

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Faculté du Génie Electrique et de l'Informatique

Département d'Electrotechnique



Mémoire

De fin d'études

**En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique en
électrotechnique**

OPTION: Machines Electriques

Thème

Mise en œuvre d'un outil de calcul pour le
dimensionnement d'une machine asynchrone
de 4kW

Proposé par:

M^r Zaouia Mustapha

Dirigé par:

M^rZaouia Mustapha

M^{elle} Kichou Nadia

(Electro-Industries)

Etudié par :

M^{elle} Azzouz Aldjia

M^{elle} Ait Menguellet Zahida

Promotion 2013

Remerciements

A travers ce modeste travail, nous tenons à remercier « Le Bon Dieu » Le Tout Puissant de nous avoir donné la santé et le courage d'effectuer ce projet de fin d'étude dans les meilleurs conditions.

Nos remerciements s'adressent à :

M^rZaouia Mustapha maître de conférence classe B à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou de nous avoir proposé ce travail et pour l'aide précieuse qu'il nous a toujours apporté jusqu'à l'achèvement de ce travail.

M^{elle} Kichou Nadia, notre Co-promotrice, pour son aide, sa tolérance et ses conseils pendant notre stage, et aussi à tout le personnel de l'Electro-Industries- Azazga.

A tous les enseignants du laboratoire LATAGE de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, particulièrement M^r Nacereddine Benamrouche, responsable de laboratoire.

Nos remerciements et gratitude s'adressent aussi aux messieurs le président et les membres de jury d'avoir accepté d'examiner notre travail.

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

MERCI



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A mes très chers parents à qui je dois tous et je ne rendrais jamais.

A la mémoire de mes deux grands parents.

A mes deux grandes mères.

A la mémoire de mon frère Mehdi.

A mes sœurs Célia et Assia ainsi que son marie Madjid.

A mes deux frères Yacine et Amar.

A mes cousins et cousines.

A mes tantes, ancles et leurs familles.

A Tous mes Ami(e)s.

A tous mes chères copines d'appartement.

A mon binôme Zahida ainsi que à toute sa famille.

A toute la promotion ETH 2013

Aldjia



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

Ames très chers parents à qui je dois tous et je ne rendrais jamais.

A la mémoire de mes deux grands parents paternelle.

A mes deux grands parents maternels.

A ma sœur Djouhar et son marie Mouhand -Ouali ainsi que ses enfants Achour, Mélissa et Enass.

A mes frères Chabane, Farid, Rezek et Salim.

Ames belles sœurs Fatima et Radia.

A ma sœur Farida et sa copine Nouara.

A ma nièce Malika.

A mes tantes et leurs familles.

A mon binôme Aldjia ainsi que à toute sa famille.

A T. Amar et à sa famille.

A Tous mes Ami(e)s.

A toute la promotion ETH 2013.

Zahida

Sommaire

Sommaire

Sommaire

Introduction Générale	01
Chapitre I : Généralités et processus de fabrication de la machine asynchrone	
I.1.Introduction	02
I.2. Les éléments de constitution de la machine asynchrone.....	02
I.2.1. Le stator	03
I.2.2. Le rotor	03
I.2.2.a- Rotor bobiné.....	04
I.2.2.b- Rotor à cage d'écureuil	04
I.2.3. Les organes mécaniques	05
I.3.La plaque signalétique	06
I.4. Glissement	06
I.5.Réglage de la vitesse	07
I.6.Les différents bobinages	07
I.6.1. Enroulement imbriqué.....	07
I.6.2. Enroulement ondulé	07
I.6.3. Enroulement concentrique.....	07
I.7. Fonctionnement de la machine asynchrone.....	07
I.7.1.Principe et domaine de fonctionnement	08
I.7.2. Fonctionnement à vide	08
I.7.3. Fonctionnement en charge.....	09
I.7.4.Détermination du point de fonctionnement	09
I.7.4.1.Méthode graphique.....	09
I.7.4.2. Méthode du calcul	10
I.8.Classification des moteurs asynchrone	10
I.9.Le démarrage	12
I.10.Le bilan de puissance	12
I.10.1.Puissance absorbée	12
I.10.2.puissance transmise au rotor	13
I.10.3.puissance mécanique totale	13
I.10.4.Puissance utile	13
I.11. Présentation de l'unité moteur.....	14

Sommaire

I.12. Description du processus de fabrication, organisation des ateliers et leur fonctionnement principal	14
I.12.1. Ateliers de découpage	14
I.12.2. Ateliers de moulage sous pression	15
I.12.3. Ateliers d'usinage	16
I.12.4. Ateliers de bobinage	17
I.12.5. Ateliers de montage	20
I.13. Contrôle finale	20
I.14. Conclusion	21

Chapitre II : Dimensionnement de la machine asynchrone

II.1. Introduction	22
II.2. calcul des dimensions principales de la machine asynchrone	22
II.2.1. Calcul et choix des dimensions principales du stator	22
II.2.2. Induction dans l'entrefer	24
II.2.3. Calcul et choix du type d'enroulement	25
II.2.4. Dimensionnement de la feuille statorique	27
II.2.5. Dimensionnement du rotor	30
II.2.6. Dimensionnement de l'anneau de court circuit	34
II.3. Calcul du circuit magnétique	35
II.3.1. Circuit magnétique statoriques	35
II.3.2. choix d'Entrefer	38
II.3.3. Circuit magnétique rotorique	38
II.3.4. Force magnétomotrice totale à vide par paire de pole	40
II.3.5. Coefficient de saturation	40
II.3.6. Courent magnétisant	41
II.3.7. Réactance de magnétisation	41
II.3.8. Coefficient de dispersion magnétique du stator	41
II.3.9. Force électromotrice à vide	41
II.4. Calcul des paramètres électriques	42
II.4.1. Paramètres statoriques	42
II.4.2. Paramètres rotorique	45
II.4.3. paramètres au démarrage	49

Sommaire

II.5.Conclusion.....	52
----------------------	----

Chapitre III : Calcul des pertes et détermination des performances de la machine à cage d'écureuil

III.1. Introduction.....	53
III.2. Calcul des pertes.....	53
III.2.1. Pertes principale dans le fer	53
III.2.2.Pertes électriques dans l'aluminium et le cuivre	54
III.2.3.Pertes mécanique	55
III.2.4.Pertes supplémentaire	55
III.2.5.Pertes totale du moteur	55
III.2.6.Calcul du rendement de la machine	56
III.2.7. Calcul de la résistance de magnétisation	56
III.3.Calcul des performances du moteur	56
III.3.1.Schéma équivalent approché du moteur	57
III.3.2.Détermination des performances du moteur	58
III.4.Conclusion	61

Chapitre IV : Application au moteur de 4kW

Partie I : Elaboration d'un programme de calcul

IV.I.1. Introduction	62
IV.I.2.Description du programme.....	62
IV.I.3.Organigramme générale.....	63
IV.I.4.Organigramme détaillé.....	64
IV.I.5.Les résultat de simulation par le programme développé.....	68
IV.I.6.caractéristique obtenu par le schéma équivalent	72
IV.I.7.Conclusion.....	76

Partie II : Utilisation de logiciel Speed PC-imd

IV.II.1.Introduction.....	77
IV.II.2.Définition de logiciel Speed PC-imd.....	77
IV.II.3.Utilisation de logiciel Speed PC-imd	77

Sommaire

IV.II.4. Les différentes étapes du logiciel Speed PC-imd	78
IV.II.5. Les résultats de simulation par logiciel Speed PC-imd	82
IV.II.6. Comparaison des résultats.....	85
IV.II.7. Conclusion	86
Conclusion générale	87

Annexe

Bibliographie

Introduction générale

Introduction générale

Dans le vaste champ de l'électrotechnique, une des plus anciennes disciplines est la construction des machines électriques. En fait les premières tentatives de construction de machines électriques commencèrent avec la découverte des phénomènes d'induction et la mise en évidence des forces issues de l'interaction entre les champs électromagnétiques et les courants de conduction (Lois : Lenz, Laplace, Faraday etc...), ainsi et désormais le domaine de conception des machines électriques est l'une des plus prestigieuses découvertes du siècle dernier et reste aujourd'hui un thème de recherche très prisé par les laboratoires de recherche. L'objectif visé par cette recherche est toujours l'optimisation et la conception de nouvelles machines adaptées à la demande du marché et répondre aux exigences du cahier de charge le plus en plus envisage. [1].

La caractérisation de ces machines entraîne la formulation des méthodes de calcul qui s'appuie sur des équations qui tiennent compte des dimensions géométriques, paramètres électriques et magnétiques. Par la suite, l'utilisation des outils informatiques de calcul nous permettent d'avoir les différentes performances de ces machines. Ces outils peuvent être des programmes de calcul analytique ou numérique.

Afin de bien mener notre travail, nous l'avons répartie en quatre chapitres, le premier chapitre est consacré aux généralités sur la machine asynchrone et le processus de sa fabrication, tandis que le deuxième chapitre est réservé au dimensionnement de ce type de machine en se basant sur un cahier de charge. Le calcul des pertes et la détermination des performances de la machine est l'objet du troisième chapitre. Le quatrième chapitre est divisé en deux parties, la première est réservée à l'application du code de calcul développé sous environnement MATLAB à une machine asynchrone à cage de 4 kW, la seconde partie est consacrée au calcul de la même machine en utilisant le logiciel Speed PC-imd. Une comparaison des résultats obtenus après l'application du programme développé avec ceux obtenus par le logiciel Speed PC-imd sera effectuée.

Enfin nous terminons par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités et processus de fabrication de la Machine asynchrone

I.1.Introduction

Le moteur asynchrone est actuellement le moteur électrique dont l'usage est le plus répandu dans l'industrie à cause de la facilité de son alimentation, la simplicité de sa construction, sa robustesse, son entretien limité et aussi son prix relatif intéressant. Le domaine de puissance varie de quelques W à plusieurs MW, relié directement au réseau industriel à tension et fréquence constantes, il tourne à une vitesse peu différente de la vitesse synchrone. C'est le moteur le plus utilisé dans l'industrie pour les entraînements à vitesse constante ou à vitesse variable. Ces derniers sont obtenus grâce à l'électronique de puissance [2].

On s'intéresse dans ce chapitre aux généralités sur les moteurs asynchrones et leurs processus de fabrication au sein de l'entreprise Electro-Industries d'Azazga où nous avons accomplis un stage. Ce processus nous a aidés à comprendre les différentes étapes de construction des machines électriques.

I.2. Eléments constituant la machine asynchrone

La connaissance des éléments qui constituent des machines asynchrones permet de comprendre de quelle façon le système est réalisé physiquement. Les machines asynchrones triphasées peuvent se décomposer du point de vue mécanique, en trois parties :

- Le stator, partie fixe de la machine où est connectée l'alimentation électrique.
- Le rotor, partie tournante qui permet de mettre en rotation la charge mécanique.
- Les organes mécaniques (les paliers) qui permettent la mise en rotation de l'arbre moteur.

