

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la A Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D' INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Etude de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : **Sciences et Thecnologies**

Filière : **Génie Electrique**

Spécialité : **Machine Electrique**

Présenté par

Nadia ABBAS

Mohammed Ou Ramdane HASDANE

Thème

Conception Optimale d'un moteur asynchrone triphasé à rendement premium

Mémoire soutenu publiquement le 06 juillet 2017 devant le jury composé de :

M^{er} Azouz MIOUAT

MACA, UMMTO, Président

M^{er} Mohand Tahar BELASSEL

MCCA, UMMTO, Encadreur

M^{er} Rabah KHALDI

MACA, UMMTO, Examineur

M^{er} Abd El Ghani KIMOUCHE

MACA, UMMTO, Examineur

M^{me} Sadia HADJAZ

INGENIEUR, Electro-Industries AZAZGA, Co-Encadreur

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la A Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D' INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Etude de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : **Sciences et Thecnologies**

Filière : **Génie Electrique**

Spécialité : **Machine Electrique**

Présenté par

Nadia ABBAS

Mohammed Ou Ramdane HASDANE

Thème

Conception Optimale d'un moteur asynchrone triphasé à rendement prémium

Mémoire soutenu publiquement le 06 juillet 2017 devant le jury composé de :

M^{er} Azouz MIOUAT

MACA, UMMTO, Président

M^{er} Mohand Tahar BELASSEL

MCCA, UMMTO, Encadreur

M^{er} Rabah KHALDI

MACA, UMMTO, Examineur

M^{er} Abd El Ghani KIMOUCHE

MACA, UMMTO, Examineur

M^{me} Sadia HADJAZ

INGENIEUR, Electro-Industries AZAZGA, Co-Encadreur

REMERCIEMENTS

Nous remercions et nous rendons grâce tout d'abord à « ALLAH » tout puissant de nous avoir donné la santé et le courage de mener à bon terme ce travail.

Comme nous tenons à adresser tout autres reconnaissances et notre gratitude à :

**Mr BELASSEL.M-T notre promoteur, de nous avoir encadré, Suivi et orienté tout au long de notre travail.*

**M^{me} HADJAZ .S notre co-encadreur, pour son aide, sa tolérance et ses conseils au cours de notre projet, ainsi que M^{re} IGUER, et tous le personnel de l' Electro-Industrie-AZAZGA.*

**Nous remercions d'avance, les membres du jury d'avoir accepté d'examiner notre travail.*

Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui ont contribué de près où de loin à la réalisation de ce travail.

A tous les enseignants qui ont contribué à notre instruction.

Dédicaces

*Pour que ma réussite soit complète, je la partage avec toutes
les personnes que j'aime.*

Je dédie ce modeste travail à :

*Mes très chers parents pour leur amour et pour le courage et
la volonté qu'ils m'ont inculqués ;*

A la mémoire de mes grands-parents

*A mes adorables frères et sœurs : Nassima, Samira, Lamia,
Merieme, et Nabile;*

A notre poussin Midou et ses parents ;

A toute la famille ;

*Et en particulier à ma chère « Lynda » qui m'a
donnée de l'aide et du soutien durant mon travail ;*

A ma collègue de travail Nadia ;

A tous mes amis et collègues sans exception ;

A tous ceux qui m'aiment ; et tous ceux que j'aime.

Mohammed ou Ramdane

Dédicaces

*Pour que ma réussite soit complète, je la partage avec toutes
les personnes que j'aime.*

Je dédie ce modeste travail à :

*Mes très chers parents pour leur amour et pour le courage et
la volonté qu'ils m'ont inculqués ;*

*A mes adorables frères et sœurs : Hamid, Hacene, Farida,
Fadila, Ahcene, Hocine, Mehdi ; A sadia et son mari Yacine
et leurs deux anges Dassine et Delina ; A mouh et sa femme
Malha et la petite Mayessen.*

*Et en particulier à mon cher « Sedik » qui m'a donné
de l'aide et du soutien durant mon travail ;*

A toute la famille ;

A tous mes amis et collègues sans exception ;

A mon collègue de travail Med ou Ramdane ;

A tous ceux qui m'aiment ; et tous ceux que j'aime

Nadia



Sommaire

Sommaire

<i>Introduction générale</i>	0
<i>Chapitre I. Généralités sur la machine asynchrone</i>	1
<i>I.1. Introduction</i>	2
<i>I.2. Historique</i>	2
<i>I.3. Présentation du moteur asynchrone</i>	3
<i>I.4. Constitution du moteur asynchrone</i>	3
<i>I.4.1. le stator</i>	4
<i>I.4.2. Le rotor</i>	4
<i>I.4.3. Les différents types du moteur asynchrone</i>	5
<i>I.4.4. Le bobinage du moteur asynchrone</i>	6
<i>I.5. Principe de fonctionnement du moteur asynchrone</i>	10
<i>I.5.1. lois fondamentales sur lesquelles est basé le fonctionnement du moteur asynchrone</i>	10
<i>I.5.2. principe de fonctionnement</i>	12
<i>I.5.3. principe de fonctionnement d'un moteur à double cages</i>	13
<i>I.5.4. Vitesse de synchronisme</i>	14
<i>I.6. Le glissement d'un moteur asynchrone</i>	14
<i>I.7. Le bilan de puissance du moteur asynchrone</i>	15
<i>I.8. Classification des moteurs asynchrones à cage</i>	16
<i>I.8.1. Classification selon la NEMA</i>	16
<i>I.8.2. Classification selon les classes de rendement CEI</i>	18
<i>I.9. Les caractéristiques des moteurs à rendement premium</i>	20
<i>I.10. Les avantages d'utilisation des moteurs à rendement premium</i>	20
<i>I.11. Couplage des moteurs asynchrones</i>	21
<i>I.12. Démarrage des moteurs asynchrones</i>	22
<i>I.12.1. Différents types de démarrage d'un moteur asynchrone</i>	22
<i>I.12.2. Démarrage d'un moteur asynchrone à double cages</i>	23
<i>I.13. Freinage des moteurs asynchrones</i>	23
<i>I.13.1. Freinage hyper-synchrone</i>	23
<i>I.13.2. Arrêt par injection de courant continu</i>	24
<i>I.13.3. Arrêt à contrecourant</i>	24
<i>I.13.4. Freinage mécanique par électro-frein</i>	24
<i>Cahier de charges</i>	25
<i>Chapitre II. Dimensionnement et calcul des performances du moteur</i>	26

<i>II.1. Introduction</i>	26
<i>II.2. Présentation de l'entreprise ELECTRO-INDUSTRIES AZAZGA</i>	26
<i>II.2.1. Situation géographique</i>	27
<i>II.2.2. Historique de l'entreprise</i>	27
<i>II.2.3. Les différentes unités de l'entreprise</i>	27
<i>II.2.4. Production de l'entreprise</i>	28
<i>II.3. Aperçus sur le moteur 400-4 pôles</i>	28
<i>II.3.1. Calcul de l'enroulement du moteur</i>	28
<i>II.4. Dimensionnement et calcul du moteur asynchrone 400-4 pôles</i>	29
<i>II.4.1. Dimensionnement des parties principales</i>	29
<i>II.4.2. Calcul du circuit magnétique</i>	38
<i>II.4.3. Calcul des paramètres électriques des enroulements</i>	41
<i>II.4.4. Calcul des pertes et du rendement</i>	49
<i>II.5. Calcul des performances du moteur</i>	51
<i>II.5.1. Schéma équivalent d'un moteur à deux cages</i>	52
<i>II.5.2. Caractéristique de fonctionnement du moteur</i>	52
<i>II.5.3. Caractéristiques de démarrage</i>	55
<i>II.6. Tableaux des résultats du calcul optimal</i>	56
<i>II.7. Comparaison des résultats</i>	60
<i>II.7.1. Interprétation des résultats</i>	62
<i>II.7.2. Comparaison entre le moteur calculé et le moteur existant</i>	63
<i>II.8. Conclusion</i>	63
<i>Chapitre III. Modélisation par éléments finis d'un moteur asynchrone à double cage</i>	63
<i>III.1. Introduction</i>	64
<i>III.2. Les équations de Maxwell</i>	65
<i>III.3. Etape de mise en œuvre du problème sous FEMM</i>	66
<i>III.4. Structure de la machine étudiée</i>	66
<i>III.5. Le maillage triangulaire</i>	67
<i>III.6. Visualisation des lignes de champ</i>	68
<i>III.7. Visualisation de l'induction magnétique</i>	68
<i>III.8. L'induction magnétique normale dans l'entrefer</i>	69
<i>III.9. Module induction magnétique normale dans l'entrefer</i>	69
<i>III.10. Potentiel vecteur magnétique</i>	70
<i>III.11. Conclusion</i>	70

Conclusion générale..... 70

Annexe

Bibliographie



Introduction générale

Introduction générale

Vu sa facilité de mise en œuvre, son coût de fabrication relativement faible, son bon rendement et son excellente fiabilité, le moteur asynchrone ou moteur à induction est actuellement le moteur électrique dont l'usage est plus répandu dans les domaines industriels et domestique.

Dans le domaine de la construction des moteurs, il existe plusieurs méthodes de calcul et de dimensionnement qui se diffèrent d'un constructeur à un autre.

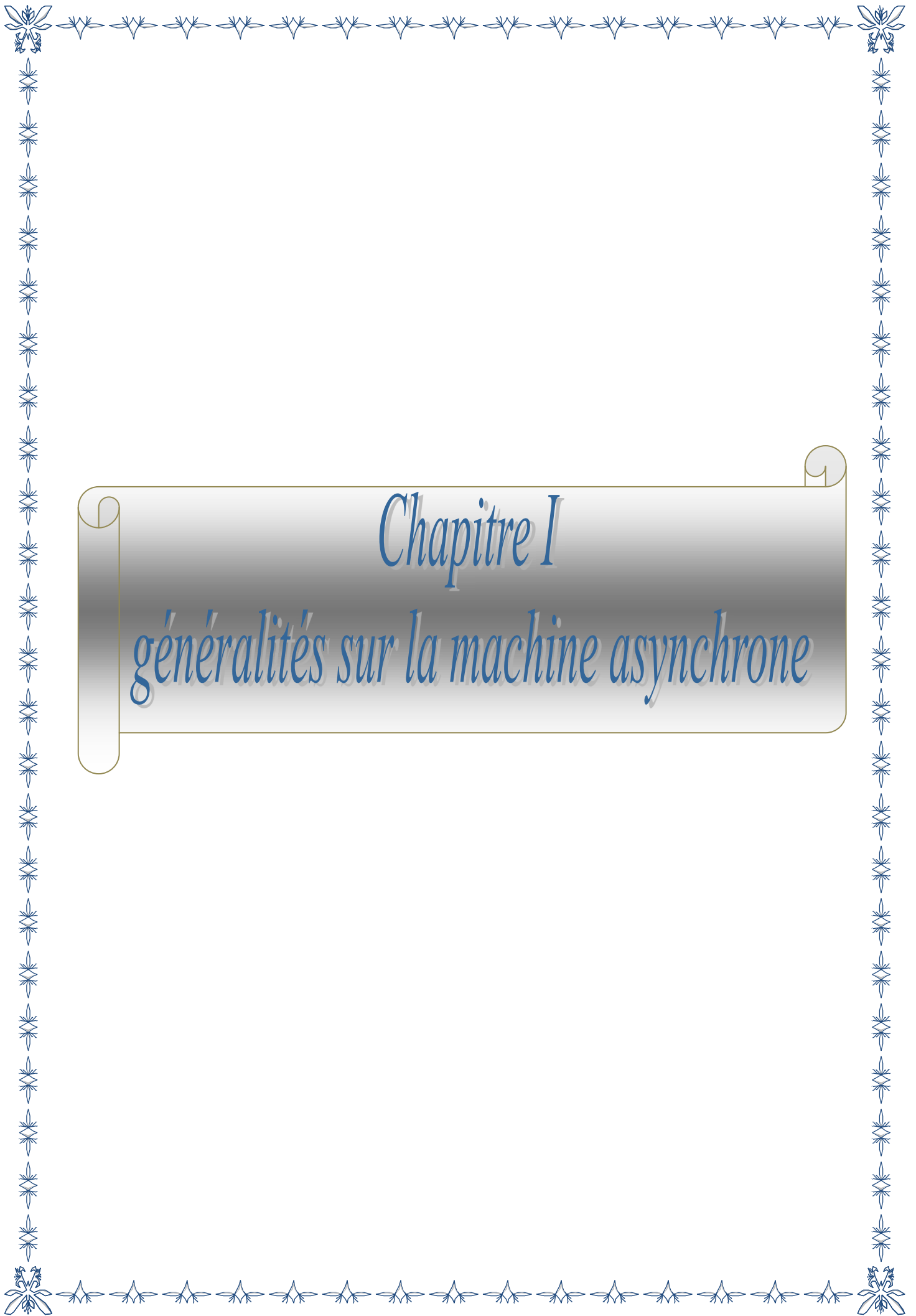
En conséquence la construction des machines électriques est devenue un art sur la base de formules semi empirique ou chaque constructeur développe une méthode de calcul plus en moins précise, qui tient compte des hypothèses tirées des expériences passées.

À la suite de la crise énergétique, les fabricants des moteurs électriques ainsi que les consommateurs s'intéressent à la réduction de consommation d'énergie des systèmes électriques. Ce qui conduit au lancement d'importants travaux à travers le monde, particulièrement pour l'amélioration du rendement des moteurs.

C'est dans le cadre de calcul d'un moteur asynchrone à double cage, à rendement premium qui définit comme un rendement très élevé ; tout en respectant un cahier de charge et en agissant sur les différents paramètres de la machine, ensuite en comparant les résultats trouvés à ceux d'un moteur standard fabriqué par Electro-industrie d'AZAZGA, et c'est le but de notre travail.

À l'aide du logiciel de calcul et de programmation « Mathcad », qui est un logiciel de calcul mathématique nous allons utiliser une méthode de calcul semi-empirique, elle repose essentiellement sur un nombre élevé de formules développées en associant les connaissances théoriques et l'expérience pratique des constructeurs.

Le contenu de notre travail se résume par trois chapitres dont le premier chapitre, traite des généralités sur les moteurs asynchrones, tandis que le deuxième chapitre sera consacré pour le dimensionnement et le calcul des performances du moteur et pour la comparaison des résultats trouvés aux résultats du moteur réel fabriqué par l'Electro-industrie, quand au dernier chapitre, il sera basé sur une modélisation avec le logiciel FEMM (Finit Element Magnetique Method) pour un calcul par élément fini des champs magnétiques et en fin nous terminerons notre travail par une conclusion générale.



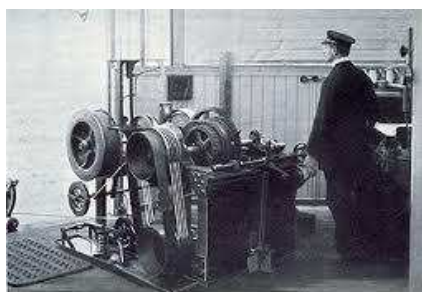
Chapitre I
généralités sur la machine asynchrone

Chapitre I. Généralités sur la machine asynchrone**1.1. Introduction**

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

1.2. Historique

La machine asynchrone a pu être réalisée grâce aux trois grands inventeurs ; En 1887, Nikola Tesla dépose un brevet sur la machine asynchrone, puis en mai de l'année suivante cinq autres brevets ; Pendant la même période Galileo Ferraris publie des traités sur les machines tournantes, avec une expérimentation en 1885, puis une théorie sur la machine asynchrone en avril 1888 ; en 1889, Mikhaïl Dolivo Dobrovolski, électricien allemand d'origine russe, invente la première machine asynchrone à courant triphasé à cage d'écureuil qui sera construite industriellement à partir de 1891. Du fait de sa simplicité de construction, d'utilisation et d'entretien, de sa robustesse et son faible prix de revient, la machine asynchrone est aujourd'hui très couramment utilisée comme moteur dans une gamme de puissance allant de quelques centaines de watts à plusieurs milliers de kilowatts. Quand la machine asynchrone est alimentée par un réseau à fréquence fixe, il est difficile de faire varier sa vitesse. En outre, au démarrage, le couple est faible et le courant appelé est très élevé. Deux solutions historiques ont résolu ce dernier problème : le rotor à encoches profondes et le rotor à double cage mis au point en 1912 par Paul Boucherot. et grâce aux progrès de l'électronique de puissance, l'alimentation par onduleur à fréquence variable permet maintenant un démarrage convenable avec une vitesse réglable c'est pourquoi il est utilisable pour les motorisations des nouveaux TGV. [5]



Le grand treuil (1910)

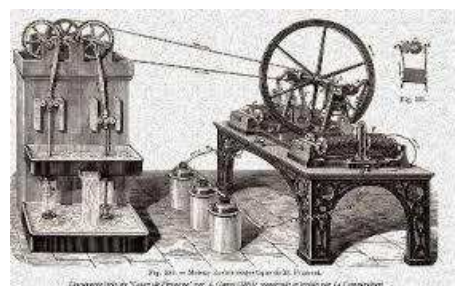


Figure I.1. Les premières machines asynchrones [10].

1.3. Présentation du moteur asynchrone

Le moteur asynchrone est une machine qui transforme l'énergie électrique apportée par le courant alternatif monophasé, biphasé, triphasé ou polyphasé en énergie mécanique. Il est caractérisé par des grandeurs d'entrée qui sont électriques et des grandeurs de sortie qui sont mécaniques. La conversion de l'énergie électrique s'effectue à 63 % à l'aide de moteurs asynchrones triphasés grâce à leur simplicité de construction, à leur robustesse et à leur facilité de démarrage. [7]

Pour convertir l'énergie électrique en énergie mécanique, le moteur utilise les lois de l'électromagnétisme. Et grâce à l'électronique de puissance cette machine aboutie a deux fonctionnements ; le premier c'est celui cité et le deuxième c'est le fonctionnement en génératrice dans le cas de la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique.

La machine asynchrone, connue également sous le terme <<Anglo-saxon>> machine à induction qui est une machine sans connexion entre sa partie fixe qui est le stator et sa partie tournante qui est le rotor, et on distingue deux type selon le rotor ; il y a le moteur asynchrone a cage d'écureuil et le moteur asynchrone a rotor bobiné (les symboles des deux types sont donnés dans la *Figure I.2*). Et le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de rotation du rotor est légèrement inférieure à la vitesse du champ tournant créé dans stator. [10]

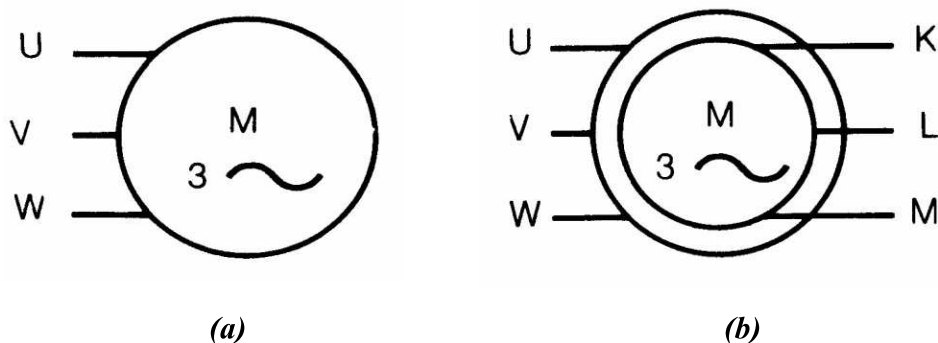


Figure I.2. Symbole électrique du moteur asynchrone [6].

1.4. Constitution du moteur asynchrone

Le moteur à induction triphasé (souvent appelé moteur asynchrone triphasé) comprend deux parties principales : un inducteur fixe nommé stator et un induit mobile nommé rotor. D'autres parties qui sont mécaniques sont présentées sur la figure ci-dessous :

La Figure I.3 représente l'éclaté du moteur asynchrone à cage.

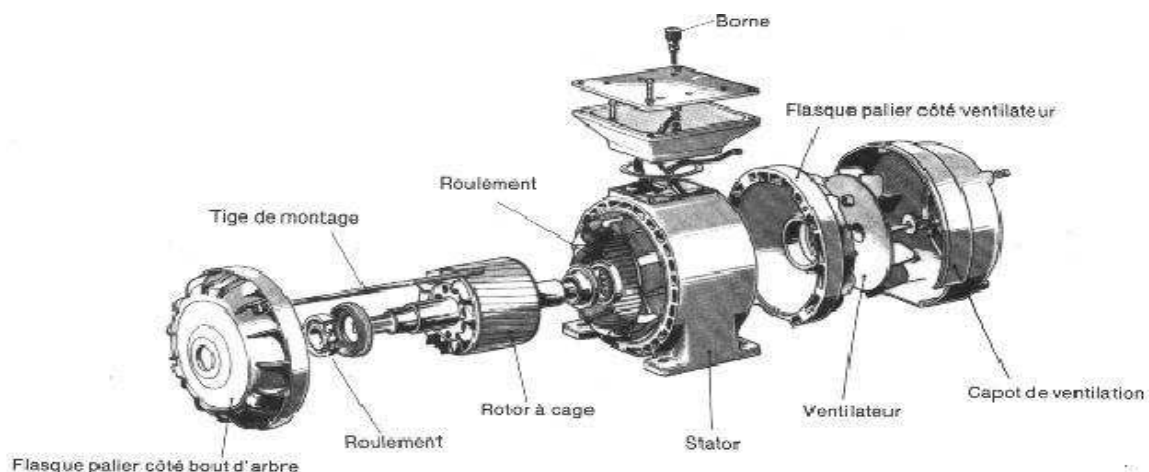


Figure I.3. Eclaté d'un moteur asynchrone à cage [5].

I.4.1. le stator

Dans tous les cas, le stator reste au moins dans le même principe ; il comporte une carcasse en acier renfermant un empilage de tôles identique isolée entre elles par oxydation ou par un vernis isolant et constituent un cylindre vide ; ces tôles sont percées de trous a leur périphérie intérieure. L'alignement de ces trous forme des encoches dans lesquelles on loge un bobinage triphasé. La Figure I.4 représente des stators avec le bobinage.



Figure I.4. Stator d'un moteur asynchrone [10].

I.4.2. Le rotor

C'est la partie mobile du moteur, son circuit magnétique est similaire a celui du stator, il est constitué d'un empilage de tôles minces isolées entre elles et formant un cylindre claveté sur l'arbre du moteur et il contient des encoches dont lesquelles est logé soit le bobinage pour les rotors bobinés ou bien des barre court-circuitées pour les rotors a cage.

1.4.3. Les différents types du moteur asynchrone

Les différents types de moteur asynchrone ne se distinguent que par le rotor ; dans tous les cas, le stator reste dans le même principe.

Les différents types de rotor qu'on peut distinguer sont :

➤ Rotor bobiné

Le rotor comporte un enroulement bobiné à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques empilés sur l'arbre de la machine. Les encoches découpées dans les tôles sont théoriquement parallèle à l'axe du moteur, mais on incline légèrement par rapport à cet axe de façon à réduire certaines pertes dues aux harmoniques d'espaces.

Les extrémités de l'enroulement rotorique sont sorties et reliées à des bagues montées sur l'arbre, sur lesquelles frottent des balais en carbone. [7]



Figure I.5. Rotor bobiné. [10]

➤ Rotor à cage

Dans ce cas le circuit du rotor est constitué de barres conductrices régulièrement réparties entre deux couronnes métalliques formant les extrémités, le tout rappelant la forme d'une cage d'écureuil. Bien entendu, cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique analogue à celui du rotor bobiné. Les barres sont faites en cuivre, en bronze ou en aluminium, suivant les caractéristiques mécaniques et électriques recherchées par le constructeur. La Figure I.6 montre des exemples de cage d'écureuil.



