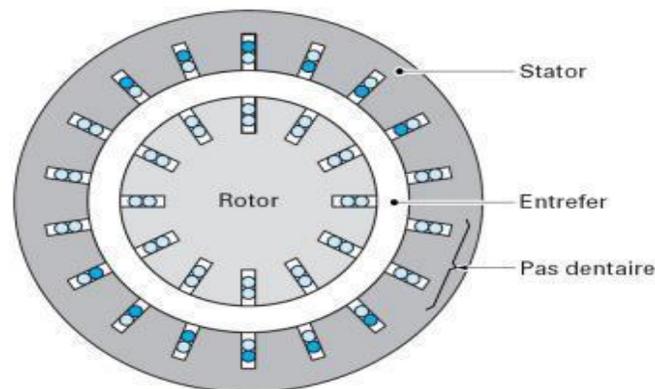


Fig. II.1 Machine tournante à courant alternatif : coupe

II.2 Type de Bobinage

Trois types de bobinage de stator sont habituellement utilisés : l'imbriqué, le concentrique et l'ondulé, chacun d'entre eux présentant ses propres avantages. L'enroulement imbriqué s'utilise pour le bobinage de moteurs à partir quelques dizaines de kW. Dans les petits moteurs asynchrones on emploie généralement l'enroulement concentrique, surtout quand le bobinage est mécanisé. L'enroulement ondulé est indiqué pour les moteurs à bagues. Les enroulements imbriqué et ondulé sont le plus souvent à double couche, de manière que chaque encoche contient deux côtés de bobine et le nombre de conducteurs par encoche doit forcément être pair.

Pour utiliser le moteur sous plusieurs tensions différentes, on peut répartir les bobines en un certain nombre de groupes qu'on peut relier en série ou en parallèle. Dans ce dernier cas on s'y réfère comme des chemins en parallèle.

II.2.1 Bobinage imbriqué à simple couche

Dans ce type de bobinage, chaque bobine qui forme l'enroulement occupe deux encoches. Alors le nombre d'encoches doit être multiple de deux fois le nombre de phases. Le nombre d'enroulements par phase est égal au nombre de paires de pôles.

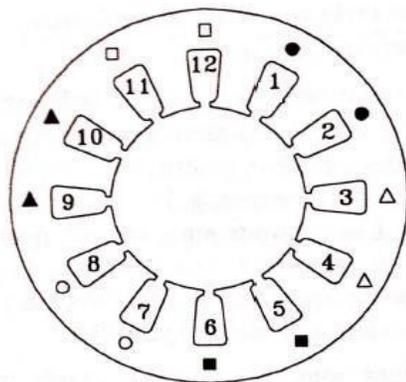


Fig. II.2 Moteur triphasé à une paire de pôles, enroulement imbriqué à simple couche.

Une paire de pôles indique qu'il doit y avoir un seul enroulement par phase. Dans le moteur précédent, le nombre d'encoches étant 12, on trouve qu'il doit y avoir quatre encoches par phase donc deux bobines par enroulement. Pour que le pas d'encoche (distance entre deux côtés d'une même bobine) soit « normal » ou « entier », il faut que si le premier côté de la première bobine de la phase A est dans l'encoche 1, le deuxième côté soit dans l'encoche 7. La seconde bobine de cette phase occupera donc les phases 2 et 8, et ainsi de suite.

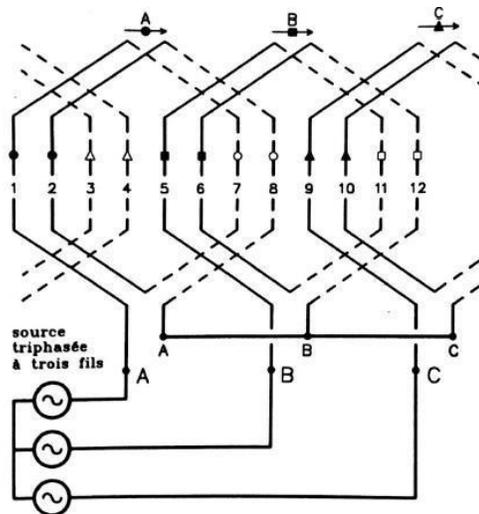


Fig. II.3 Diagramme d'enroulement imbriqué à une couche, une paire de pôles, 12 encoches.

Si c'était un moteur avec le même nombre de pôles et phases, mais 24 encoches au lieu de 12, les encoches correspondant à la phase A seraient 1 et 13, 2 et 14, 3 et 15 et 4 et 16, car maintenant on aurait quatre bobines par enroulement soit huit encoches par phase.

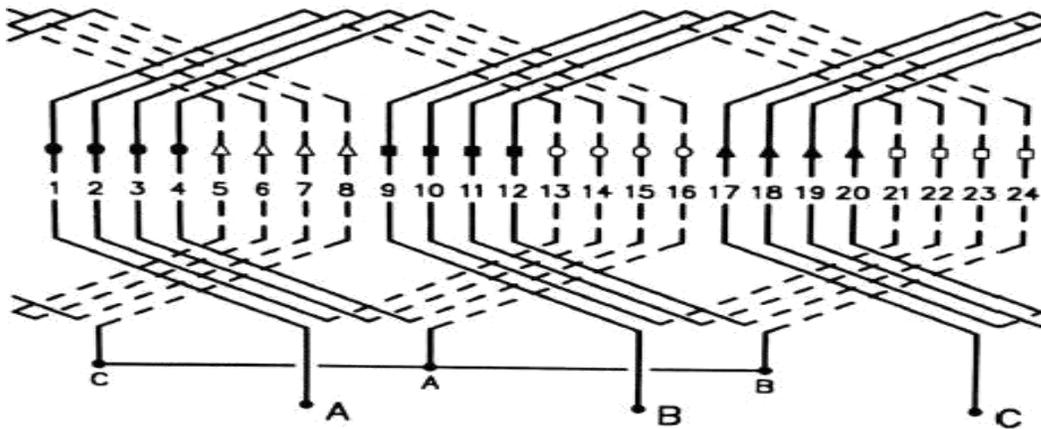


Fig. II.4 Diagramme d'enroulement imbriqué à une couche, une paire de pôles, 24 encoches.

Par contre, dans un moteur à quatre pôles, il doit y avoir deux enroulements par phase. Pour le même stator à 24 encoches, on aura donc 8 encoches par phase donc 4 encoches par enroulement (la moitié que pour un moteur à une paire de pôles).

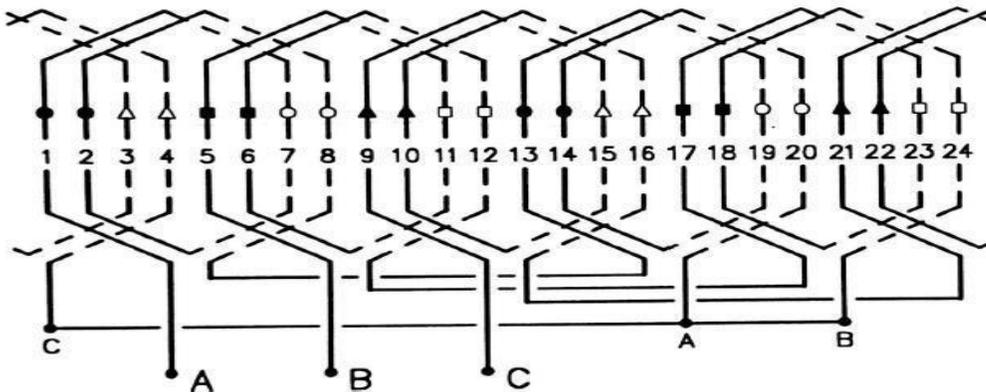


Fig. II.5 Diagramme d'enroulement imbriqué à une couche, deux paires de pôles, 24 encoches

Or, en réalité, chaque bobine qui occupe une paire d'encoches se compose de plusieurs conducteurs ou tours de fil. Ces schémas sont des modèles simplifiés avec un seul tour de fil par bobine. Le nombre de tours de fil est déterminé en fonction de la tension d'alimentation et

les Ampères-tours nécessaires pour produire le flux souhaité dans le circuit magnétique. La figure suivante représente deux tours de fil par bobine en plus de la connexion en triangle (les précédentes étant en étoile).

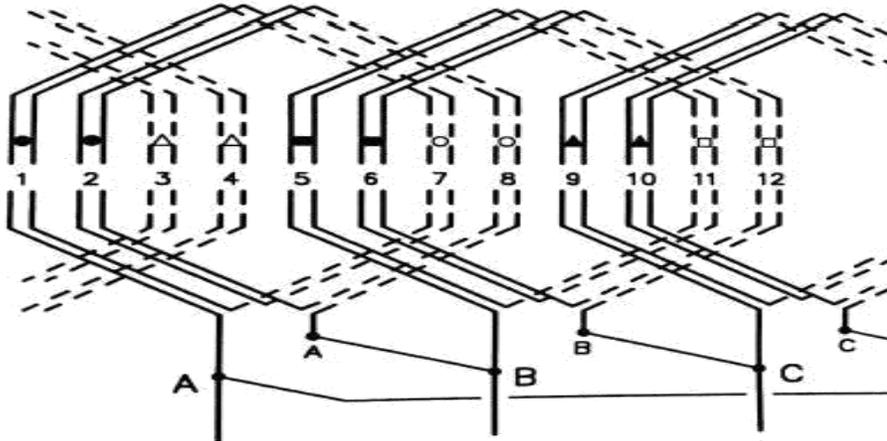


Fig. II.6 Équivalent au premier diagramme d'enroulement mais pour deux tours de fil et connexion en triangle.

II.2.2 Bobinage imbriqué à double couche

L'enroulement imbriqué est le plus utilisé pour les stators des moteurs à moyenne-grande puissance. Le plus souvent un enroulement à double couche est employé, de manière que chaque bobine est composée de la moitié des conducteurs qui passent par une encoche, et les conducteurs sont placés dans l'encoche de manière qu'une bobine occupe la partie supérieure et l'autre la partie inférieure.

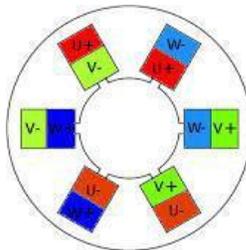


Fig. II.7 Schéma simplifié de comment se répartissent les bobinages dans l'encoche

Le pas d'encoche peut alors être modifié : on parle d'un pas raccourci ou fractionnaire, ce qui complique la mise en place du bobinage mais, si le choix est judicieux, atténue les harmoniques de l'onde de flux et améliore le comportement du moteur.

Si on reprend le cas du moteur 2 pôles-12 encoches mais cette fois avec un pas raccourci de 5 encoches au lieu de 6, pour la phase A les deux premières bobines se placent dans les encoches 1 et 6 et 2 et 7, alors que les deux autres occupent les bobines 2 et 7 et 3 et 8.