Les différents types de moteurs asynchrones ne se distinguent que par le rotor, dans tous les cas le stator reste au moins dans son principe, le même.

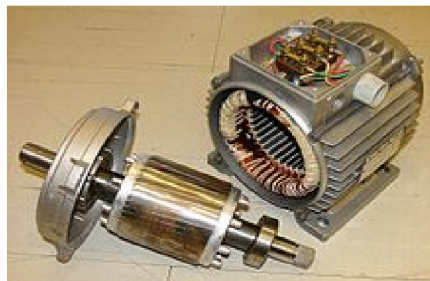
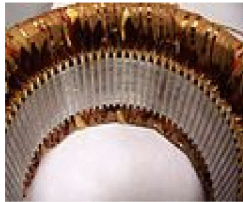


Fig I.1 : Rotor (à gauche) et stator (à droite) d'une machine asynchrone [3].

I.2.1. Le stator

Il est constitué d'un cylindre ferromagnétique entaillé d'encoches permettant d'y loger les bobinages. Ce cylindre est constitué d'un empilement de plaques de tôles feuilletées afin de limiter les courants de Foucault [3]

Les enroulements sont parcourus par des courants alternatifs triphasés et possède p paire de pôles.



a) Stator d'une machine triphasée



b) Stator feuilleté sans les bobinages

Fig. I.2. Représentation d'un stator de la machine asynchrone [3].

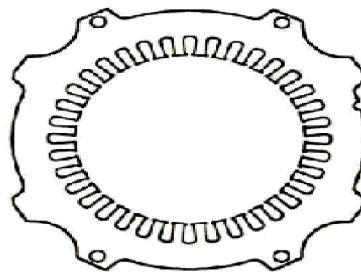


Fig. I.3. Tôle de stator [4].

I.2.2. Le rotor

Le rotor est constitué de tôles ferromagnétiques et de barres conductrices régulièrement réparties à la périphérie du rotor. Les barres sont reliées entre elles par deux anneaux de court-circuit, les tôles ferromagnétiques servent à guider les lignes de champ tandis que les barres accueillent les courants induits. Pour les moteurs de faible puissance, les rotors sont réalisés à partir d'un empilement de tôles découpées et isolées les unes des autres (feuilletage) dans lesquelles on injecte un matériau

conducteur de manière à constituer les barres ainsi que les anneaux de court-circuit [3].

Pour les moteurs de forte puissance, les barres sont insérées dans le rotor puis les anneaux de court-circuit sont soudés aux barres. Le matériau constituant les barres et les anneaux de court-circuit est généralement un alliage à base d'aluminium, mais on peut aussi rencontrer du cuivre ou du laiton. En général, les barres sont légèrement inclinées suivant l'axe du rotor afin que le nombre de barres présentes sous une phase statorique soit constant quelle que soit la position du rotor. Ce procédé permet de diminuer la variation de la réluctance du circuit magnétique au cours de la rotation du rotor et de diminuer ainsi les oscillations de couple. C'est cette inclinaison des encoches qui donne à l'ensemble des barres et les anneaux de court-circuit la forme d'une cage d'écureuil déformée.

Les machines asynchrones peuvent avoir deux types de rotor, rotor bobiné ou à cage d'écureuil.

I.2.2.a. Rotor bobiné

Les tôles de ce type sont munies d'encoches ou sont placées des conducteurs formant des bobines, on peut accéder à ces bobinages par l'intermédiaire de trois bagues et trois balais, ce dispositif permet de modifier les propriétés électromécaniques du moteur [5]

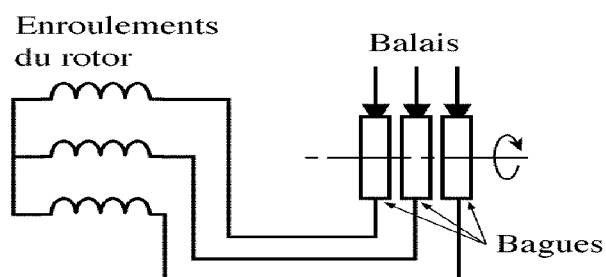


Fig. I.4 : Schéma de principe d'un rotor bobiné [5].

I.2.2.b. Rotor à cages

Il est constitué des barres conductrices en cuivre pour les gros moteurs ou en aluminium pour les petits, ces barres sont court-circuitées à chaque extrémité par deux

anneaux dits << de court circuit >>, eux aussi fabriqués en cuivre ou en aluminium, ils sont siège des courants induits.

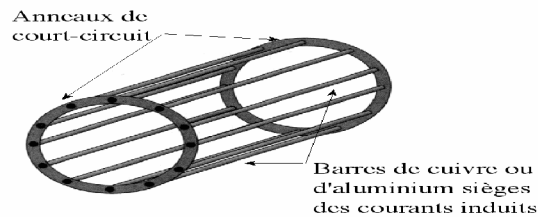


Fig. I.5 : Schéma de principe d'une cage d'écureuil [5].

Ces deux parties principales (stator et rotor) précédant sont séparées par un espace appelé entrefer.

I.2.3. Les organes mécaniques (les paliers)

Elles permettent la rotation du rotor (roulements), le maintien des différents ensembles (bâtis) et le refroidissement du moteur (ventilateur). Ces organes sont constitués de flasque sur lequel le rotor sera positionné grâce à des roulements à billes ou à rouleaux suivant le type de charge (axial ou radial).

Les roulements sont insérés à chaud sur l'arbre, les flasques moulés en fonte sont fixés sur le carter statorique grâce à des boulons ou des tiges de serrage.

Les éléments constituant la machine asynchrone sont présentés dans la Fig. I.6.

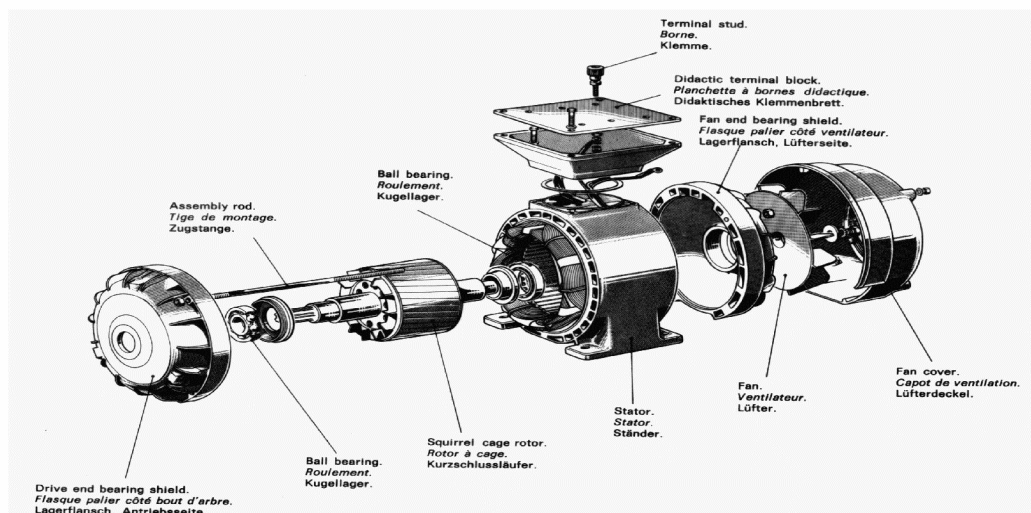


Fig. I.6. Éléments constituant une machine asynchrone à cage d'écureuil [3].

I.3. La plaque signalétique

La figure I.7 montre l'exemple d'une plaque signalétique d'un moteur asynchrone triphasé industriel [3] :

Mot 3~ 50/60 Hz	IEC34	IP55
MT90L24-4		
1,5 / 1,75 kW		1 420 / 1 710 tr/min
380-420 / 440-480 V - Y		3,7 / 3,6 A
220-240 / 250-280 V - Δ		6,4 / 6,3 A
		cos φ = 0,75 / 0,78

Fig I.7 : Plaque signalétique

I.4. Glissement

On dit que le rotor « glisse » par rapport au champ tournant s'il tourne à une vitesse Ω plus petite que la vitesse de synchronisme Ω_s qui est donnée par la relation suivante :

$$\Omega_s = W / p \quad (I.1)$$

Ω_s : vitesse de rotation du champ tournant en [rd.s⁻¹].

W : pulsation des courants alternatif en [rd.s⁻¹].

$$W = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (I.2)$$

p : nombre de paires de pôles.

f : fréquence en [Hz].

Le rapport entre la vitesse du champ et celle du rotor est appelée glissement, ce dernier dépend de la charge.

$$g = n_s - n / n_s = \Omega_s - \Omega / \Omega_s \quad (I.3)$$

n_s : vitesse de rotation de synchronisme de champ tournant en [tr. min].

n : vitesse de rotation du rotor en [tr. min⁻¹].

$$\Omega_s = 2 \cdot \pi \cdot n_s / 60 \quad (I.4)$$

$$\Omega = 2 \cdot \pi \cdot n / 60 \quad (I.5)$$

$$n_s = f / p \quad (I.6)$$

I.5. Réglage de la vitesse d'un moteur asynchrone

La vitesse de synchronisme dépend de la fréquence des courants statoriques. Et comme la vitesse de rotation reste très proche de la vitesse de synchronisme, pour varier la vitesse du moteur il faut varier la fréquence des courants statoriques.

En réalité pour faire varier la vitesse sans modifier le couple utile il faut garder le rapport V_s/f constant (V_s est la tension d'alimentation d'un enroulement).

Si on augmente la vitesse, il faut augmenter la fréquence des courants statoriques et la tension d'alimentation dans les limites du bon fonctionnement de la machine.

I.6. Les différents bobinages

On peut effectuer le bobinage d'une machine tournant de plusieurs façons, mais on utilise habituellement trois types d'enroulements, l'enroulement imbriqué, l'enroulement ondulé et enroulement concentrique [4].

I.6.1. Enroulement imbriqué

S'emploie généralement pour le bobinage des stators de moteurs de quelque dizaine de kilowatts et plus.

I.6.2. Enroulement ondulé

Il est idéal pour les rotors des moteurs asynchrones à bague, leur disposition dans les encoches différencie ces différents types d'enroulements.

I.6.3. Enroulement concentrique

Est un bobinage obligatoirement à couche unique, de telle sorte que chaque encoche contient un seul coté de bobine.

Remarque

L'enroulement imbriqué et l'enroulement ondulé peuvent être des bobines à simple couche, mais sont plus souvent à double couche. si c'est le cas, chaque encoche contient deux cotes de bobine et le nombre de conducteurs par encoche doit nécessairement être un nombre pair.