Figure I.6. Cage d'écureuil. [10]

➤ **Rotor à double cages**

Le rotor comporte deux cages coaxiales. L'une (fréquemment réalisée en laiton ou en bronze), externe, à résistance relativement élevée, est placée près de l'entrefer, l'autre (en cuivre), interne, de plus faible résistance, est noyée dans le fer. La *Figure I.7* représente un rotor à doubles cages. [7]

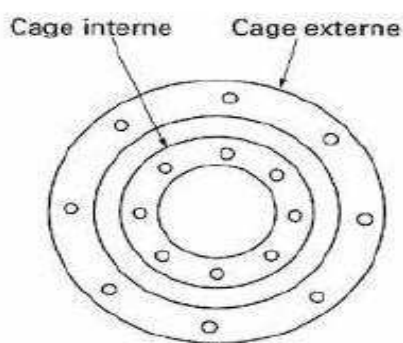


Figure I.7. Rotor à double cages. [7]

➤ **Rotor à encoches profondes**

Ce type comporte une cage rotorique simple avec des barres très plates s'enfonçant profondément dans le circuit magnétique. Ce type on utilise le phénomène de refoulement du courant dans les barres rotorique qui limite la pénétration du champ magnétique dans le rotor et le courant se localise dans la partie supérieure de la barre et donc la section utile sera réduite, la résistance augmente et le courant diminue. En fonction nominal, cet effet diminue avec l'augmentation de la vitesse et la diminution de la fréquence des courants rotoriques, ce qui va réduire la résistance des barres. [7]

1.4.4. Le bobinage du moteur asynchrone

L'enroulement est la partie essentielle, nécessaire pour la création de champ électromagnétique dans toutes les machines électriques. La puissance de la machine, la densité du courant et la qualité du cuivre sont les paramètres qui déterminent le choix de l'enroulement du stator à exécuter.

➤ **Les différents types de bobinage**

En triphasé, le stator comporte trois enroulements indépendants, chaque enroulement est composé de sections logées dans les encoche de circuit magnétique statorique ; le bobinage peut être :

○ **Enroulement à une couche**

Ce type d'enroulement se caractérise par un pas diamétral sur le plan électromagnétique et vu qu'il est simple dans la réalisation il est donc très utilisé pour le moteur asynchrone dont la hauteur d'axe est de 50 à 160 mm.

○ **Enroulement à deux couches**

Ce type d'enroulement se caractérise par un bon coefficient de bobinage ; il est largement utilisé dans le moteur asynchrone dont la hauteur d'axe est de 160 à 355 mm.

○ **Enroulements combinés une-deux couches**

Ce type d'enroulement est effectué par la combinaison des sections à une seule couche et à deux couches. Son avantage principal est la possibilité de le réaliser automatiquement.

Ces enroulements sont principalement réalisés par plusieurs façons, on distingue les plus utilisés :

a) **Enroulement ondulé**

L'enroulement ondulé est habituellement un bobinage à double couche, les conducteurs qui occupent des places analogiques sous deux pôles consécutifs sont connectés en série. Il faut toujours garder à l'esprit que chaque phase doit être séparée de deux autres phases de 120° . [9]

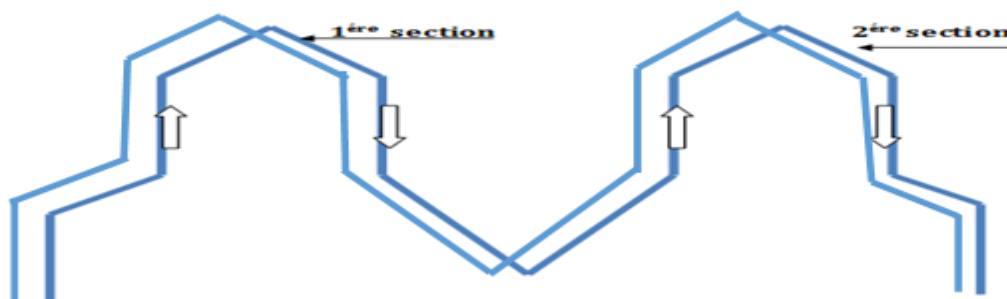


Figure I.8. Schéma explicatif de l'enroulement ondulé. [9]

b) **Enroulement imbriqué**

L'enroulement imbriqué est composé de groupe de bobine distribué uniformément au périphérique de stator ; généralement il est utilisé pour le bobinage des stators des moteurs de quelques dizaines de Kilowatts et plus.

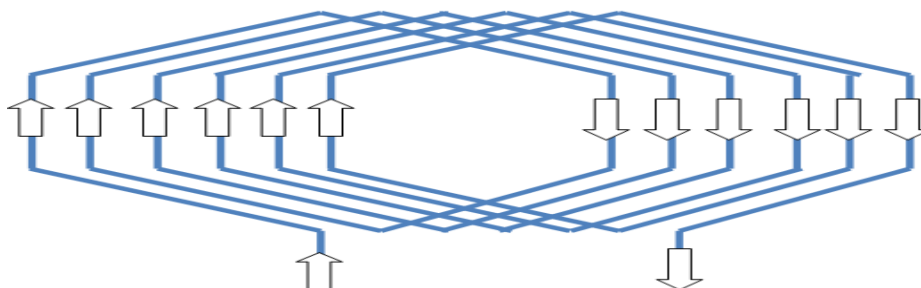


Figure I.9. Schéma explicatif de l'enroulement imbriqué. [9]

c) *Enroulement concentrique*

Il constitue le type d'enroulement le plus utilisé dans la fabrication d'un bobinage à simple couche, et double couche.

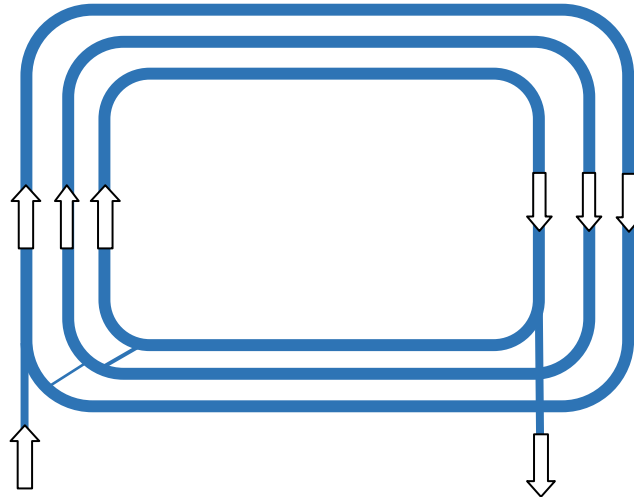


Figure I.10. Schéma d'un bobinage concentrique.

➤ *Groupement de bobines*

L'enroulement d'une machine asynchrone triphasé est composé d'un groupe de bobines, ces dernières peuvent être groupées en série ou en parallèle, en respectant le nombre de pôles ainsi la polarité dans chaque bobine comme il est représenté dans les schémas suivants.

➤ *Enroulement à deux pôles*

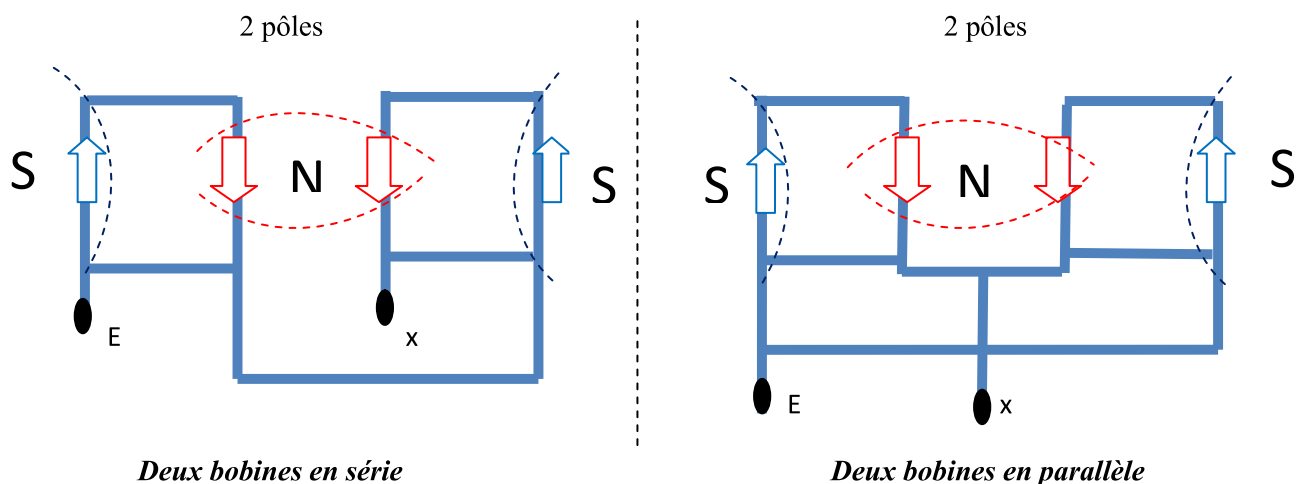


Figure I.11. Groupement de bobines pour deux pôles. [9]

➤ *Enroulement à quatre pôles*

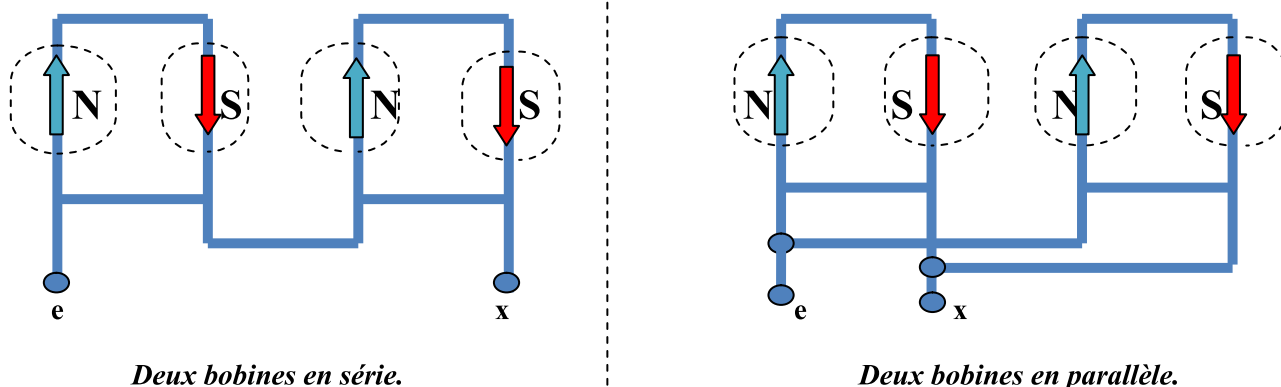


Figure I.12. Groupement de bobines pour quatre pôles. [9]

➤ *La sinusoïde d'induction comprise sous l'angle électrique*

La sinusoïde d'induction a une alternance positive sous le pôle nord et une alternance négative sous le pôle sud, chacune comprise sous un angle électrique qui est égale au pas polaire τ . l'induction pour les différent nombre de pole est donnée dans les figures si dessous. [9]

○ *La sinusoïde qui représente un angle électrique pour un moteur de deux pôles*

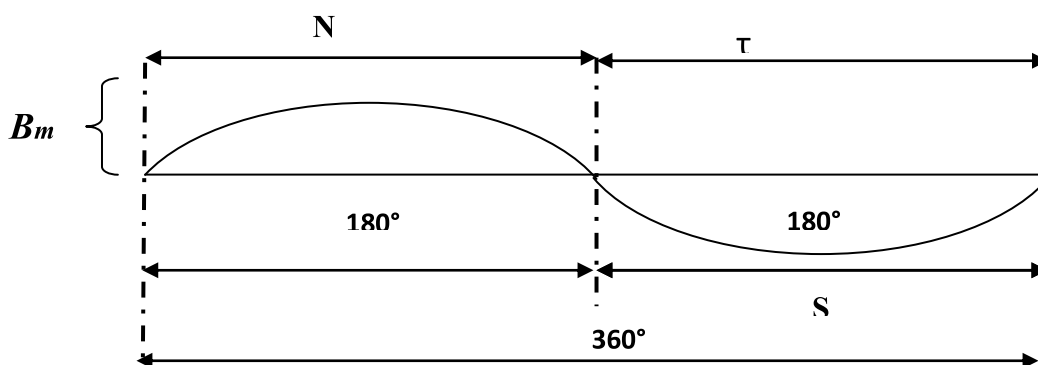


Figure I.13. L'induction magnétique pour deux pôles.

○ *La sinusoïde qui représente un angle électrique pour un moteur de quatre pôles*

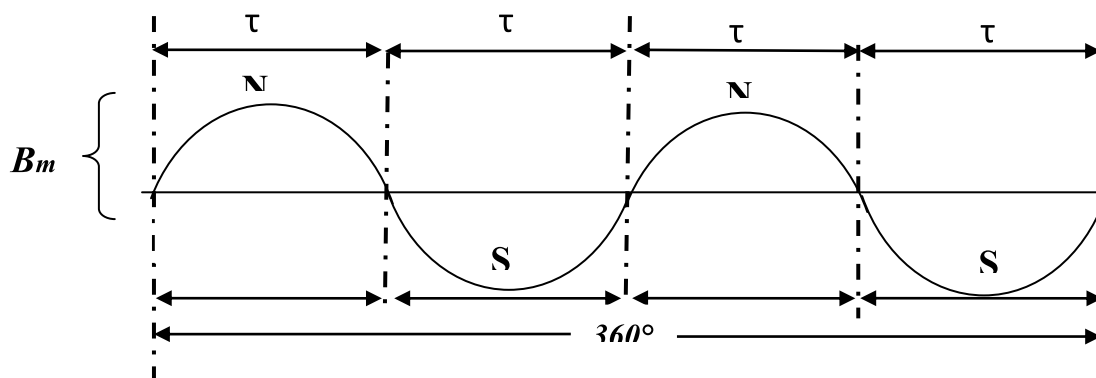


Figure I.14. L'induction magnétique pour quatre pôles.

➤ Isolation du bobinage

Dans l'industrie de fabrication des moteurs électriques, les conducteurs doivent toujours être isolés par mesure de sécurité afin d'éviter les courts circuits qui diminuent la qualité du moteur et apporter le maximum de sécurité, pour cela on a besoin de matériaux isolants de haute qualité et supportant les effets thermiques engendrés par le fonctionnement du moteur.

Et les matériaux d'isolation utilisés sont : caniveaux d'encoches, lames intermédiaires, cales de fermeture, gaines isolantes, séparateur de phase et Câble de raccordement.

➤ Classes d'isolation thermiques

La tâche la plus difficile et la plus importante est d'assurer la bonne tenue de l'isolation des enroulements, qui se dégrade pour des températures relativement peu élevées. Pour cette raison la charge admissible d'une machine est déterminée tout d'abord par la température admissible des isolants utilisés.

Les matériaux isolants utilisés dans la construction des machines électriques se divisent selon leur tenue à la chaleur en classe **Y**, **A**, **E**, **B**, **F**, **H** et **C** qui correspondent à des températures maximales 90°C, 105°C, 120°C, 130°C, 155°C, 180°C et supérieure à 180°C ; comme le montre le *tableau I.1.* [9]

Tableau I.1. Les classes d'isolation thermique.

<i>Y</i>	<i>A</i>	<i>E</i>	<i>B</i>	<i>F</i>	<i>H</i>	<i>C</i>
90°C	105°C	120°C	130°C	155°C	180°C	+180°C

I.5. Principe de fonctionnement du moteur asynchrone

I.5.1. lois fondamentales sur lesquelles est basé le fonctionnement du moteur asynchrone

➤ *Loi d'Ampère*

Lorsqu'un conducteur est traversé par un courant il y a une apparition d'un champ magnétique H qui est donné par la formule suivante :

$$H = \frac{N.I}{L} \text{ [A/m]} \quad (\text{I.1})$$

Avec :

H -champ magnétique ; L - longueur moyenne des lignes de champ.

N - nombre de spire ; I - courant circulant dans le conducteur.

Ce champ magnétique va créer une induction magnétique (B) qui est donnée la formule suivante

$$B = \mu_0 \cdot H \text{ [T]} \quad (\text{I.2})$$

Avec : μ_0 - la perméabilité de l'air et $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ [A/m]}$

➤ **Loi de Laplace**

Un conducteur L parcouru par un courant I et placé dans un champ magnétique B est soumis à la force de Laplace.

La valeur maximale de la force électromagnétique F est donnée par l'équation suivant.

$$F = B \times I \times L \quad (\text{I.3})$$

Avec:

F - force agissant sur le conducteur [N] ; L - longueur du conducteur [m].

B - l'induction magnétique [T] ; I - courant circulant dans le conducteur [A].

Si le conducteur fait avec le vecteur B un angle α on a : $F = B \times I \times L \times \sin \alpha$

➤ **Loi de Faraday (création)**

Toute variation de flux dans un circuit engendre une f.e.m dans ce circuit qui est égale à la dérivée par rapport au temps du flux qui traverse chaque spire du circuit. (Figure du conducteur traversé par un courant).

$$e = \frac{d\phi}{dt}$$

➤ **Loi de Lenz (sens)**

$$e = - \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{I.4})$$

La f.e.m. a un effet qui s'oppose à la cause qui lui donne naissance.

I.5.2. principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement des moteurs à courants alternatifs réside dans l'utilisation d'un champ magnétique tournant produit par des tensions alternatives la circulation d'un courant dans une bobine crée un champ magnétique B . Ce champ est dans l'axe de la bobine, sa direction et son intensité sont fonction du courant I . C'est une grandeur vectorielle. Si le courant est alternatif, le champ magnétique varie en sens et en direction à la même fréquence que le courant. Dans le cas du moteur triphasé, les trois bobines sont disposées dans le stator à 120° les unes des autres, trois champs magnétiques sont ainsi créés. Compte-tenu de la nature du courant sur le réseau triphasé, les trois champs sont déphasés (chacun à son tour passe par un maximum) comme le montre la *Figure I.15*. Le champ magnétique résultant tourne à la même fréquence que le courant, les 3 enroulements statoriques créent donc un champ magnétique tournant, sa fréquence de rotation est nommée fréquence de synchronisme. Si on place une boussole au centre, elle va tourner à cette vitesse de synchronisme. Le rotor est constitué de barres d'aluminium, cuivre ou de bronze noyées dans un circuit magnétique. Ces barres sont reliées à leur extrémité par deux anneaux conducteurs et constituent une "cage d'écureuil". Cette cage est en fait un bobinage à grosse section et très faible résistance. Cette cage est balayée par le champ magnétique tournant. Les conducteurs sont alors traversés par des courants de Foucault induits. Des courants circulent dans les anneaux formés par la cage, les forces de Laplace qui en résultent exercent un couple sur le rotor. D'après la loi de Lenz les courants induits s'opposent par leurs effets à la cause qui leur a donné naissance. Le rotor tourne alors dans le même sens que le champ mais avec une vitesse légèrement inférieure à la vitesse de synchronisme de ce dernier. Le rotor ne peut pas tourner à la même vitesse que le champ magnétique, sinon la cage ne serait plus balayée par le champ tournant et il y aurait disparition des courants induits et donc des forces de Laplace et du couple moteur. Les deux fréquences de rotation ne peuvent donc pas être synchrones d'où le nom de moteur asynchrone.

La figure ci-dessous représente l'emplacement des bobines statoriques et le principe de fonctionnement du moteur asynchrone à cage.

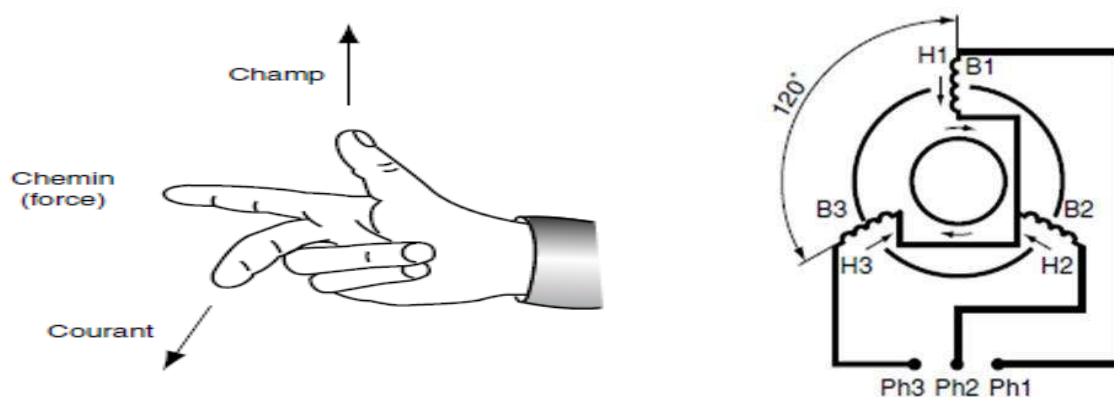


Figure I.15. Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone triphasé à cage. [10]

I.5.3. principe de fonctionnement d'un moteur à double cages

Le moteur à double cage possède deux cages au rotor. La cage externe nommée cage de démarrage et cage interne nommée cage de travail comme le montre la *Figure I.16*.

Les deux cages sont reliées par un passage étroit. La différence de résistance est obtenue par une section plus faible pour les barres de la cage externe et éventuellement par une résistivité plus grande du matériau utilisé. Pendant le démarrage. Les courants induits dans la cage interne sont faibles et tout se passe comme si le moteur démarrait avec sa seule cage ; externe, de forte résistance. Lorsque la vitesse augmente, l'intensité des courants induits diminue, et l'essentiel du courant parcourt la cage interne peu résistive. Tout se passe comme si le moteur fonctionnait en régime permanent avec sa seule cage interne de faible résistance.

Ainsi, pendant le démarrage le couple moteur est développé surtout par la cage extérieure et pour cette raison elle est appelée cage de démarrage. Et au fur et à mesure que la vitesse du moteur augmente, la fréquence du courant dans le rotor diminue. il en résulte une diminution de l'inductance de la cage interne et accroissement du courant qui y circule. Cette cage commence donc à créer un couple de plus en plus grand. [11]

On aura ainsi un couple de démarrage important et un fonctionnement permanent à faible glissement. L'inconvénient est que le facteur de puissance est faible de fait de la consommation de puissance réactive due aux fuites magnétiques importantes de la cage interne. Et puisque le moteur asynchrone branché sur le réseau est alimenté à fréquence fixe. Il est alors nécessaire de se préoccuper de son démarrage la figure ci-dessous représente le couple au démarrage.

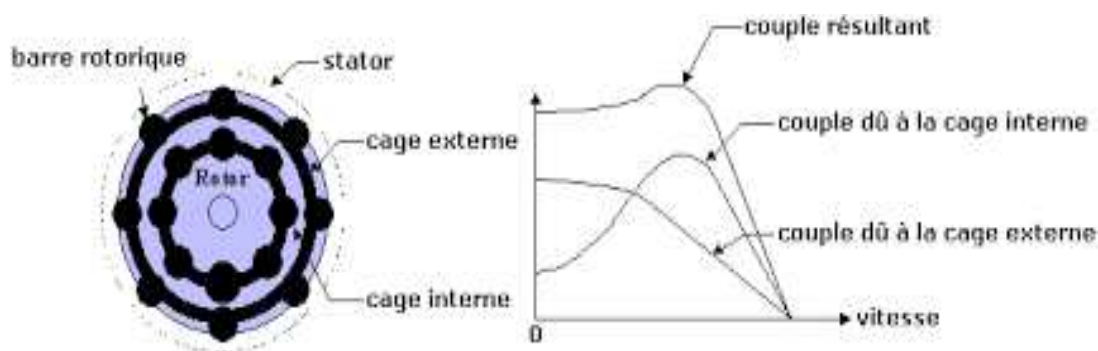


Figure I.16. Fonctionnement et démarrage d'un moteur à double cages. [10]

1.5.4. Vitesse de synchronisme

La vitesse de synchronisme des moteurs asynchrones triphasés est proportionnelle à la fréquence du courant d'alimentation et inversement proportionnelle au nombre des paires des pôles constituant le stator. Elle est donnée par la formule suivant :

$$\text{Avec :} \quad N = \frac{60 \cdot f}{P} \quad (I.5)$$

N_s – Vitesse de synchronisme [tr/min]. f – Fréquence [Hz]. P – Nombre de paires de pôles.

Dans la pratique il n'est pas toujours possible d'augmenter la vitesse d'un moteur asynchrone en l'alimentant sous une fréquence supérieure à celle pour laquelle il est prévu, même si la tension est adaptée. A noter que compte tenu du glissement, les vitesses de rotation en charge des moteurs asynchrones sont légèrement inférieures aux vitesses de synchronisme.