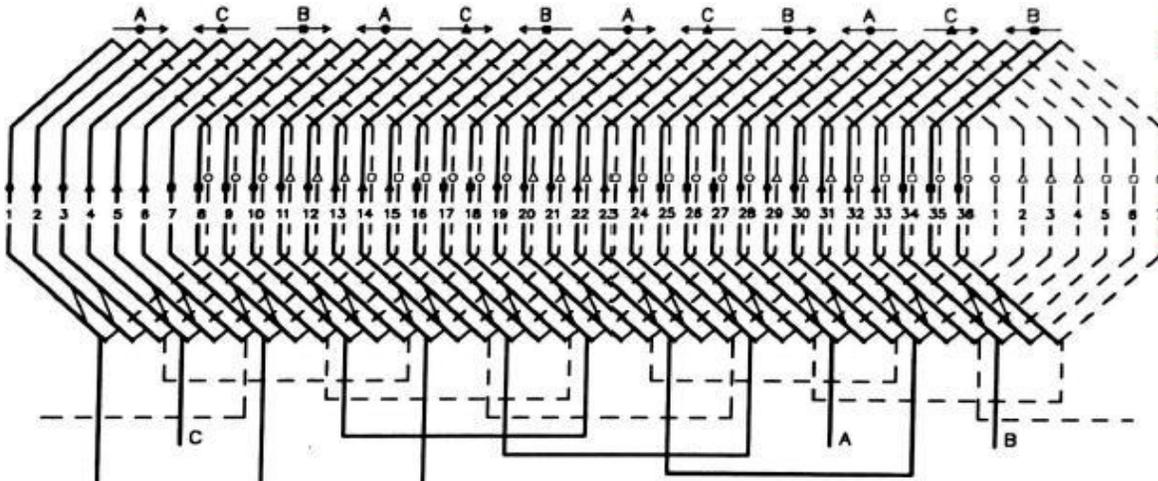


Fig. II.8 Enroulement imbriqué double couche. Moteur à 3 phases, 4 pôles, 36 encoches. Pas fractionnaire de $7/9$ (140° électriques). Enroulements à 120° élec

II.2.3 bobinage ondulé

Comme le bobinage imbriqué, il s'agit d'un type d'enroulement habituellement fait à double couche. Dans ce type d'enroulement, les conducteurs qui occupent des places analogues sous deux pôles consécutifs sont connectés en série. Le circuit fait le tour du stator une ou plusieurs fois, sans revenir en arrière, en allant d'un pôle à l'autre. On nomme *tronçon* le circuit formé lorsque toutes les encoches d'une même phase contiennent un conducteur. Comme il s'agit d'un circuit à double couche, il est possible de superposer un deuxième tronçon au premier, mais ceci doit se faire en sens inverse.

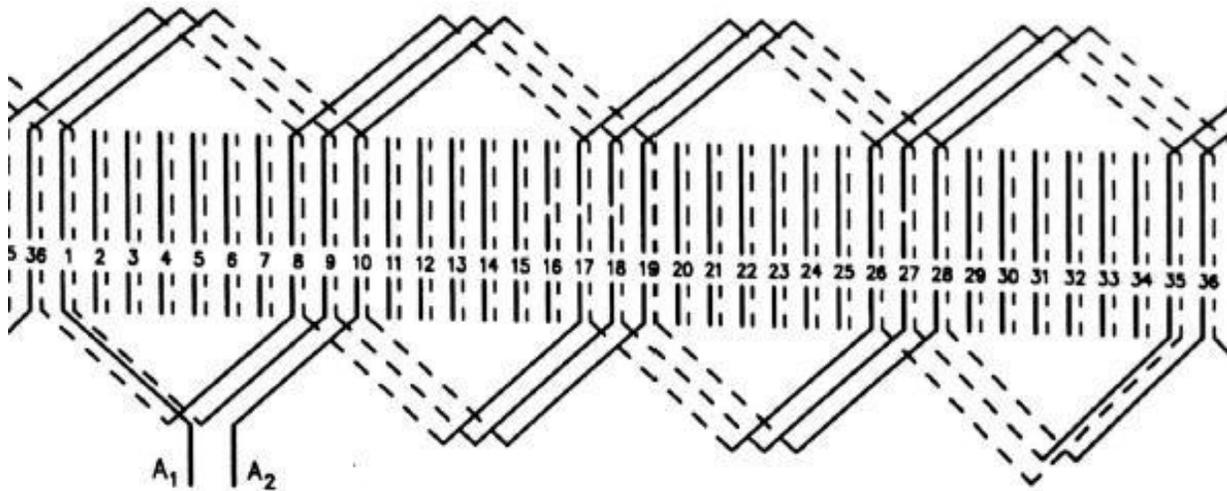


Fig. II.9 Enroulement ondulé d'une phase. Moteur à 4 pôles et 36 encoches.

La figure précédente montre les deux tronçons qui forment une phase complète. Les lignes complètes représentent les conducteurs supérieur et les lignes pointillés les conducteurs inférieurs. Le nombre de tronçons est de deux fois le nombre de phases. Dans un tronçon, un conducteur supérieur est connecté à un conducteur inférieur et vice-versa. Entre le commencement et la fin de chaque tronçon il y a un nombre de pas raccourcis égal au nombre d'encoches par pôle par phase moins un.

Pour le bobinage des autres phases, le même principe s'applique avec un décalage de 120° électriques.

II.2.4 Bobinage concentrique

C'est le type de bobinage à simple couche le plus commun. Comme dans le bobinage à simple couche, chaque bobine occupe et remplit deux encoches. La différence réside dans le fait que, pour une phase, les bobines sont de dimensions différentes et placées les unes autour des autres. Pour un moteur à une paire de pôles et douze encoches, plutôt que 1 et 7 pour la première bobine et 2 et 8 pour la seconde, la première bobine est agrandie et occupe les encoches 1 et 8, alors que la seconde est réduite et occupe les encoches 2 et 7. Aucune des deux n'est à pas normal (6), au contraire que dans le bobinage imbriqué, car l'une est à pas 5 et l'autre à pas 7. Cependant, la moyenne correspond au pas normal. Considérant un moteur à

une paire de pôles et 24 encoches, les bobines pour la phase occupent les encoches 1 et 16, 2 et 15. Le même raisonnement s'applique aux autres phases. Ce type d'enroulement est forcément à simple couche.

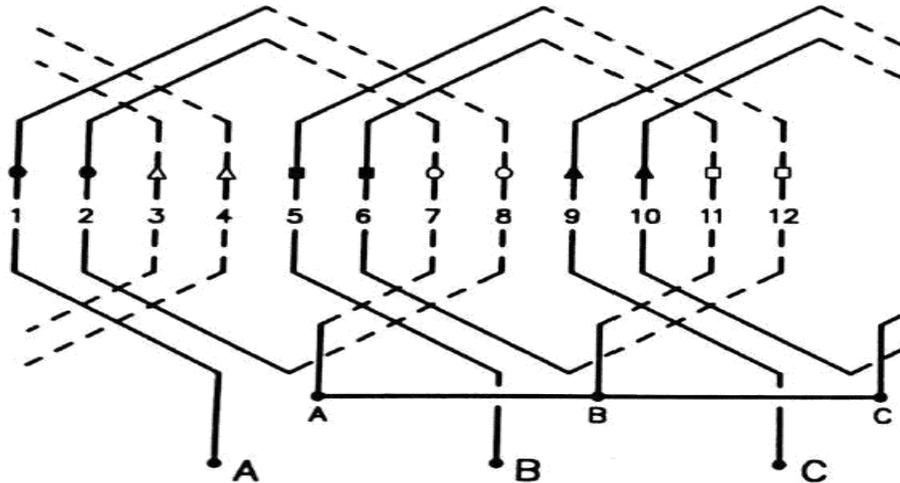


Fig. II.10 Enroulement concentrique pour un moteur à une paire de pôles, 12 encoches.

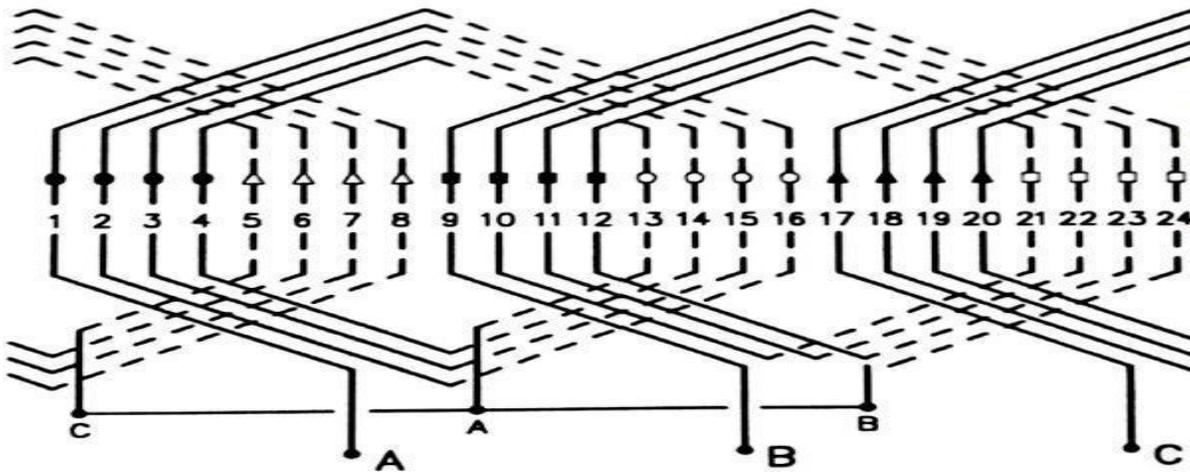


Fig. II.11 Enroulement concentrique. Moteur à une paire de pôles et 24 encoches

II.3 Les enroulements à plusieurs vitesses

Les enroulements à plusieurs vitesses représentent le quatrième type d'enroulement des systèmes triphasés ils sont utilisés dans les machines électriques nécessitant deux, trois, ou quatre vitesse de rotation, fig. (II.12).

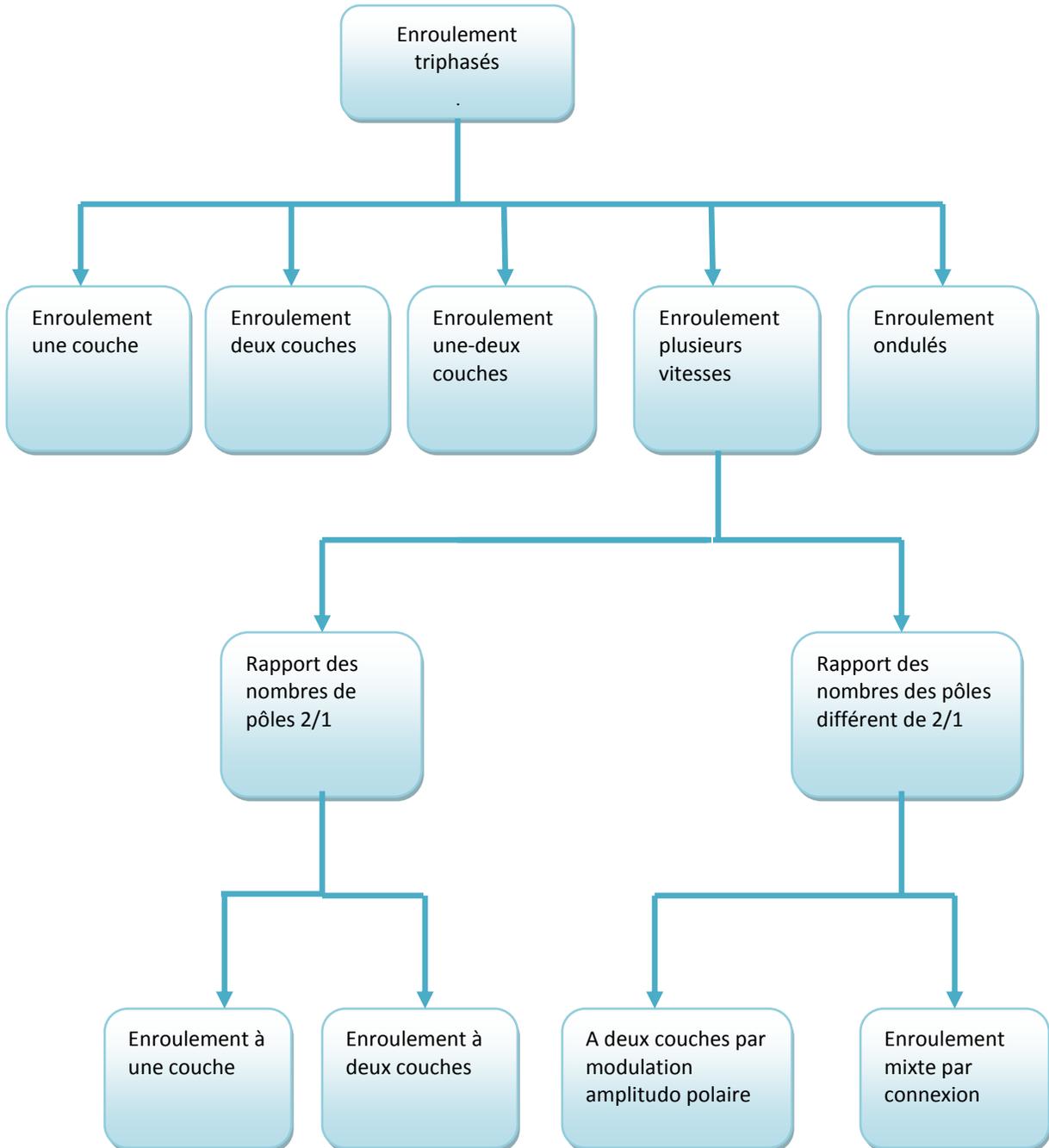


Fig. II.12 enroulements triphasés

Les moteurs a deux vitesses pour un rapport de 2/1 :

$2P = 4/2 ; 8/2 ; 12/6$, on un seul enroulement à une ou deux couches.