I.7. Fonctionnement du moteur asynchrone

I.7.1. Principe et domaine de fonctionnement

I.7.1.a. Principe de fonctionnement

Le fonctionnement du moteur asynchrone triphasé est basé sur l'application des principes du théorème d'Ampère, la loi de Faraday et la loi de Lenz de l'électromagnétisme.

Au moment où l'on ferme l'interrupteur pour brancher les enroulements du stator sur une ligne triphasée, les tensions appliquées produisent des courants triphasés, ces derniers créent

un champ tournant qui induit une tension dans les barres du rotor, cette tension est alternative car les conducteurs sont tantôt devant un pôle nord tantôt devant un pôle sud du champ tournant. Les conducteurs étant en court-circuit à leurs extrémités par les deux anneaux, la tension induite donne naissance à des courants intenses dans les barres, ces derniers sont situés dans un champ magnétique, ce qui produit des forces électromagnétiques. Les forces tendent à entraîner le rotor dans le sens de rotation du champ [6].

I.7.1.b. Domaine de fonctionnement

En fonctionnement moteur, la valeur du glissement est comprise entre 0 et 1

Si $n_r = 0$, $g = 1$ le rotor est immobile

Si $n_r = n_s$, $g = 0$ le rotor tourne à la même vitesse que le champ tournant

Le schéma de la figure ci-dessous représente la caractéristique mécanique du couple en fonction de la vitesse, car le glissement est une fonction linéaire de la vitesse.

On peut définir sur cette caractéristique les différentes zones de fonctionnement qui sont données par la figure I.8 suivante :

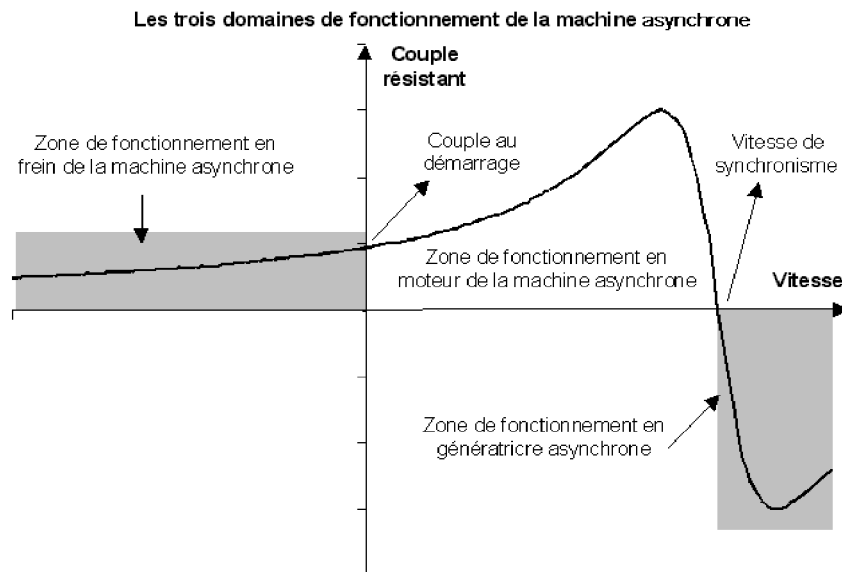


Figure I.8: Domaines de fonctionnement [3]

I.7.2. Fonctionnement à vide

A vide le moteur n'entraîne pas de charge, donc le glissement est nul ($g=0$) est le moteur tourne à la vitesse de synchronisme ($n_0 = n_s$).

Le facteur de puissance à vide est très faible ($<0,2$) et le courant absorbé reste fort (P est petit et Q est grand). On parle alors de courant réactif ou magnétisant (ils servent à créer le champ magnétique).

n_0 : la vitesse de synchronisme à vide en [tr/min].

P : la puissance active en [W].

Q : la puissance réactive en [Var].

I.7.3 .Fonctionnement en charge

En charge le moteur fournit de la puissance active, le stator fait appel à un courant actif.

Remarque

Le moteur asynchrone est capable de démarrer en charge.

I.7.4. Détermination du point de fonctionnement du moteur en charge

Le point de fonctionnement est le point d'intersection des caractéristiques du couple utile et du couple résistant en fonction de la vitesse, on le détermine par deux méthodes.

I.7.4.1. Méthode de résolution graphique

Le principe de cette méthode est de tracer à l'échelle sur du papier millimétré les deux caractéristiques (C_u et C_r) et relever les coordonnées du point d'intersection. La courbe du couple résistant C_r dépend de la charge.

Avec:

C_u : couple utile du moteur en [N.m].

C_r : couple résistant en [N.m].

La caractéristique $C=f(n)$ est représenté par la figure I.9

(L'indice T signifie le couple)

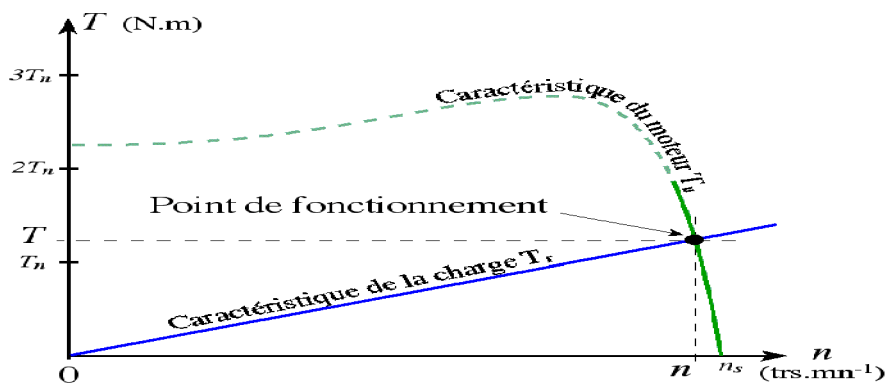


Figure. I. 9 : Caractéristique du couple en fonction de la vitesse [5]

I.7.4.2. Méthode de résolution par le calcul

Pour trouver le point de fonctionnement, il faut résoudre l'équation suivante :

$$C_u = C_r \quad \text{soit : } a \cdot n + b = C_r$$

I.8. Classification des moteurs asynchrones [4]

La NEMA (National Electrical Manufacturers Association) classe les moteurs à cage d'écureuil comme suit [4] :

Classe A : Moteurs à couple normal et à courant de démarrage normal.

Classe B: Moteurs à couple normal et à faible courant de démarrage.

Classe C : Moteurs à fort couple et à faible courant de démarrage.

Classe D : Moteurs à fort glissement.

Classe F: Moteurs à faible couple et à faible courant de démarrage.

Cette classification se base sur la variation de la résistance et de la réactance des enroulements du rotor.

Au démarrage, la réactance d'un conducteur est d'autant plus grande que ce dernier est loin de l'entrefer, la résistance dépend de la longueur du rotor, de la section des conducteurs et du matériau utilisé. Plus cette résistance est grande, plus le courant de démarrage est petit et meilleur ainsi que le couple de démarrage, jusqu'à une certaine limite, bien entendu, il est donc possible d'expliquer les différentes caractéristiques obtenues pour les diverses classes.

- ❖ L'encoche du rotor d'un moteur de classe(A) n'est pas tellement creuse et l'enroulement a une faible résistance. De même, la réactance est faible et presque uniforme pour tout le conducteur, il en résulte que le courant circule dans tout le conducteur, le couple est normal et le courant de démarrage est suffisamment élevé.
- ❖ Le moment de classe (B) est le plus utilisé de nos jours. Ses caractéristiques découlent de l'emploi d'encoches profondes et étroites. Lors du démarrage, la réactance est plus forte dans le bas du conducteur, cela force le courant à passer surtout dans le haut du conducteur, ce qui en réduit la surface active et augmente sa résistance. Le courant se trouve ainsi limité et on peut dans bien des cas démarrer ce moteur à pleine tension, c'est un avantage par rapport au moteur de classe A.
- ❖ Un moteur de classe (C) possède un rotor à double cage d'écureuil, on peut construire cet enroulement de différentes façons, le principe consiste à placer un enroulement de forte résistance près de l'entrefer et un enroulement de faible résistance loin de la surface. Durant le démarrage, le conducteur éloigné de l'entrefer a une grande

réactance, ce qui force le courant à passer dans le conducteur extérieur, le courant est donc faible mais le couple est fort.

- ❖ Lorsque le rotor a atteint sa vitesse, la réactance du conducteur situé le plus loin de l'entrefer devient faible, la répartition du courant est alors à peu près uniforme dans tout le conducteur.
- ❖ Un moteur de classe (D), a un enroulement d'une grande résistance en raison de sa faible section, ce qui lui confère au démarrage un fort couple ainsi qu'un faible courant, par contre, il a un glissement à pleine charge qui peut atteindre 15 % et même 20%.
- ❖ Les enroulements du rotor d'un moteur de classe (F) sont placés loin de l'entrefer, au démarrage, la réactance est grande et le courant est faible, mais le circuit est très inductif et le couple développé est faible.

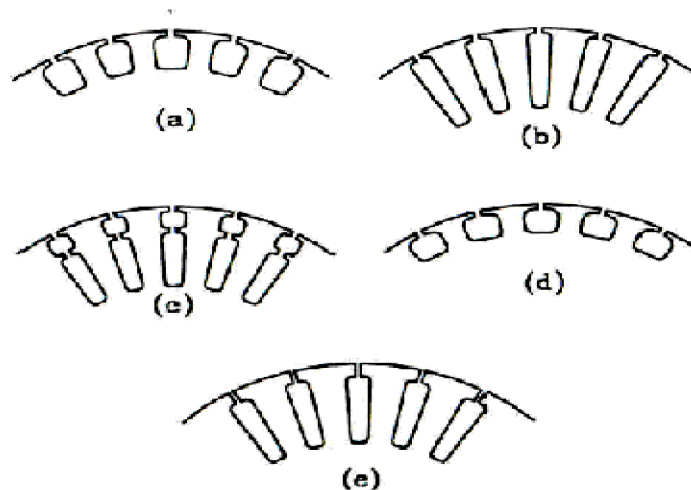


Figure I.10. Forme d'encoches pour diverses classes de moteurs (a-classe A, b- classe B, c- classe C, d- classe D, e-classe F) [4]

On peut ainsi obtenir les caractéristiques recherchées par le choix d'une forme d'encoche appropriée, forme qui n'est pas nécessairement rectangulaire, surtout si les conducteurs sont en aluminium coulé. On retrouve des configurations d'encoches plus complexes qui, même s'il s'agit d'une cage simple, donnent un comportement qui tend beaucoup vers celui d'une double cage.