1.6. Le glissement d'un moteur asynchrone

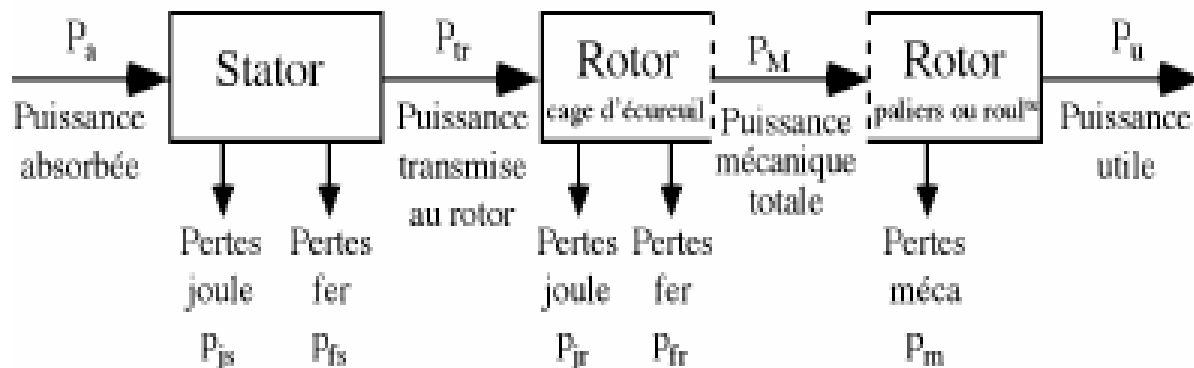
Le glissement est une grandeur qui rend compte de l'écart de vitesse de rotation d'une machine asynchrone par rapport à la vitesse de rotation de son champ statorique.

Il doit y avoir une différence de vitesse pour que ce type de machine fonctionne car c'est le décalage entre le rotor et le champ statorique qui provoque l'apparition des courants induits au rotor, courants qui créent le champ rotorique. On définit le glissement par la relation suivante :

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} \quad (I.6)$$

I.7. Le bilan de puissance du moteur asynchrone

La figure ci-dessous représente le bilan de puissance pour le moteur asynchrone à cage.



- Expression du rendement

$$\eta = \frac{\text{Puissance mécanique fournie}}{\text{Puissance électrique absorbée}} \quad (I.7)$$

- Expression du rendement approché (les pertes fer rotoriques sont négligées)

$$\eta = \frac{\text{Puissance électrique absorbée} - \text{Pertes mesurables}}{\text{Puissance électrique absorbée}} \quad (I.8)$$

$$P_u = P_{tr} - P_m - P_{jr} = (1 - g)(P_a - P_{fs} - P_{js}) - P_m$$

$$D'où : \quad \eta = \frac{(1-g)(P_a - P_{js} - P_{fs}) - P_m}{P_a}$$

- Expression du rendement du rotor : $\eta = P_u / P_{tr} = (1 - g)$ (I.9)

I.8. Classification des moteurs asynchrones à cage

Les moteurs asynchrones sont repartis en plusieurs types selon la NEMA et selon les classes de rendement.

I.8.1. Classification selon la NEMA

Les moteurs asynchrones a cage sont cinq types selon la classification ou bien de cinq classes et cette classification est faite par la NEMA (National Electrical Manufacturers Association) ; et le tableau suivant montre les cinq classifications et leurs caractéristiques :

Tableau I.3. Classification des moteurs à cage par la NEMA

<i>La classe du moteur</i>	<i>Les caractéristiques</i>
<i>Classe A</i>	Moteur à couple normal et à courant de démarrage normal.
<i>Classe B</i>	Moteur à couple normal et à faible courant de démarrage.
<i>Classe C</i>	Moteur à fort couple et à faible courant de démarrage.
<i>Classe D</i>	Moteur à fort glissement
<i>Classe F</i>	Moteur à faible couple et à faible courant de démarrage.

○ *La différence entre les classes A, B, C, D et F*

Pour la **classe A** l'encoche du rotor n'est pas tellement creuse et l'enroulement se caractérise par une faible résistance et une faible réactance et dont le couple est normal, le courant de démarrage est suffisamment élevé et ce type de moteur ne se fabrique plus. [5]

Les moteurs de **classe B** sont les plus utilisés ils se caractérisent par des encoches profondes et étroites et lors du démarrage la réactance est plus forte dans le bas du conducteur et cela force le courant à passer surtout dans le haut du conducteur et ce dernier se trouve limité lorsque le moteur démarre à pleine tension et c'est ça l'avantage par rapport au moteur de **classe A**.

Les moteurs de **classe C** sont les moteurs dont le rotor est à double cage (c'est notre cas d'étude) ils sont construit différemment, leur principe consiste à placer un enroulement de forte résistance près de l'entrefer et un enroulement de faible résistance loin de la surface. Et durant le démarrage, le conducteur éloigné de l'entrefer a une grande réactance ce qui force le courant à passer dans le conducteur extérieure courant et donc faible mais le couple est fort. Et lorsque le rotor atteint sa pleine vitesse, la réactance du conducteur qui se situe loin de l'entrefer devient faible et cela engendre une répartition uniforme du courant dans le conducteur.

Les moteurs de classe **D** se caractérisent par un enroulement d'une grande résistance en raison de sa faible section, ce que lui confère un fort couple au démarrage ainsi qu'un faible courant.

Les moteurs de **classe F** sont les moteurs dont les conducteurs du rotor sont placés loin de l'entrefer ; au démarrage la réactance est grande, le courant est faible mais le circuit est très inductif et le couple est plutôt faible. [4]

Remarque :

Chaque classe de moteur est caractérisée par un type d'encoche bien spécifique comme le montre cette figure pour la classe B elle représente pour les deux cas une seule cage et à double cage

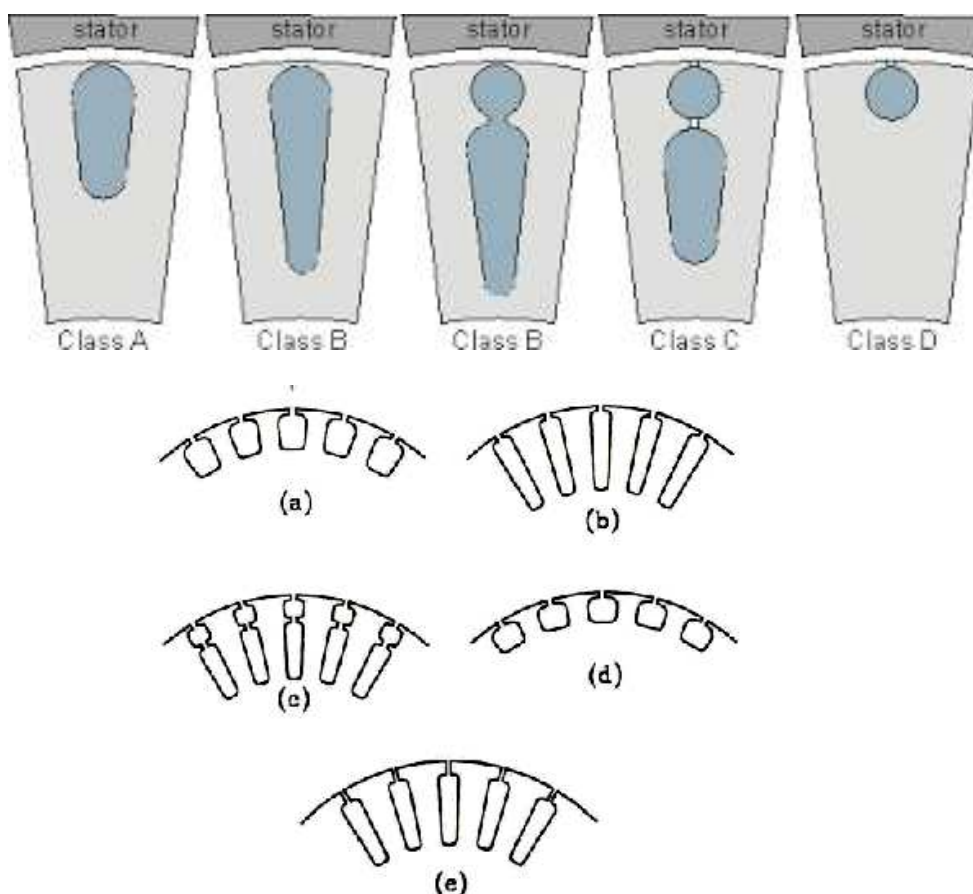


Figure I.18. Les différentes encoches rotoriques : Classe NEMA. [5]

1.8.2. Classification selon les classes de rendement CEI

Les classes de rendement font toujours l'objet d'une marque déposée européenne ; et l'utilisation des classes de rendement repose sur un accord contractuel de licence entre les participants avec l'accord volontaire des fabricants de moteurs et le détenteur de licence. La norme CEI 60034-30 :2008 définit les classes de rendement des moteurs triphasés avec une puissance comprise entre 0.75 kW et 375 kW, et l'abréviation IE fait référence à l'expression International Efficiency (rendement international) et bien sûr suivis par un chiffre qui différencie la classe :

- **IE1**=rendement standard.
- **IE2**=haut rendement.
- **IE3**=rendement premium.
- **IE4**=rendement super premium.

Le système de classe de rendement spécifié par la norme CEI 60034-30 est valable pour tous les moteurs à induction triphasés à cage basse tension dont les caractéristiques suivantes :

- Tension nominale jusqu'à 1000 V
- Puissance nominale de sortie de 0.75 à 375 kW
- Le nombre de pôles est de 2,4 ou bien 6
- Destiné à être alimenté directement à partir du réseau industriel
- Présentant des conditions de fonctionnement assignées conforme à la norme CEI 60034-1 (température, altitude d'installation ...). [5]

○ **Classe de rendement IE1, IE2 et IE3**

IE1, 50Hz

IE2, 50Hz

IE3, 50Hz

Tableau I.2.classe de rendement pour une fréquence de 50Hz selon la norme CEI60034-30.

P_n (kW)	Nombre de pôles								
	2	4	6	2	4	6	2	4	6
0.75	72.1	72.1	70.0	77.4	79.6	75.9	80.7	82.5	78.9
1.1	75.0	75.0	72.9	79.6	81.4	78.1	82.7	84.1	81.0
1.5	77.2	77.2	75.2	82.3	82.8	79.8	84.2	85.3	82.3
2.2	79.3	79.7	77.7	83.2	84.3	81.4	85.9	86.7	84.3
3	81.5	81.5	79.7	84.6	85.5	83.3	87.1	87.7	85.6
4	83.1	83.1	81.4	85.8	86.6	84.6	88.1	88.6	86.3
5.5	84.7	84.7	83.1	87.0	87.7	86.0	89.2	89.6	88.0
7.5	86.0	86.0	84.7	88.1	86.7	87.2	90.1	90.4	89.1
11	87.6	87.6	86.4	89.4	89.6	88.7	91.2	91.4	90.3
15	88.7	88.7	87.7	90.3	90.6	89.7	91.9	92.1	91.2
18.5	89.3	89.3	88.6	90.9	91.2	90.4	92.4	92.6	91.7
22	89.9	89.9	89.2	91.3	91.6	90.9	92.7	93.0	92.2
30	90.7	90.7	90.2	92.0	92.3	91.7	93.3	91.6	92.9
37	91.2	91.2	90.8	92.5	92.7	92.2	93.7	93.9	93.3
45	91.7	91.7	91.4	92.9	93.1	92.7	94.0	94.2	93.7
55	92.1	92.1	91.9	93.2	93.5	93.1	94.3	94.6	94.1
75	92.7	92.7	92.6	93.8	94.0	93.7	94.7	95.0	94.6
80	93.0	93.0	92.9	94.1	94.2	94.4	95.0	95.2	94.9
10	93.3	93.3	93.3	94.3	94.5	94.3	95.3	95.4	95.1
132	93.5	93.5	93.5	94.6	94.7	94.6	95.4	95.6	95.4
140	93.8	93.8	93.8	94.8	94.9	94.8	95.6	95.8	95.6
200-375	94.0	94.0	94.0	95.0	95.1	95.0	95.8	96.0	95.8

I.9. Les caractéristiques des moteurs à rendement premium

Les moteurs à rendement premium ont la même constitution que les moteurs classique car ils se construisent de la même façon ; mais ils se distinguent par :

- L'utilisation de l'acier mince et de haute qualité pour les tôles du circuit magnétique.
- L'augmentation de la section du stator et du rotor et donc la réduction de la densité des flux magnétiques, en conséquence les pertes par hystérésis.
- Les pertes par frottement sont diminuées par l'emploi de paliers ou de meilleure qualité.
- Une minimisation de l'épaisseur de l'entrefer.
- Une grande longueur.
- Une augmentation de la taille de la carcasse.
- La capacité de résistance aux surcharges est améliorée.
- Le facteur de puissance est plus meilleur.

I.10. Les avantages d'utilisation des moteurs à rendement premium

Les avantages de l'emploi des moteurs à rendement premium se résument comme suit :

- Les moteurs à haut rendement produisent la même puissance de sorte mais avec une puissance d'entre électrique inférieure que celle des moteurs standard.
- Fiabilité et un rendement suffisamment élevé.
- Ces moteurs à rendement premium sont disponibles aux différentes puissances et avec différentes vitesses (750, 950, 1500 et de 3000 tr/mn).
- Les moteurs à rendement premium ont 30-50 % de pertes inférieure que les moteurs standards équivalents.
- Panne réduite en raison de leur conception et construction.
- Réduction de la sensibilité du facteur de puissance et du rendement aux influences de tensions de charge. [4]

I.11. Couplage des moteurs asynchrones

Les six bornes des enroulements du stator des machines triphasées sont toujours placées de la même manière sur la plaque à bornes. Cette organisation particulière permet le raccordement en deux façons soit en étoile, soit en triangle, suivant une procédure simple et standardisée. [1]

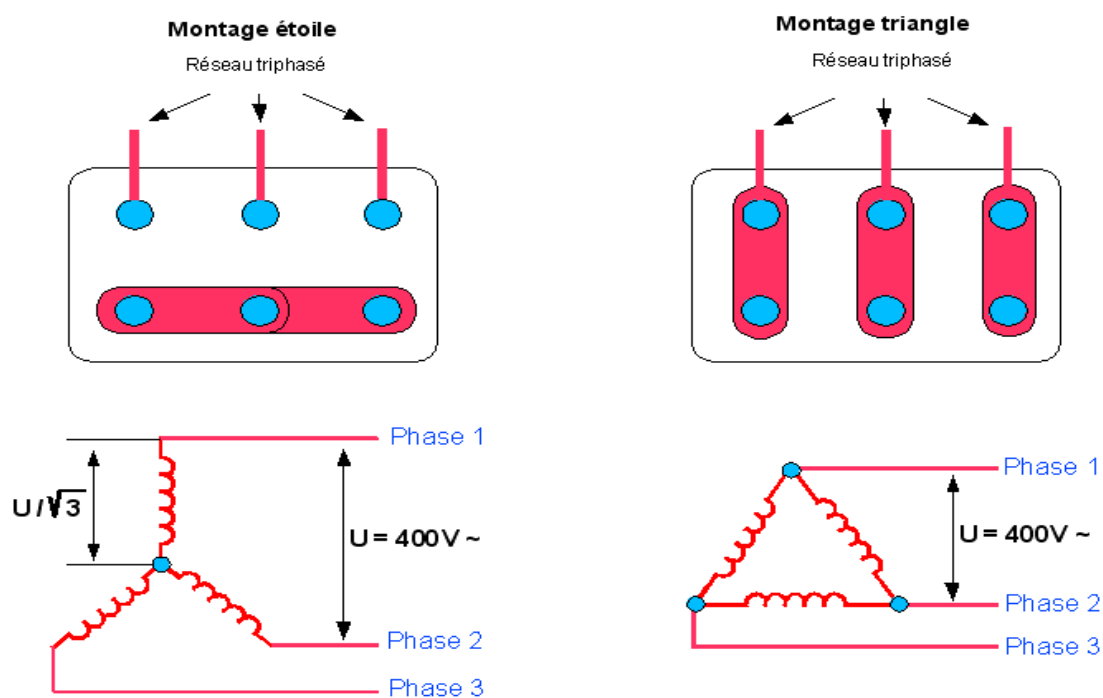


Figure I.19. Les deux couplages du moteur asynchrone. [1]

En examinant les deux couplages possibles du moteur on remarque :

- Dans le montage triangle chaque enroulement est soumis à la tension composée (tension entre deux phases donc 400V).
- Dans le montage étoile, chaque enroulement est branché entre une phase et le neutre artificiel (le moteur est équilibré). La tension entre chaque phase et le neutre étant de 220V, le moteur fonctionne normalement.
- Nous savons que pour un montage triangle : $U = V = 380 V$; $I = J\sqrt{3}$ et pour un montage étoile : $V = U/\sqrt{3} = 220 V$; $I = J$
- La plus petite intensité correspond au branchement étoile (intensité nominale d'un enroulement), et la plus forte intensité au branchement triangle (intensité nominale en ligne).

I.12. Démarrage des moteurs asynchrones

Le moteur asynchrone branché directement sur le réseau est alimenté à fréquence fixe. Il est alors nécessaire de se préoccuper de son démarrage, les éléments principaux du démarrage sont le couple de démarrage et le courant de démarrage. [2]

Pour que le rotor du moteur au démarrage puisse se mettre en mouvement le couple de démarrage développé doit être supérieur au couple résistant sur l'arbre créé par le mécanisme entraîné. Suivant la puissance du moteur le courant absorbé varie entre quatre à dix fois le courant nominal. Le plus souvent ce courant excessif est de si courte durée que le moteur pourrait le supporter sans risquer un échauffement dangereux.

I.12.1. Différents types de démarrage d'un moteur asynchrone

➤ Démarrage étoile-triangle

Ce type de démarrage nécessite la sortie de six bornes du moteur et n'est envisageable que pour les petites puissances à cause de la brutalité des régimes transitoires lors des changements du couplage. Au démarrage, le stator est branché momentanément en étoile, puis lorsque le rotor a pratiquement atteint sa vitesse de régime, le couplage passe en triangle.

La connexion en étoile divise par $\sqrt{3}$ la tension appliquée et l'intensité en ligne au démarrage est donc divisée par 3. Le couple étant proportionnel au carré de la tension, il est également réduit.

➤ Insertion de résistances statoriques

Cette méthode permet d'avoir plusieurs crans de démarrage. Des résistances, métalliques ou électrolytiques à variation continue sont placées en série avec chaque phase du stator au moment du démarrage ce qui a pour effet de limiter la tension à leur borne, puis éliminées quand le moteur a atteint sa vitesse de régime. Cette solution est de plus en plus abandonnée au profit de solutions électroniques d'un coût voisin, d'un volume moindre et d'un rendement bien meilleur.

➤ Démarrage par autotransformateur à une ou plusieurs prises

Avec le démarrage par autotransformateur on réduit la tension au moment du démarrage, mais sans interrompre l'alimentation du moteur. La tension est progressivement augmentée, l'intensité du courant ne dépasse pas la valeur maximale désirée. Cette solution est également abandonnée au profit de solution électronique d'un coût inférieure.

➤ Démarrage par un gradateur de tension

Un gradateur permet de faire varier progressivement la tension en réglant l'angle de retard à l'amorçage. Le résultat est similaire à celui obtenu avec un autotransformateur avec moins d'encombrement et à coût plus avantageux. Mais, la tension obtenue n'est pas sinusoïdale et la présence des harmoniques est néfaste pour le comportement du moteur.

➤ **Démarrage avec un onduleur de tension**

L'onduleur de tension permet de faire un démarrage souple avec limitation du courant dans les situations où aucune baisse de n n'est possible.

➤ **Démarrage rotorique**

Pour les rotors bobinés, on a la possibilité d'insérer, lors du démarrage, des résistances dans le circuit rotorique muni de contacts glissants (bagues-balais). Cette solution permet à la fois de diminuer le courant de démarrage et d'augmenter le couple moteur. Les résistances sont de type métallique ou électrolytique à variation continue. Dans ce cas, des solutions électroniques (gradateur rotorique) sont disponibles.

1.12.2. Démarrage d'un moteur asynchrone à double cages

Le courant rotorique, de fréquence égale à la fréquence f du réseau d'alimentation, se répartit de façon inversement proportionnelle aux réactances des cages, qui sont alors grandes devant les résistances. Dans ces conditions, c'est la cage externe qui est parcourue par le maximum de courant ; sa résistance relativement forte réduit l'appel de courant et accroît le couple.

Au contraire, lorsque le moteur atteint son régime nominal de fonctionnement, normalement caractérisé par un faible glissement g et une fréquence basse fg , ce sont les résistances qui contrôlent la répartition du courant, ce qui favorise la cage interne de faible résistance.

On peut ainsi, obtenir des couples de démarrage de deux à trois fois supérieurs à ceux du rotor à simple cage. [8]

1.13. Freinage des moteurs asynchrones

On distingue plusieurs types de freinage des moteurs asynchrones :

1.13.1. Freinage hyper-synchrone

Lorsque la vitesse du rotor est supérieure à la vitesse du champ tournant, le moteur freine. Couplé à un variateur de fréquence qui diminue progressivement la vitesse on peut arrêter la machine. Le couple de freinage est élevé à condition de générer un champ correspondant à la valeur de glissement optimal du fonctionnement en génératrice (voir les trois domaines de fonctionnement de la machine asynchrone) et de maintenir la décélération dans ce domaine jusqu'à arrêt complet. Cette méthode est particulièrement efficace pour freiner rapidement une machine asynchrone sans dispositif mécanique additionnel.

I.13.2. Arrêt par injection de courant continu

L'alimentation en courant continu du stator crée un champ fixe dans la machine qui s'oppose au mouvement. Ce n'est pas la méthode la plus efficace pour freiner la machine (fonctionnement en génératrice décrochée) et les contraintes en courant sont également très sévères. La commande de l'intensité du courant continu permet de piloter le freinage.

I.13.3. Arrêt à contrecourant

Le principe consiste à inverser deux phases pendant un court instant. Ceci est donc équivalent à un freinage hyper-synchrone à fréquence fixe et mal géré. Le couple résistant est faible et le courant appelé est également très important (de l'ordre de 10 à 12 fois l'intensité nominale). La conséquence en est que les enroulements de la machine risquent un suréchauffement: il est conseillé de prévoir des résistances supplémentaires afin de diminuer l'intensité. Enfin, avec cette méthode, le couple de décélération reste négatif pendant toute la phase de freinage, il faut donc prévoir de couper l'alimentation au passage par zéro de la vitesse (temporisation, contact centrifuge), sinon la rotation s'inverse.

I.13.4. Freinage mécanique par électro-frein

Ce système est constitué d'un frein à disque solidaire de l'arbre de la machine asynchrone et dont les mâchoires initialement serrées hors tension sont commandées par un électroaimant. Après alimentation de l'électroaimant, les mâchoires se desserrent laissant la rotation libre. La coupure de l'alimentation provoque le freinage. Ce dispositif aussi appelé « frein à manque de courant » est souvent prévu comme dispositif d'arrêt d'urgence. [4]



Cahier de charges

<i>Puissance nominale :</i>	<i>$P_n=315 \text{ kW.}$</i>
<i>Hauteur d'axe :</i>	<i>$h=400 \text{ mm.}$</i>
<i>Tension nominale :</i>	<i>$U_n=692/400 \text{ V.}$</i>
<i>Couplage :</i>	<i>$Y/\Delta.$</i>
<i>Nombre de pôles :</i>	<i>$2P=4.$</i>
<i>Vitesse nominale :</i>	<i>$N_n=1490 \text{ tr/mn.}$</i>
<i>Fréquence du réseau d'alimentation :</i>	<i>$F=50\text{Hz.}$</i>
<i>Facteur de puissance :</i>	<i>$\cos\Phi=0.88.$</i>
<i>Rendement nominal :</i>	<i>$\eta=0.96.$</i>
<i>Nombre de phase :</i>	<i>$m=3.$</i>
<i>Classe d'isolation :</i>	<i>$F.$</i>
<i>Degré de protection :</i>	<i>$IP 55.$</i>



Chapitre II

Dimensionnement et calcul des performances du moteur

Chapitre II. Dimensionnement et calcul des performances du moteur**II.1. Introduction**

Dans ce chapitre on a développé une méthode de calcul optimale pour un moteur asynchrone triphasé à doubles cages qui est classé dans la catégorie des grands moteurs selon la puissance et la hauteur d'axe, fabriqué par l'entreprise **ELECTRO-INDUSTRIES D'AZAZGA**; Notre étude va consister en premier lieu à la détermination des dimensions géométriques pour les deux parties principales du moteur qui sont le stator et le rotor; En deuxième lieu à la réalisation d'un calcul optimal des circuits magnétiques ainsi que les paramètres électriques du moteur.

II.2. Présentation de l'entreprise ELECTRO-INDUSTRIES AZAZGA

L'entreprise ELECTRO-INDUSTRIES est spécialisée dans la fabrication et la commercialisation des transformateurs de distribution, les moteurs électriques monophasés et triphasés.

- *Plan de l'entreprise*



Figure II.1. Plan de l'entreprise ELECTRO-INDUSTRIES AZAZGA.