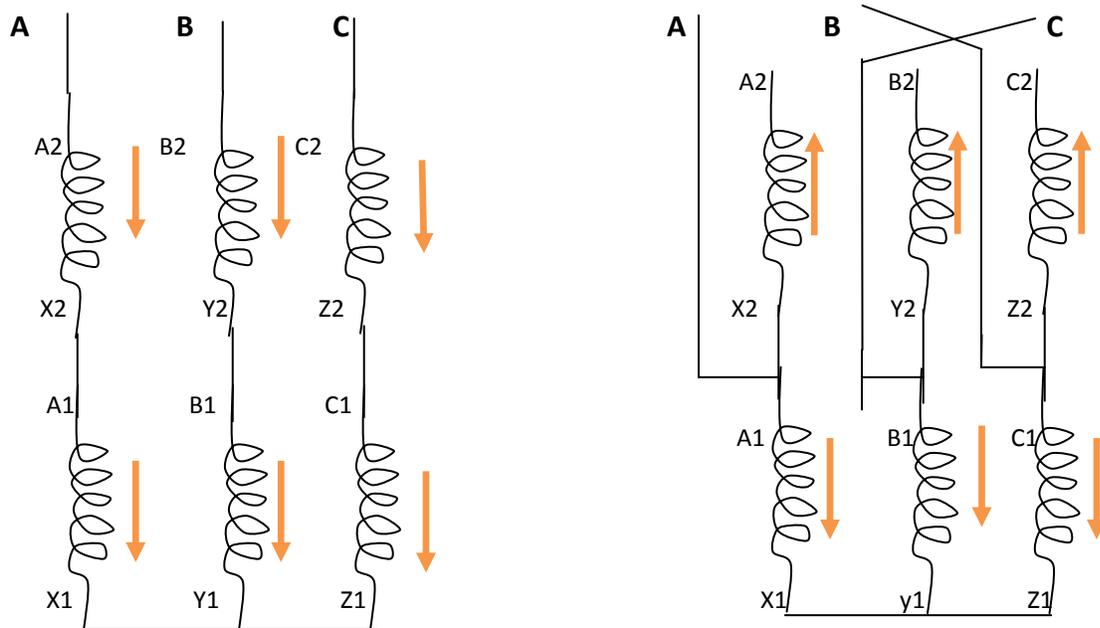
Les moteurs à deux vitesses dont les nombres de pôles ne sont pas dans le rapport 2/1 (exemple : $2P = 6/4$) ont, en général deux enroulements indépendants logés dans les même encoches. ces enroulements sont réalisée à une couche. cependant pour un tel rapport il existe des méthodes qui permettent d'obtenir deux vitesses de rotation avec un seul enroulement. Les moteurs à trois et quatre vitesses de rotation ont aussi deux enroulements indépendants.

II.4 Connexion Les enroulements

Le figure (**Fig. II.13**) représente les schémas de connexion les plus utilisés pour des rapports 2/1 (schémas de DAHLANDER).

Le schéma << étoile - double étoile >>, fig.(**II.13.a**) assure lors de la variation de la vitesse un couple constant.

Le schéma <<triangle- double étoile>>, fig.(**II.13.b**) assure à peu près légalité des puissances.



Pour $2p=8$

pour $2p=4$

a/

ABC

AB

C

A la grande polarité :(petite vitesse), le bobinage doit avoir un pas plus que diamétral,

Toujours connecté en triangle-sérié, de telle sorte que chaque coté du triangle soit constitué par deux bobinages en sérié.

A la petite polarité (grande vitesse), le pas est raccourci sensiblement de 50 %.

Le cas utilisation le plus fréquent est l'étoile – parallèle, dont les deux moitiés de l'enroulement de chaque phase sont toujours connectées en parallèle.

Avec un moteur de 2/4 pôles couplé à puissance constante et à circuits magnétiques normaux, les puissances sont inferieurs environ à 45 % à celles des moteurs ordinaires. Considérées a chacune de leurs polarités, et elles sont entre elles sensiblement dans le rapport 2/3. [4]

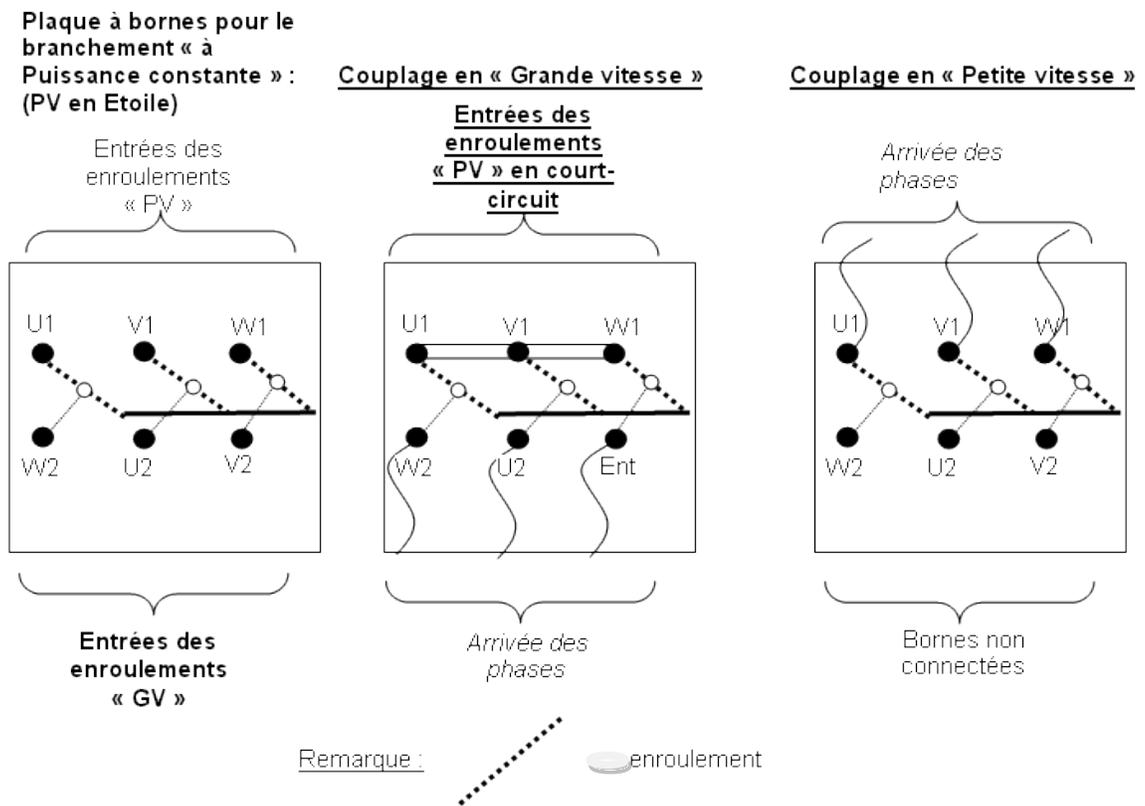


Fig II.14 Couplage à puissance constante

➤ **Couplage à couple constant :**

A la grande polarité (grand nombre de pôles), en réalise le couplage étoile-série.

A la petite polarité (petit nombre de pôles), on utilise le groupement étoile-parallèle.

Une étoile permanente est effectuée sur le bobinage. elle est formée par la réunion des trois sorties S1, S2, S3, ce qui limite à six le nombre des bornes sur la plaque du moteur : soit les entrées E1, E2, E3, et les trois prises médianes M1, M2, M3.

Le pas de bobinage est égale à la moitié du pas normal d'un moteur à 4 pôles.[4]

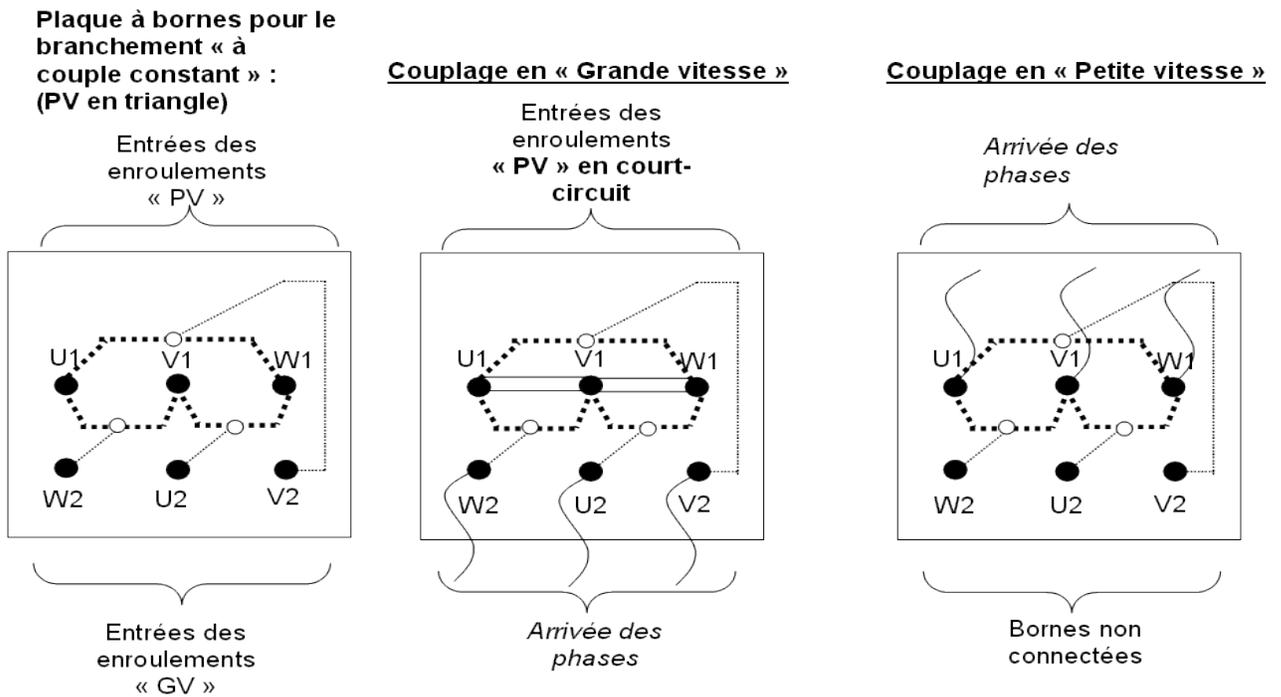


Fig. II.15 Couplage à couple constant

○ : pour les points de médianes M1, M2, M3

● : pour les entrées/ sorties des bobines, E1, E2, E3 ; S1, S2, S3.

--- : Les enroulements.

II.8 Rappel sur les paramètres des enroulements des machines asynchrone

L'enroulement de toute machine électrique est la pièce maîtresse nécessaire pour la création du champ magnétique. Il est constitué de bobines ou de sections généralement en cuivre, connectées en série ou en série – parallèle.