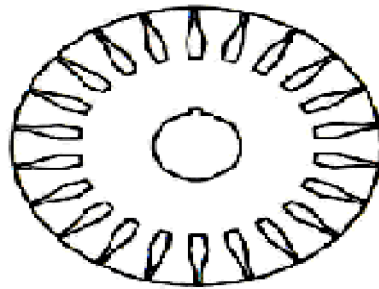


Figure I.11. Tôle du rotor avec des encoches de forme complexe [4]

I.9. Le démarrage

Le démarrage des moteurs asynchrones est régi par deux grandeurs principales qui sont le couple et le courant de démarrage.

Au démarrage, le moment du couple moteur est dans les conditions habituelles d'utilisation, très supérieur au moment du couple résistant. L'accélération est donc brutale et le courant appelé est susceptible d'être important. Ce phénomène risque d'être dommageable pour des moteurs de puissance d'environ une dizaine de kilowatts.

I.10. Le bilan des puissances

Le moteur asynchrone absorbe une puissance électrique active triphasée. Une partie de cette puissance est dissipée par effet joule dans les enroulements du stator, par la suite le champ magnétique inducteur entraîne des pertes dans le fer, par hystérésis et par courants de Foucault. Le reste de la puissance absorbée est transmise au rotor à travers l'entrefer. La majeure partie de cette puissance est alors utilisée pour produire une puissance électromagnétique, tandis que la présence d'un courant induit dans le rotor provoque des pertes par effet joule dans le rotor.

La puissance électromagnétique fournie par le stator est responsable de la mise en mouvement du rotor, qui produit la puissance mécanique utile qui sera par la suite transmise à la charge par le biais d'un arbre de transmission ou d'une courroie de distribution. Toutefois dans le mouvement du rotor, une partie de la puissance est perdue par divers mécanismes de frottement [7].

I.10.1. Puissance électrique absorbée

Lorsque le moteur est connecté à un réseau triphasé il absorbe une puissance active donnée par la relation suivante :

$$P_a = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi \quad (I.7)$$

Avec :

P_a : Puissance électrique absorbée [W].

U : Tension de phase [V].

I : Courant de phase [A].

$\cos\varphi$: Facteur de puissance

I.10.2. Puissance transmise

C'est la puissance que reçoit le rotor.

$$P_{tr} = P_a - P_{js} - P_{fs} \quad (I.8)$$

Avec :

P_{tr} : Puissance transmise au rotor [W].

P_{js} : Pertes par effet joule au stator [W].

P_{fs} : Pertes fer au stator [W].

I.10.3. Puissance mécanique totale

Le couple électromagnétique de moment entraîne le rotor à la vitesse Ω_r . il lui communique donc la puissance mécanique totale P_M .

$$P_M = P_{tr} - (P_{jr} + P_{fr}) = P_{tr} \cdot (1 - g) \quad (I.9)$$

P_M : Puissance mécanique [W].

P_{jr} : Pertes par effet joule au rotor [W].

P_{fr} : Pertes fer au rotor [W].

g : Glissement

I.10.4. Puissance utile

C'est la puissance que fournit le moteur, elle est égale à la puissance mécanique totale diminuée des pertes mécanique.

$$P_u = P_M - P_m \quad (I.10)$$

Avec :

P_u : Puissance utile [W].

P_m : Pertes mécanique [W].

Le bilan des puissances est schématisé comme le montre la figure I.12 suivante :

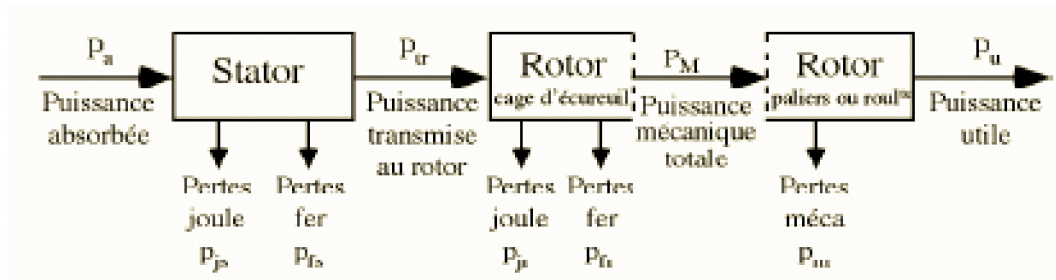


Figure I.12. Bilan des puissances [2].

Dans ce qui suit on présentera les différentes étapes du processus de fabrication des moteurs asynchrones qui sont réalisées au sein de l'entreprise Electro-Industries d'Azazga [8].

I.11. Présentation de l'unité moteur

L'unité moteur asynchrone s'occupe de la fabrication des moteurs asynchrones à différentes puissances et à différentes hauteurs d'axes.

Parmi les moteurs électriques fabriqués par Electro-Industries d'Azazga, on a le moteur asynchrone à cage d'écureuil. Pour assurer leur réalisation, l'unité moteur dispose de cinq ateliers de fabrication mécaniques disposant des postes de contrôles (mécanique et électrique) pour valider la conformité de chaque pièce fabriquée rentrant dans la réalisation de chaque type de moteur.

I.12. Description du processus de fabrication, Organisation des ateliers et leurs fonctions principales

- ❖ Ateliers de découpage.
- ❖ Ateliers de moulage sous pression
- ❖ Ateliers d'usinage.
- ❖ Ateliers de bobinage.
- ❖ Ateliers de montage.

I.12.1. Atelier de Découpage

Dans cet atelier sont réalisés tous les travaux de transformations de tôles utilisées pour la fabrication des différentes pièces à noter :

- a-**Découpage et encochage des tôles statoriques et rotoriques puis leur emballage.
- b-**Repoussage des agrafes et fabrication des capots et roues de ventilateurs.

➤ Fabrication des tôles statoriques et rotoriques

L'atelier reçoit des rouleaux de tôles magnétiques importées par Electro-Industries de nature :

- ✓ Isolées au vernis pour les moteurs à hauteurs d'axe 183mm à 404mm.
- ✓ Non isolées : leurs isolations ce fait dans des fours par oxydation pour les moteurs à hauteur d'axe 70mm à 163mm.

a. Procédé de découpage

Le procédé le plus répandu dans cet atelier est celui de découpage automatique successif avec la presse rapide. Ce procédé permet de découper et d'encocher dans le même cycle les tôles statoriques et rotoriques de différents types de moteurs selon la commande lancée à la machine

Une fois découpées et encochées, les tôles statoriques et rotoriques sont évacuées vers l'extérieur de la machine par des convoyeurs empilés séparément, deux autres procédés sont utilisés pour la fabrication des tôles statoriques et rotoriques.

- ❖ Procède de découpage automatique.
- ❖ Procède de découpage semi-automatique.

Tous ces procédés aboutissent au même résultat.

b. Fabrication des capots de ventilateurs

A partir des tôles sous forme des disques en acier, on fait l'emboutissage par l'emboutisseuse, et pour la partie plane elle sera percée sous formes de grille par un poinçon matrice pour permettre l'échappement de la chaleur lors du fonctionnement du moteur.

I.12.2. Atelier de Moulage sous pression

Dans cet atelier sont fabriquées toutes les pièces rentrant dans la fabrication des moteurs en version aluminium à savoir.

- ❖ Injection du rotor en aluminium pur à 99.5 %
- ❖ Réalisation des pièces en alliage d'aluminium (Silicium, Manganèse, Cuivre) comme : carcasse, flasque (AS, BS), boîtes à bornes, couvercles de boîte à bornes.

➤ Fabrication du rotor

Une fois l'arbre est prêt, ceci dit les opérations : Empilages des tôles rotoriques, agrafes, emmanchement de l'arbre sont faites, le rotor est mis dans la machine et après la fermeture du

moule, le procédé d'injection commence avec une pression très élevée de la machine, pour permettre la pénétration de l'aluminium dans les encoches et forme ainsi la cage d'écureuil et les anneaux de court-circuitage.

➤ **Fabrication des pièces en alliage d'aluminium (Carcasse, Flasque, Boites à bornes...)**

L'alliage d'aluminium fondu à haute température est injecté dans les moules conçus spécialement pour chaque pièce.

Pour les moteurs à hauteur d'axe >130mm, la carcasse et les flasques sont en fente importé par Electro-industries d'Allemagne et <130mm, la carcasse et les flasques en alliages d'aluminium sont fabriqués par Electro-industries.

I.12.3. Ateliers d'usinage

Dans cet atelier se fait la fabrication des arbres du rotor ainsi que l'usinage des pièces comme le flasque, rotor, carcasse... etc.

❖ **Fabrication de l'arbre**

L'atelier reçoit les ronds d'aciers qui consistent la matière première et qui subit différentes contrôles. Une fois l'acier est contrôlé positivement, on découpe les arbres à l'aide d'une scie mécanique ou avec une scie automatique. L'arbre en état brut passe au centre d'usinage pour être centré, cette opération consiste à percer deux trous qui servent de référence pour pouvoir tourner notre rotor dans un axe bien précis.

Une fois que le tournage est achevé, l'arbre est acheminé à l'atelier de moulage sous pression pour l'emmancher au paquet rotorique et mouler la cage d'écureuil, cependant on ne parle plus d'arbre mais de rotor qui est envoyé à l'atelier d'usinage pour être usiné et rectifié.

❖ **Usinage de rotor**

Les opérations effectuées sur le rotor sont :

➤ **Tournage de paquet**

Cette opération se fait avec un tour parallèle pour avoir un entrefer homogène et réduit.

➤ **Rectification**

Rectification des sièges de roulement et les sorties d'arbre à l'aide d'une rectification.

➤ **Fraisage**

Fraisage de la rainure de clavette cote entrainement à l'aide d'une fraiseuse.

➤ **Equilibrage de rotor**

Cette opération ne se fait qu'après avoir reçu l'ordre de montage du rotor, cependant le rotor est emmagasiné au magasin de pièces finies.

Deux méthodes d'équilibrage sont utilisées.

- ✓ Equilibrage positif avec l'ajout de rondelles d'acier.
- ✓ Equilibrage négatif avec enlèvement de matière.

➤ **Usinage des différentes pièces (carcasse, flasque, boîte à borne,.....)**

✓ **Carcasse**

Alésage de la carcasse à l'aide des tours verticaux pour recevoir le paquet .perçage et taraudage des trous de fixation sur lesquels sont fixés les flasques AS et BS et la boîte à borne, à l'aide des perceuses, taraudeuses à broches multiples.

✓ **Flasques (AS et BS)**

Tournage des bords de centrage et cage de roulements.

✓ **boîte à borne**

On à :

- Perçage et taraudage des trous de fixation recevant le couvercle à l'aide de perceuse à broches.
- Perçage et taraudage du trou de la mise a la terre.