II.2.1. Situation géographique

L'électro-industries est implantée dans une zone agricole de 39.5 hectares, située sur la route nationale n°12, distante de 30 Km du chef-lieu de la wilaya de Tizi-ouzou et de 08 Km du chef-lieu de la daïra d'Azazga.

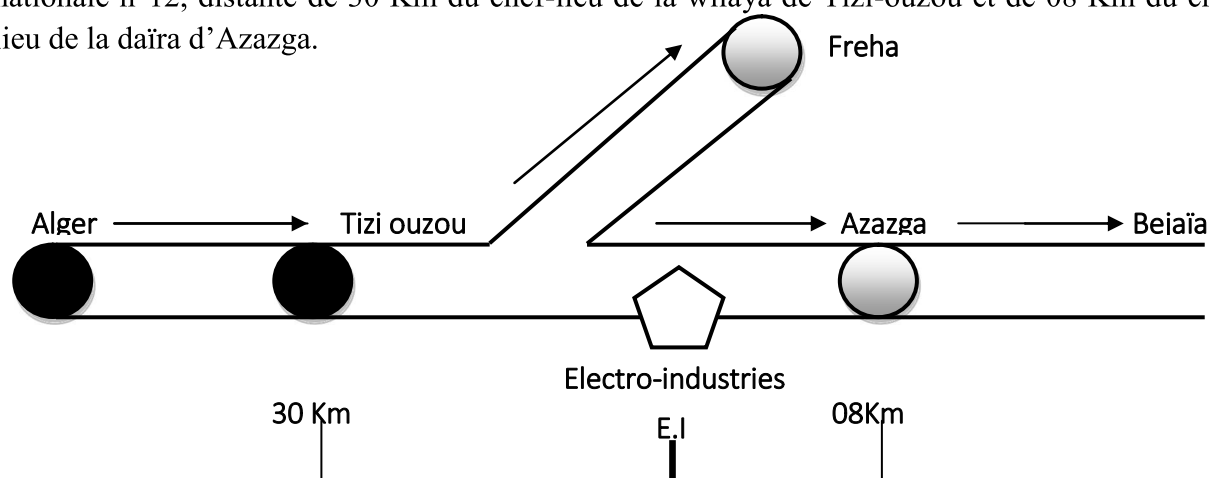


Figure II.2. Situation géographique de l'entreprise E.I.

II.2.2. Historique de l'entreprise

Electro-industries est une issue de la réorganisation du secteur industriel opérée en Algérie entre 1980 et 2000 qui a conduit en 1999 à la restructuration de l'ancienne ENEL (entreprise Nationale des Industries Electrotechniques) en un certain nombre d'EPE/SPA, parmi lesquelles figure ELECTRO-INDUSTRIES. L'usine a été réalisée dans le cadre d'un contrat produit en main avec des partenaires allemands. [9]

II.2.3. Les différentes unités de l'entreprise

Son activité de production remonte à 1986, dans les domaines de fabrication de moteurs électriques, alternateurs et transformateurs de distribution. L'électro-industries est composée de deux (02) unités ; toutes situées sur un même site :

- Unité de fabrication de transformateurs de distribution MT/BT.
- Unité de fabrication de moteurs électriques, alternateurs et prestations technique.

Les produits fabriqués par Electro-Industries sont conformes aux recommandations CEI et aux normes Allemandes DIN/VDE.

II.2.4. Production de l'entreprise

Le complexe d'AZAZGA est unique sur l'échelle nationale, il produit par année le matériel suivant :

Tableau II.1. Les types et les quantités de production par année à l'ENEL.

Produit	Puissance	Quantité de produit par année
Transformateurs	25 à 160 KVA	50000
Moteur électrique	0.25 à 400 KW	30000
Alternateur	16 à 180 KVA	2000
Montage des groupes électrogènes	17.5 à 52 KVA	1000

II.3. Aperçus sur le moteur 400-4 pôles

Le moteur 400-4 est un moteur asynchrone triphasé à 4 pôles et une hauteur de 400 mm qui est placé dans la catégorie des grands moteurs fabriqué par l'ELECTRO-INDUSTRIE dont les caractéristiques sont :

- Nombre d'encoche statorique $Z_1=72$ encoches.
- Nombre d'encoche rotorique $Z_2=56$ encoches.
- Diamètre extérieur $D_{ext}=580$ mm.
- Diamètre intérieur $D_1=400$ mm.
- Diamètre du fond d'encoche statorique $D_{f1}=482.4$ mm.
- Nombre de phase $m=3$ phases.

II.3.1. Calcul de l'enroulement du moteur

➤ **Le pas d'enroulement**

L'enroulement de ce moteur est concentrique dont la valeur du pas de la première bobine est donné comme suit :

Le pas polaire : $\tau = Z_1/2P = 72 / 2*2 = 18$ encoches.

Le pas moyen : $y_{1moy} = 15$ encoches ; le pas est raccourcis par rapport au pas diamétrale ($\varepsilon = -3$).

➤ **Détermination des caractéristiques d'enroulement**

- $N_{sT} = Z_1 = 72$ sections : l'enroulement est à 2 couches.
- $N_{s/B} = q = Z_1/2 * p * m_1 = 6$ sections/bobine.
- $N_{s/ph} = N_{sT}/m_1 = 24$ sections.
- $N_{B/ph} = N_{s/ph} / N_{s/B} = 4$ bobines/phase.

➤ **Le schéma symbolique d'une phase**

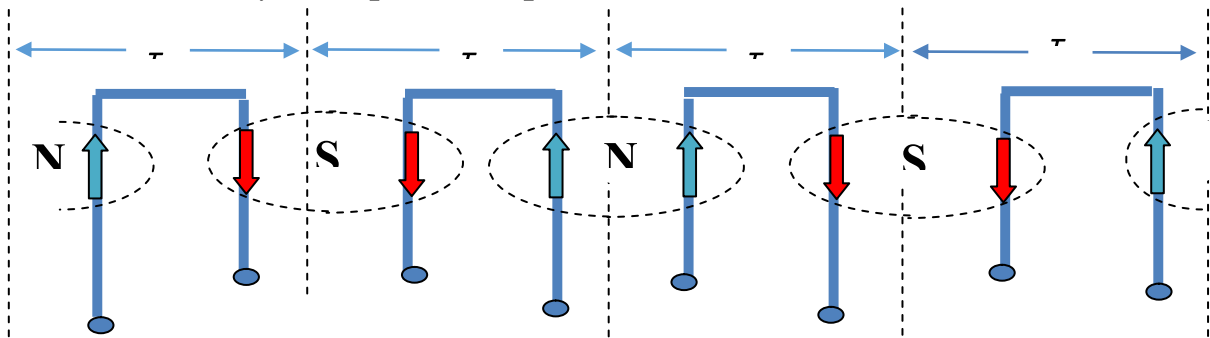


Figure II.2. Le schéma symbolique d'une phase.

➤ **L'angle électrique**

γ : C'est l'angle entre deux encoches adjacentes il est donné comme suit :

$$\gamma = 180 / m_1 * q = 60/6 = 10^\circ \text{ électrique.}$$

$$[U_1-U_2] = 180/\gamma = 18 \text{ encoches; } [U_1-V_1] = 120/\gamma = 12 \text{ encoches; } [U_1-W_1] = 2*120/\gamma = 24 \text{ encoches}$$

II.4. Dimensionnement et calcul du moteur asynchrone 400-4 pôles

L'étude et le calcul de ce moteur consistent à déterminer les dimensions géométriques de ces différentes parties tout en respectant les critères techniques exigés et les contraintes électromagnétiques afin de caractériser la machine d'une manière simple.

II.4.1. Dimensionnement des parties principales

❖ **Dimensionnement du stator**

Le stator est dimensionné de la façon suivante :

a. Puissance électromagnétique

C'est la puissance transmise du stator vers le rotor à travers l'entrefer, elle est donnée par la formule suivante :

$$P_e = \frac{K_e \cdot P_n}{\eta_n \cdot \cos(\phi_n)} \quad [W] \tag{II.1}$$

Avec : $\cos(\phi_n)$ – Facteur de puissance ; η_n – Rendement nominal de la machine ;

K_e – Coefficient qui tient compte de la chute de tension dans le stator.

Où : $K_e = 0.98 - 5 \cdot p \cdot 10^{-3}$

b. Longueur virtuelle du stator

Elle est donnée par :

$$L_i = \frac{6.1 \cdot 10^{12} \cdot P_e}{\alpha_i \cdot K_f \cdot N \cdot D_1^2 \cdot A_1 \cdot B_\delta \cdot K_{en1}} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.2})$$

Où : α_i – Coefficient de recouvrement polaire $\alpha_i = 0.64$; K_f – Facteur de forme de la courbe d'induction ;

N – Vitesse de rotation de synchronisme ; D_1 – Diamètre intérieur du stator ;

A_1 – Charge linéaire extraite de la Figure 1 ; B_δ – Induction dans l'entrefer donné par la Figure 1 de l'annexe ; K_{en1} – Facteur de bobinage de l'enroulement statorique, il est donné par :

$$K_{en1} = K_{d1} \cdot K_{r1} \quad (\text{II.3})$$

K_{d1} – Coefficient de distribution, donné par :

$$K_{d1} = \frac{S_{in} \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m_1}\right)}{q_1 \cdot S_{in} \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m_1 \cdot q_1}\right)} \quad (\text{II.4})$$

K_{r1} – Coefficient de raccourcissement polaire, donné comme suit :

$$K_{r1} = S_{in} \frac{\beta \cdot \pi}{2} \quad (\text{II.5})$$

β – rapport de raccourcissement.

➤ Coefficient de longueur

C'est le rapport entre la longueur virtuelle et le diamètre intérieur de la tôle de stator, il est donné par la relation suivante :

$$\lambda_i = \frac{L_i}{D_1} \quad (\text{II.6})$$

➤ Pas polaire

C'est la distance entre deux axes de pôles voisins distincts, il est donné par la relation suivante :

$$\tau_{p1} = \frac{\pi \cdot D_1}{2 \cdot p} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.7})$$

Avec : p – Nombre de paires de pôles.

➤ Pas polaire en nombre d'encoche

C'est la distance entre deux axes de pôles voisins en nombre d'encoche, il est donné par la relation suivante:

$$\tau_p = \frac{Z_1}{2.p} \quad (\text{II.8})$$

➤ Pas dentaire

C'est la distance séparant deux axes de deux encoches voisines, il est donné par la relation suivante :

$$t_1 = \frac{\pi.D_1}{Z_1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.9})$$

c. Courant nominale

Le courant nominal dans une phase statorique est donné par l'expression suivante :

$$I_{n1} = \frac{P_N.10^3}{m_1.\eta_n.\cos(\Phi_n).U_{n1}} \quad [\text{A}] \quad (\text{II.10})$$

m_1 – Nombre de phases statoriques ; U_{n1} – Tension nominale.

d. Nombre de conducteurs effectifs dans une encoche

Le nombre de conducteurs effectifs dans une encoche est donné par la formule suivante :

$$U_{en1} = \frac{a_1.t_1.A_1.10^3}{I_{n1}} \quad [\text{V}] \quad (\text{II.11})$$

a_1 – Nombre de voies parallèles

e. Nombre de spires d'une voie parallèle

Il est donné par la relation suivante :

$$W_1 = \frac{p.q_1.U_{n1}}{a_1} \quad (\text{II.12})$$

➤ Angle électrique

C'est l'angle entre deux encoches adjacentes il est donné par la relation suivante :

$$\gamma = \frac{p.360}{Z_1} \quad (\text{II.13})$$

➤ **Nombre d'encoche par pôle et par phase**

Il est donné par la relation suivante :

$$Q_1 = \frac{Z_1}{2.p.m_1} \quad (\text{II.14})$$

➤ **Pas de la section d'enroulement**

C'est la distance entre deux faisceaux de la même section, il est donné par la relation suivante :

$$y_1 = \frac{Z_1}{2.p} - \varepsilon \quad (\text{II.15})$$

Où : ε – Raccourcissement du pas diamétral.

f. Section effective transversale d'un conducteur de l'enroulement

Elle est calculée par l'expression suivante :

$$S_{\text{eff}1} = \frac{I_{n1}}{a_{1.j1}} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{II.16})$$

Avec : J_1 – Densité du courant dans l'enroulement statorique en $[\text{A}/\text{mm}^2]$. (Figure 2 voir l'annexe).

NB : Si la section effective calculée est supérieure à $1,8\text{mm}^2$ on doit diviser celle-ci en sections élémentaires, et comme la section des conducteurs est normalisée, on choisira la section standard la plus proche de celle calculée.

$$S_{\text{el}1} = \frac{S_{\text{eff}1}}{N_{\text{el}}} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{II.17})$$

Où : N_{el} – nombre de conducteurs élémentaires.

Les sections normalisées sont données par le Tableau 2 (voir l'annexe).

❖ ***Dimensionnement de la feuille statorique***

Elle est dimensionnée de la façon suivante :

a. Largeur de la dent

La largeur de la dent est calculée à partir de la loi de conservation du flux à travers le pas dentaire qui est donné par

$$b_{z1} = \frac{t_1.B_\delta}{K_{\text{fer}}.B_{z1\text{max}}} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.18})$$

Où : K_{fer} – Coefficient de remplissage du paquet de tôle statorique et rotorique.

$K_{\text{fer}}=0.95$ pour l'isolation avec oxydation ; $K_{\text{fer}}=0.97$ pour l'isolation en vernie.

L'Induction maximale dans la dent statorique (Tableau 1 voir l'annexe).

$$B_{z1} = \frac{t_1 \times B_\delta}{K_{fer} \times b_{z1}} \quad [T] \quad (II.19)$$

b. Hauteur du dos du stator

La hauteur du dos du stator est donnée par la formule suivante :

$$h_{c1} = \frac{0.5 \cdot \alpha_i \cdot \tau_{p1} \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot B_{c1}} \quad [mm] \quad (II.20)$$

Où : B_{c1} – Induction magnétique dans le dos du stator (Tableau 1 voir l’annexe).

c. Hauteur de la dent

La hauteur de la dent est donnée par l’expression suivante :

$$h_{z1} = 0.5 \cdot (D_{ext} - D_1) - h_{c1} \quad (II.21)$$

d. Section de l’encoche statorique

La section occupée par les conducteurs est donnée par la relation suivante :

$$S_{enciso1} = 0.5(d_{enc11} + d_{enc12}) \cdot \left(h_{enc1} - \frac{d_{enc12}}{2} \right) + \frac{\pi \cdot d_{enc12}^2}{4 \cdot 2} \quad [mm^2] \quad (II.22)$$

Où : S_{iso} – Section occupée par l’isolation

$$S_{iso} = \left(2 \left(h_{enc1} - \frac{d_{enc12}}{2} - e_{cal} \right) + \frac{d_{enc11} + d_{enc12}}{2} + \frac{\pi \cdot d_{enc12}}{2 \cdot 2} \right) \cdot e_1 + 8,5 \cdot e_{cal} \quad [mm^2] \quad (II.23)$$

Où : e_1 – Epaisseur de l’isolant

$$S_{enc1} = S_{enciso1} - S_{iso} \quad (II.24)$$

e. Coefficient de remplissage

Le coefficient de remplissage est défini comme étant le rapport de la section des conducteurs occupants l’encoche à la section utile de l’encoche, il est donné par :

$$K_{Ra} = \frac{N_{el} \cdot U_{en1} \cdot d_{iso}^2}{S_{enc1}} \quad (II.25)$$

Avec : d_{iso} – Diamètres des conducteurs avec isolation en [mm]. Sont donnés par le Tableau 2 (voir l’annexe).

S_{enc1} – Section de l’encoche en [mm²], elle est donnée par le Tableau 2 (voir l’annexe).

f. Vérification des charges électromagnétiques

Après avoir calculé le nombre de conducteurs effectifs dans une encoche et choisi la section normalisée, on passera à la vérification de la charge linéaire A_1 , l’induction B_δ et le flux ϕ .

La différence relative entre la valeur vérifiée et la valeur préliminaire ne doit pas dépasser les 10%.

g. Charge linéaire

La charge linéaire est le nombre d'ampères par mètre sur la périphérie d'induit.

$$A_1 = \frac{I_{n1} \cdot Z_1 \cdot U_{en1}}{\pi \cdot D_1 \cdot a_1 \cdot 10^{-3}} \quad [A/m] \quad (\text{II.26})$$

➤ **Induction magnétique dans l'entrefer**

Elle est donnée par la formule suivante :

$$B_\delta = \frac{\emptyset}{\alpha_i \cdot \tau_{p1} \cdot L_i \cdot 10^{-6}} \quad [T] \quad (\text{II.27})$$

➤ **Flux sous un pôle**

Il est donné par la relation suivante :

$$\emptyset = \frac{K_e \cdot U_{n1}}{4 \cdot K_f \cdot W_1 \cdot f_1 \cdot K_{en1}} \quad [Wb] \quad (\text{II.28})$$

h. Choix de l'entrefer

On choisit l'entrefer aussi grand que possible pour réduire les pertes supplémentaires dans le fer produites par les pulsations du champ, et de la dispersion provoquée par les champs d'harmonique supérieur.

Comme il doit être aussi petit que possible afin d'avoir un facteur de puissance qui s'approche au maximum de l'unité, et un courant magnétisant minimal. L'épaisseur de l'entrefer est liée à la puissance de la machine. Il est donné en fonction de la hauteur d'axe et le nombre de paires de pôles ; Il est donné par la Figure 2 (voir l'annexe).

❖ **Dimensionnement du rotor**

Le rotor est à double cage d'écureuil, la cage externe est constituée de barres en bronze logées dans des encoches circulaires, la cage interne comporte des barres en cuivre logées dans des encoches rectangulaires. Les deux cages sont court-circuitées à leurs extrémités.

a. Choix du nombre d'encoches rotorique

Pour éviter les couples parasites et les couples de vibrations créés par les harmoniques des forces magnétomotrices, et le bruit magnétique qui est créé par l'attraction entre les dents du stator et les dents du rotor, ainsi que la pulsation périodique du flux, on doit choisir le nombre d'encoches du rotor différent de celui du stator ; ($Z_1 \neq Z_2$).

b. Diamètre extérieur du rotor

Le diamètre extérieur du rotor est donné par l'expression suivante:

$$D_2 = D_1 - 2\delta \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.29})$$

Où : δ – L'épaisseur de l'entrefer donnée par la Figure 2 (voir l'annexe).

➤ Pas dentaire rotorique

Le pas dentaire rotorique est défini comme étant la distance séparant les axes de deux encoches rotorique voisines. Il est donné par la formule suivante :

$$t_2 = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.30})$$

Avec: Z_2 –Le nombre d'encoches rotoriques ; D_2 – Le diamètre extérieur du rotor en [mm].

c. Courant dans la barre

Le courant dans une phase de l'enroulement rotorique est donné par :

$$I_2 = \frac{1.11 \cdot I_{n1} \cdot 6 \cdot W_1 \cdot \cos(\varnothing_n) \cdot K_{en1}}{Z_2} \quad [\text{A}] \quad (\text{II.31})$$

Avec: I_{n1} – Courant nominal statorique ; W_1 –Nombre de spires statoriques.

K_{en1} –Facteur de bobinage d'enroulement statorique.

❖ Dimensionnement de la feuille rotorique

La feuille rotorique est représentée par la Figure 3 (voir l'annexe)

a. Hauteur de la culasse rotorique

La hauteur de la culasse rotorique est donnée par la formule suivante :

$$h_{c2} = \frac{0.5 \cdot \alpha_1 \cdot \tau_{p2} \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot B_{c2}} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.32})$$

Où : B_{c2} –Induction dans la culasse rotorique.

➤ Pas polaire rotorique

Il est défini comme étant la distance séparant les axes de deux encoches rotorique voisines, il est donné par la formule suivante :

$$\tau_{p2} = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.33})$$

b. Hauteur de la dent

La hauteur de la dent est donnée par la formule suivante:

$$h_{Z2} = 0.5 \cdot (D_2 - D_{int2}) - h_{c2} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.34})$$

h_{c2} – hauteur de la culasse rotorique en [mm] ; D_{int2} – diamètre intérieur du rotor en [mm].

c. Largeur de la dent

La largeur de la partie circulaire de la dent est donnée par la relation suivante :

$$b_{Z2c} = \frac{\pi \cdot (D_2 - \frac{2}{3} \cdot d_{bc} - 2 \cdot h_{f2})}{Z_2} - 0.94 d_{bc} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.35})$$

La largeur de la partie rectangulaire de la dent est donnée par la relation suivante :

$$b_{Z2r} = \frac{\pi \cdot (D_2 + \frac{2}{3} \cdot h_m - 2 \cdot h_{z2})}{Z_2} - b_{br} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.36})$$

La largeur de la dent est exprimée par l'expression suivante :

$$b_{Z2} = \frac{b_{Z2c} + b_{Z2r}}{2} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.37})$$

- **L'induction admissible dans la dent rotorique**

$$B_{Z2} = \frac{t_2 \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot b_{Z2}} \quad [\text{T}] \quad (\text{II.38})$$

d. Sections des barres rotoriques

Elle est donnée en fonction des dimensions de l'encoche:

$$S_b = S_{bc} + S_{br} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{II.39})$$

Avec:

➤ **Section de la barre circulaire**

Elle est donnée par la relation suivante :

$$S_{bc} = \pi \cdot \frac{d_{bc}^2}{4} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{II.40})$$

➤ **Section de la barre rectangulaire**

Elle est donnée par la relation suivante :

$$S_{br} = a \cdot b \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{II.41})$$

e. Densité du courant dans la barre

Elle est donnée par la formule suivante:

$$J_b = \frac{I_2}{S_b} \quad [\text{A/mm}^2] \quad (\text{II.42})$$

❖ Dimensionnement des anneaux de court-circuit

Les anneaux sont dimensionnés de la manière suivante :

a. Les hauteurs des anneaux

Les hauteurs des anneaux s'expriment comme suit :

➤ Hauteur de l'anneau de la cage externe

$$h_{anc} = (1.1 \div 1.25) \cdot h_{z2c} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.43})$$

➤ Hauteur de l'anneau de la cage interne

$$h_{anr} = (1.1 \div 1.25) \cdot h_{z2r} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.44})$$

b. Les sections des anneaux

La section de l'anneau est donnée par la formule suivante :

$$S_{an} = S_{anc} + S_{anr} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{II.45})$$

➤ La section de l'anneau de la cage externe

Elle est donnée par la formule suivante :

$$S_{anc} = (0.35 \div 0.45) \cdot \frac{Z_2 \cdot S_{bc}}{2 \cdot p} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{II.46})$$

➤ La section de l'anneau de la cage interne

Elle est donnée par la formule suivante :

$$S_{anr} = (0.35 \div 0.45) \cdot \frac{Z_2 \cdot S_{br}}{2 \cdot p} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{II.47})$$

c. Largeur de l'anneau

La largeur de l'anneau s'exprime comme suit :

➤ La largeur de l'anneau de la cage externe

Elle est donnée par la relation suivante :

$$b_{anc} = \frac{S_{anc}}{h_{anc}} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.48})$$

➤ La largeur de l'anneau de la cage interne

Elle est donnée par la relation suivante :

$$b_{anr} = \frac{S_{anr}}{h_{anr}} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.49})$$

d. Diamètre moyen de l'anneau**➤ Diamètre moyen de l'anneau de la cage externe**

Il est donné par la relation suivante :

$$D_{anc} = (D_2 - h_{anc}) \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.50})$$

➤ Diamètre moyen de l'anneau de la cage interne

Il est donné par la relation suivante :

$$D_{anr} = (D_2 - 16.3) - h_{anr} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.51})$$

II.4.2. Calcul du circuit magnétique

Le circuit magnétique des machines à courant alternatif, et les machines asynchrones en particulier, doit canaliser les lignes du champ magnétique tournant.

L'objet de ce calcul consiste à déterminer les forces magnétomotrices (Fmm) qui nous permettra de calculer le courant magnétisant et de déduire par la suite la réactance magnétique. Le principe de calcul est basé sur la loi générale de la circulation du champ magnétique.

Dans notre cas, $\oint H \cdot dl$ représente la somme $\sum H_x \cdot l_x$

Où : H_x —Représente l'intensité du champ magnétique correspondant à l'induction dans le tronçon x ; H_x est donné en [A/m].

l_x — Représente la ligne moyenne du tronçon choisi en [m].

Le calcul du champ magnétique sera fait pour une paire de pôles.

Le circuit magnétique de la machine asynchrone est constitué de cinq parties distinctes :

Entrefer, la culasse statorique, la culasse rotorique, les dents statorique et les dents rotorique.