Tout enroulement à courant alternatif est défini par les paramètres suivants :

Z : Le nombre d'encoches.

2P : Le nombre de pôles.

En plus de la variation du champ tournant, le nombre 2P indique le nombre de groupes de bobinages dans une phase à l'exception de l'enroulement à une couche par pôle conséquent. Ou celui – c'est égale à P.

m : Le nombre de phase.

q : Le nombre d'encoche par pôle et par phase. $q = \frac{Z}{2Pm}$

il indique le nombre de bobinage dans un groupe.

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté les différents types d'enroulement d'un moteur asynchrone (une et deux couches) et le mode de connexion des enroulements surtout ce qui concerne son élaboration, et le type de bobinage d'un moteur à deux vitesses et leur de couplage au niveau de la plaque à bornes, et un petite rappel sur les paramètres des enroulements d'un machine asynchrone.

Chapitre III

Calcul des caractéristiques
d'un moteur asynchrone

Introduction

Tous les moteurs électriques sont différents selon ses paramètres, ces paramètres sont nécessaires pour réaliser le moteur, donc dans ce chapitre on va calculer les différentes caractéristiques de notre moteur, pour obtenir un moteur à deux vitesses avec un seul bobinage, à partir du guide de conception on a calculé les paramètres suivants.

III.1. Les paramètres de la machine

$$2P = 6 \quad , \quad P = 3\text{kW}, \quad U = 220/380 \text{ V}$$

IP 023, Acier 2013 , $f = 50\text{Hz}$, Classe F

III.2 Calcul des dimensions principales

III.2.1 Le nombre de pôles : il est donné et égale à $2P=2$

III.2.2 La hauteur préalable de l'axe de rotation h

$$h = f(P_2, 2P)$$

D'après le **tableau (9.1)** ; $h=100 \text{ mm}$

III.2.3. Le Diamètre extérieur D_a du stator

Suivant le tableau, la hauteur en fonction de D_a en distingue

$$D_a = 0.168 \text{ m}$$

$$D_a = 168 \text{ mm}$$

Le Diamètre intérieur

$$D_1 = K_d \cdot D_a \tag{III.1}$$

Selon le **tableau (9.2)** : $2p = 6$, $K_d [0.64 \div 0.68]$

$$D_1 = 392(0.64 \div 0.68) = 107,52 \div 114,24$$

$$D_1 = 112 \text{ mm}$$

III.2.4 Le pas polaire

$$\tau = \frac{\pi * D}{2P} = \frac{\pi * 112}{4} = 87.9 \quad (\text{III.2})$$

$$\tau = 87.96\text{mm}$$

III.2.5 La puissance de calcul

$$P' = P_2 * \frac{k_e}{\cos\varphi * \eta} \quad (\text{III.2})$$

$\cos \varphi = 0.82$ selon la **figure 9.4**

$\eta = 0.82$ selon la **figure 9.4**

$k_e = 0.96$ selon la **figure 9.2**

$$P' = \frac{3 * 0.96}{0.82 * 0.82}$$

$$P' = 4.28\text{Kw}$$

III.2.6 Les charges électromagnétiques A et B_δ

D'après la **figure (9.6)**, et pour IP 44

$$A = 24.8 * 10^3 \text{A/m}$$

$$B_\delta = 0.85\text{T}$$

III.2.7 Les valeurs préalables de α_i , K_b

$K_{b1} = [0,95 \div 0,96]$, pour l'enroulement à une couche.

$$K_{b1} = 0,95$$

$$\alpha_i = \frac{2}{\pi} + 0,156(K_\delta - 1)^{2/3} \quad (\text{III.3})$$

On suppose $K_\delta = 1,25$

$$\alpha_i = \frac{2}{\pi} + 0,156(1,25 - 1)^{2/3}$$

$$\alpha_i = 0,75$$

$$K_b = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} + 0,058(K_\delta - 1)^{2/3} \quad (\text{III.4})$$

$$K_b = 1,08$$

III.2.8 La longueur de calcul de l'entrefer

$$l_\delta = \frac{2 \cdot P'}{\omega \cdot k_b \cdot k_{b1} \cdot \pi \cdot A \cdot B_\delta \cdot D^2} \quad (\text{III.5})$$

$$\omega = (2 \cdot \pi / 60) \cdot n_s \quad (\text{III.6})$$

$$n_s = 60 \cdot f / p = 1500 \text{ tr/min} \quad (\text{III.7})$$

$$\omega = 157 \text{ rd/sec}$$

$$l_\delta = \frac{2 \cdot 4,28 \cdot 10^3}{157 \cdot 1,08 \cdot 0,95 \cdot 24,8 \cdot 10^3 \cdot 0,85 \cdot \pi \cdot 112^2}$$

$$l_\delta = 85,29 \text{ mm}$$

III.2.9 Le rapport λ

$$\lambda = \frac{l_\delta}{\tau} = \frac{85,29}{87,96} \quad (\text{III.8})$$

$\lambda = 0,97 \Rightarrow$ selon la **figure (9.7)**, la valeur de λ est dans la limite

de l'intervalle $[0,9 \div 1,1]$.

III.3 La zone des dents du stator

III.3.1 Le pas dentaire t_1 du stator

D'après la **figure (9-8)**

$$t_1 = 0,009 \div 0,012$$

$$t_{1min} = 0,009 = 9 \text{ mm}$$

$$t_{1max} = 0,012 = 12 \text{ mm}$$

III.3.2 Nombre d'encoche possible

$$Z_{1 \min} \div Z_{1 \max} = \frac{\pi \cdot D_1}{t_{1 \max}} \div \frac{\pi \cdot D_1}{t_{1 \min}} \quad (\text{III.9})$$

$$Z_{1 \min} \div Z_{1 \max} = \frac{\pi \cdot 112}{12} \div \frac{\pi \cdot 112}{9} = 29.30 \div 39.07$$

D'après le **tableau (9.8)**

$Z = 36$ encoches

$$Z = 2p \cdot m \cdot q = 4 \cdot 3 \cdot 3 = 36 \quad (\text{III.10})$$

III.3.3 Le pas dentaire

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D_1}{z_1} = \frac{\pi \cdot 112}{36} = 9.77 \text{ mm} \quad (\text{III.11})$$

$$t_1 = 9.77 \text{ mm}$$

D'après le **tableau (9.5)** ;

Le type de l'enroulement c'est un enroulement concentrique à une couche montéfil à fil.

III.3.4 Nombre de conducteur efficace préalable

Pour $a = 2$

$$U'_{\text{en}} = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot A}{Z_1 \cdot I_{\text{nom}}} \quad (\text{III.12})$$

$$I_{\text{nom}} = \frac{P_2}{m \cdot \cos \varphi \cdot \eta \cdot U_{\text{nom}}} = \frac{3 \cdot 10^3}{3 \cdot 0.82 \cdot 0.82 \cdot 220} \quad (\text{III.13})$$

$$I_{\text{nom}} = 6.72 \text{ A}$$

$$U'_{\text{en}} = \frac{\pi \cdot 112 \cdot 24.8 \cdot 10^3}{6.72 \cdot 36} = 36.07 \text{ conducteurs}$$

U'_{en} est petit $\Rightarrow a = 2$

$$U_{en} = 2 \cdot 36 = 72 \text{ conducteurs}$$

III.3.5 Nombre des spires d'une phase du stator

$$W_1 = \frac{U_{en} \cdot Z_1}{2 \cdot a_1 \cdot m_1} = \frac{72 \cdot 36}{2 \cdot 2 \cdot 3} \quad (\text{III.14})$$

$$W_1 = 216 \text{ spires}$$

III.3.6 La charge linéaire

$$A = \frac{2 \cdot I_{1nom} \cdot W_1 \cdot m_1}{\pi \cdot D} = \frac{2 \cdot 6.72 \cdot 216 \cdot 3}{\pi \cdot 112} \quad (\text{III.15})$$

$$A = 24.91 \cdot 10^3 \text{ A/m}$$

le flux

$$\Phi = \frac{k_e \cdot U_{1nom}}{4 \cdot k_b \cdot k_{b1} \cdot W_1 \cdot f} = \frac{0.96 \cdot 220}{4 \cdot 1.08 \cdot 0.95 \cdot 216 \cdot 50} \quad (\text{III.16})$$

$$\Phi = 4.76 \cdot 10^{-3} \text{ wb}$$

III.3.7 L'induction du champ magnétique dans l'entrefer

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha \tau l_\delta} = \frac{p \cdot \Phi}{D_1 l_\delta} = \frac{2 \cdot 4.76 \cdot 10^{-3}}{0.112 \cdot 85.29 \cdot 10^{-3}} = 0,77 \quad (\text{III.17})$$

$$B_\delta = 0,77 \text{ T}$$

III.3.8 La section de fil efficace

$$S_{ef} = \frac{I_{1nom}}{a_1 \cdot J_1} \quad (\text{III.18})$$

$$j_1 = \frac{AJ}{A} \quad (\text{III.19})$$

$$AJ \text{ selon la figure (9.9)} \Rightarrow AJ = 185 \cdot 10^3 \text{ A}^2/\text{m}^3$$

$$j_1 = \frac{275 \cdot 10^9}{39,12 \cdot 10^3}$$

$$j_1 = 7,45 \text{ A/m}^2$$

$$S_{ef} = \frac{6.76}{2 \cdot 7.45} = 0.453 \text{ mm}^2$$

D'après le tableau (3-2) :

$$S_{ef} = 0.442 \text{ mm}^2$$

III.3.9 La densité de courant:

$$j_1 = \frac{I_{1nom}}{a_1 \cdot S_{ef} \cdot n_{el}} = \frac{6.76}{2 \cdot 0.442} \quad (\text{III.20})$$

$$j_1 = 7.64 \text{ A/m}^2$$

III.4 Calcul des dimensions de la zone de dents du stator et de l'entrefer

III.4.1 B_{z1} et B_a :

Selon le tableau (9.6)

$$B_a = [1,4 \div 1,6] \Rightarrow B_a = 1.4 \text{ T}$$

$$B_{z1} = [1,7 \div 1,9] \Rightarrow B_{z1} = 1.7 \text{ T}$$

b_{z1} :

$$b_{z1} = \frac{B_\delta \cdot t_1 \cdot l_\delta}{B_{z1} \cdot l_1 \cdot k_r} \quad (\text{III.21})$$

k_r : Coefficient de remplissage de paquet du fer suivant le tableau (7.1)

k_r : $h = (50 \div 100) \text{ mm}$; $U < 660 \text{ V}$; acier 2013

$$\Rightarrow k_r = 0.97 ; l_1 = l_\delta$$

$$b_{z1} = \frac{0,77 \cdot 9,77}{1,7 \cdot 0,97}$$

$$b_{z1} = 4,56 \text{ mm}$$

h_a :

$$h_a = \frac{\Phi}{2 \cdot B_a \cdot l_1 \cdot k_r} = \frac{0,013}{2 \cdot 1,4 \cdot 0,97 \cdot 85,29 \cdot 10^{-3}} = 0.020 \quad (\text{III.22})$$

$$h_a = 20 \text{ mm}$$

on trouve $0,5 < h_f < 1 \text{ mm}$ en fonction de la puissance **et** $h > 160 \text{ mm}$