I.12.4. Atelier de bobinage

L'atelier de bobinage se divise en trois secteurs :

I.12.4.1. Secteur préparation isolation

Dans l'industrie de fabrication des moteurs électriques, les conducteurs doivent toujours être isolés par mesure de sécurité afin d'éviter les courts-circuits et apporter le maximum de sécurité aux personnes, pour cela, on a besoin de matériaux isolants de haute qualité et supportant les effets thermique engendré par le fonctionnement de la machine. C'est dans ce secteur que sont préparés tous les isolants pour toutes les machines soit :

- ❖ Caniveaux d'encoches.
- ❖ Cale de fermeture
- ❖ Gaines isolantes
- ❖ Séparateur de phase.
- ❖ Lame intermédiaire.
- ❖ Câble de raccordement.

Les isolants utilisés par L'ENEL garantissent une qualité conforme aux normes internationales en vigueur.

➤ **Essai pratiqués sur le cuivre**

✓ **Essai électrique**

Après l'essai effectué au laboratoire le cuivre doit présenter une bonne résistance électrique et une bonne résistivité.

✓ **Essai mécanique**

Le cuivre doit présenter de bonnes caractéristiques mécaniques, tout en contrôlant :

- la flexion.
- l'effet de ressort.
- l'essai de traction.

Les résultats de ces essais seront comparés à la norme recommandée.

I.12.4.2. Secteur préparation bobines

Une fois que le cuivre est contrôlé, il transite au magasin pour être remis aux bobineuses pour confection des bobines se fait à l'aide de gabarits montés sur les machines rotatives (bobineuses) qui sont réglées selon le nombre de spires par faisceaux.

Une fois que les bobines sont réalisées, elles sont retirées de la machine, attachées et envoyées dans le dernier secteur pour être insérées dans le stator.

I.12.4.3. Secteur de préparation du stator bobiné

Secteur plus grand que ceux notes précédemment ou se déroule le processus de fabrication du stator bobiné allant de l'insertion des caniveaux d'encoches jusqu'à l'imprégnation.

❖ **Insertion des caniveaux d'encoches**

Cette opération se fait grâce à une machine qui découpe le papier isolant et le pénètre automatiquement dans les encoches du stator.

❖ Insertion des bobines dans le stator

L'insertion se fait soit :

- automatiquement pour les moteurs à hauteur d'axe 70mm à 130mm.
- manuellement pour les moteurs à hauteur d'axe 132mm à 400mm.

C'est pendant cette opération que l'on injecte aussi les lames intermédiaires pour le bobinage à double couche ainsi que les cales de fermeture.

Une fois les bobines introduites, on place les séparateurs de phases pour éviter les courts circuits entre phases. Après cela, on procède au formage de têtes de bobine manuellement avec un mandrin et un marteau en bois (maillet) pour respecter l'homogénéité et les dimensions des têtes de bobines cote AS (cote entraînement) et cote BS (cote ventilation).

❖ Connexion

- Connexion entre les bobines et l'isolation
- Connexion des bobines et câbles de raccordement .

❖ Frettage et pressage des têtes de bobines

Après raccordement des câbles le stator subit un frettage à main à l'aide d'un fil isolant. une fois fretté, le stator passe à presse hydraulique pour donner la forme et les dimensions définitives des têtes de bobines coté AS et BS.

❖ Contrôle

- Contrôle visuel de séparateur de phases et des têtes par rapport au diamètre extérieur et intérieur du paquet statorique.
- Contrôle électrique.
- la mesure de la résistance ohmique entre phase.
- Vérification s'il n'y pas de court circuit entre spires, court circuit entre phase et de court circuit à la masse à haute tension (2000V).
- contrôle de polarité des trois phases en cas d'anomalie on vue de localiser les trois entrées et les trois sorties (U1, V1, W1, U2, V2, W2).
- Le contrôle de frettage des têtes, la taille des têtes de bobines.
- la vérification des caniveaux d'encoches, coupure de phase et les réglettes de fermeture.

❖ Imprégnation

Cette opération consiste à mettre de la résine au bobinage du stator pour le rendre plus compact et solidaire, deux types d'imprégnation sont utilisés.

- Imprégnation de goutte à goutte.
- Imprégnation dans un bain de résine.

I.12.5. Ateliers de montage

On recense trois secteurs essentiels dans cet atelier

- ❖ Secteur équilibrage
- ❖ Secteur prés montage
- ❖ Secteur montage final

I.13. Contrôle finale

Une fois le produit est fini, ce dernier subit un certain nombre de contrôle électrique. Dans le contrôle électrique on lui applique les essais suivants :

- ❖ Essai à vide.
- ❖ Essai en court-circuit.
- ❖ Essai en charge.
- ❖ Essai en freinage.

On contrôle aussi un certain nombre de pièces du moteur comme :

- ❖ voilure flasque-bride
- ❖ Concentricité flasque bride
- ❖ Concentricité bout d'arbre
- ❖ Bout d'arbre incliné
- ❖ longueur bout d'arbre (coté 'i2')
- ❖ Ecart trous de patte-arbre (coté 'i')
- ❖ Ecart trous de patte (a,b)
- ❖ hauteur d'axe (cote 'h')
- ❖ jeu axial du rotor
- ❖ Bout d'arbre endommagé
- ❖ Bord de centrage endommagé
- ❖ Bornes de terres manquent

- ❖ Vis manque
- ❖ Accessoires manquent
- ❖ plaque signalétique endommagé
- ❖ Rainure à clavette endommagée.
- ❖ Autres.

Après ce contrôle c'est il n-ya pas de problème la machine est prête à être livrée.

I.14.Conclusion

Ce chapitre résume quelques généralités sur le moteur asynchrone, à savoir : sa constitution, son principe de fonctionnement, quelques problèmes de sa constitution ainsi que sa classification selon les caractéristiques techniques et mécaniques.

Cette description nous à permet de voir les étapes de fabrication des éléments qui constitues les machines asynchrones et comprendre de quelle façon le système est réalisé physiquement. Dans le chapitre suivant on s'intéressera au dimensionnement d'un moteur à cage d'écureuil d'une puissance de 4kW.

Chapitre II

Dimensionnement de la Machine asynchrone

II.1.Introduction

Les principaux paramètres du dimensionnement d'une machine asynchrone sont géométriques (diamètre d'alésage, longueur utile, dimensions des encoches), électriques (densité de courant et charge linéique...), magnétiques (induction dans l'entrefer et dans les différents tronçons de la machine) et mécaniques (entrefer et vitesse de rotation). Chacun de ces paramètres a une importance lors du dimensionnement. Cependant, du fait de leurs dépendances, nous sommes obligés de faire des compromis suivant les exigences prioritaires de fonctionnement et du cahier de charge.

II.2.Les dimensions principales de la machine asynchrone

II.2.1.Calcul et choix des dimensions principales du stator

❖ Le choix du diamètre extérieur

Le diamètre extérieur D_{ext} est déterminé en fonction de la puissance normalisée pour différentes paires de pôles (p) suivant le tableau 1 (voir annexe A) [9].

❖ Calcul du diamètre de l'alésage du stator

Le diamètre intérieur du stator est donné en fonction du diamètre extérieur pour les différentes paires de pôles par le tableau 2 (voir annexe A).

❖ longueur virtuelle de l'induit

La longueur virtuelle de l'induit est définie comme étant la longueur de l'induit fictif présentant la même réluctance d'induit réel sans canaux de ventilation ni franges de flux aux extrémités. Elle est calculée suivant l'expression ci-dessous :

$$L_i = \lambda \cdot D_1 \quad (II.1)$$

Avec :

D_1 : Diamètre de l'alésage (intérieur) du stator [mm].

λ : Facteur de géométrie de la machine.

La valeur maximale du facteur de géométrie de la machine est donnée par l'expression suivante [9] :

$$\lambda_{max} = (1.46 - 71 \cdot 10^{-5} \cdot D_{ext}) \cdot K_{\lambda p} \quad (II.2)$$

Avec :

D_{ext} : Allant de 80 à 700 mm

$K_{\lambda p}$: Coefficient donnée dans le tableau 2(voir Annexe) pour différentes paire de pôles [9].

❖ pas polaire

Le pas polaire est défini comme étant la distance entre deux axes de pôles voisins, il est donné par l'expression suivante :

$$\zeta = \pi \cdot D_1 / 2p \quad (\text{II.3})$$

Avec :

p : Nombre de paires de pôles

ζ : Pas polaire en [mm] .

❖ puissance Electromagnétique

C'est la puissance transmise du stator vers le rotor à travers l'entrefer. Elle est donnée par l'expression suivante :

$$P_e = K_e \cdot P_{\text{nom}} / \eta_{\text{nom}} \cdot \cos\varphi_{\text{nom}} \quad (\text{II.4})$$

Avec :

P_e : puissance Electromagnétique en [Kva].

P_{nom} : Puissance nominale de la machine [W].

$\cos\varphi_{\text{nom}}$: Facteur de puissance nominal de la machine.

η_{nom} : Rendement nominal de la machine.

k_e : Facteur qui tient compte de la chute de tension dans la phase statorique.

Il est donné en fonction du nombre de paires de pôles (p) par l'expression suivante :

$$K_e = 0.98 - 5 \cdot P \cdot 10^{-3} \quad (\text{II.5})$$

❖ Charge linéaire

La charge linéaire représente les ampères conducteurs par unité de longueur du périmètre de l'induit. Elle caractérise l'utilisation électrique de la machine, elle est donnée en fonction du diamètre extérieur pour les différentes de pôles par la figure A7 (voir annexe B).

❖ Choix du type d'encoches

Généralement, on prend pour les machines qui ne dépassant pas 150kW, les encoches semi-fermées trapézoïdales.

❖ Pas dentaire

Le pas dentaire est défini comme étant la distance séparant deux axes de deux encoches voisines, il est donné par la relation suivante :

$$t_1 = \pi \cdot D_1 / Z_1 \quad (\text{II.6})$$

Avec :

Z_1 : Nombre total d'encoches statoriques.

t_1 : pas dentaire en [mm].

❖ Nombre d'encoches statoriques

Le nombre d'encoches statoriques (Z_1) est donné par la relation suivante :

$$Z_1 = 2 \cdot P \cdot m_1 \cdot q_1 \quad (\text{II.7})$$

Avec :

q_1 : Nombre d'encoches par pôle et par phase, sa valeur est donnée en fonction de la hauteur h et le nombre de paire de pôles p par le tableau 11 (voir annexe A).

❖ Densité de courant

Le choix de la densité de courant doit obéir aux critères électrique et thermique. En effet, on doit veiller à ce que les pertes dans la machine soient minimales pour avoir un bon rendement et éviter de grands échauffements, pouvant affecter l'isolation de la machine.

Sa valeur est donnée en fonction du diamètre intérieur par la courbe de la figure A₆ (voir annexe A).