❖ Circuit magnétique statorique

Avec les inductions calculées au paravent on peut déterminer les intensités des champs magnétiques dans les différentes parties de la machine.

a. Longueur moyenne des lignes de champs dans la culasse statorique

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$L_{C1} = \frac{\pi}{2p} (D_{ext} - h_{C1}) \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.52})$$

b. Force magnétomotrice de la culasse statorique

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$F_{C1} = h_{C1} \cdot L_{C1} \cdot 10^{-3} \quad [A] \quad (II.53)$$

Avec : H_{C1} – Intensité du champ magnétique dans la culasse statorique qui correspond à l'induction B_{C1} . Elles sont données dans Tableau 1 (voir l'annexe).

c. Force magnétomotrice dans la dent du stator

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$F_{Z1} = H_{Z1} \cdot h_{Z1} \cdot 10^{-3} \quad [A] \quad (II.54)$$

Où : h_{Z1} – Hauteur de la dent statorique en [mm] ; H_{Z1} – Intensité du champ magnétique qui correspond à l'induction B_{Z1} Elles sont données dans Tableau 1 (voir l'annexe).

➤ Circuit magnétique rotorique

Pour pouvoir calculer le circuit magnétique rotorique d'une machine asynchrone il faut procéder de la manière suivante :

a. Longueur moyenne des lignes du champ magnétique dans la culasse du rotor

Elle est donnée par la formule suivante :

$$L_{C2} = (D_2 - 2 \cdot h_{Z2} - h_{C2}) \cdot \frac{\pi}{2} \cdot p + h_{C2} \quad [mm] \quad (II.55)$$

Avec : h_{Z2} – Hauteur de la dent rotorique en [mm]. h_{C2} – Hauteur de la culasse rotorique en [mm].

b. Force magnétomotrice dans la culasse du rotor

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$F_{C2} = h_{C2} \cdot L_{C2} \cdot 10^{-3} \quad [A] \quad (II.56)$$

Où : H_{C2} – Intensité du champ magnétique dans la culasse rotorique qui correspond à l'induction B_{C2} . Elles sont données dans Tableau 1 (voir l'annexe).

c. Force magnétomotrice dans les dents du rotor

Pour le type d'encoche utilisée on a :

$$F_{Z2} = F_{ZC} + F_{Zr} \quad [A] \quad (II.57)$$

➤ Fmm dans la partie circulaire de la dent

Elle est donnée par la formule suivante :

$$F_{ZC} = H_{Z2} \cdot h_{ZC} \cdot 10^{-3} \quad [A] \quad (II.58)$$

➤ Fmm dans la partie rectangulaire de la dent

Elle est donnée par la formule suivante :

$$F_{Zr} = H_{Z2} \cdot h_{ZC} \cdot 10^{-3} \quad [A] \quad (II.59)$$

Où : H_{Z2} – Intensité du champ magnétique dans la dent rotorique. (Tableau 1 voir l'annexe)

➤ **Force magnétomotrice dans l'entrefer**

La force magnétomotrice dans l'entrefer est proportionnelle à l'induction dans celui-ci.

$$F_{\delta} = 0,8 \cdot B_{\delta} \cdot K_{\delta} \cdot \delta \cdot 10^{-3} \quad [A] \quad (II.60)$$

Avec : K_{δ} – Coefficient de CARTER qui tient compte du non- uniformité de l'entrefer, due aux ouvertures des encoches statoriques et rotoriques. Il est donné par la relation suivante :

$$K_{\delta} = K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2} \quad (II.61)$$

Avec :

$$K_{\delta 1} = 1 + \frac{b_{f1}}{t_1 - b_{f1} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_1}{b_{f1}}} \quad (II.62)$$

$$K_{\delta 2} = 1 + \frac{b_{f2}}{t_2 - b_{f2} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_2}{b_{f2}}} \quad (II.63)$$

b_{f1} et b_{f2} – Sont respectivement les largeurs des fentes des dents statoriques et rotorique en [mm].

➤ **Force magnétomotrice totale par paire de pôle**

Elle est donnée par la formule suivante :

$$F = \sum F_i = 2 \times (F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2}) + F_{c1} + F_{c2} \quad [A] \quad (II.64)$$

Le numéro 2 est du au fait que l'entrefer, les dents statoriques et rotoriques sont parcourus deux fois par les lignes de champs magnétique.

➤ **Coefficients de saturation**

Ils sont donnés comme suit :

a. Coefficient de saturation des dents

Il est donné par la relation suivante :

$$K_{\mu z} = \frac{F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2}}{F_{\delta}} \quad (II.65)$$

b. Coefficient de saturation de la machine

Il est donné par la relation suivante :

$$K_{\mu} = \frac{\sum F_i}{2F_{\delta}} \quad (II.66)$$

➤ **Courant magnétisant**

Il représente la composante réactive du courant à vide, il est donné par la formule suivante :

$$I_{\mu} = \frac{p \times \sum F_i}{0,9 \times m_1 \times W_1 \times K_{en 1}} \quad [A] \quad (II.67)$$

➤ **Réactance de magnétisation**

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$X_m = \frac{K_e \times U_{n1}}{I_\mu} \quad [\Omega] \quad (\text{II.68})$$

Où : K_e – Facteur de majoration.

➤ **Coefficient de dispersion magnétique du stator**

Il est donné par la relation suivante:

$$\sigma_\mu = \frac{X_1}{X_m} \quad (\text{II.69})$$

Avec : X_1 –Réactance inductive de dispersion de l'enroulement statorique.

➤ **Force électromotrice à vide**

Elle est donnée par la formule suivante :

$$E_0 = \frac{U_{n1}}{(1+\sigma_\mu)} \quad [\text{V}] \quad (\text{II.70})$$

II.4.3. Calcul des paramètres électriques des enroulements

Pour pouvoir déterminer les caractéristiques de la machine en procédera au calcul de tous les paramètres suivants ($R_1, R_2, X_1, X_2, R_{2dem}, X_{2dem}, X_{2ram}, X_{2int}, R_{bc}, R_{br}$).

II.4.3.1. Paramètres statoriques

a. Résistance active d'une phase du stator

Elle est donnée par la formule suivante :

$$R_1 = \rho_{cu} (T) \frac{W_1 \times L_{w1} \times 10^3}{a_1 \times N_{el} \times S_{elt1}} \quad [\Omega] \quad (\text{II.71})$$

Avec: S_{elt1} – Section standard d'un conducteur.

$\rho_{cu} (T)$ – Résistivité du cuivre à la température (T), elle est donnée pour:

$$T=20^\circ\text{C} \quad \rho_{cu} = 17,2 \cdot 10^{-9} \quad [\Omega \cdot \text{m}]$$

Avec : L_{w1} – Longueur moyenne d'une spire de l'enroulement statorique, calculée comme suit :

$$L_{W1} = 2. (L_i + L_{f1}) \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.72})$$

Où: L_i –Longueur virtuelle de l'induit.

L_{f1} – Longueur moyenne de la partie frontale d'une demi spire; telle que :

$$L_{f1} = (1.16 + 0.14. p). b_{1\text{moy}} + 15 \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.73})$$

$b_{1\text{moy}}$ –Largeur moyenne d'une section.

$$b_{1\text{moy}} = \frac{\pi.(D_1+h_{Z1}).y_{1\text{moy}}}{Z_1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.74})$$

$Y_{1\text{moy}}$ – Le pas moyen d'un groupe de section.

b. Réactances de fuites et perméances de fuites du stator

La réactance de fuite globale du stator comprend :

➤ **Réactance de fuite d'encoche**

Elle est due aux flux de fuite qui se referme autour des conducteurs :

$$X_{\text{enc } 1} = \frac{1.58 \times f_1 \times L_i \times W_1^2}{q_1 \times P \times 10^8} \times \lambda_{\text{enc } 1} \quad [\Omega] \quad (\text{II.75})$$

➤ **Réactance de fuite différentielle**

C'est le résultat des flux suivants :

-Flux de fuite de dent à dent à travers l'entrefer.-Flux différentielle de phase.

-Flux différentielle de l'encoche.

Elle est donnée par la formule suivante:

$$X_{1d} = \frac{1.58 \times f_1 \times L_i \times W_1^2}{q_1 \times P \times 10^8} \times \lambda_{1d} \quad [\Omega] \quad (\text{II.76})$$

➤ **Réactance de fuite frontale**

C'est la réactance présentée par les parties frontales des enroulements situés dans l'air à chaque extrémité du paquet de tôles. Elle est donnée par la formule suivante :

$$X_{1f} = \frac{1.58 \times f_1 \times L_i \times W_1^2}{q_1 \times P \times 10^8} \times \lambda_{1f} \quad [\Omega] \quad (\text{II.77})$$

La réactance totale est donnée par la formule suivante :

$$X_1 = 1.58 \times f_1 \times L_i \times W_1^2 \times \frac{\lambda_1}{q_1 \times P \times 10^8} \quad [\Omega] \quad (\text{II.78})$$

Avec : λ_1 – Perméance de dispersion de l'enroulement statorique, elle est calculée comme suit :

$$\lambda_1 = \lambda_{\text{enc } 1} + \lambda_{1d} + \lambda_{1f} \quad (\text{II.79})$$

$\lambda_{\text{enc } 1}$ –Perméance d'encoche, elle est donnée par la relation suivante :

$$\lambda_{\text{enc } 1} = \frac{h_{1.K_{B1}}}{3.d_{\text{enc } 11}} + \left(\frac{h_{11}}{d_{\text{enc } 11}} + \frac{3.h_{K1}}{d_{\text{enc } 11} + 2.b_{f1}} + \frac{h_{f1}}{b_{f1}} \right) K_{B2} \quad (\text{II.80})$$

Où : K_{B1} , K_{B2} -Coefficients ($K_{B1}= K_{B2}=0.97$).

λ_{1d} -Perméance différentielle proportionnelle à la réactance de fuite différentielle. Elle est donnée par la formule suivante :

$$\lambda_{r1} = \frac{0.9 \times t_1 \times (q_1 \times K_{en1})^2}{K_\delta \times \delta} \quad (\text{II.81})$$

$$K_{r1} = 1 - \frac{0.33 \times b^2 \times f_1}{\delta \times t_1} \quad (\text{II.82})$$

Où: K_{r1} - Coefficient qui dépend de Q_1 (voire l'annexe, figure3) ; K_{dd1} - Coefficient de fuite différentiel ; λ_{1f} - Perméance frontale proportionnelle à la réactance de fuite frontale.

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$\lambda_{1f} = 0.34 \frac{q_1 \times (L_{f1} - 0.64 \times \beta \times \tau_{p1})}{L_i} \quad (\text{II.83})$$

II.4.3.2 Paramètres rotorique

Le rotor contient des paramètres électriques qui permettent de définir et comprendre le fonctionnement d'un moteur asynchrone.

➤ Résistance rotorique

Elle est déduite après le calcul suivant :

➤ Résistances actives des cages

$$K_{red} = 2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot p}{Z_2}\right) \quad (\text{II.84})$$

Ou: K_{red} -coefficient de réduction.

a. Résistance active de la cage externe

Elle est calculée comme suit :

➤ Résistance active de la barre circulaire

Pour $T=24^\circ\text{C}$

$$\rho_{\text{CuSn } 6(T)} = 128.86 \quad [\Omega \cdot \text{m}]$$

$$R_{bc} = \rho_{\text{CuSn } 6(T)} \cdot \frac{K_{dep} \cdot L_2 \cdot 2 \cdot 10^3}{S_{bc}} \quad [\Omega] \quad (\text{II.85})$$

➤ **Résistance de l'anneau de la cage externe**

Est calculée comme suit :

$$R_{anc} = \frac{\rho_{CuSn}(T) \cdot 2 \cdot \pi \cdot D_{anc} \cdot 10^3}{S_{bc}} \quad [\Omega] \quad (II.86)$$

$$R_{c1} = R_{bc} + 2 \cdot \frac{R_{anc}}{K_{red}^2} \quad [\Omega] \quad (II.87)$$

b. Résistance active de la cage interne

Elle est calculée comme suit :

➤ **Résistance active de la barre rectangulaire**

Pour T=20 $\rho_{Cu(T)} = 0.0172 \cdot 10^{-6} \quad [\Omega \cdot m]$

$$R_{br} = \rho_{Cu(T)} \cdot \frac{K_{dep} \cdot L_2 \cdot 10^3}{S_{br}} \quad [\Omega] \quad (II.88)$$

➤ **Résistance de l'anneau de la cage interne**

Elle est calculée comme suit :

$$R_{anr} = \frac{\rho_{Cu(T)} \cdot 2 \cdot \pi \cdot D_{anr} \cdot 10^3}{Z_2 \cdot S_{anr}} \quad [\Omega] \quad (II.89)$$

$$R_{c2} = R_{br} + 2 \cdot \frac{R_{anr}}{K_{red}^2} \quad [\Omega] \quad (II.90)$$

c. Résistance de l'anneau ramenée à la barre

Elle est calculée comme suit :

➤ **La cage externe**

Elle est donnée par la relation suivante :

$$R_{anrambc} = \frac{R_{anc}}{K_{red}^2} \quad [\Omega] \quad (II.91)$$

➤ **La cage interne**

Elle est calculée comme suit :

$$R_{anrambr} = \frac{R_{anr}}{K_{red}^2} \quad [\Omega] \quad (II.92)$$

➤ **La résistance totale de l'anneau ramené a la barre**

Elle est donnée par la relation suivante :

$$R_{anrambt} = \frac{R_{anrambc} \cdot R_{anrambr}}{R_{anrambc} + R_{anrambr}} \quad [\Omega] \quad (II.93)$$

d. Résistance de l'anneau ramenée au stator

Elle est calculée comme suit :

$$B_{ob} = \frac{t_1}{t_2} \quad (II.94)$$

$$\alpha_{ob} = \frac{2 \cdot \pi \cdot p \cdot B_{ob}}{Z_2} \quad (II.95)$$

$$K_{ob} = \frac{\sin\left(\frac{\alpha_{ob}}{2}\right)}{\frac{\alpha_{ob}}{2}} \quad (II.96)$$

$$M = \left(\frac{4 \cdot m_1}{Z_2}\right) \cdot \left(\frac{w_1 \cdot Ken_1}{K_{ob}}\right)^2 \quad (II.97)$$

$$R_{anrams} = M \cdot R_{anrambt} \quad [\Omega] \quad (II.98)$$

e. Résistance active d'une phase rotorique

Elle est calculée comme suit :

$$R'_2 = R_{bc} + R_{anrambc} \quad [\Omega] \quad (II.99)$$

$$R''_2 = R_{br} + R_{anrambr} \quad [\Omega] \quad (II.100)$$

$$R_2 = \frac{R'_2 \cdot R''_2}{R'_2 + R''_2} \quad [\Omega] \quad (II.101)$$

f. Résistance d'une phase rotorique ramenée au stator

Elle est donnée par la relation suivante :

$$R_{2ram} = M \cdot R_2 \quad [\Omega] \quad (II.102)$$

g. Réactance et perméance du rotor

➤ **La cage externe**

$$I_{an} = \frac{I_2}{K_{red}} \quad [A] \quad (II.103)$$

$$J_{anc} = \frac{I_{an}}{S_{anc}} \quad [A/mm^2] \quad (II.104)$$

➤ **Facteur de conductibilité magnétique**

Est donné comme suit :

$$K_c = 1 \quad K_r = K_c$$

$$\lambda_{cm} = \left(0.785 - \frac{1}{2 \cdot d_{bc}}\right) \cdot K_c + \frac{h_{f2}}{b_{f2}} \quad (\text{II.105})$$

➤ **Perméance frontale**

Elle est donnée par la relation suivante :

$$\lambda_{2fc} = \frac{2.3 \cdot D_{ancmoy}}{Z_2 \cdot L_i \cdot K_{red}^2} \cdot \log \left[\frac{4.7 \cdot D_{ancmoy}}{2 \cdot (h_{anc} + b_{anc})} \right] \quad (\text{II.106})$$

➤ **réactance de la cage extérieure**

Est calculée comme suit :

$$X_{2ext} = X_{fbag} + X_{fenc} \quad (\text{II.107})$$

$$X_{2ext} = 7.9 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot (\lambda_{cm} + \lambda_{2fc}) \cdot 10^{-6} \quad [\Omega] \quad (\text{II.108})$$

➤ **La cage interne**

$$J_{anr} = \frac{I_{an}}{S_{anr}} \quad [A/mm^2] \quad (\text{II.109})$$

➤ **Facteur de dispersion d'encoche**

Est donné par la formule suivante :

$$\lambda_{disenc} = \frac{h_m}{3 \cdot b_{br}} \cdot K_r + \frac{h_{f22}}{b_{f22}} \quad (\text{II.110})$$

➤ **Permeance frontale**

$$\lambda_{2fr} = \frac{2.3 \cdot D_{anmoy}}{Z_2 \cdot L_i \cdot K_{red}^2} \log \left[\frac{4.7 \cdot D_{anmoy}}{2 \cdot (h_{anr} + b_{anr})} \right] \quad (\text{II.111})$$

➤ **La réactance de la cage intérieure**

Est donnée comme suit :

$$X_{2int} = X_{fbag} + X_{fenc} \quad (\text{II.112})$$

$$X_{2int} = 7.9 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot (\lambda_{disenc} + \lambda_{2fr}) \cdot 10^{-6} \quad [\Omega] \quad (\text{II.113})$$

$$X_2 = \frac{X_{2ext} \cdot X_{2int}}{X_{2ext} + X_{2int}} \quad [\Omega] \quad (\text{II.114})$$

➤ **Réactance du rotor ramenée au stator**

Est donnée par la relation suivante :

$$X_{2ram} = M \cdot X_2 \quad [\Omega] \quad (II.115)$$

❖ **Paramètres au démarrage**

Lors de l'alimentation du moteur, les barres de la cage sont soumises à un champ tournant de fréquence d'alimentation ($f_1=50$ Hz) ; la profondeur de pénétration du courant est alors faible (effet refoulement des courants) ; seule la partie supérieure des barres est le siège des courants induits d'où une forte résistance de la cage au démarrage.

Avec l'augmentation de la vitesse, le glissement diminue et par conséquent, la fréquence du champ ($f_2=g \cdot f_1$), donc la profondeur de pénétration augmente et la résistance de la cage diminue.

a. Profondeur de pénétration

Elle est donnée par la relation suivante :

$$h_{pp} = \frac{h_b}{1+\varphi_1} \quad [mm] \quad (II.116)$$

Où: h_b –Hauteur de la barre ; φ –Coefficient qui dépend de la valeur de ξ_1

$$\xi_1 = 0.064 \times h_b \times \sqrt{gd} \quad (II.117)$$

b. Section de la barre pénétrée par le courant de démarrage

Elle est donnée par la relation suivante :

$$S_{bdem} = S_{bc} \quad [mm^2] \quad (II.118)$$

c. Résistance de la barre au démarrage

Pour le type d'encoche donnée dans la Figure 3 (voir l'annexe) :

$$R_{bdem} = R_b \cdot K_{dep} \quad [\Omega] \quad (II.119)$$

Où : K_{dep} – Coefficient de déplacement du courant, c'est le rapport entre la section de la barre totale et la section de la barre au démarrage.

$$K_{dep} = \frac{S_b}{S_{bdem}} \quad (II.120)$$

d. Résistance de la Cage au démarrage

Elle est donnée comme suit :

$$R_{2dem} = R_{anrambc} + R_{bdem} \quad [\Omega] \quad (II.121)$$

e. Résistance de la cage au démarrage ramenée au stator

Elle est donnée par la relation suivante:

$$R_{2dem-ram} = M \times (R_{anrambc} + R_{bdem}) \quad [\Omega] \quad (II.122)$$

f. Résistance du rotor pour des bagues séparées

Elle est calculée comme suit :

$$\alpha = \frac{R_{bc}}{R_{bc} + R_{br}} \quad (II.123)$$

$$\alpha = 1 \quad \Delta z = 0.05$$

$$\xi = 1 + \frac{1}{5} \left(\frac{\pi \cdot p}{Z_2} \right)^2 - \frac{\Delta z}{1 - \left(\frac{p}{Z_2} \right)^2} \quad (II.124)$$

$$\lambda_{\pi 1} = \frac{t_1}{12 \cdot \delta \cdot K_{\delta}} \cdot \xi \quad (II.125)$$

$$\lambda_{\pi 2} = \frac{t_2}{12 \cdot \delta \cdot K_{\delta}} \cdot \xi \quad (II.126)$$

$$\beta' = \frac{X_{2int}}{R_{bc} + R_{br}} \quad (II.127)$$

$$r'2 = R_{2ram} \frac{I_{n1}}{U_{n1}} \quad [\Omega] \quad (II.128)$$

$$x'2 = X_{2ram} \frac{I_{n1}}{U_{n1}} \quad (II.129)$$

$$K' = \frac{1}{1 + \beta'^2 \cdot g^2} \quad (II.130)$$

$$r_{2\xi} = R_{bc} \cdot (1 - \alpha \cdot K') \quad [\Omega] \quad (II.131)$$

g. Réactance du rotor pour des bagues séparées

Elle est donnée par la relation suivante :

$$x_{2\xi} = 7,9 \cdot f_1 \cdot L_2 \cdot (\lambda_{2fc} + \lambda_{2fr} \cdot \alpha^2 \cdot K' + \lambda_{disenc} + \lambda_{\pi 2}) \cdot 10^{-9} \quad [\Omega] \quad (II.132)$$

❖ Paramètres du rotor au régime à vide et au fonctionnement nominal

Les paramètres rotoriques au régime à vide et au fonctionnement nominal d'un moteur asynchrone à double cage sont calculés comme suit :

a. Résistance du rotor pour des bagues séparées

Est donnée par la relation suivante :

$$r_2 = R_{bc} \cdot (1 - \alpha) \quad [\Omega] \quad (II.133)$$

b. Réactance du rotor pour des bagues séparées

Est calculée comme suit :

$$x_2 = 7,9 \cdot f_1 \cdot L_2 \cdot (\lambda_{2fc} + \lambda_{2fr} \cdot \alpha^2 + \lambda_{disenc} + \lambda_{\pi 2}) \cdot 10^{-9} \quad [\Omega] \quad (II.134)$$

$$K_R = \frac{r_{2\xi}}{r_2} \quad (II.135)$$

$$r'_{2\xi} = K_R \cdot r'_2 \quad [\Omega] \quad (II.136)$$

II.4.4. Calcul des pertes et du rendement

La transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique s'accompagne inévitablement de perte d'énergie dans les différentes parties du moteur telles que le circuit magnétique, les enroulements statoriques et rotoriques, ainsi que les différentes parties mécaniques.

Cette partie est consacrée à l'évaluation des pertes dans le moteur asynchrone, et cela pour permettre d'estimer le rendement en tachant d'avoir aussi proche que possible de celui qui figure dans le cahier de charge.

On peut distinguer quatre groupes de pertes : Pertes principales dans le fer, pertes électriques dans le cuivre et le bronze, pertes mécaniques et pertes supplémentaires.

❖ Pertes principales dans le fer

Les pertes principales dans le fer sont les pertes par hystérésis, dues au déphasage entre le courant magnétisant et le flux fondamental, et les pertes par courant de Foucault dues à la circulation des courants induits par le flux fondamental dans les tôles magnétiques.

Les dents et la culasse statorique sont les parties les plus touchées par ces pertes. Les pertes magnétiques dans le rotor sont négligeables à cause de la faible fréquence du flux.

a. Pertes dans les dents

Les pertes dans les dents sont données par la formule suivante :

$$P_{fz1} = 1.7 \times P_{1/50} \times B_{z1max}^2 \times G_{z1} \times 50 \quad [W] \quad (II.137)$$

$$P_{1/50} := 2,8 [W.Kg^{-1}] \quad \text{pour l'acier 2013}$$

$$G_{z1} = 7.8 \times 10^{-6} \times L_i \times K_{fer} \times [h_{z1} \times \pi \times (D_1 + h_{z1}) - S_{enc1} \times Z_1] \quad [Kg] \quad (II.138)$$

G_{z1} – Poids des dents statorique.

b. Pertes dans la culasse statorique

Les Pertes dans la culasse statorique sont proportionnelles au carré de l'induction dans la culasse :

$$P_{c1} = 1.7 \times P_1 \div 50 \times G_{c1} \times B_{c12} \quad [W] \quad (II.139)$$

$$G_{c1} = 7,8 \times 10^{-6} \times L_i \times K_{fer} \times h_{c1} \times \pi \times (D_{ext1} - h_{c1}) \quad [Kg] \quad (II.140)$$

G_{c1} –Poids de la culasse statorique.