On suppose: $h_f = 0,5 \text{ mm}$

$$B_f = d_{is} + (1,5 \div 2) = 1,685 + (1,5 \div 2) \quad (\text{III.23})$$

$$b_f = (3,185 \div 3,685)$$

$$b_f = 3,5 \text{ mm}$$

$$h_{en} = \frac{D_a - D}{2} - h_a = \frac{168 - 112}{2} - 20 \quad (\text{III.24})$$

$$h_{en} = 8 \text{ mm}$$

b_1 :

$$b_1 = \frac{\pi * (D + 2 * h_{en})}{Z_1} - b_{z1} = \frac{\pi * (112 + 2 * 8)}{36} - 4,56 \quad (\text{III.25})$$

$$b_1 = 6,61 \text{ mm}$$

Suivant **le tableau (3.2)** de fils des enroulements en distingue :

$$S_{ef} = 0,442 \text{ mm}^2$$

$$d_{is} = 0,815 \text{ mm}^2$$

$$d = 0,75 \text{ mm}^2$$

$$b_f = d_{is} + (1,5 \div 2)$$

$$b_f = 0,815 + (1,5 \div 2)$$

$$b_f = 2,815 \text{ mm}$$

b_2 :

$$b_2 = \frac{\pi * (D + 2 * h_f - b_f) - Z_1 * b_{z1}}{Z_1 - \pi} = \frac{\pi * (112 + 2 * 0,5 - 2,815) - (36 * 4,56)}{36 - \pi} \quad (\text{III.26})$$

$$b_2 = 5,53 \text{ mm}$$

h_1 :

$$h_1 = h_{en} - \left(h_f + \frac{b_2 - b_f}{2} \right) = 8 - \left(0,5 + \frac{5,53 - 2,815}{2} \right) \quad (\text{III.27})$$

$$h_1 = 3,3275 \text{ mm}$$

III.4.2 les dimensions de l'encoche réelle

$$b_1' = b_1 - \Delta b_{en} \quad (\text{III.28})$$

$$b_2' = b_2 - \Delta b_{en} \quad (\text{III.29})$$

$$h_1' = h_1 - \Delta h_{en} \quad (\text{III.30})$$

$$h = 100 \text{ mm} \Rightarrow \Delta b_{en} = \Delta h_{en} = 0,1$$

$$b_1' = 6,61 - 0,1 = 6,51 \text{ mm}$$

$$b_2' = 5,53 - 0,1 = 5,43 \text{ mm}$$

$$h_1' = 3,3275 - 0,1 = 3,2275 \text{ mm}$$

III.4.3 La section de l'isolant par rapport à la masse

$$S_{is} = b_{is} (2h_{en} + b_1 + b_2) \quad (\text{III.31})$$

b_{is} : l'épaisseur de l'isolant a un seul coté

D'après le **tableau (2.2)** : isolation des enroulements des machines asynchrone montés fil à fil.

$$\Rightarrow b_{is} = 0,25 \text{ mm}$$

pour l'enroulement à une couche : $S_{pe} = 0$

$$S_{is} = b_{is} (2h_{en} + b_1 + b_2)$$

$$S_{is} = 0,25 * (2 * 8 + 6,51 + 5,53)$$

$$S_{is} = 7,035 \text{ mm}^2$$

III.4.4 La section de partie de l'encoche occupée par les conducteurs

$$S'_{en} = \left(\frac{b'_1 + b'_2}{2} h'_1 \right) - S_{is} - S_{pe} \quad (\text{III.32})$$

Avec : S_{pe} la section des paquets dans l'encoche

$$S'_{en} = \left(\frac{6,51 + 5,53}{2} * 3,2275 \right) - 7,035$$

$$S'_{en} = 12,23 \text{ mm}^2$$

III.4.5 Le coefficient de remplissage de l'encoche

$$K_r = \frac{d_{is}^2 * U_{en} * n_{el}}{S'_{en}} \quad (\text{III.33})$$

$$K_r = \frac{(0,815)^2 * 72 * 1}{12,23}$$

$$K_r = 0,73$$

Pour le bobinage manuel $K_r = 0,7 \div 0,75$

III.4.6 Calcul la largeur et la hauteur de calcul de dent

$$b'_z = \pi \frac{D_1 + 2h_{en}}{Z} - b_1 \quad (\text{III.34})$$

$$b'_z = \pi \frac{112 + 2*8}{36} - 6,61$$

$$b'_z = 4,56$$

$$b''_z = \pi \frac{D_1 + 2(h_{en} - h_1)}{Z} - b_2 \quad (\text{III.35})$$

$$b''_z = \pi \frac{112 + 2(8 - 3,3275)}{36} - 5,53$$

$$b''_z = 5,05$$

$$h_z = h_{en}$$

III.5 Calcul du rotor en court-circuit

L'entrefer pour les moteurs asynchrone

D'après la figure (9.10) en déterminé :

$$\square = 0.3 \text{ mm}$$

III.5.1 Le nombre d'encoche du rotor

Selon le tableau (9.8)

Le nombre d'encoche $Z_2 = 28$ encoches avec inclinaison.

$Z_2 < Z_1$ Pour les moteurs de petite puissance.

III.5.2 Le diamètre extérieur

$$D_2 = D - 2 \square \quad (\text{III.36})$$

$$D_2 = 112 - 2 * 0.3$$

$$D_2 = 111.4 \text{ mm}$$

La largeur du noyau :

$$L_2 = L_1 \quad (\text{III.37})$$

$$L_2 = 85.29 \text{ mm}$$

III.5.3 Le pas dentaire :

$$t_2 = \frac{\pi * D_2}{Z_2} = \frac{\pi * 111.4}{28} \quad (\text{III.38})$$

$$t_2 = 12.49$$

III.5.4 Le diamètre de l'arbre préalable :

$$D_{ar} = k_{ar} * D_a \quad (\text{III.39})$$

Pour $h = (71 \div 250) \text{ mm} \Rightarrow k_{ar} = 0.23$

$$D_{ar} = 0.23 * 168$$

$$D_{ar} = 38.64$$

III.5.5 Le diamètre intérieur du noyau :

$$D_j = D_{ar} \tag{III.40}$$

$$D_j = 38.64 \text{ mm}$$

III.5.6 Le courant dans la barre :

$$I_2 = k_i * I_1 * D_i \tag{III.41}$$

D_i : D'après la **figure (9.11)**

$$D_i = 0.85$$

$$k_i = \frac{2m * W_1 * k_{b1}}{Z_2} \tag{III.42}$$

$$k_i = \frac{2 * 3 * 216 * 0.95}{28}$$

$$k_i = 43.97$$

$$I_2 = k_i * I_1 * D_i$$

$$I_2 = 43.97 * 6.72 * 0.85$$

$$I_2 = 251.15 \text{ A}$$

III.5.7 La section de la barre :

$$S_b = \frac{I_2}{J_2} \tag{III.43}$$

$$J_2 = (2.5 \div 3.5) * A \tag{III.44}$$

$$J_2 = (2.5 \div 3.5) * 2491$$

$$J_2 = 2.95 \text{ A/mm}^2$$

$$S_b = \frac{I_2}{J_2}$$

$$S_b = \frac{251.15}{2.95}$$

$$S_b = 85.13 \text{ mm}^2$$

III.5.8 Les encoches du rotor sont le plus souvent ovales

Pour : $h < 160 \text{ mm}$

On trouve : b_f, h_f, h'_f

$$b_f = 1.5 \text{ mm}$$

$$h_f = 0.75 \text{ mm}$$

III.5.9 La largeur admissible des dents

$$b_{z2} = \frac{B_{\square} * t_2 * l_2}{B_{Z2} * l_{ac2} * k_f} \quad \text{(III.45)}$$

$$k_f = 0.95 \div 0.97$$

D'après le tableau (9.6) :

$$B_{Z2} = 1.75 \text{ T}$$

$$l_{ac2} = l_2$$

$$b_{z2} = \frac{B_{\square} * t_2 * l_2}{B_{Z2} * l_{ac2} * k_f} = \frac{0.77 * 12.49}{1.75 * 0.95}$$

$$b_{z2} = 5.78 \text{ mm}$$

III.5.10 Les dimensions de l'encoche

$$b_1 = \frac{\pi(D_2 - 2h_f - 2h'_f) - Z_2 * b_{z2}}{\pi + Z_2} \quad (\text{III.46})$$

$$b_1 = \frac{\pi(111.4 - 2*0.75 - 2*0) - 28 * 5.78}{\pi + 28}$$

$$b_1 = 5.88 \text{ mm}$$

$$b_2 = \frac{\sqrt{b_1^2 \left(\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2} \right) - S_b/4}}{\frac{Z_2}{\pi} - \frac{\pi}{2}} \quad (\text{III.47})$$

$$b_2 = \frac{\sqrt{5.88^2 \left(\frac{28}{\pi} + \frac{\pi}{2} \right) - 85.13/4}}{\frac{28}{\pi} - \frac{\pi}{2}}$$

$$b_2 = 2.51 \text{ mm}$$

$$h_1 = (b_1 - b_2) * \frac{Z_2}{2\pi} \quad (\text{III.48})$$

$$h_1 = (5.88 - 2.51) * \frac{28}{2\pi}$$

$$h_1 = 15.02 \text{ mm}$$

III.5.11 La hauteur totale de l'encoche

$$h_{en2} = h'_f + h_f + \frac{b_1}{2} + h_1 + \frac{b_2}{2} \quad (\text{III.49})$$

$$h'_f = 0 ;$$

$$h_{en2} = 0.75 + \frac{5.88}{2} + 15.02 + \frac{2.51}{2}$$

$$h_{en2} = 19.96 \text{ mm}$$

Les conditions de construction non diligente à arrai les dimensions :

$$b_1 = 5.5 \text{ mm} ; b_2 = 2.5 \text{ mm} ; h_1 = 15 \text{ mm} ; h_{en2} = 19.5 \text{ mm}.$$

III.5.12 La section de la barre

$$S_b = \frac{\pi}{8} (b_1^2 + b_2^2) + \frac{1}{2} (b_1 + b_2) * h_1 \quad \text{(III.50)}$$

$$S_b = \frac{\pi}{8} (5.5^2 + 2.5^2) + \frac{1}{2} (5.5 + 2.5) * 15$$

$$S_b = 74.32 \text{ mm}^2$$

III.5.13 La densité du courant dans la barre

$$J_2 = \frac{I_2}{S_b} \quad \text{(III.51)}$$

$$J_2 = \frac{251.15}{74.32}$$

$$J_2 = 3.37 \text{ A mm}^2$$

III.5.14 La densité du courant dans les anneaux circuitagés

$$S_{an} = \frac{I_{an}}{J_{an}} \quad \text{(III.52)}$$

$$I_{an} = \frac{I_2}{2 \sin \frac{p\pi}{Z_2}} = \frac{251.15}{2 \sin \frac{2\pi}{28}} \quad \text{(III.53)}$$

$$I_{an} = 540.65 \text{ A}$$

$$J_{an} = J_2 (0.8 \div 0.85)$$

$$J_{an} = 3.37 (0.8 \div 0.85)$$

$$J_{an} = (2.69 \div 2.86)$$

$$J_{an} = 2.7 \text{ A}$$

$$S_{an} = \frac{I_{an}}{J_{an}} = \frac{540.65}{2.7}$$

$$S_{an} = 260.94 \text{ mm}^2$$

III.5.15 Les dimensions des anneaux circuitâgés d'une cage d'écureuil

$$b_{an} = 1.25 h_{en2} \quad (\text{III.54})$$

$$b_{an} = 1.25 \cdot 19.5$$

$$b_{an} = 24.37 \text{ mm}$$

$$a_{an} = \frac{S_{an}}{b_{an}} \quad (\text{III.55})$$

$$a_{an} = \frac{260.94}{24.37}$$

$$a_{an} = 10.69 \text{ mm}$$

III.6 Calcul du circuit magnétique

III.6.1 Les valeurs de l'induction dans les dents du stator et du rotor

$$*/ \quad B_{Z1} = \frac{B_{\square} * t_1 * l_{\square}}{b_{Z1} * l_{ac1} * K_f} \quad (\text{III.56})$$

$$B_{Z1} = \frac{0.77 * 9.77}{4.56 * 0.95}$$

$$B_{Z1} = 1.73 \text{ T}$$

$$**/ \quad B_{Z2} = \frac{B_{\square} * t_2 * l_{\square}}{b_{Z2} * l_{ac2} * K_f} \quad (\text{III.57})$$

$$B_{Z2} = \frac{0.77 * 12.49}{5.78 * 0.95}$$

$$B_{Z2} = 1.75 \text{ T}$$

III.6.2 Les inductions dans les dos du stator et rotor :

$$B_a = \frac{\Phi}{2h'_a * l_{ac1} * K_f} \quad (\text{III.58})$$

$$B_a = \frac{4.76 * 10^{-3}}{2 * 20 * 85.29 * 0.95 * 10^{-6}}$$

$$B_a = 1.46 \text{ A}$$

$$h'_a = \frac{D_a - D}{2} - h_{en1} \quad (\text{III.59})$$

$$h'_a = \frac{168 - 112}{2} - 8$$

$$h'_a = 20 \text{ mm}$$

$$h'_j = \frac{2+P}{3.2P} \left(\frac{D2}{2} - h_{en2} \right) - \frac{2}{3} * d_{c2} * m_{c2} \quad (\text{III.60})$$