II.2.2. Induction dans l'entrefer

L'induction dans l'entrefer est d'une importance fondamentale dans le dimensionnement des machines électriques tournantes. Elle caractérise l'utilisation magnétique de la machine. Il est donc, intéressant d'utiliser des valeurs aussi élevées que possibles, malheureusement on est limité par les propriétés des matériaux actifs utilisés. Sa valeur est généralement comprise entre 0.7 et 1.1 Teslas. Elle est donnée par l'expression suivante :

$$B_\sigma = \frac{6.11 \cdot P_e \cdot 10^{12}}{\alpha_j \cdot k_f \cdot k_{enr1} \cdot N \cdot D_1 \cdot A_1 \cdot L_j} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

$$\left. \begin{array}{l} K_f = \frac{\pi}{2 \sqrt{2}} \\ \alpha_j = \frac{2}{\pi} \end{array} \right\} \text{Cas où le champ magnétique est sinusoïdal.}$$

B_σ : Induction dans l'entrefer [T].

A_1 : Charge linéaire [A/m].

Chapitre II : Dimensionnements de la machine asynchrone

P_e : Puissance électrique interne [kVA].

α_i : Coefficient de recouvrement polaire.

k_f : Coefficient de forme de l'onde de l'induction dans l'enterfer.

k_{enr1} : Coefficient d'enroulement, qui est le produit du coefficient de raccourcissement et du coefficient de distribution. il est donné par l'expression suivante :

$$k_{\text{enr1}} = k_r \cdot k_d \quad (\text{II.9})$$

Avec :

$$k_r = \sin \beta \cdot \pi / 2 \quad (\text{II.10})$$

$$B = \gamma / \zeta \quad (\text{II.11})$$

$$k_d = \frac{\sin \left(\frac{\pi}{2 \cdot m_1} \right)}{q_1 \cdot \sin \left(\frac{\pi}{2 \cdot m_1 \cdot q_1} \right)} \quad (\text{II.12})$$

γ : Pas d'enroulement.

ζ : Pas polaire.

m_1 : Nombre de phase statorique.

B : Angle de raccourcissement de l'enroulement.

q_1 : Nombre d'encoche par pôle et par phase.

N : Vitesse de synchronisme [tr/min].

f : Fréquence de la tension d'alimentation [Hz] .

p : Nombre de paires de pôles.

II.2.3. Calcul et choix du type d'enroulement

❖ Choix du type d'enroulement

L'enroulement est un élément important des machines asynchrones car c'est avec sa participation qu'a eu lieu le processus de conversion électromécanique de l'énergie.

L'enroulement doit assurer la tenue mécanique, électrique et thermique pour toute la durée d'une exploitation normale.

Généralement, on prend l'enroulement à une seule couche pour les machines ayant des puissances qui ne dépassant pas 10kW, au-delà, on prend l'enroulement à deux couches qui a l'avantage de réduire les harmoniques d'ordre supérieur.

❖ Courant nominal dans une phase statorique

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

$$I_{\text{nom}} = \frac{P_{\text{nom}} \cdot 10^3}{m_1 \cdot U_{\text{nom}} \cdot \eta_{\text{nom}} \cdot \cos_{\text{nom}}} \quad (\text{II.13})$$

Avec :

I_{nom} : Courant nominal dans une phase statorique [A].

P_{nom} : Puissance nominale de la machine [kW].

U_{nom} : Tension nominal de la machine [V].

η_{nom} : Rendement nominal de la machine.

\cos_{nom} : Facteur de puissance nominal de la machine.

m_1 : Nombre de phase statoriques.

❖ nombre de conducteurs effectifs

Le nombre de conducteurs effectifs est défini comme étant le nombre de conducteurs occupant l'encoche. il est donné par la formule suivante :

$$U_{\text{enc1}} = \frac{a_2 \cdot t_1 \cdot A_1 \cdot 10^{-3}}{I_{\text{nom}}} \quad (\text{II.14})$$

Avec :

A_1 : Charge linéaire [A/m].

a_2 : Nombre de voies parallèles.

❖ nombre de spires par phase

C'est le nombre de spires que contient une phase statorique, il est donné par l'expression suivante :

$$W_1 = \frac{U_{\text{enc1}} \cdot Z_1}{2 \cdot a_2 \cdot m_1} \quad (\text{II.15})$$

❖ Section effective d'un conducteur

La section effective du conducteur de la phase statorique est calculée par l'expression suivante :

$$S_{\text{eff}} = \frac{I_{\text{nom}}}{a_2 \cdot J_1} \quad (\text{II.16})$$

Avec :

S_{eff} : Section effective d'un conducteur [mm²]

J_1 : Densité de courant [A/mm²].

Si la section $S_{\text{eff}} \geq 1.8$ (mm²) on la divise par un nombre entier N_{e1} .

Chapitre II : Dimensionnements de la machine asynchrone

On aura alors la section effective $S_{\text{eff}} = S_{\text{eff}} / N_{\text{el}}$.

Une fois calculée, on fait le choix de la section standard nominalisée la plus proche de celle calculée.

Dans le programme informatique la section standard proche de celle calculée ainsi que le diamètre du conducteur avec et sans isolation sont extraites du tableau 10 (voir annexe A).

II.2.4. Dimensionnements de la feuille statorique

L'encoche statorique est représentée par la figure 1-a (voir annexe B).

❖ largeur de la dent

La largeur de la dent est calculée en se basant sur la loi de conservation du flux à travers le pas dentaire, elle est donnée par la relation suivante :

$$b_{z1} = \frac{t_1 \cdot B_{\delta}}{K_{\text{fer}} \cdot B_{z1\text{max}}} \quad (\text{II.17})$$

Avec :

b_{z1} : largeur de la dent [mm].

t_1 : Pas dentaire statorique [mm].

K_{fer} : Coefficient de remplissage du paquet de tôles statoriques et rotorique. Il est déterminé comme le rapport entre la longueur de l'induit sans isolation sur sa longueur avec isolation.

$K_{\text{fer}} = 0.95$ Pour l'isolation avec oxydation.

$K_{\text{fer}} = 0.97$ Pour l'isolation avec vernis.

$B_{z1\text{max}}$: Induction maximale dans la dent statorique. Elle est donnée par le tableau 3 (voir annexe A) en fonction du nombre de paires de pôles.

❖ hauteur du dos du stator

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

$$h_{c1} = \frac{0.5 \cdot \alpha_i \cdot \zeta \cdot B_{\delta}}{k_{\text{fer}} \cdot B_{c1}} \quad (\text{II.18})$$

Avec :

h_{c1} : hauteur du dos du stator [mm].

Chapitre II : Dimensionnements de la machine asynchrone

α_i : Coefficient de recouvrement polaire.

ζ : Pas polaire [mm].

B_{c1} : Induction magnétique dans le dos du stator donnée par le tableau 3 (voir annexe A)

❖ largeur minimale de l'encoche

La largeur minimale de l'encoche est déduite géométriquement, en calculant le pas dentaire mesuré à partir de la base de la clavette. elle est donnée par l'expression suivante :

$$b_{enc1} = \left(\frac{\pi(D_1 + 0.2 \cdot h_{z1})}{Z_1} \right) - b_{z1} \quad (II.19)$$

❖ largeur maximale de l'encoche

De la même manière, on calcul géométriquement la largeur maximale de l'encoche qui est donnée par l'expression suivante :

$$b_{enc2} = \left(\frac{\pi(D_1 + 2 \cdot h_{z1})}{Z_1} \right) - b_{z1} \quad (II.20)$$

Avec :

h_{z1} : Hauteur de la dent statorique [mm].

b_{enc1} : Largeur minimale de l'encoche [mm].

b_{enc2} : Largeur maximale de l'encoche [mm].

❖ hauteur de la dent

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

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

❖ hauteur de l'encoche

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

$$h_{enc1} = h_{z1} - (h_{k1} + h_{f1}) \quad (II.22)$$

Chapitre II : Dimensionnements de la machine asynchrone

Avec:

h_{f1} : Hauteur de la fente d'encoche statorique [mm].

$$1.2 \leq h_{f1} \leq 1.8$$

❖ hauteur de la clavette

Généralement, la hauteur de la clavette est donnée par la relation suivante :

$$h_{k1} = 0.5 \cdot (b_{enc1} - b_{f1}) \quad (II.23)$$

Avec :

b_{f1} : Largeur de la fente d'encoche statorique $b_{f1} \leq 4$ mm.

❖ Ouverture de l'encoche

L'encoche trapézoïdale dispose à sa sortie d'une ouverture destinée au passage des conducteurs, toutefois, cette ouverture ne doit pas dépasser 4 mm.

$$B_{f1} \leq 4 \text{ mm.}$$

❖ Section occupé par les conducteurs

Pour les encoches de forme trapézoïdale la section occupée par les conducteurs est donnée par l'expression suivante :

$$S_{enc1} = 1/2 \cdot [b_{enc1} + b_{enc2}] \cdot h_{enc1} - S_{iso} \quad (II.24)$$

Avec:

S_{iso} : Section occupée par l'isolation en [mm²], elle est donnée par la relation suivante :

$$S_{iso} = (b_{enc2} + 2 \cdot b_{enc1}) \cdot e_1 + 0.5 \cdot (b_{enc1} + b_{enc2}) \cdot e_3 + b_{enc1} \cdot e_2 \quad (II.25)$$

Avec:

e_1 : Épaisseur de l'isolation du contour de l'encoche [mm].

e_2 : Épaisseur de l'isolation de la clavette [mm].

e_3 : Épaisseur de l'isolant entre les couches pour un enroulement à deux couches [mm].

Chapitre II : Dimensionnements de la machine asynchrone

Les épaisseurs d'isolation sont extraites automatiquement du tableau 4 (voir annexe A).

❖ Coefficient de remplissage

Le coefficient de remplissage est défini comme étant le rapport de la section des conducteurs (isolation comprise) occupant l'encoche à la section utile de l'encoche, il est donné par l'expression suivante :

$$K_{ra} = \frac{U_{enc1} \cdot N_{e1} \cdot d_{iso}^2}{S_{enc1}} \quad (II.26)$$

Avec :

$$0.7 \leq K_{ra} \leq 0.75 \quad \text{en [mm]}$$

S_{enc1} : Section utile de l'encoche [mm^2].

d_{iso} : Diamètre du conducteur avec isolation [mm^2].

II.2.5. dimensionnement du rotor

L'encoche rotorique est représentée par la figure 1-b (voir annexe B)

❖ nombre d'encoches rotorique

Le choix du nombre d'encoches rotorique est déterminé en fonction du nombre d'encoches statorique. Le tableau 5 (voir annexe A) donne le nombre Z_2 à adopter afin de réduire les couples parasites.