Les pertes dans le fer sont égales à la somme des pertes dans les dents et celle du dos du stator :

$$P_{fer} = P_{c1} + P_{fz1} \quad [W] \quad (II.141)$$

❖ Pertes électriques dans le cuivre et dans le bronze

Ce sont les pertes par effet joules dans les enroulements statorique et rotorique. Elles sont proportionnelles au carré des courants qui circulent dans ces enroulements.

a) Pertes joules statoriques

Les pertes joules statoriques sont les pertes électriques dans le cuivre, elles sont données par la formule suivante :

$$P_{j1} = m_1 \times R_1 \times I_{n1}^2 \quad [W] \quad (II.142)$$

Avec: R_1 – Résistance d'une phase de l'enroulement statorique ; I_{n1} – Courant dans une phase statorique.

b) Pertes joules rotoriques

Ce sont les pertes dans le bronze et le cuivre, elles sont données par la formule suivante :

$$P_{j2} = m_2 \times R_2 \times I_2^2 \quad [W] \quad (II.143)$$

Avec: m_2 –Nombre de phase rotorique ; I_2 –Courant dans la barre ; R_2 –Résistance d'une phase rotorique.

❖ Pertes mécaniques

Elles dépendent de la vitesse du moteur, elles se composent de pertes par frottements aux paliers, et de pertes par ventilation et frottements avec l'air. Elles sont exprimées par :

$$P_{mec} = K_t \times (N \times 10^{-3})^2 \times (D_{ext} \times 10^{-2})^4 \quad [W] \quad (II.144)$$

Avec: K_t –Facteur de majoration.

- $K_t=1,3 \cdot (1 - D_{ext} \cdot 10^{-3})$ pour $2p=2$.
- $K_t=1$ pour $2p > 2$.

❖ Pertes supplémentaires

Ces pertes ont pour origine le champ de fuite dans les encoches et dans les têtes de bobines, on les estime à 0,5 % de la puissance absorbée par le moteur. Elles sont données par la formule suivante :

$$P_{\text{sup}} = 0.005 \times \frac{P_n \times 10^3}{\eta_n} \quad [\text{W}] \quad (\text{II.145})$$

❖ **Pertes totales**

Elles sont données par la relation suivante :

$$P_{\text{tot}} = P_{\text{fer}} + P_{j1} + P_{j2} + P_{\text{mec}} + P_{\text{sup}} \quad [\text{W}] \quad (\text{II.146})$$

❖ **Rendement de la machine**

Le rendement est donné par la relation suivante :

$$\eta = \frac{P_n \times 10^3}{P_n \times 10^3 + P_{\text{tot}}} \quad (\text{II.147})$$

❖ **Calcul de la résistance de magnétisation**

La puissance absorbée à vide correspond aux pertes fer et mécanique, alors le courant actif à vide qui correspond à ces pertes sera exprimé comme suit :

$$I_{0a} = \frac{P_{\text{fer}} + P_{\text{mec}} + P_{a10}}{m_1 + U_{n1}} = \frac{P_{\text{fer}} + P_{\text{mec}} + R_1 \times m_1 \times (I_\mu)^2}{m_1 \times U_{n1}} \quad [\text{A}] \quad (\text{II.148})$$

D'où :

$$R_m = \frac{X_m \times I_\mu}{I_{0a}} \quad [\Omega] \quad (\text{II.149})$$

Avec: I_μ – Courant magnétisant. ; X_m – Réactance magnétisante exprimée.

II.5. Calcul des performances du moteur

Dans cette partie de calcul, nous étudions les performances du moteur, en utilisant une méthode analytique on se basant sur le schéma équivalent de la machine asynchrone à rotor double cage.

II.5.1. Schéma équivalent d'un moteur à deux cages

C'est un schéma conventionnel monophasé ramené au stator

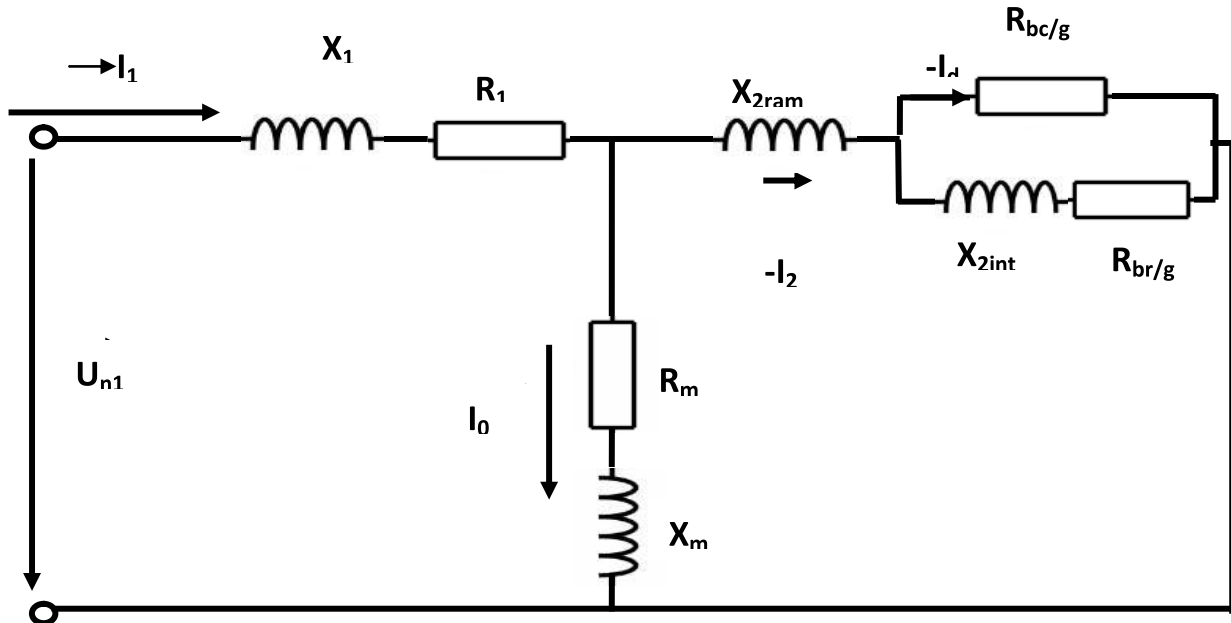


Figure II.3. le schéma équivalent en L d'un moteur asynchrone à double cage.

Avec :

R_1 –Résistance statorique en $[\Omega]$; X_1 – Réactance de fuite du stator en $[\Omega]$.

X_{2ram} –Réactance de fuite du rotor ramené au stator en $[\Omega]$.

R_{bc} – Résistance rotorique de la barre circulaire $[\Omega]$; R_{br} – Résistance rotorique de la barre rectangulaire $[\Omega]$; X_{2int} –Réactance de la cage interne du rotor $[\Omega]$.

R_m – Résistance magnétisante en $[\Omega]$; X_m – Réactance magnétique en $[\Omega]$.

II.5.2. Caractéristique de fonctionnement du moteur

Les caractéristiques de fonctionnement d'un moteur asynchrone sont :

a. Puissance rapporté du circuit primaire au circuit secondaire

La puissance rapportée du circuit secondaire au circuit primaire est égale :

$$P_2 = P_n + P_{sup} + P_{mec} \quad [W] \tag{II .150}$$

b. calcul de l'impédance

Ce fait comme suit :

$$C_1 \approx 1 + \frac{X_1}{X_m} \quad (\text{II .151})$$

C_1 – constante de transformation du schéma en T vers le schéma en L.

$$a' = C_1^2 \quad (\text{II .152})$$

$$s = \frac{a' \cdot r'2}{g} \quad (\text{II .153})$$

$$a = C_1 \cdot R_{1T20} \quad (\text{II .154})$$

$$R = a + (a' \cdot r'2)/g \quad [\Omega] \quad (\text{II .155})$$

$$X'2 = X_2 \cdot \frac{4 \cdot m_1 \cdot (W_1 \cdot K_{en1})^2}{Z_2 \cdot K_{ob}^2} \quad [\Omega] \quad (\text{II .156})$$

$$b = C_1 \cdot (X_1 + C_1 \cdot x'2) \quad (\text{II .157})$$

$$X = b + \frac{b' \cdot r'2}{g} \quad [\Omega] \quad (\text{II .158})$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad [\Omega] \quad (\text{II .159})$$

c. Calcul du courant secondaire

Le courant dans le circuit secondaire est calculé comme suit :

$$I_2'' = \frac{U_{n1}}{Z} \quad [A] \quad (\text{II .160})$$

$$I_2' = C_1 \times I_2'' \quad [A] \quad (\text{II .161})$$

Avec: I_2'' – Le courant dans le circuit secondaire transformé en L ; I_2' –Le courant dans le circuit secondaire ramené au primaire.

d. Facteur de Puissance rotorique

Le facteur de puissance rotorique est donné par la formule suivante:

$$\cos \phi_2 = \frac{R}{Z} \quad (\text{II.162})$$

D'ou :

➤ Courant actif

Il est donné par la formule suivante :

$$I_{2a}'' = I_2'' \times \cos \phi_2 \quad [A] \quad (\text{II.163})$$

➤ Courant réactif

Il est donné par la formule suivante :

$$I_{2r}'' = I_2'' \times \sin \phi_2 \quad [A] \quad (II.164)$$

➤ **Courant actif qui correspond aux pertes fer et aux pertes joules statorique à vide**

Il est donné par la relation suivante :

$$I_{0a} = \frac{P_{a10} + P_{f1}}{m_1 \times U_{n1}} \quad [A] \quad (II.165)$$

➤ **Courant magnétisant**

Il est donné par la relation suivante :

$$I_{0r} = \frac{P \times \sum F_i}{0.9 \times m_1 \times W_1 \times K_{en1}} \quad [A] \quad (II.166)$$

➤ **Courant total à vide**

Il est donné par la relation suivante :

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2} \quad [A] \quad (II.167)$$

➤ **Courant absorbé**

Il est donné par la relation suivante :

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1r}^2} \quad [A] \quad (II.168)$$

Avec :

$$I_{1a} = I_{0a} + I_{2a}'' \quad [A] \quad (II.169)$$

$$I_{1r} = I_{0r} + I_{2r}'' \quad [A] \quad (II.170)$$

Le facteur de puissance de la machine est donné par la relation suivante :

$$\cos \phi_1 = \frac{I_{1a}}{I_1} \quad (II.171)$$

e. Puissance absorbée par le moteur

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$P_1 = m_1 \times U_{n1} \times I_{1a} \quad [W] \quad (II.172)$$

f. Vitesse de rotation du moteur

Elle est donnée par la relation suivante:

$$N_2 = N \times (1 - g) \quad [tr/min] \quad (II.173)$$

Avec: N–Vitesse du synchronisme ; g –Glissement.

La vitesse relative du rotor par rapport au stator.

Est donnée par la relation suivante : $N_2/N=1-g$

g. Couple utile sur l'arbre du moteur

Il est donné par la relation suivante :

$$C_u = 9.55 \frac{P_n}{N_2} \quad [N.m] \quad (II.174)$$

II.5.3. Caractéristiques de démarrage

Les caractéristiques d'un moteur asynchrone sont données comme suit :

a. Résistance et réactance équivalentes au démarrage

Elles sont calculées comme suit :

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{b_{f1}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{f1}}{\delta}} \quad (II.175)$$

$$k' \delta = \frac{t_1}{t_1 - \gamma_1 1. \delta} \quad (II.176)$$

$$x_{12n} = k_{\mu} \cdot X_m \quad [\Omega] \quad (II.177)$$

$$C_{1nm} = 1 + \frac{x_{1m}}{x_{12n}} \quad (II.178)$$

$$R_{\pi m} = R_{1T20} + C_{1nm} \cdot \frac{r^2 \xi}{g} \quad [\Omega] \quad (II.179)$$

$$X_{\pi m} = x_{1m} + C_{1nm} \cdot x' 2 \xi m \quad [\Omega] \quad (II.180)$$

b. Courant de démarrage

Au démarrage le moteur asynchrone est assimilable à un transformateur dont le secondaire alimente une résistance faible dans ces conditions le courant de démarrage est considérable.

Il peut atteindre 6 à 7 fois le courant nominale .sa valeur est donnée par l'expression suivante :

$$I_d = I'' 2m \cdot \frac{\sqrt{R_{\pi m}^2 + (X_{\pi m} + X_m)^2}}{C_{1nm} \cdot X_m} \quad [A] \quad (II.181)$$

Avec :

$$I'' 2m = \frac{U_{n1}}{\sqrt{R_{\pi m}^2 + X_{\pi m}^2}} \quad [A] \quad (II.182)$$

c. Couple de démarrage

Est donné par la formule suivante :

$$C_d = C_u \cdot C_{drap} \quad [N.m] \quad (II.183)$$

$$\text{Avec : } C_{drap} = \left(\frac{I' 2m}{I_2}\right)^2 \cdot K_R \cdot \frac{g_n}{g} \quad (II.184)$$

$$K_R = 1.001 \text{ d'où : } I' 2m = C_{1nm} \cdot I'' 2m \quad [A] \quad (II.185)$$

II.6. Tableaux des résultats du calcul optimal

Tableau II.2. Tableau des résultats des calculs

Paramètre	Symbole	valeur	Unité	Source
Puissance électromagnétique	P_e	361683.2	[W]	(II.1)
Longueur virtuelle du stator	L_i	560	[mm]	(II.2)
Coefficient de la chute de tension dans le stator	K_e	0.97	–	–
Coefficient de distribution	K_{d1}	0.96	–	(II.4)
Coefficient de raccourcissement polaire	K_{r1}	0.966	–	(II.5)
Pas polaire en nombre d'encoche	τ_p	18	–	(II.8)
Pas dentaire	t_1	17.453	[mm]	(II.9)
Courant nominale	I_{n1}	538.189	[A]	(II.10)
Nombre de conducteurs effectifs dans une encoche	U_{en1}	11	–	(II.11)
Nombre de spires d'une voie parallèle	W_1	33	–	(II.12)
Angle électrique	γ	10	–	(II.13)
Nombre d'encoche par pôle et par phase	q_1	6	–	(II.14)
Section effective transversale d'un conducteur de l'enroulement	S_{eff1}	17.655	[mm ²]	(II.16)
nombre de conducteurs élémentaires	N_{el}	10	–	–
Section élémentaires	S_{el1}	1.765	[mm ²]	(II.17)
Largeur de la dent	b_{z1}	8.528	[mm]	(II.18)
L'Induction dans la dent statorique	B_{z1}	1.103	[T]	(II.19)
Hauteur du dos du stator	h_{c1}	48.8	[mm]	(II.20)
Hauteur de la dent	h_{z1}	41.2	[mm]	(II.21)
Section de l'encoche statorique avec isolation	$S_{encisol}$	411.43	[mm ²]	(II.22)
Section occupée par l'isolation	S_{iso}	28.614	[mm ²]	(II.23)
Section de l'encoche statorique	S_{enc1}	382.816	[mm ²]	(II.24)
Coefficient de remplissage	K_{Ra}	0.722	–	(II.25)
Charge linéaire	A_1	$480 \cdot 10^2$	[A/m]	(II.26)
Induction magnétique dans l'entrefer	B_δ	0.512	[T]	(II.27)

Flux sous un pôle	\emptyset	0.0573	[Wb]	(II.28)
Diamètre extérieur du rotor	D_2	397.4	[mm]	(II.29)
Pas dentaire rotorique	t_2	560	[mm]	(II.30)
Courant dans la barre	I_2	919.035	[A]	(II.31)
Hauteur de la culasse rotorique	h_{c2}	79.925	[mm]	(II.32)
Pas polaire rotorique	τ_{p2}	312.117	[mm]	(II.33)
Hauteur de la dent	h_{z2}	48.76	[mm]	(II.34)
largeur de la partie circulaire de la dent	b_{z2c}	8.629	[mm]	(II.35)
largeur de la partie rectangulaire de la dent	b_{z2r}	10.75	[mm]	(II.36)
Largeur de la dent	b_{z2}	9.69	[mm]	(II.37)
L'induction admissible dans la dent rotorique	B_{z2}	1.24	[T]	(II.38)
Section de la barre circulaire	S_{bc}	136.848	[mm ²]	(II.40)
Section de la barre rectangulaire	S_{br}	168.49	[mm ²]	(II.41)
Densité du courant	J_b	4.4	[A/mm ²]	(II.42)
Hauteur de l'anneau de la cage externe	h_{anc}	50	[mm]	(II.43)
Hauteur de l'anneau de la cage interne	h_{anr}	50	[mm]	(II.44)
La section de l'anneau de la cage externe	S_{anc}	1000	[mm ²]	(II.46)
La section de l'anneau de la cage interne	S_{anr}	1000	[mm ²]	(II.47)
La largeur de l'anneau de la cage externe	b_{anc}	20	[mm]	(II.48)
La largeur de l'anneau de la cage interne	b_{anr}	20	[mm]	(II.49)
Diamètre moyen de l'anneau de la cage externe	D_{anc}	347.4	[mm]	(II.50)
Diamètre moyen de l'anneau de la cage interne	D_{anr}	304.9	[mm]	(II.51)
Longueur moyenne des lignes de champs dans la culasse statorique	L_{c1}	417.204	[mm]	(II.52)
Force magnétomotrice de la culasse statorique	F_{c1}	60.495	[A]	(II.53)
Force magnétomotrice dans la dent du stator	F_{z1}	5.974	[A]	(II.54)
Longueur moyenne des lignes du champ magnétique dans la culasse du rotor	L_{c2}	86.376	[mm]	(II.55)
Force magnétomotrice dans la culasse du rotor	F_{c2}	8.378	[A]	(II.56)
Force magnétomotrice dans les dents du rotor	F_{z2}	4.047	[A]	(II.57)
Force magnétomotrice dans l'entrefer	F_{δ}	597.785	[A]	(II.60)

Coefficient de CARTER qui tient compte du non- uniformité de l'entrefer	K_{δ}	1.123	–	(II.61)
Force magnétomotrice totale par paire de pôle	$F=\sum F_i$	$1.284*10^3$	[A]	(II.64)
Coefficient de saturation de la machine	K_{μ}	1.074	–	(II.66)
Courant magnétisant	I_{μ}	31.187	[A]	(II.67)
Réactance de magnétisation	X_m	12.441	[Ω]	(II.68)
Coefficient de dispersion magnétique du stator	σ_{μ}	0.011	–	(II.69)
Force électromotrice à vide	E_0	395.489	[V]	(II.70)
Résistance active d'une phase du stator	R_1	0.016	[Ω]	(II.71)
Longueur moyenne d'une spire de l'enroulement statorique	L_{w1}	$1.982*10^3$	[mm]	(II.72)
Largeur moyenne d'une section	b_{1moy}	288.765	[mm]	(II.74)
Réactance de fuite d'encoche	X_{enc1}	0.054	[Ω]	(II.75)
Réactance de fuite différentielle	X_{1d}	0.025	[Ω]	(II.76)
Réactance de fuite frontale	X_{1f}	0.063	[Ω]	(II.77)
La réactance totale	X_1	0.142	[Ω]	(II.78)
Perméance d'encoche	λ_{enc1}	1.333	[Ω]	(II.80)
Perméance de dispersion de l'enroulement statorique	λ_1	3.534	[Ω]	(II.79)
Perméance frontale proportionnelle à la réactance de fuite frontale	λ_{1f}	1.569	[Ω]	(II.83)
coefficient de réduction	K_{red}	0.224	–	(II.84)
Résistance active de la barre circulaire	R_{bc}	479.855	[Ω]	(II.85)
Résistance de l'anneau de la cage externe	R_{anc}	$6.704*10^{-7}$	[Ω]	(II.86)
Résistance active de la cage externe	R_{c1}		[Ω]	(II.87)
Résistance active de la barre rectangulaire	R_{br}	$5.202*10^{-5}$	[Ω]	(II.88)
Résistance de l'anneau de la cage interne	R_{anr}	$5.884*10^{-7}$	[Ω]	(II.89)
Résistance active de la cage interne	R_{c2}		[Ω]	(II.90)
Résistance de l'anneau ramenée à la barre cage interne	$R_{anrambc}$	$1.331*10^{-5}$	[Ω]	(II.91)
Résistance de l'anneau ramenée à la barre cage externe	$R_{anrambr}$	$1.331*10^{-5}$	[Ω]	(II.92)
Résistance de l'anneau ramenée à la barre	$R_{anrambt}$	$6.223*10^{-6}$	[Ω]	(II.93)
Résistance de l'anneau ramenée au stator	$R_{anrambs}$	$1.242*10^{-3}$	[Ω]	(II.98)
Résistance active d'une phase rotorique	R_2	$6.371*10^{-5}$	[Ω]	(II.101)
Résistance d'une phase rotorique ramenée au stator	R_{2ram}	0.013	[Ω]	(II.102)

Le courant des anneaux	I_{an}	$4.096 \cdot 10^3$	[A]	(II.103)
La densité du courant des anneaux de la cage externe	J_{anc}	4.096	[A/mm ²]	(II.104)
Facteur de conductibilité magnétique	λ_{cm}	2.69	[Ω]	(II.105)
Perméance frontale externe	λ_{2fc}	0.54	[Ω]	(II.106)
réactance de la cage extérieure	X_{2ext}	0.714	[Ω]	(II.108)
La densité du courant des anneaux de la cage interne	J_{anr}	4.096	[A/mm ²]	(II.109)
Facteur de dispersion d'encoche	λ_{disenc}	2.978	—	(II.110)
Perméance frontale interne	λ_{2fr}	0.511	[Ω]	(II.111)
La réactance de la cage intérieure	X_{2int}	0.772	[Ω]	(II.113)
Réactance du rotor ramenée au stator	X_{2ram}	77.007	[Ω]	(II.115)
Profondeur de pénétration	h_{pp}	13.2	[mm]	(II.116)
Section de la barre pénétrée par le courant de démarrage	S_{bdem}	136.848	[mm ²]	(II.118)
Résistance de la barre au démarrage	R_{bdem}	479.855	[Ω]	(II.119)
Coefficient de déplacement du courant	K_{dep}	1		(II.120)
Résistance de la Cage au démarrage	R_{2dem}	479.855	[Ω]	(II.122)
Résistance de la cage au démarrage ramenée au stator	$R_{2dem-ram}$	$9.576 \cdot 10^4$	[Ω]	(II.122)
Résistance du rotor pour des bagues séparées	$r_{2\xi}$	$5.214 \cdot 10^{-5}$	[Ω]	(II.131)
Réactance du rotor pour des bagues séparées	$x_{2\xi}$	$1.173 \cdot 10^{-3}$	[Ω]	(II.132)
Pertes dans les dents	P_{fz1}	778.41	[W]	(II.137)
Pertes dans la culasse statorique	P_{c1}	$2.312 \cdot 10^3$	[W]	(II.139)
Les pertes dans le fer	P_{fer}	$3.091 \cdot 10^3$	[W]	(II.141)
Pertes joules statoriques	P_{j1}	$4.609 \cdot 10^3$	[W]	(II.142)
Pertes joules rotoriques	P_{j2}	$3.013 \cdot 10^3$	[W]	(II.143)
Pertes mécaniques	P_{mec}	$1.39 \cdot 10^3$	[W]	(II.144)
Pertes supplémentaires	P_{sup}	$1.641 \cdot 10^3$	[W]	(II.145)
Pertes totales	P_{tot}	$1.374 \cdot 10^4$	[W]	(II.146)
Rendement de la machine	η	0.958	—	(II.147)
la résistance de magnétisation	R_m	102.838	[Ω]	(II.149)
l'impédance	Z	1.188	[Ω]	(II.159)
courant secondaire	I'_2	340.502	[A]	(II.161)
Facteur de Puissance rotorique	$\cos\phi_2$	0.883	—	(II.162)
Courant actif	I'_{2a}	336.663	[A]	(II.163)
Courant réactif	I'_{2r}	340.502	[A]	(II.164)
Courant actif qui correspond aux pertes fer et aux pertes joules statorique à vide	I_{0a}	2.614	[A]	(II.165)
Courant magnétisant	I_{0r}	54.018	[A]	(II.166)
Courant total à vide	I_0	54.082	[A]	(II.167)
Courant absorbé	I_1	367.28	[A]	(II.168)
Le facteur de puissance de la machine	$\cos\phi_1$	0.861	—	(II.171)
Puissance absorbée par le moteur	P_1	$3.599 \cdot 10^5$	[W]	(II.172)
Vitesse de rotation du moteur	N_2	$1.485 \cdot 10^3$	[tr/min]	(II.173)
Couple utile sur l'arbre du moteur	C_u	$2.026 \cdot 10^3$	[N.m]	(II.174)

Résistance équivalente au démarrage	$R_{\pi m}$	0.021	[Ω]	(II.179)
réactance équivalente au démarrage	$X_{\pi m}$	0.28	[Ω]	(II.180)
Courant de démarrage	I_d	$1.443 \cdot 10^3$	[A]	(II.181)
Couple nominal	C_n	$2.006 \cdot 10^3$	[N.m]	—
Couple de démarrage	C_d	$4.874 \cdot 10^3$	[N.m]	(II.183)
Le rapport	I_d/I_n	3.928	—	—
Le rapport	C_d/C_n	2.43	—	—

II.7. Comparaison des résultats

Dans cette partie on va présenter des exemple de calcul pour différentes variantes pour avoir des résultats plus optimales pour le moteur existant tout en respectant les norme de construction et puis établir des comparaisons entre ces exemples, puis une comparaison entre le moteur calculé le plus performant et le moteur existant à **l'électro-industrie**.