$d_{c2}; m_{c2}$: le nombre des rangs et le diamètre des cancales acsiaux de ventilation, on néglige $d_{c2}; m_{c2}$.

$$h'_j = \frac{2+P}{3.2P} \left(\frac{111.4}{2} - 19.96 \right)$$

$$h'_j = 22.33 \text{ mm}$$

$$B_j = \frac{\phi}{2h'_j * l_{ac2} * K_f} \quad (\text{III.61})$$

$$B_j = \frac{4.76 * 10^{-3}}{2 * 22.33 * 85.29 * 0.95 * 10^{-6}}$$

$$B_j = 1.31 \text{ T}$$

III.6.3 La FMM dans l'entrefer

$$F_{\square} = \frac{2}{\mu_0} * B_{\square} * \square * K_{\square} \quad (\text{III.62})$$

$$K_{\square} = 1.25$$

$$F_{\square} = \frac{2}{\mu_0} * 1.59 * 10^6 * 0.77 * 0.3 * 1.25$$

$$F_{\square} = 459.11 \text{ A}$$

$$K_{\square} = \frac{t_1}{t_1 + \Sigma \delta} \quad (\text{III.63})$$

$$\Delta_{\sigma} = \frac{\left(\frac{b_{f1}}{\sigma}\right)^2}{5 + \frac{b_{f1}}{\sigma}} = \frac{\left(\frac{2.18}{0.3}\right)^2}{5 + \frac{2.18}{0.3}} \quad (\text{III.64})$$

$$\Delta_{\sigma} = 4.30$$

$$K_{\sigma} = \frac{t_1}{t_1 + \Delta_{\sigma}} = \frac{9.77}{9.77 - (4.30 \cdot 0.75)}$$

$$K_{\sigma} = 1.25$$

III.6.4 La FMM de la zone du stator et rotor

$$F_{Z1} = 2h_{Z1} \cdot H_{Z1} \quad (\text{III.65})$$

$$B_{Z1} = 1.9 \text{ T} \Rightarrow H_{Z1} = 2070 \text{ A/m (la courbe d'aimantation).}$$

$$F_{Z1} = 2 * 8.2070 * 10^{-3}$$

$$F_{Z1} = 33.12 \text{ A}$$

$$F_{Z2} = 2h_{Z2} \cdot H_{Z2} \quad (\text{III.66})$$

$$B_{Z2} = 1.75 \text{ T} \Rightarrow H_{Z2} = 1290 \text{ A/m (la courbe d'aimantation).}$$

$$F_{Z2} = 2 * 19.96 * 1290 * 10^{-3}$$

$$F_{Z2} = 51.49 \text{ A}$$

III.6.5 Le coefficient de saturation de la zone dentaire

$$K_{\mu d} = 1 + \frac{F_{Z1} + F_{Z2}}{F_{\sigma}} \quad (\text{III.67})$$

$$K_{\mu d} = 1 + \frac{33.12 + 51.49}{459.11}$$

$$K_{\mu d} = 1.184$$

III.6.6 Les FMM des dos du stator et du rotor

$$F_a = L_a * H_a \quad (\text{III.68})$$

$$B_a = 1.46 \text{ T} \Rightarrow H_a = 1085 \text{ A/m (la courbe d'aimantation).}$$

$$L_a = \frac{\pi(D_a - h_a)}{2P} = \frac{\pi(168 - 20)}{2P} \quad (\text{III.69})$$

$$L_a = 116.18 \text{ mm}$$

$$F_a = L_a * H_a$$

$$F_a = 116.18 * 1085 * 10^{-3}$$

$$F_a = 126.02 \text{ A}$$

$$F_j = L_j * H_j \quad \text{(III.70)}$$

$$B_j = 1.31 \text{ T} \Rightarrow H_a = 975 \text{ A/m (la courbe d'aimantation).}$$

$$L_j = \frac{\pi(D_{ar} - h_j)}{2P} = \frac{\pi(111.4 - 16.42)}{4} \quad \text{(III.71)}$$

$$L_j = 100.33 \text{ A}$$

$$h_j = \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{en2} \quad \text{(III.72)}$$

$$h_j = \frac{111.4 - 38.64}{2} - 19.96$$

$$h_j = 16.42$$

$$F_j = L_j * H_j$$

$$F_j = 100.33 * 975$$

$$F_j = 97.82 \text{ A}$$

$$F_{\Sigma} = F_{\square} + F_{Z1} + F_{Z2} + F_a + F_j \quad \text{(III.73)}$$

$$F_{\Sigma} = 459.11 + 33.12 + 51.49 + 126.05 + 97.82$$

$$F_{\Sigma} = 767.59 \text{ A}$$

III.6.7 Coefficient de saturation de CM

$$K_{\mu} = \frac{F_{\Sigma}}{F_{\square}} = \frac{767.59}{459.11} \quad \text{(III.74)}$$

$$K_{\mu} = 1.67$$

III.6.8 Le courant d'aimantation

$$I_{\mu} = \frac{P \cdot F_{\Sigma}}{0.9 \cdot m \cdot w_1 \cdot K_{B1}} \quad (\text{III.75})$$

$$I_{\mu} = \frac{2 \cdot 767.59}{0.9 \cdot 3 \cdot 157 \cdot 0.95}$$

$$I_{\mu} = 3.81 \text{ A}$$

III.6.9 La valeur relative

$$I_{\mu}^* = \frac{I_{\mu}}{I_{1nom}} = \frac{3.81}{6.72} \quad (\text{III.76})$$

$$I_{\mu}^* = 56.69 \%$$

Conclusion

Au terme de ce chapitre, on a concentré les méthodes des calculs des moteurs asynchrones à cage, comme le choix des dimensions principales, le calcul des dimensions de la zone de dents du stator et de l'entrefer, le calcul du rotor en court-circuit, et le calcul du circuit magnétique, sur un moteur de 3 Kw, 220 V, 2p=4 .

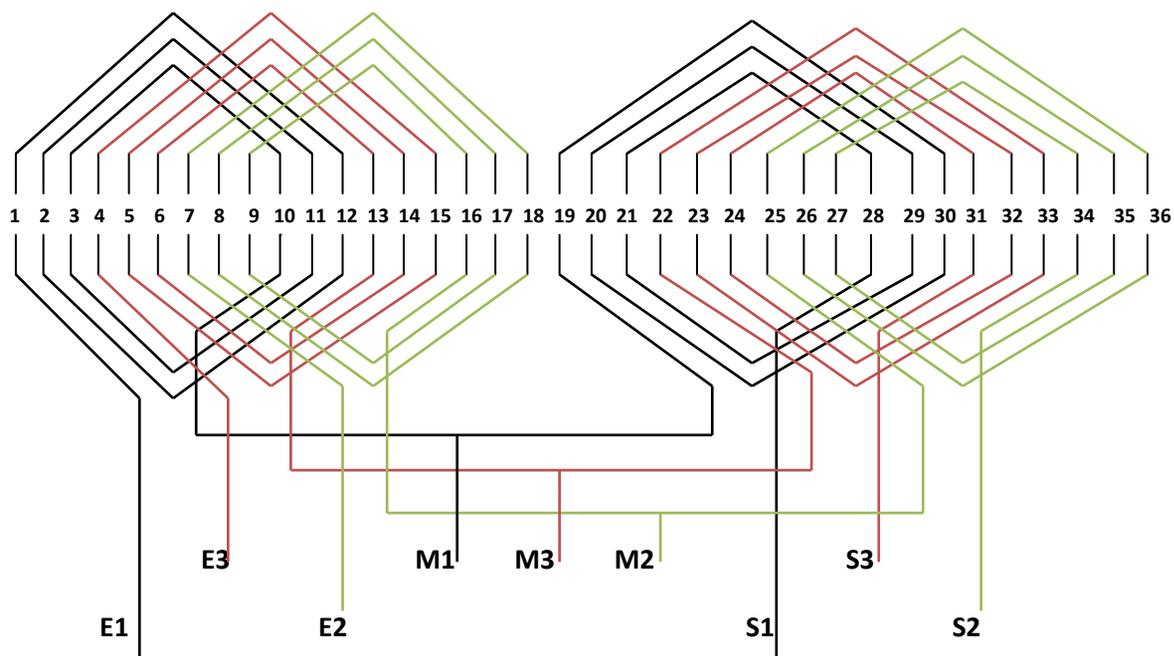


Fig. III.1 schéma d'un enroulement concentrique à une couche avec point médiane

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif visé est technique de bobinage d'un moteur asynchrone à deux vitesses à cage d'écureuil,

Les statistiques menées par plusieurs firmes sur l'amélioration de la fiabilité des machines électriques on montré que 70% à 90% des défauts ou des arrêts de ces dernières sont dues aux enroulements.

Le premier chapitre est consacré à l'étude des machines à courant alternatif par la présentation des généralités sur les machines à courant alternatif.

Dans le deuxième chapitre, on présente : les différents types de bobinage des machines asynchrones et leur de connexion entre les enroulements statorique pour la variation de la vitesse du moteur asynchrone. Pour changer la vitesse on utilise un commutateur de position (position 1 pour la grande vitesse et position 2 pour la petite vitesse ou l'inverse).

Dans la troisième chapitre on détermine les dimensions principaux, type d'enroulement et le calcul de la zone dentaire statorique et rotorique, et calcul les paramètres de circuit magnétique de la machine à étudier, et on réalise le schéma de l'enroulement statorique d'un moteur asynchrone à deux vitesses avec des points médianes.

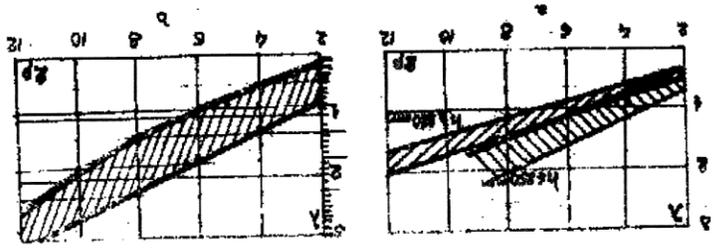
On espère apporter par ce travail une contribution à la communauté pédagogique, et on souhaite proposer un travail concernant les techniques de bobinage d'un moteur asynchrone à deux vitesses, pour étudier la conception de la machine.

En fin, on présente le bilan de ce travail, et les perspectives envisagées.

Conclusion générale

Annexe

Mr. G. I. Report γ 1/2 pour des moteurs asynchrones
 a - pour IP 441 b - pour IP 23.