❖ Diamètre extérieur du rotor

Connaissant les valeurs de l'entrefer et de l'alésage du stator, le diamètre extérieur du rotor a pour expression :

$$D_2 = D_1 - 2 \cdot \sigma \quad (II.27)$$

D_2 : Diamètre extérieur du rotor en [mm].

❖ pas dentaire

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

$$t_2 = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} \quad (\text{II.28})$$

Avec :

t_2 : pas dentaire rotorique [mm].

❖ force électromotrice à vide dans une barre rotorique

La tension induite dans une barre rotorique est égale à celle du primaire rapportée au secondaire (rotor). elle est donnée par la relation suivante :

$$E_{ba} = \frac{W_2 \cdot K_{enr2}}{W_1 \cdot K_{enr1}} \cdot E_1 \quad (\text{II.29})$$

Avec :

$\frac{W_2 \cdot K_{enr2}}{W_1 \cdot K_{enr1}}$: Rapport de transformation

W_2 : Nombre de spires par phase du rotor.

K_{enr2} : Facteur d'enroulement rotorique.

L'enroulement à cage peut être assimilé à un enroulement polyphasé dont le nombre de phases est égal au nombre d'encoches rotorique ($m_2=Z_2$) [9]. dans ce cas, le facteur d'enroulement K_{w2} et le nombre de spires w_2 par phase valent respectivement : $K_{enr2}=1$, $w_2=0.5$.

D'où :

$$E_{ba} = \frac{K_e \cdot U_{nom}}{2 \cdot P \cdot U_{enc1} \cdot K_{enr1}} \quad (\text{II.30})$$

Avec :

E_{ba} : force électromotrice a vide dans une barre rotorique [V].

K_e : Coefficient qui tient compte de la chute de tension dans la phase statorique.

❖ Courant dans la barre

Le courant dans une phase de l'enroulement secondaire (barre) est donné par l'expression suivante :

$$I_2 = 1.11 \cdot I_{nom} \cdot 2 \cdot m_1 \cdot W_1 \frac{K_{enr1} \cdot \cos \varphi_{nom}}{Z_2} \quad (\text{II.31})$$

Chapitre II : Dimensionnements de la machine asynchrone

I_2 : Courant dans la barre en [A].

❖ hauteur de la dent rotorique

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

$$h_{z2} = 0.5.(D_2 - D_{2int}) - h_{c2} \quad (II.32)$$

Avec :

$$D_{2int} = (0.3 \text{ à } 0.35).D_2 \quad (II.33)$$

D_{2int} : Diamètre intérieur du rotor [mm].

h_{c2} : Hauteur de la culasse rotorique [mm].

❖ Diamètre de l'encoche

Etant donné que la forme de l'encoche est ovale le diamètre inférieur de l'encoche est donné par l'expression géométrique suivante :

$$b_1 = \frac{[\pi.(D_2 - 2.h_{z2}) - Z_2.b_{z2}]}{(\pi + Z_2)} \quad (II.34)$$

Le diamètre supérieur de l'encoche est donné par la relation suivante :

$$b_2 = \frac{[\pi.(D_2 - 2.h_{f2}) - Z_2.b_{z2}]}{(Z_2 - \pi)} \quad (II.35)$$

Avec :

b_1 : Diamètre inférieur de l'encoche en [mm].

b_2 : Diamètre supérieur de l'encoche en [mm].

h_{f2} : Hauteur de la fente rotorique [mm].

❖ hauteur du pont

La hauteur du pont de l'encoche rotorique (h_{f2}) varie entre 0.5 et 0.7 [mm].

❖ hauteur de la culasse rotorique

La hauteur de la culasse est déduite de la loi de conservation du flux, elle est donnée par l'expression ci-dessous :

$$h_{c2} = 0.5 \cdot \frac{\alpha_i \cdot \tau \cdot B_\delta}{k_{fer} \cdot B_{c2}} \quad (\text{II.36})$$

Avec :

ζ : Pas polaire [mm].

B_δ : Induction dans l'entrefer [T].

α_i : Coefficient de recouvrement polaire.

B_{c2} : induction dans la culasse rotorique [T].

K_{fer} : Coefficient de remplissage des paquets de tôles.

❖ hauteur de l'encoche rotorique

La hauteur de l'encoche est donnée en fonction des diamètres de l'encoche ovale par l'expression suivante :

$$h_{enc2} = h_2 + 0.5 \cdot (b_1 + b_2) \quad (\text{II.37})$$

Avec :

$$h_2 = h_{z2} - h_{f2} - 0.5 \cdot (b_1 + b_2) \quad (\text{II.38})$$

h_{enc2} et h_2 sont exprimés en [mm].

❖ Cage rotorique

La cage rotorique est à encoches ovales dans lesquelles sont logées les barres d'aluminium court-circuitées à leurs extrémités par deux anneaux.

❖ Section de la barre

La section de la barre est donnée en fonction des dimensions de l'encoche par l'expression suivante :

$$S_b = 0.125 \cdot (b_1^2 - b_2^2) \cdot \pi + (b_1 + b_2) \cdot h_2 \cdot 0.5 \quad (\text{II.39})$$

S_b : Section de la barre [mm²]

❖ Densité de courant

La densité de courant est donnée par la relation suivante:

$$J_b = \frac{I_2}{b_2} \quad (\text{II.40})$$

J_b : Densité de courant en $[A/mm^2]$.

II.2.6. dimensionnement de l'anneau de court-circuit

❖ Section transversale de l'anneau

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

$$S_{an} = (0.35 \text{ à } 0.45) \frac{Z_2 \cdot S_b}{2P} \quad (\text{II.41})$$

Avec :

S_{an} : Section transversale de l'anneau en $[mm^2]$.

❖ hauteur de l'anneau

La hauteur de l'anneau est donnée par la relation suivante :

$$h_{an} = (1.1 \text{ à } 1.25) \cdot h_{z2} \quad (\text{II.42})$$

h_{an} : Hauteur de l'anneau $[mm]$.

❖ largeur de l'anneau

La largeur de l'anneau est donnée par la relation suivant :

$$b_{an} = \frac{S_{an}}{h_{an}} \quad (\text{II.43})$$

b_{an} : Largeur de l'anneau $[mm]$.

❖ Diamètre de l'anneau

Le diamètre de l'anneau est calculé par la l'expression suivante :

$$D_{an} = D_2 - h_{an} \quad (\text{II.44})$$

D_{an} : Diamètre de l'anneau $[mm]$.

❖ Densité de courant dans l'anneau

La densité de courant dans l'anneau est le rapport du courant circulant dans l'anneau à la section de l'anneau. Elle est donnée par la relation suivante :

$$J_{an} = \frac{I_{an}}{S_{an}} \quad (\text{II.45})$$

Avec :

J_{an} : Densité de courant dans l'anneau en $[A/mm^2]$.

I_{an} : Courant dans l'anneau en $[A]$, il est donné par l'expression suivante :

$$I_{an} = \frac{I_{bar}}{K_{red}} \quad (\text{II.46})$$

K_{red} : Coefficient de réduction qui est donnée par l'expression suivante

$$K_{red} = 2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot P}{Z_2}\right) \quad (\text{II.47})$$

II.3. Dimensionnement du circuit magnétique

Le circuit magnétique de la machine est constitué de cinq tronçons distincts suivants :

- a- la culasse statorique
- b- la culasse rotorique
- c- les dents statorique
- d- les dents rotorique
- e- l'entrefer

II.3.1. Circuit magnétique statorique

Pour déterminer les intensités du champ magnétique dans les différentes parties de la machine, il faut au préalable calculer les inductions dans les différents tronçons du circuit magnétique.

❖ Chute de potentiel magnétique dans les dents du stator

La chute de potentiel magnétique dans les dents du stator est donnée par l'expression suivante :

$$F_{z1} = H_{z1} \cdot h_{z1} \cdot 10^{-3} \quad (\text{II.48})$$

La valeur du champ H_{z1} correspond à l'induction B_{z1} , elle est tirée du tableau 6 (voir annexe A)

F_{z1} : Chute de potentiel magnétique dans les dents du stator en [A].

❖ Induction dans la culasse du stator

La conservation du flux à travers le pas polaire nous a permis de déduire l'induction dans la culasse statorique par la relation suivante :

$$B_{C1} = \frac{0.5 \cdot \alpha_i \cdot \tau \cdot B_{\delta}}{k_{fer} \cdot h_{c1}} \quad (II.49)$$

Avec :

h_{c1} : Hauteur de la culasse statorique [mm].

α_i : Coefficient de recouvrement polaire.

τ : Pas polaire [mm].

B_{c1} : Induction dans la culasse du stator en [T].

❖ Induction dans les dents du stator

La conservation du flux à travers le pas dentaire, nous a permis de déduire l'induction dans les dents statoriques par la relation suivante :

$$B_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1}{k_{fer} \cdot b_{z1}} \quad (II.50)$$

Avec :

t_1 : Pas dentaire statorique [mm].

B_{δ} : Induction dans l'entrefer [T].

B_{z1} : Induction dans les dents du stator [T].

b_{z1} : Largeur de la dent statorique [mm].

K_{fer} : Coefficient de remplissage du paquet de tôles statorique et rotorique

❖ Chute de potentiel magnétique dans la culasse

La chute de potentiel magnétique dans la culasse statorique est donnée par la formule suivante :

$$F_{c1} = L_{c1} \cdot H_{c1} \cdot 10^{-3} \quad (\text{II.51})$$

Avec :

H_{c1} : Intensité du champ magnétique correspondant à l'induction dans la culasse B_{c1} . elle est donnée par le tableau 7 (voir annexe A).

L_{c1} : Longueur moyenne du parcours de la ligne du champ dans la culasse en [mm].

F_{c1} : Chute de potentiel magnétique dans la culasse en [A].

❖ longueur moyenne des lignes du champ dans la culasse statorique

La longueur moyenne des lignes du champ dans la culasse statorique est donnée par la relation suivante :

$$L_{c1} = \frac{\pi}{2 \cdot p} (D_{\text{ext}} - h_{c1}) \quad (\text{II.52})$$

Avec :

L_{c1} : longueur moyenne des lignes du champ dans la culasse statorique en [mm].