La comparaison sera faite en premier lieu entre trois cas de calcul obtenu avec la modification des variantes suivantes : la charge linéaire, la densité du courant, le nombre de conducteur utilisé et la puissance de la machine. Et les différentes valeurs des caractéristiques mécaniques, électriques ainsi que les performances du moteur calculé sont données dans les tableaux suivants :

- **Premier cas** : les variantes sont la charge linéaire et la densité du courant

Tableau II.3. Tableau des résultats du premier cas

<i>Puissance nominale [kW]</i>	315	Rapport entre les couples (Cd/Cn)	1.245
<i>Charge linéaire A_1 [A/cm]</i>	520	<i>Pertes mécaniques P_{mec} [W]</i>	$1.39 \cdot 10^3$
<i>Densité de courant J_1 [A/mm²]</i>	4.5	<i>Pertes joules statoriques P_{j1} [W]</i>	$5.413 \cdot 10^3$
<i>Diamètre et nombre du conducteur élémentaire N_{el} [mm]</i>	12 ($d_{nu}=1.32$)	<i>Pertes joules rotorique P_{j2} [W]</i>	$4.17 \cdot 10^3$
<i>Section élémentaire S_{el} [mm²]</i>	1.439	<i>Pertes fer [W]</i>	$2.597 \cdot 10^3$
<i>Courant nominal I_{n1} [A]</i>	538.189	<i>Pertes totales P_t [W]</i>	$1.521 \cdot 10^4$
<i>Coefficient de remplissage K_{ra}</i>	0.743	<i>Couple utile C_u [Nm]</i>	$2.029 \cdot 10^3$
<i>cosΦ</i>	0.863	<i>Couple au démarrage C_d [Nm]</i>	$2.496 \cdot 10^3$
<i>Rapport des courants (Id/In)</i>	3.904	<i>Le rendement η</i>	0.959

- **Deuxième cas** : les variantes sont la puissance et le nombre de conducteur élémentaires

Tableau II.4. Tableau des résultats du deuxième cas

Puissance nominale [kW]	320	Rapport entre les couples (Cd/Cn)	2.026
Charge linéaire A_1 [A/cm]	520	Pertes mécaniques P_{mec} [W]	$1.39 \cdot 10^3$
Densité de courant J_1 [A/mm ²]	4.5	Pertes joules statoriques P_{j1} [W]	$4.727 \cdot 10^3$
Nombre et diamètre du conducteur élémentaire Nel [mm]	13($d_{nu}=1.32$)	Pertes joules rotorique P_{j2} [W]	$3.617 \cdot 10^3$
Section élémentaire Sel [mm ²]	1.349	Pertes fer [W]	$3.091 \cdot 10^3$
Courant nominal I_{n1} [A]	546.733	Pertes totales P_t [W]	$1.449 \cdot 10^4$
Coefficient de remplissage Kra	0.737	Couple utile Cu [Nm]	$2.026 \cdot 10^3$
$\cos\Phi$	0.82	Couple au démarrage Cd [Nm]	$4.063 \cdot 10^3$
Rapport des courants (Id/In)	4.571	Le rendement η	0.962

➤ **troisième cas** : les variantes sont la densité de courant et le nombre de conducteur

Tableau II.4. Tableau des résultats du troisième cas

Puissance nominale [kW]	315	Rapport entre les couples (Cd/Cn)	1.245
Charge linéaire A_1 [A/cm]	520	Pertes mécaniques P_{mec} [W]	$1.39 \cdot 10^3$
Densité de courant J_1 [A/mm ²]	4.65	Pertes joules statoriques P_{j1} [W]	$5.523 \cdot 10^3$
Nombre et diamètre du conducteur élémentaire Nel [mm]	8($d_{nu}=1.60$)	Pertes joules rotorique P_{j2} [W]	$4.171 \cdot 10^3$
Courant nominal I_{n1} [A]	538.189	Pertes fer [W]	$2.597 \cdot 10^3$
Section élémentaire Sel [mm ²]	2.08	Pertes totales P_t [W]	$1.532 \cdot 10^4$
Coefficient de remplissage Kra	0.712	Couple utile Cu [Nm]	$2.029 \cdot 10^3$
$\cos\Phi$	0.863	Couple au démarrage Cd [Nm]	$2.496 \cdot 10^3$
Rapport des courants (Id/In)	3.904	Le rendement η	0.959

II.7.1. Interprétation des résultats

- Dans le premier cas ou les variantes sont la charge linéaire et la densité de courant les paramètres du moteur sont presque les mêmes par rapport aux autres cas, sauf que dans ce cas on a obtenu un meilleur coefficient de remplissage et un facteur de puissance plus grand.
- Pour le deuxième cas ou les variantes sont la puissance et le nombre de conducteur élémentaires dans l'encoche les paramètres du moteur sont aussi presque les mêmes pour les trois cas, sauf que dans ce cas on a obtenu une meilleure puissance et un haut rendement par contre, un facteur de puissance légèrement petit, un courant nominal et un couple de démarrage plus grands aussi.
- Concernant le troisième cas ou les variantes sont la densité de courant et le nombre de conducteur élémentaires les résultats obtenus sont beaucoup plus proche du premier cas ou le facteur de puissance est plus grand, un bon rendement mais légèrement inférieure par rapport au deuxième cas.
- Les pertes totales pour les trois cas sont presque les égales, il ya une petite différence qui est due aux pertes fer, pertes joules rotorique et pertes joules statorique car elle différent d'un cas a un autre, mais avec des marges minimales.

II.7.2. Comparaison entre le moteur calculé et le moteur existant

Feuille de calcul du moteur existant donné par L'Electro-industrie

Tableau II.5. Feuille de calcul du moteur avant l'optimisation

Tension nominale [V]	couplage	Courant nominal [A]	Vitesse de rotation [tr/mn]	Puissance nominale [kW]	cosΦ	Le rendement η	La fréquence [Hz]
380	Δ	560	1488	315	0.89	0.955	50

Feuille de calcul du moteur calculé

Tableau II.5. Feuille de calcul du moteur après l'optimisation

Tension nominale [V]	couplage	Courant nominal [A]	Vitesse de rotation [tr/mn]	Puissance nominale [kW]	cosΦ	Le rendement η	La fréquence [Hz]
400	Δ	538	1485	315	0.861	0.963	50

- En gardant les mêmes caractéristiques géométriques, la même puissance et en augmentant la gamme de tension à 400 [V] pour le moteur calculé, on a abouti à des améliorations considérables, on remarque ce qui suit :
 - Une diminution considérable du courant nominal par rapport au moteur existant.
 - Un rendement premium de 96.3% (classe **IE3**).
 - Un très haut rendement qui s'explique par la réduction des pertes totales
 - Par contre il y a une légère diminution du facteur de puissance comparant au moteur existant mais sa rente dans la tolérance.

II.8. Conclusion

En définitive, les résultats obtenus après le calcul optimal sont satisfaisants ; ceux-ci impliquent que le moteur calculé est réalisable avec toutes ces améliorations surtout vis-à-vis du rendement qui est dans la classe premium (classe de rendement : IE3).



Chapitre III

Modélisation par éléments finis d'un moteur à double cage

Chapitre III. Modélisation par éléments finis d'un moteur asynchrone à double cage

III.1. Introduction

Les méthodes de calcul empirique ou analytique basées sur des modèles simplifiés deviennent insuffisantes, dès que la complexité de la géométrie s'accroît et que certains matériaux possèdent des caractéristiques non linéaire. La résolution de tel problème nécessite de recourir à des méthodes numériques. Et la méthode la plus courante pour l'analyse et la conception des problèmes électromagnétiques est la méthode des éléments finis.

Et la méthode de calcul sont basés sur les équations de Maxwell, aussi appelées équations de Maxwell-Lorentz, sont des lois fondamentales de la physique. Elles constituent la base de l'électromagnétisme, avec l'expression de la force électromagnétique de Lorentz.

Les équations de Maxwell sont des équations de base traduisant les phénomènes électromagnétiques, différents théorèmes (Gauss, Ampère, Faraday).

La modélisation de la machine par la méthode des éléments finis va nous permettre de résoudre les équations de Maxwell.

Dans ce qui suit, nous présenterons la modélisation d'un moteur asynchrone à double cage en adoptant le logiciel **FEMM** (Finit Element Magnetique Méthod). Et pour la visualisation des résultats trouvés on a fait appel au logiciel Matlab. Les principales étapes de la mise en œuvre sont donc présentées. [12]

III.2. Les équations de Maxwell

Les équations fondamentales de Maxwell sont :

$$\text{div} \vec{B} = 0 \tag{III.1}$$

$$\text{rot} \vec{E} = - \frac{d\vec{B}}{dt} \tag{III.2}$$

$$\text{rot} \vec{B} = \mu \vec{J} + \mu \epsilon \frac{d\vec{E}}{dt} \tag{III.3}$$

$$\text{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \tag{III.4}$$

La relation constitutive entre B et H dans les matériaux dure est :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \tag{III.5}$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \tag{III.6}$$

En tenant en compte de la loi d'ohm dans les milieux conducteurs :

$$\vec{J}_c = \vec{J}_s + \vec{J}_{\text{induit}} \tag{III.7}$$

$$\vec{J}_{\text{induit}} = \sigma \vec{E} + \sigma (\nabla \times \vec{B}) \tag{III.8}$$

Dans notre cas on utilise l'équation suivante :

$$\text{rot} \vec{B} = \mu \vec{J} \tag{III.9}$$

Il existe \vec{A} potentiel vecteur magnétique tel que l'induction

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A} \tag{III.10}$$

D'après (III.9) et (III.10) on aura un résultat qui est en terme de potentiel vecteur magnétique et on obtient le système d'équation suivant:

$$\text{rot}(\text{rot} \vec{A}) = \mu \vec{J} \tag{III.11}$$

$$\text{rot}(\text{rot} \vec{A}) = -\Delta \vec{A} \iff -\Delta \vec{A} = \mu \vec{J} \iff \Delta \vec{A} = -\mu \vec{J}$$

$$\text{D'où : } \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{\mu} \frac{d}{dx} \vec{A} \right) + \frac{d}{dy} \left(\frac{1}{\mu} \frac{d}{dy} \vec{A} \right) + \frac{d}{dz} \left(\frac{1}{\mu} \frac{d}{dz} \vec{A} \right) = -\mu \vec{J}$$

III.3. Etape de mise en œuvre du problème sous FEMM

Les étapes à suivre pour la modélisation du moteur asynchrone à double cage sont données par l'organigramme ci-dessous :

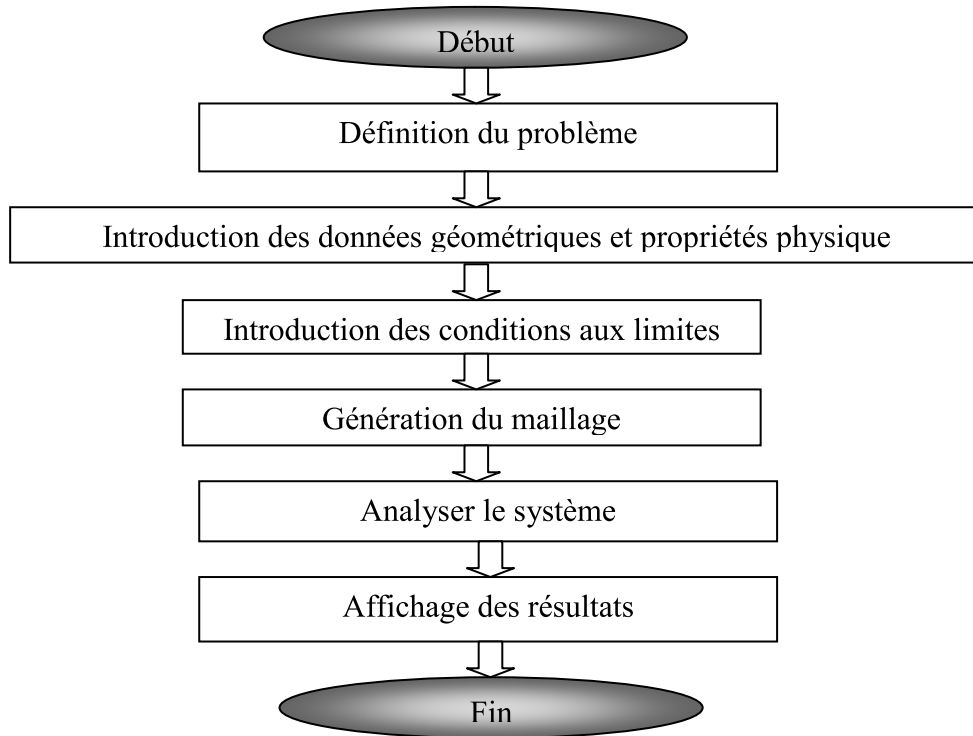


Figure III.1. Organigramme de calcul avec la méthode des éléments finis.

III.4. Structure de la machine étudiée

Les Figure III.2 et Figure III.3 représentent la disposition géométrique des éléments et les différents matériaux constitutifs de la machine asynchrone à double cage présentée au part avant.

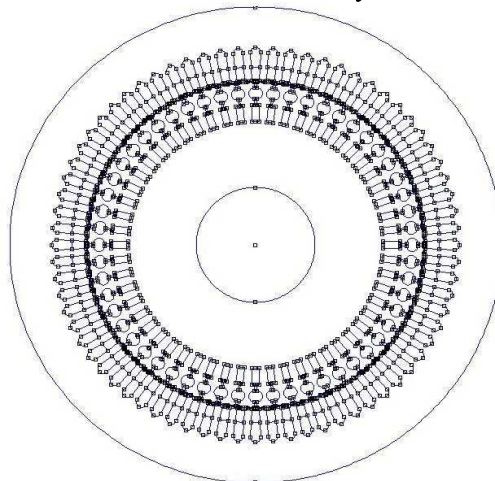


Figure III.2. Structure de la machine asynchrone à double cage.

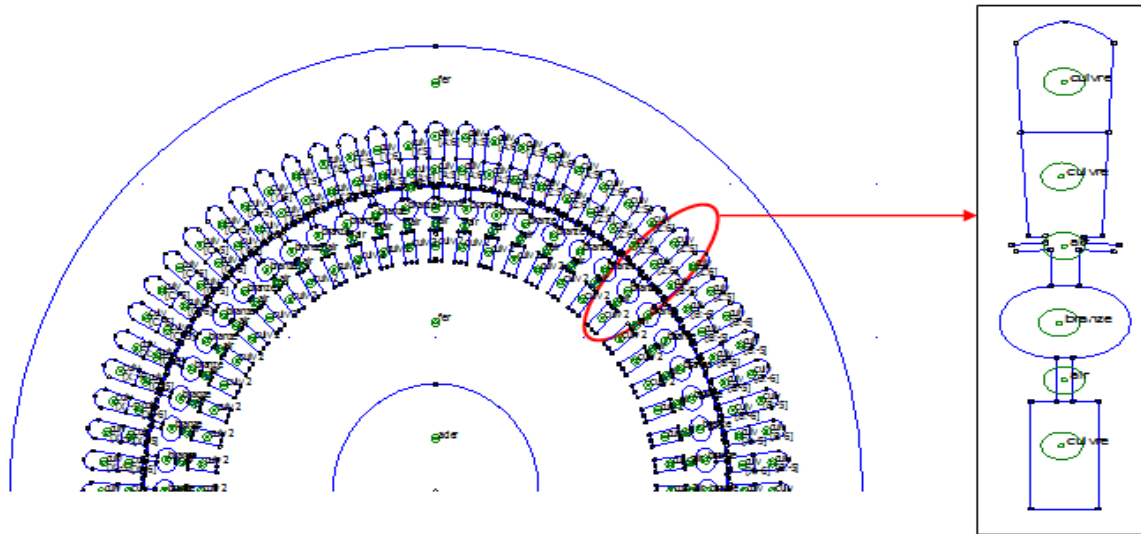


Figure III.3. La structure de la machine avec les différents matériaux.

III.5. Le maillage triangulaire

Avec le logiciel FEMM, l'opération du maillage triangulaire est très simple, car elle se fait automatiquement. Après avoir enregistré la structure déjà construite dans la première partie, la figure ci-dessous représente le maillage obtenu.

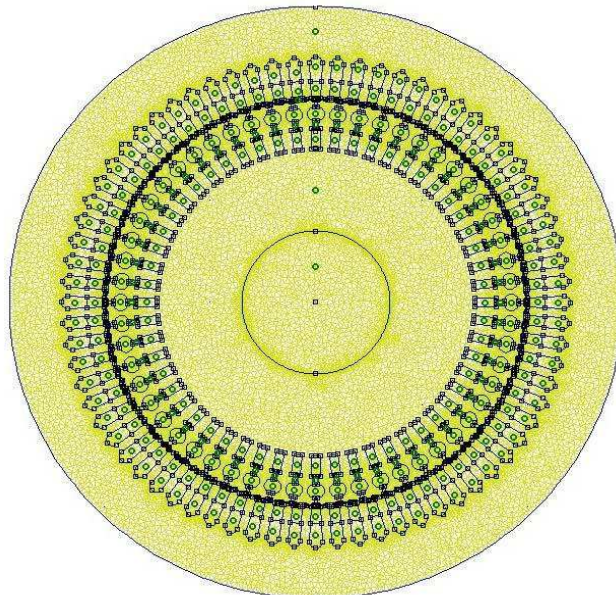


Figure III.4. Le maillage du moteur asynchrone à double cage.

III.6. Visualisation des lignes de champ

Après avoir terminé le maillage, on arrive à la distribution des lignes de champ comme le montre la figure ci-dessous. On voit clairement que les lignes de champ se canalisent dans le matériau ferromagnétique (fer rotorique et statorique), car le fer possède une grande perméabilité magnétique. Par contre dans l'arbre de la machine on visualise l'absence des lignes du champ du fait que l'acier possède une perméabilité très négligeable devant celle du fer.

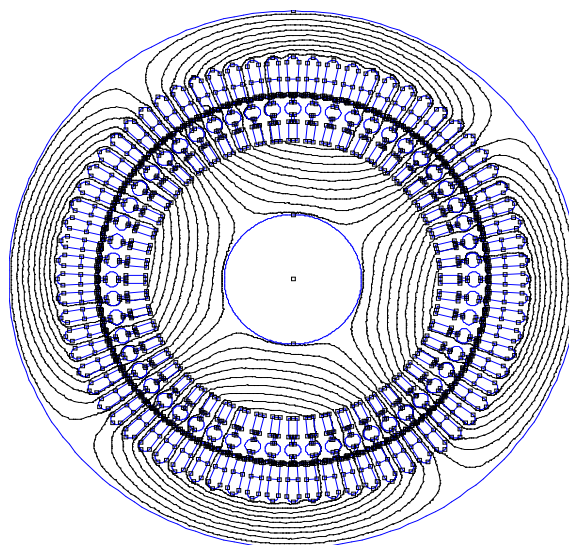


Figure III.5. La distribution des lignes de champ.

III.7. Visualisation de l'induction magnétique

La figure suivante représente l'induction magnétique dans la machine étudiée :

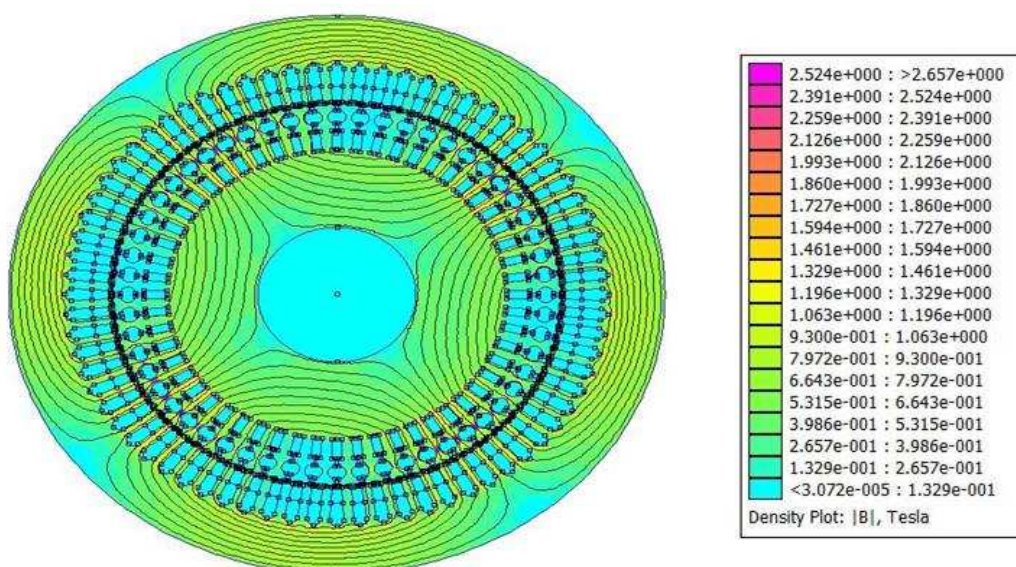


Figure III.6. L'induction magnétique dans la machine.

III.8. L'induction magnétique normale dans l'entrefer

La figure ci-dessous montre que la valeur de l'induction normale dans l'entrefer est au voisinage de 0.8[T] :

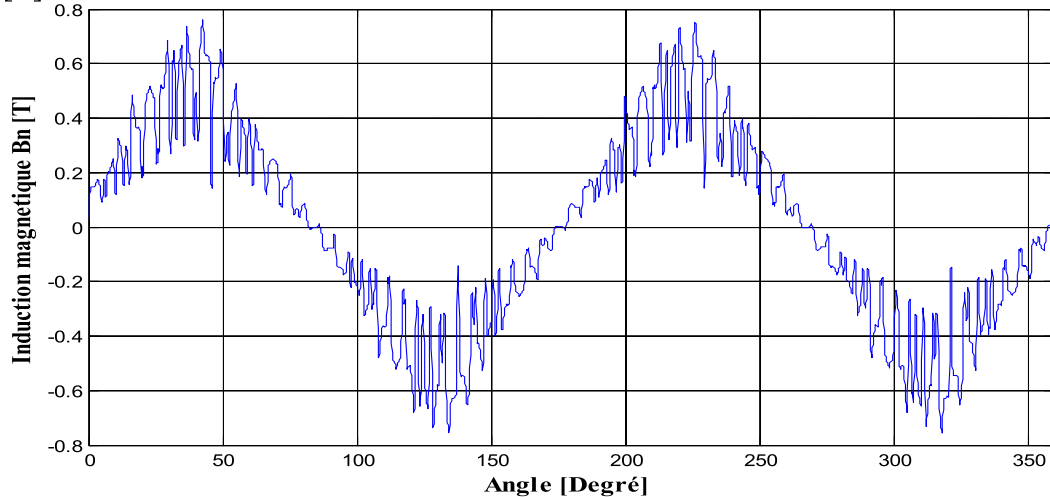


Figure III.7. L'induction magnétique normale dans l'entrefer.

- La figure d'induction magnétique normale dans l'entrefer est une courbe presque sinusoïdale. La valeur maximale positive obtenue est $B_n=0.8$ [T] et la valeur négative qui correspond au changement successif de sens de l'orientation d'induction des pôles (chaque pôle nord suit un pôle sud) vaut $B_n= - 0.8$ [T].
- On voit la présence des ondulations et des piques sur la forme de l'induction magnétique, elles sont dues au encoche et au dent statorique et rotorique, en deuxième part à la géométrie très complexe de la machine.