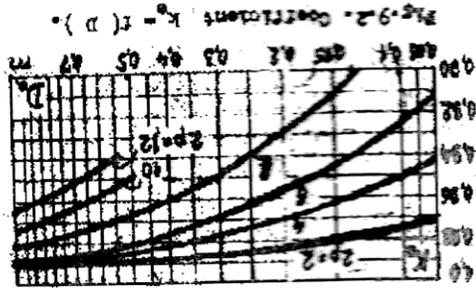
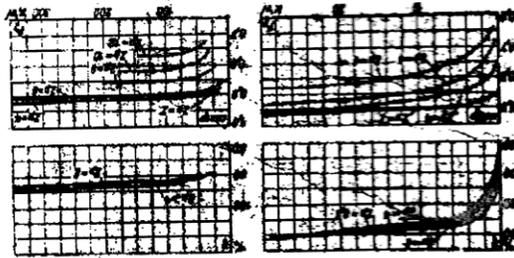


Fig. 9.2. Coefficient $K_p = f(s)$.

A : pour $P_2 < 30$ Kw ; B : pour $P_2 < 400$ Kw

Fig. 9.3 : Dépendance $\eta \cdot \cos \phi = f(p_2)$ des moteurs asynchrones
(A) (B)



p_2	K_p
2	0,58 - 0,97
4	0,64 - 0,68
6	0,70 - 0,72
8 - 12	0,74 - 0,77

Rapport entre les diamètres intérieur (D) et extérieur (D_2) $D_2 = K_D D$

Tableau (9.5)

H, (mm)	2p	Forme de l'encoche	Type d'enroulement
50-160	2-8	Trapezoidale demi fermée	Concentrique a une couche monté fil a fil
180-250	2-12	--	Imbriqué a deux couches monté fil a fil
280-315	10-12	--	--
280-355	2-8	Rectangulaire demi ouverte	A deux couches en barre
400-450	2-12	Rectangulaire ouverte	A deux couches en barre

Les enroulements statoriques des machines asynchrones

Tableau (9.4)

2p	50-132	160-225	250-450
2	3 ; 4	5 ; 6	7 ; 8
4	2 ; 3	3 ; 4	4 ; 5
6	2 ; 3	3 ; 4	4 ; 5
8	1,5 ; 2	2 ; 3	3 ; 4
10	-	-	2 ; 3
12	-	-	2 ; 2,5

Pour H (mm)
Le nombre d'encoche par pole et par phase q₁ des moteurs asynchrones

2p	Nombre d'encheche du stator	Sans inclinaison	Avec inclinaison
2	12 9* 15*	11*, 12*, 15*, 21*, 22* 15*, (16*), 17*, 19, 32	14*, (18), 19*, 22*, 26, 28*, (30), 31, 33, 34, 35 18, 20, 26, 31, 33, 34, 35 (18), 2*, 3*, 24, 37, 39, 40 25, 27, 29, 43, 45, 47 -
4	12 18 24 36 42 48 60 72	9* 10*, 14* 15*, 16*, 17*, (32) 26, 44, 46 (34), (50), 52, 54 34, 38, 56, 58, 62, 64 50, 52, 68, 70, 74 62, 64, 80, 82, 86	15* 18*, 22* 16, 18, (20), 30, 33, 34, 35, 36 (24), 27, 28, 30, (32), 34, 45, 48 (33), 34, (38), (51), 53 (36), (38), (39), 40, (44), 57, 59 48, 49, 51, 56, 64, 69, 71 61, 63, 68, 76, 81, 83
6	36 54 72 90	26, 46, (48) 44, 64, 66, 68 56, 58, 62, 82, 84, 86, 88 74, 76, 78, 80, 100, 102, 104	28*, 33, 47, 49, 50 42, 43, 51, 65, 67 83, 85, 87, 90 75, 77, 79, 101, 103, 105
8	48 72 84 96	(34), 36, 44, 62, 64 56, 58, 86, 88, 90 66, (68), 70, 100, 98, 102, 104 78, 82, 110, 112, 114	35, 44, 61, 63, 65 56, 57, 59, 85, 87, 89 (68), (69), (71), (97), (99), (101) 79, 80, 81, 83, 109, 111, 113

2p	Nombre d'encoche du stator	Sans inclinaison	Avec inclinaison
10	60 90 120	44, 46, 74, 76 68, 72, 74, 76, 104, 106, 108, 110 112, 114 86, 88, 92, 94, 96, 98, 102, 104, 106, 134, 136, 138, 140, 142, 144, 146	57, 69, 77, 78, 79 70, 71, 73, 87, 93, 107, 109 99, 101, 103, 117, 123, 137, 139
12	72 90 108 144	56, 64, 80, 88 68, 70, 74, 88, 98, 106, 108, 110 86, 88, 92, 100, 116, 130, 132 124, 128, 136, 152, 160, 164, 166, 168, 170, 172	69, 75, 80, 89, 91 (71), (73), 86, 87, 93, 94, (107), 84, 89, 91, 104, 111, 112, 125, 127 125, 127, 141, 147, 161, 163
14	84 126	74, 94, 102, 104, 106 106, 108, 116, 136, 144, 146, 148, 150, 152, 154, 158	75, 77, 79, 89, 91, 93, 103 107, 117, 119, 121, 131, 133, 135, 145
16	96 144	84, 86, 106, 108, 116, 118 120, 122, 124, 132, 134, 154, 156, 164, 166, 168, 170, 172	90, 102 138, 150

Le nombre d'encoches préférable des moteurs asynchrones

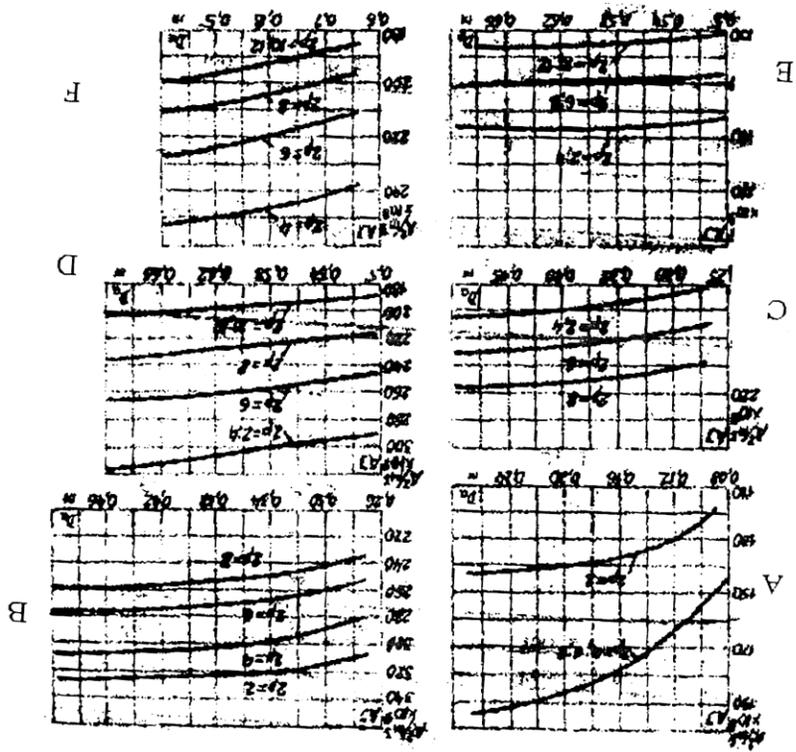
Remarque 1 : * - nombre d'encoches utilisée dans les machines a faible puissance

2 : on a pris entre parentes

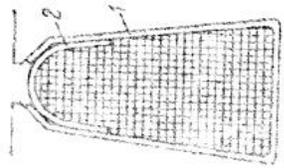
Le nombre d'encoches qui provoquer l'augmentation de la vibration des moteurs

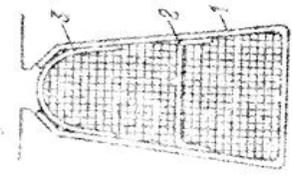
(Tableau 9.8)

Fig.9 valeurs moyennes du produit Ad des moteurs asynchrones :
 A- pour IP44, h=132mm,
 C- pour IP44, h=280-355mm,
 E- pour IP23, h=280-355mm,
 B- pour IP44, h=160-250mm,
 D- pour IP23=160-250
 F- pour IP23, U=6000V



2.2 Isolation des enroulements des machines asynchrones montés fil à fil (h = 250 mm, U = 660 V, classes d'isolation B, F, H)

Figure	Type de l'enroulement	Hauteur de l'axe de rotation, mm	Position	Matériaux		Epaisseur, mm	Nombre de couches	Epaisseur unilatérale
				classe B	classes F, H			
	à une couche	50-80	1	Plastique en fibre de verre Imidoflexe	0.2 0.3	1 1	0.2 0.3	
			2					"
		90-132	1	Plastique en fibre de verre Imidoflexe	0.25 0.35	1 1	0.25 0.35	
			2					"
		160	1	Plastique en fibre de verre Imidoflexe	0.4 0.5	1 1	0.4 0.5	
			2					"
à deux couches	à deux couches	180-250	1	Plastique en fibre de verre Imidoflexe	0.4 0.4 0.5	1 1 1	0.4 0.4 0.5	
			2					"
			3					"



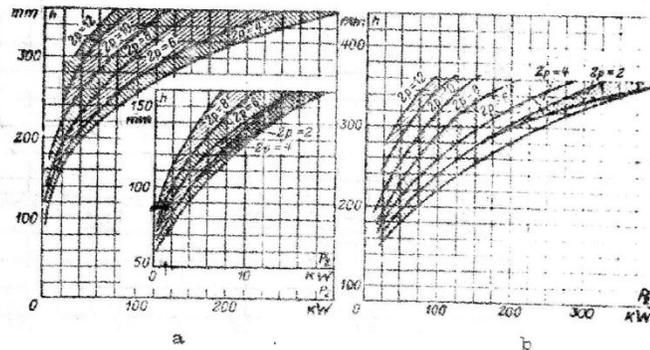


Fig. 9.1. La hauteur de l'axe de rotation des moteurs asynchrones $h = f(P_2, n)$: a - pour IP 44; b - pour IP 23.

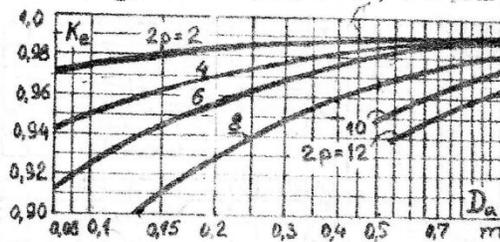


Fig. 9.2. Coefficient $k_a = f(D)$.

6698 Rapport entre les diamètres intérieur D et extérieur D_a . $K_D = D/D_a$

$2p$	2	4	6	8 - 12
K_D	0,52 - 0,57	0,64 - 0,68	0,70 - 0,72	0,74 - 0,77

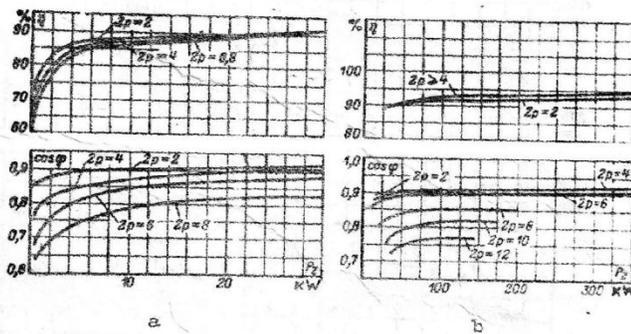
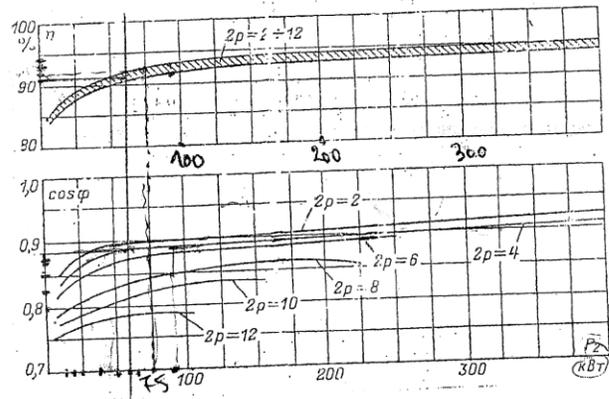


Fig. 9.3. Dépendance η et $\cos \phi = f(P_2)$ des moteurs asynchrones: a - pour $P_2 < 30$ kW; b - pour $P_2 < 400$ kW.