III.9. Module induction magnétique normale dans l'entrefer

Le module induction magnétique est donné par la figure suivante :

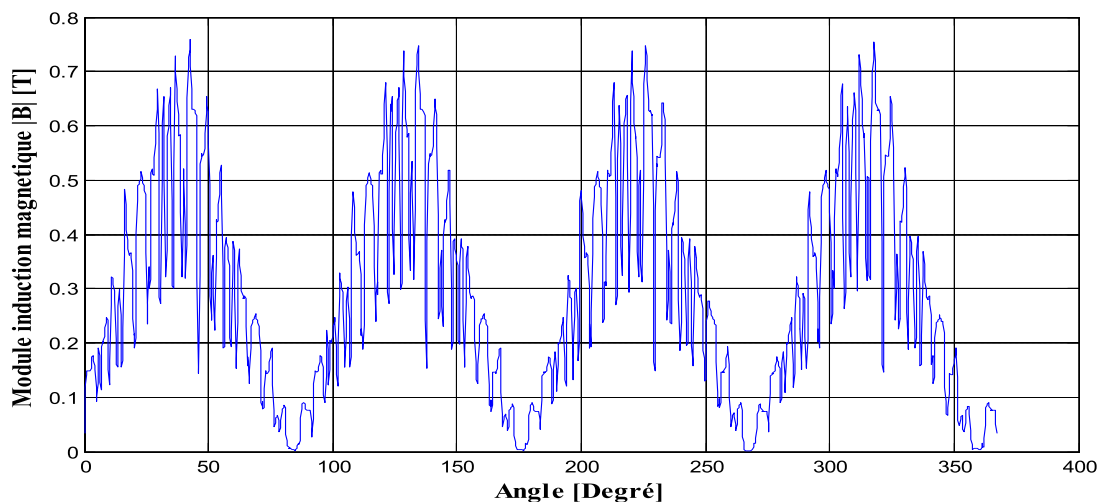


Figure III.8. Module induction magnétique dans l'entrefer.

III.10. Potentiel vecteur magnétique

On remarque dans la figure (III.9) que la forme du potentiel vecteur magnétique dans l'entrefer est sinusoïdale, elle montre aussi la disposition alternative des 4 pôles de la machine et la valeur maximale du potentiel est aux alentours de 0.04 [T].

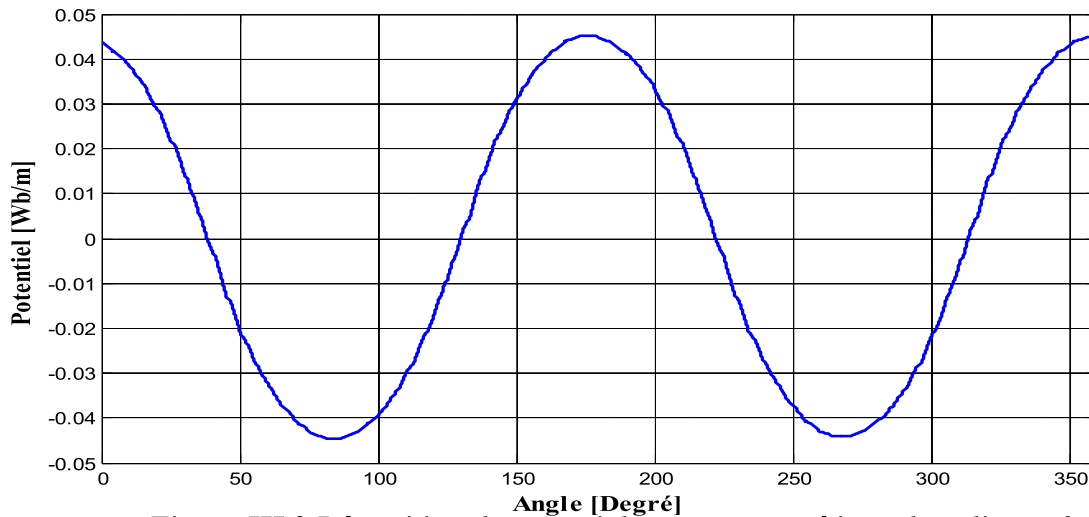


Figure III.9 Répartition du potentiel vecteur magnétique dans l'entrefer.

III.11. Conclusion

Dans cette partie on fait appel à la méthode des éléments fini et au logiciel FEMM pour visualiser le champ, l'induction magnétique normale et module induction magnétique dans l'entrefer. Et on à obtenue les mêmes résultats trouvés dans le calcul optimal du moteur.



Conclusion générale

Conclusion générale

L'optimisation d'un moteur asynchrone à double cage nécessite une étude profonde, des recherches intenses et minutieuses ainsi des grands moyens, ce qui nous conduit à un travail de longue durée.

Pour arriver à notre objectif, on a pris en considération toutes les différentes valeurs des données recommandées par l'Entreprise ELECTRO-INDUSTRIE d'AZAZGA et les choix de nos valeurs calculées pour lesquels on doit faire des compromis, nous sommes parvenus à des résultats satisfaisants du fait que toutes les contraintes électriques, mécaniques et magnétiques sont dans la limite admissible.

Notre méthode de calcul ainsi que le programme informatique utilisé, nous ont été d'un apport considérable en matière du temps et de précision surtout au niveau du calcul de rendement et des caractéristiques de démarrage.

Toutefois, on peut estimer que le domaine de la construction et surtout l'optimisation d'un moteur électrique asynchrone triphasé à double cage, en augmentant son rendement est un sujet d'actualité, mais aussi est un domaine très vaste qui nous a permis d'ajouter beaucoup de compréhension aux connaissances déjà acquises sur son fonctionnement dans notre cursus universitaire.

Enfin, nous espérons que nous avons apporté un appui considérable pour les étudiants des promotions futurs afin d'optimiser les moteurs asynchrones triphasés à double cage d'écureuil et nous souhaitons que d'autres études seront faites sur ce sujet, en prenant en considération d'autres paramètres et en particulier de s'intéresser à l'étude thermique et au refroidissement.



Annexe

Annexe

Dans l'annexe on a donné le tableau de magnétisation d'acier, tableau des diamètres et sections des conducteurs, tableau du coefficient Kd en fonction du nombre de poles, tableau de Krr1 en fonction de q ; les figures de l'induction magnetique et la charge lineaire dans l'entrefer puis celles de la densité du courant et l'épaisseur de l'entrefer ainsi celle du dimensionnement des encoches rotoriques et statoriques.

Tableau 1. La magnétisation d'acier.

<i>B(Tesla)</i>	<i>H (A/m)</i>	<i>Ps (W/Kg)</i>	<i>Ss (VA/Kg)</i>	<i>μa</i>
1,829	1,341.e+4	8,962.e+0	3,259.e+2	1,085.e+2
1,763	8,980.e+3	8,518.e+0	2,163.e+2	1,562.e+2
1,699	6,751.e+3	7,527.e+0	1,379.e+2	2,003.e+2
1,634	4,241.e+3	7,120.e+0	8,191.e+1	3,066.e+2
1,571	2,463.e+3	6,592.e+0	4,525.e+1	5,076.e+2
1,508	1,337.e+3	6,074.e+0	2,458.e+1	8,976.e+2
1,445	7,250.e+2	5,546.e+0	1,475.e+1	1,586.e+3
1,384	5,339.e+2	5,019.e+0	1,023.e+1	2,063.e+3
1,323	3,839.e+2	4,550.e+0	7,950.e+0	2,742.e+3
1,261	3,031.e+2	4,130.e+0	6,610.e+0	3,322.e+3
1,2	2,532.e+2	3,750.e+0	5,597.e+0	3,771.e+3
1,138	2,202.e+2	3,409.e+0	5,018.e+0	4,113.e+3
1,077	1,972.e+2	3,093.e+0	4,450.e+0	4,346.e+3
1,015	1,802.e+2	2,801.e+0	3,986.e+0	4,482.e+3
0,954	1,671.e+2	2,527.e+0	3,577.e+0	4,543.e+3
0,892	1,564.e+2	2,265.e+0	3,265.e+0	4,539.e+3
0,83	1,480.e+2	2,026.e+0	2,918.e+0	4,463.e+3
0,768	1,407.e+2	1,802.e+0	2,601.e+0	4,344.e+3
0,707	1,342.e+2	1,589.e+0	2,307.e+0	4,192.e+3
0,645	1,278.e+2	1,387.e+0	2,027.e+0	4,016.e+3
0,584	1,220.e+2	1,195.e+0	1,771.e+0	3,809.e+3
0,522	1,161.e+2	1,012.e+0	1,525.e+0	3,578.e+3
0,46	1,106.e+2	8,402.e-1	1,316.e+0	3,310.e+3
0,399	1,047.e+2	6,789.e-1	1,090.e+0	3,033.e+3
0,337	9,880.e+1	5,278.e-1	8,794.e-1	2,714.e+3
0,276	9,250.e+1	3,887.e-1	6,849.e-1	2,374.e+3
0,213	8,550.e+1	2,637.e-1	5,039.e-1	2,001.e+3
0,153	7,650.e+1	1,558.e-1	3,431.e-1	1,592.e+3
0,091	6,350.e+1	7,074.e-2	1,895.e-1	1,140.e+3
0,029	4,000.e+1	1,703.e-2	6,363.e-2	5,769.e+2
0	0,000.e+0	0,000.e+0	8,000.e-6	0,000.e+0

Tableau 2. Diamètre et section normalisés des conducteurs.

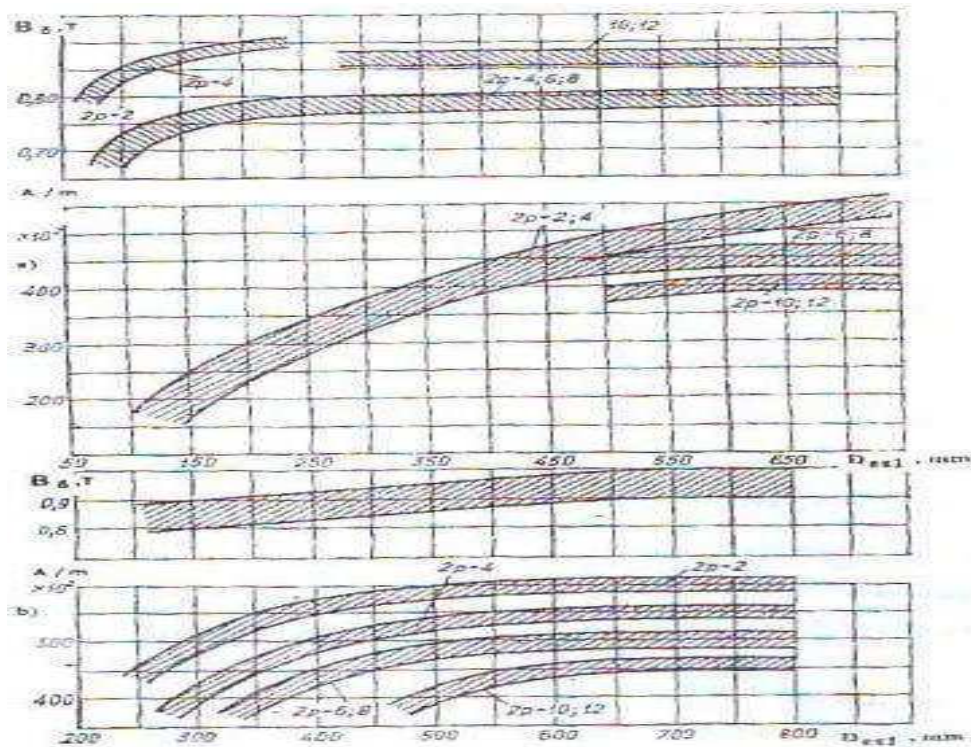
Diamètre du conducteur nu [mm]	Diamètre du conducteur isolé [mm]	Section du conducteur nu [mm ²]	Diamètre du conducteur nu [mm]	Diamètre du conducteur isolé [mm]	Section du conducteur nu [mm ²]
0.08	0.10	0.00502	0.475	0.515	0.1772
0.09	0.11	0.00636	0.5	0.545	0.1963
0.10	0.122	0.00785	0.53	0.585	0.221
0.112	0.134	0.00985	0.56	0.615	0.246
0.125	0.147	0.01227	0.60	0.655	0.283
0.132	0.154	0.01368	0.63	0.69	0.312
0.14	0.162	0.011539	0.67	0.73	0.353
0.15	0.18	0.011767	0.71	0.77	0.396
0.16	0.19	0.0201	0.75	0.815	0.442
0.17	0.2	0.0227	0.80	0.865	0.503
0.18	0.21	0.0255	0.85	0.915	0.567
0.19	0.22	0.02284	0.90	0.965	0.636
0.20	0.23	0.0314	0.95	1.015	0.709
0.212	0.242	0.0353	1.00	1.08	0.785
0.224	0.259	0.0391	0.06	1.14	0.883
0.236	0.271	0.0437	1.12	1.20	0.985
0.25	0.285	0.0491	1.18	1.26	1.094
0.265	0.300	0.0552	1.25	1.33	1.227
0.28	0.315	0.0616	1.32	1.405	1.368
0.30	0.335	0.0707	1.40	1.485	1.539
0.315	0.350	0.0779	1.50	1.585	1.767
0.335	0.370	0.0881	1.60	1.685	2.011
0.355	0.395	0.099	1.70	1.785	2.27
0.375	0.415	0.1104	1.80	1.895	2.54
0.40	0.44	0.1257	1.90	1.995	2.83
0.425	0.465	0.1419	2.00	2.095	3.14
0.45	0.49	0.1590	2.12	2.22	3.53

Tableau 3. Représente le Coefficient K_d en fonction du nombre de pôles $2P$

$2P$	2	4	6	8	12
K_d	0.52-0.6	0.62-0.68	0.7-0.72	0.72-0.75	0.75-0.77

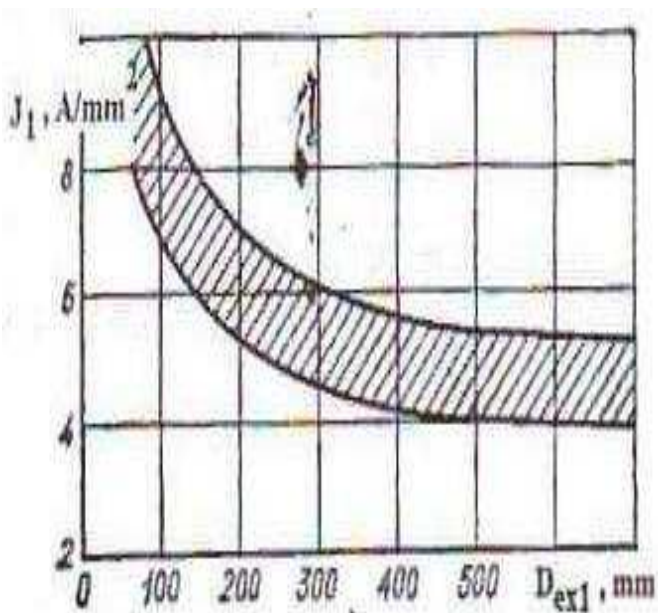
Tableau 4. Représente K_{rr1} en fonction de q

q	1.5	2	2.5	3	4	5	6	8
K_{rr1}	-	0.0285	-	0.0141	0.0065	0.0052	-	-

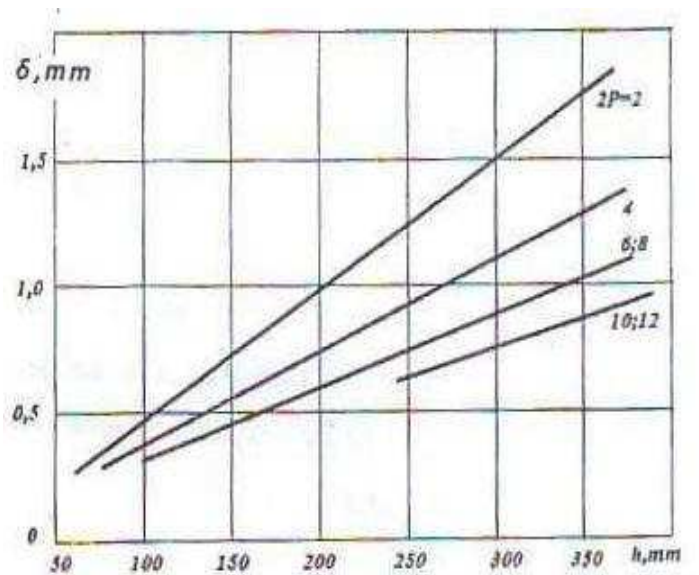


L 'induction et la charge linéaire dans l'entrefer.

Figure1. L'induction magnétique et la charge lineaire dans l'entrefer

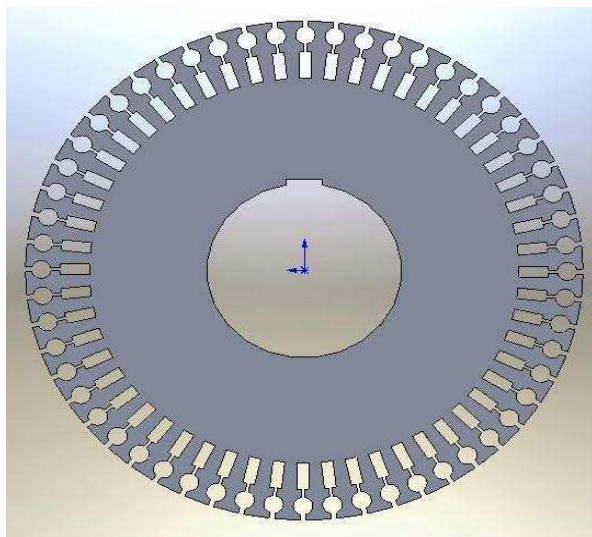
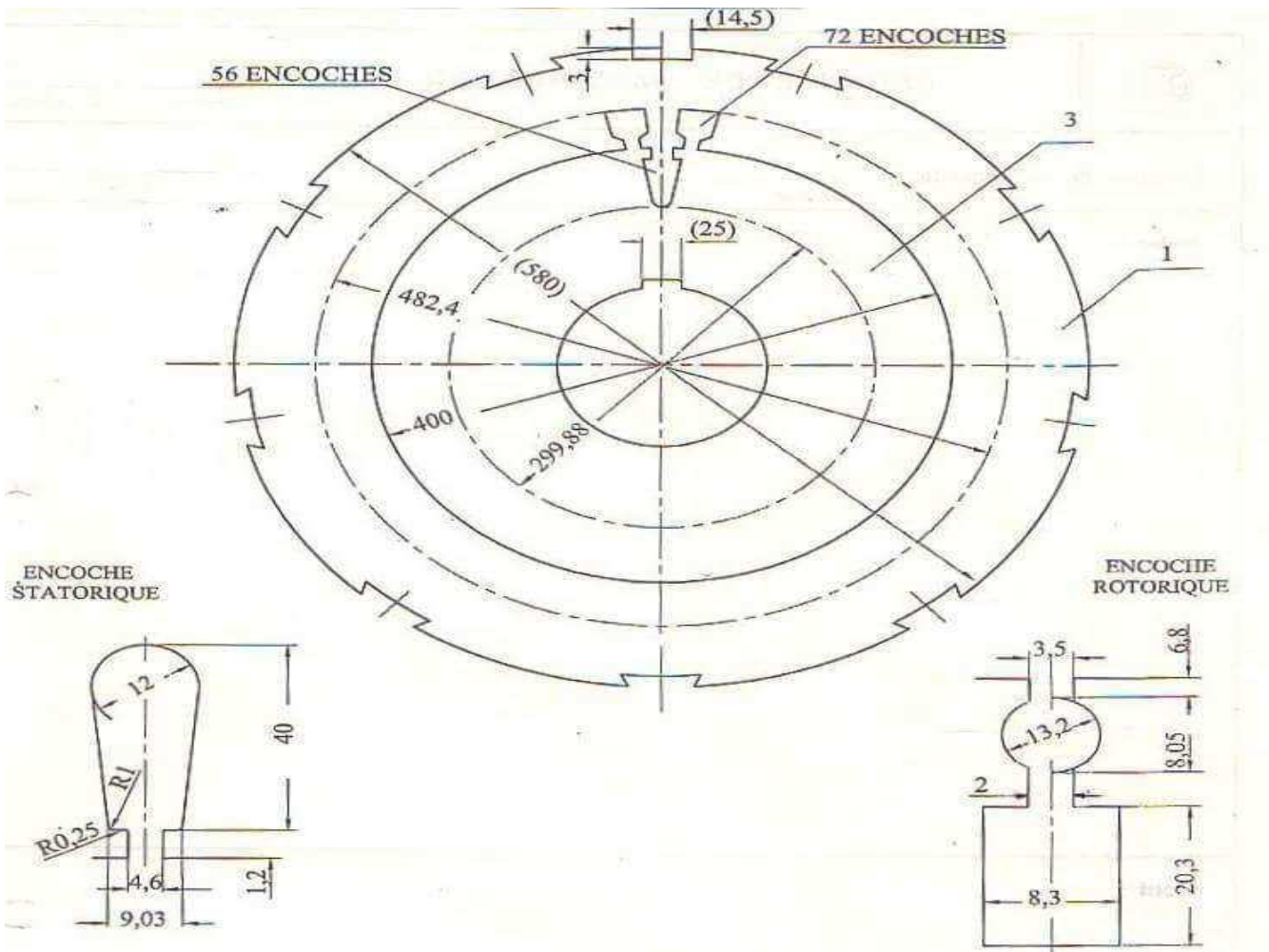


La densité du courant dans l'enroulement statorique

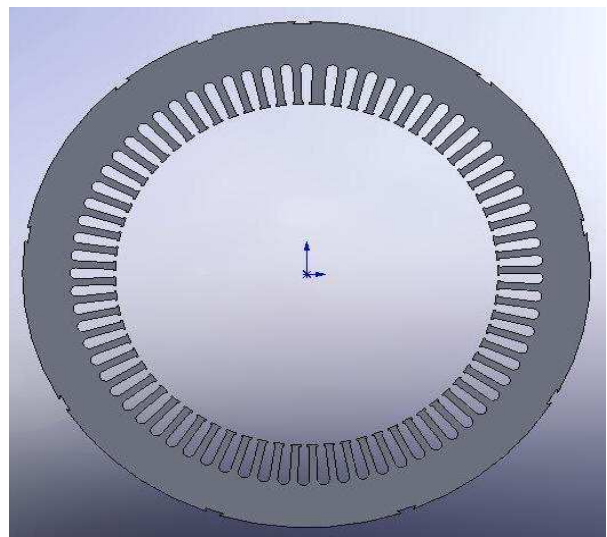


Épaisseur de l'entrefer en fonction de la hauteur d'axe.

Figure2. densité du courant et épaisseur de l'entrefer



La feuille rotorique



La feuille statorique

Figure 3. Dimensionnement des encoches rotoriques et statoriques.



Bibliographie

Bibliographie

- [1] Académie Caen –sciences de l’ingénierie.
- [2] « Alexander Cornet Ciney ». Moteur asynchrone triphasé.
- [3] « ABDESLAM DJAMILA » ; Analyse et construction d’un moteur asynchrone a rotor à cage. Mémoire de magister. Polytechnique, mars 2006.
- [4] « SALAH DJAMILA et AHCEN FAZIA » ; Calcul d’un moteur asynchrone à double cage ; Thèse d’ingénieur en électrotechnique. Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2012.
- [5] « HOSNI HACENE et LADJEL FAHIM » ; Calcul optimal d’un moteur asynchrone à double cage à haut rendement .Thèse de master II en électrotechnique. Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2012.
- [6] « Claude Chevassu, Gregory Valentin ». Machine asynchrone. septembre 2014.
- [7] « ABBAS SADIA, HACID FATMA-ZOHRA et HADJAB HAKIM » ; Conception optimale techno-économique d’un moteur asynchrone triphasé à double cage. Mémoire d’ingénieur d’état en électrotechnique. Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2008-2009.
- [8] « BELABES DJOUHER et BELKADA CHABHA » ; Conception optimale d’un moteur asynchrone triphasé a cage d’écureuil alimenté par un convertisseur de fréquence .Thèse de master II en électrotechnique. Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2012.
- [9] « DRIF MOUSSA et AOUCHICHE TAHAR » ; Etude du bobinage d’un moteur asynchrone triphasé de caractéristiques 30 KW. Mémoire technicien supérieur en Électrotechnique. BORDJ EL-BAHRI ; 2014-2017.
- [10] Machine asynchrone – Wiki pédia.
- [11] « M.KOSTENKO et L.PIOTROVSKI ». Machines électriques, tome II, MACHINE A COURANT ALTERNATIF. Troisième édition.
- [12] « BELAIDI LOUIZA et BOUCHERAK AMRANE» ; Identification des paramètres d’un moteur asynchrone triphasé à cage avec la méthode des éléments finis. Mémoire d’ingénieur d’Etat en électrotechnique. Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2012.