(5)

Q [5]



li inductiv
mi lanta fact
in MAS et. 0,8

Fig 9.4. Dependence η et $\cos \varphi = f(s)$ des moteurs asynchrones IP 23

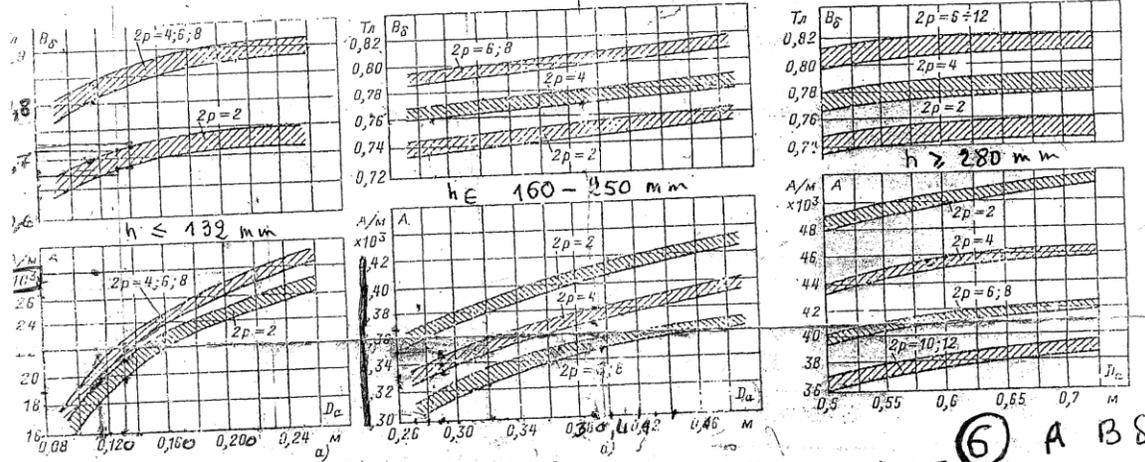
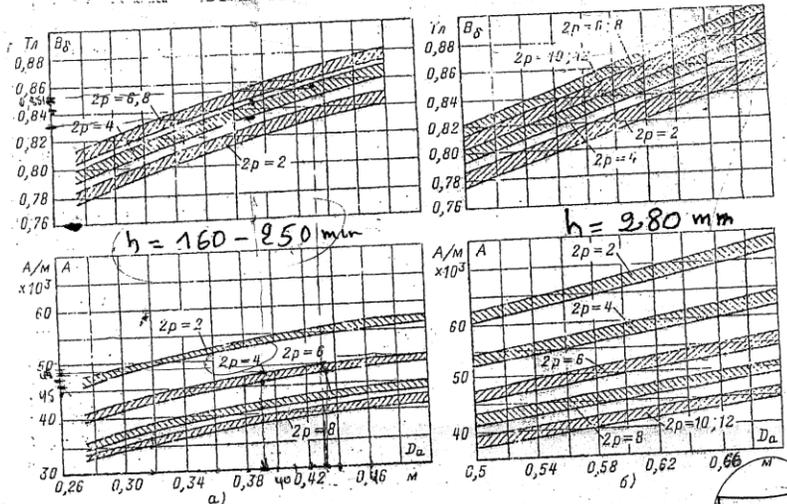


Fig 9.5. Charges Electromagnétiques des moteurs asynchrones IP 44

6 A B S



$\tau = 2p q m$
 $6 = 4 \cdot 9 \cdot 3$
12

Q [6] 3,8
2,4

7,75
12

Fig 9.6. Charges électromagnétiques des moteurs asynchrones IP 23

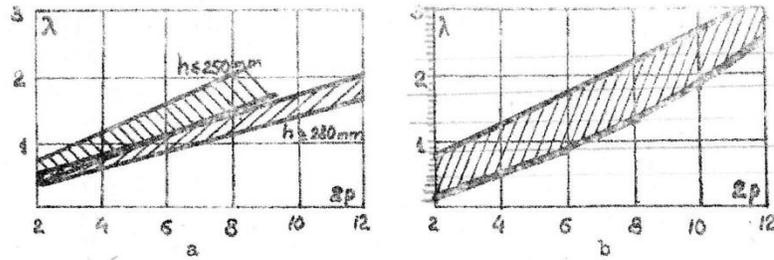


Fig.9.7. Rapport $\lambda = 1 / \alpha$ pour des moteurs asynchrones: a - pour IP 44; b - pour IP 23.

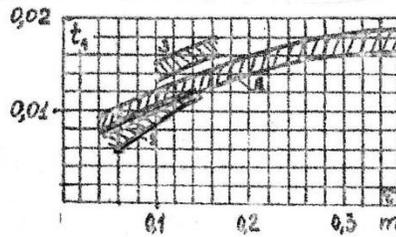


Fig.9.8. Le pas dentaire du stator des moteurs asynchrones à enroulement monté fil à fil: 1 - pour $h \leq 90$ mm; 2 - pour $h = 100 \div 250$ mm; 3 - pour $h \geq 280$ mm, $2p \geq 10$.

Le pas dentaire du stator à encoches rectangulaires

Tableau 9.3

Pas polaire, m	Pas dentaire t_1 , m pour la tension, V		
	< 600	3000	6000
< 0,15	0,016 - 0,020	0,022 - 0,025	0,024 - 0,030
0,15 - 0,4	0,017 - 0,022	0,024 - 0,027	0,026 - 0,034
> 0,4	0,020 - 0,028	0,026 - 0,032	0,028 - 0,038

*z1 doit être multiple de (2mp)
(mp = 12)*

Figure 9.7. Moyennes de la pente des courbes de débit-charge hydrauliques

h, mm		Nombre des piles z _p			
2	4	6-9	10	12	4-9
50-65	1°8	1°8	2°0	2°0	2°0
71	2°0	2°0	2°7	2°7	2°7
80, 90	3°0	3°0	3°5	3°5	3°5
100, 112	3°5	3°5	4°0	4°0	4°0
132	4°0	4°0	4°5	4°5	4°5
160-250	4°0	4°0	4°7	4°7	4°7
280-315	-	-	-	-	4°0

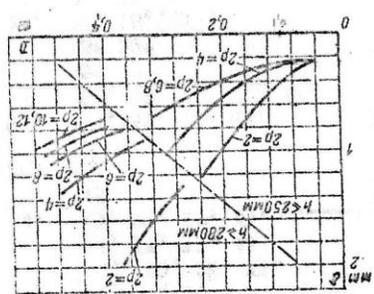


Figure 9.10. Valeurs de l'entente des courbes de débit-charge hydrauliques en fonction du diamètre.

ANNEXE I

COURBES D'AIMANTATION, INTERPOLATION

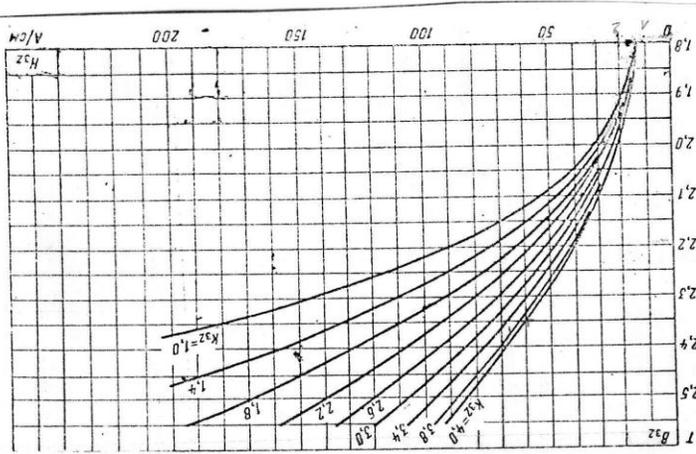


Fig. 1.a: Courbe d'aimantation pour les dents des moteurs asynchrones. (2013)

S.3

B ₂	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	
H ₂	61	68	76	86	96	107	121	136	152	170	190	210	230	250	270	290	310	330	350	370	390	410
0.09	61	68	76	86	96	107	121	136	152	170	190	210	230	250	270	290	310	330	350	370	390	410
0.08	61	68	76	86	96	107	121	136	152	170	190	210	230	250	270	290	310	330	350	370	390	410
0.07	61	68	76	86	96	107	121	136	152	170	190	210	230	250	270	290	310	330	350	370	390	410
0.06	61	68	76	86	96	107	121	136	152	170	190	210	230	250	270	290	310	330	350	370	390	410
0.05	61	68	76	86	96	107	121	136	152	170	190	210	230	250	270	290	310	330	350	370	390	410
0.04	61	68	76	86	96	107	121	136	152	170	190	210	230	250	270	290	310	330	350	370	390	410
0.03	61	68	76	86	96	107	121	136	152	170	190	210	230	250	270	290	310	330	350	370	390	410
0.02	61	68	76	86	96	107	121	136	152	170	190	210	230	250	270	290	310	330	350	370	390	410
0.01	61	68	76	86	96	107	121	136	152	170	190	210	230	250	270	290	310	330	350	370	390	410
0	61	68	76	86	96	107	121	136	152	170	190	210	230	250	270	290	310	330	350	370	390	410
0.00	61	68	76	86	96	107	121	136	152	170	190	210	230	250	270	290	310	330	350	370	390	410

Fig. 1.b: Tôles d'acier magnétique 2013 (courbe d'aimantation principale).

$B > 1.8 \rightarrow H = 0, 16 B + 0 \text{ pour } B > 1.8$

14

13

25
gwm

Bibliographie

Bibliographies

- [1]- **AOURFIS et ZROUROU.T** : « *Etude par simulation des moteurs asynchrones de mêmes puissances avec différentes formes d'encoche rotoriques*. Bejaia, 2014»
- [2]- **Philippe BARRET**: «*Machines électriques, Théorie et mise en œuvre, Ellipses, éditions Marketing S.A 2002*».
- [3]- **M. KOSTENKO, L. PIOTROVSKI**: «*Machines électriques, tome II. Éditions Mir 1979* »
- [4]- **R. MERLET** : « *technologie d'électricité et professionnelle, bobinage des machines électriques et des transformateurs statiques*»
- [5]-**REZGUI Salah Eddine** : «*Commande de machine électrique en environnement*. Constantine 2009»
- [6]-**R.P.BOUCHARDE et G.OLIVIER**: «*Conception de moteur asynchrones triphasés, 2^{ème} édition L'Ecole Polytechnique, Montréal, 1999.* »
- [7]- **Théodore WILDI** : «*Electrotechnique, institut de recherche d'Hydro-Québec, 3^{ème} édition, 1999.* »
- [9]- **P.LEBRUN** : «*Machine asynchrone, technologie, choix et alimentation des machines asynchrones. Édition Luise, ARMAND de Strasbourg.* »
- [11]- **ZAMECHE.A et ZIANI.A** : «*Etude et modélisation du moteur asynchrone à encoches profondes. Bejaia, 2008*»
- [12]-**Abdessemed R, Tomachevitch V. F.**, « *Enroulements des machines électriques* », Livre, Université Batna, 2012
- [13]- **POLOUJADOFF M** : «*Machine asynchrone, régime permanent, Technique de l'ingénieur, traité génie électrique D3480.* »
- [14]- **F. RIOUX-DAMIDAU, C.RIOUX, A.GUERAUD** : « *Machines asynchrones à rotor massif composite revue de physique appliqué 1989*».
- [16]-**J.P.FANTON**: «*Electrotechnique, Machines et réseaux, ellipses 2002.* »
- [17]-**A.AZIB**: «*Optimisation de démarrage et régulation de vitesse de la machine asynchrone à grande inertie, mémoire d'ingénieur, université de Bejaïa 2005*»