❖ Chute de potentiel dans l'entrefer

La chute de potentiel magnétique dans l'entrefer est proportionnelle à l'induction dans celui-ci et son épaisseur, elle est donnée par :

$$F_{\delta} = \frac{1}{\mu_0} \cdot B_{\delta} \cdot \delta \cdot 10^{-3} \quad (\text{II.53})$$

Avec :

F_{δ} : Chute de potentiel dans l'entrefer en [A]

δ : Épaisseur de l'entrefer [mm]

B_{δ} : Induction dans l'entrefer [T]

K_{δ} : Coefficient de carter qui tient compte de la non-uniformité de l'entrefer, il est donnée par la relation suivante :

$$K_{\delta} = K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2} \quad (\text{II.54})$$

Chapitre II : Dimensionnements de la machine asynchrone

Avec :

$$K_{\delta 1} = \frac{b_{f1}}{t_1 - b_{f1} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_1}{b_{f1}}} + 1 \quad \Rightarrow \text{Stator}$$

$$K_{\delta 2} = \frac{b_{f2}}{t_2 - b_{f2} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_2}{b_{f2}}} + 1 \quad \Rightarrow \text{Rotor}$$

Avec :

b_{f1} : Largeur de la fente statorique [mm].

b_{f2} : Largeur de la fente rotorique [mm].

II.3.2. Choix de l'entrefer

Le choix de l'entrefer est sujet au compromis de deux contraintes antagonistes .D'un coté il doit être aussi grand que possible afin de réduire les pertes supplémentaires produites par les pulsations du champ magnétique et de la dispersion provoquée par les harmoniques d'ordre supérieur du champ ,de l'autre coté on doit le maintenir aussi petit que possible pour avoir un bon facteur de puissance et par conséquent, une grande capacité de surcharge .pour cela on adopte à la formule suivante :

$$\delta = 2.95 \cdot 10^{-3} \cdot D_{\text{ext}} - 5.44 \cdot 10^{-2} \quad (\text{II.55})$$

II.3.3. Circuit magnétique rotorique

❖ Induction dans la dent rotorique

Suivant la loi de conservation du flux à travers le pas dentaire rotorique, on aboutira à l'expression suivante :

$$B_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_2}{k_{\text{fer}} \cdot b_{z2}} \quad (\text{II.56})$$

Avec :

b_{z2} : Largeur de la dent rotorique [mm] .

B_{z2} : Induction dans la dent rotorique [T].

❖ Chute de potentiel magnétique dans les dents du rotor

La chute de potentiel magnétique dans les dents du rotor est donnée par la relation suivante :

$$F_{z2} = H_{z2} \cdot (h_{z2} - 0.4 \cdot b_2) \cdot 10^{-3} \quad (\text{II.57})$$

Avec :

H_{z2} : Intensité du champ magnétique dans la dent correspondante à l'induction B_{z2} , elle est donnée par le tableau 6 (voir annexe A)

H_{z2} : Hauteur de la dent rotorique [mm].

F_{z2} : Chute de potentiel magnétique dans les dents du rotor [A].

❖ Induction magnétique dans la culasse rotorique

L'induction magnétique dans la culasse rotorique est donnée par la formule suivante :

$$B_{c2} = 0.5 \cdot \frac{B_{\delta} \cdot \alpha_i \cdot I}{k_{\text{fer}} \cdot h_{c2}} \quad (\text{II.58})$$

Avec :

h_{c2} : Hauteur de la culasse rotorique [mm].

B_{c2} : Induction magnétique dans la culasse rotorique [T].

Le parcours moyen du flux dans la culasse rotorique est donné par la formule suivante :

$$L_{c2} = (D_2 - 2 \cdot h_{z2} - h_{c2}) \cdot \frac{\pi}{2p} + h_{c2} \quad (\text{II.59})$$

Avec :

L_{c2} : Parcours moyen du flux dans la culasse rotorique [mm].

h_{z2} : Hauteur de la dent rotorique [mm].

h_{c2} : Hauteur de la culasse rotorique [mm].

❖ Chute de potentiel magnétique dans la culasse rotorique

La chute de potentiel magnétique dans la culasse rotorique s'exprime par la relation suivante :

$$F_{c2} = L_{c2} \cdot H_{c2} \cdot 10^{-3} \quad (\text{II.60})$$

Avec :

H_{c2} : Intensité du champ dans la culasse rotorique qui correspond à l'induction B_{c2} .elle est donnée par le tableau 7 (voir annexe A)

F_{c2} : Chute de potentiel magnétique dans la culasse rotorique [mm].

II.3.4. Force magnétomotrice totale à vide par paire de pôles

La force magnétomotrice totale à vide par paire de pôles est donnée par la relation suivante :

$$\Sigma f_i = 2 \cdot (F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2}) + F_{c1} + F_{c2} \quad (\text{II.61})$$

Le facteur deux (2) est du au fait que les lignes de champ parcourent deux fois l'entrefer et les dents statoriques et rotorique

II.3.5. Coefficient de saturation

On a deux principaux coefficients de saturation :

❖ Coefficient de saturation des dents

Le coefficient de saturation des dents est donné par la relation suivante :

$$K_{\mu z} = \frac{F_{\delta} + F_{z1} \cdot F_{z2}}{F_{\delta}} \quad (\text{II.62})$$

Il est compris entre [1.1 à 1.4]

❖ Coefficient de saturation de la machine

Le coefficient de saturation de la machine est donné par la relation suivante :

$$K_{\mu} = \frac{\sum F_i}{2.F_{\delta}} = \frac{2.(F_{\delta}+F_{Z1}+F_{Z2})+F_{C1}+F_{C2}}{2.F_{\delta}} \quad (\text{II.63})$$

II.3.6.Courant magnétisant

Le courant magnétisant représente la partie réactive du courant à vide.il est donnée par la relation suivante :

$$I_m = \frac{P.\sum F_i}{0.9.m_1.w_1.K_{enr1}} \quad (\text{II.64})$$

I_m : Courant magnétisant [A].

II.3.7.Réactance de magnétisation

La réactance de magnétisations est donnée par la formule suivante:

$$X_m = \frac{E_0}{I_m} = K_e \frac{U_{nom}}{I_m} \quad (\text{II.65})$$

Avec :

K_e : Coefficient qui tient compte de la chute de tension dans la phase statorique.il varie en fonction du nombre de paires de pôles.

X_m : Réactance de magnétisation [Ω].

II.3.8.Coefficient de dispersion magnétique du stator

Le coefficient de dispersion magnétique du stator est défini comme étant le rapport de la réactance statorique à la réactance de magnétisation.il est donné par la relation suivante :

$$\sigma_{\mu} = \frac{X_1}{X_m} \quad (\text{II.66})$$

II.3.9.Force électromotrice à vide

La force électromotrice à vide est donnée par la relation suivante :

$$E_0 = \frac{U_{nom}}{(1+\sigma_{\mu})} \quad (\text{II.67})$$

Chapitre II : Dimensionnements de la machine asynchrone

E_0 : Force électromotrice à vide [V].

Remarque

On a adopté l'échelle logarithmique afin de linéariser les courbes $B_z=f(Hz)$ et $B_c=f(Hc)$ dans les différents intervalles [9].

Les résultats sont rassemblés respectivement dans les tableaux 6 et 7 (voir annexe A)

II.4. Calcul des paramètres électriques

II.4. 1. Paramètres statoriques

❖ Résistance active d'une phase statorique

Le matériau utilisé pour l'enroulement statorique est le cuivre (Cu).

La résistance d'une phase statorique est donnée par la relation suivante :

$$R_1 = \rho_{Cu}(T) \frac{w_1 \cdot L_{w1} \cdot 10^3}{a_2 \cdot N_{el} \cdot q_{eff}} \quad (II.68)$$

Avec :

a_2 : Nombre de voies d'enroulement.

N_{el} : Nombre de conducteurs élémentaires.

w_1 : Nombre de spires d'une phase statorique.

q_{eff} : Section standard choisie d'un conducteur [mm^2]

$\rho_{Cu}(T)$: Résistivité du cuivre à la température(T) [$\Omega \cdot m$].

Pour une température de fonctionnement, la résistivité du cuivre est donnée par l'expression suivante :

$$\rho_{Cu}(T) = \rho_{Cu(20^\circ C)} \cdot [1 + \alpha_{Cu} \cdot (T - 20)] \quad (II.69)$$

Avec :

$$\rho_{Cu(20^\circ C)} = 0.0178 \cdot 10^{-6} \quad [\Omega \cdot m]$$

$$\alpha_{Cu} = 3.81 \cdot 10^{-3} \quad [^\circ C^{-1}].$$

L_{w1} : Longueur moyenne d'une spire de l'enroulement statorique qui est donnée par la relation suivante :

$$L_{w1} = 2(L_i + L_{f1}) \quad (II.70)$$

Avec :

L_i : Longueur virtuelle de l'induit [mm]

Chapitre II : Dimensionnements de la machine asynchrone

L_{f1} : Longueur moyenne de la partie frontale d'une demi-spire qui est donnée par l'expression suivante :

$$L_{f1} = (1.16 + 0.4.P).b_{1\text{moy}} + 15 \quad (\text{II.71})$$

$B_{1\text{moy}}$: Largeur moyenne d'une section qui est donnée par l'expression suivante :

$$b_{1\text{moy}} = \frac{\pi(D_1 + h_{z1})}{z_1} \cdot y_{1\text{moy}} \quad (\text{II.72})$$

$Y_{1\text{moy}}$: Pas moyen d'un groupe de section en [mm] .

❖ Calcul des réactances de fuite et perméance du stator

Dans la conception des machines électriques, il est important de minimiser les réactances de fuites et maximiser la réactance magnétisante afin de réduire le courant magnétisant.

Pour ce, il est impératif de décomposer le flux total en flux principaux suivants :

- a-flux frontal.
- b-flux différentiel.
- c-flux d'encoche.

a-réactance de fuite frontale

La réactance de fuite frontale est la réactance présentée par les deux parties de l'enroulement dans chaque extrémité du paquet de tôles. Elle est due au flux de fuite frontal.

b-réactance de fuite différentielle

La réactance de fuite différentielle est la réactance due au flux de fuite dent à dent à travers l'entrefer, au flux différentielle de phase et au flux différentielle d'encoche.

c-la réactance de fuite d'encoche

La réactance de Fuite d'encoche est due au flux de fuite se refermant autour des conducteurs.

❖ réactance de fuite totale du stator

La réactance de fuite totale statorique est la réactance due au flux de fuite total. Elle est donnée par la relation suivante :

Chapitre II : Dimensionnements de la machine asynchrone

$$\chi = \frac{1,58.f_i.L_i.W_1^2}{p.q_1.10^3} . \lambda_1 \quad (\text{II.73})$$

Avec :

P : Nombre de paire de pôles.

L_i : Longueur virtuelle de l'induit.

W_1 : Nombre de spire par phase.

f_i : Fréquence de la tension d'alimentation (50Hz).

q_1 : Nombre d'encoches par pole et par phase.

λ_1 : Permeance de dispersion de l'enroulement statorique. Elle est calculée comme suite :

$$\lambda = \lambda_{enc1} + \lambda_{1d} + \lambda_{1f} \quad (\text{II.74})$$

λ_{enc1} : Permeance d'encoche qui représente la réactance de fuite d'encoche .elle est donnée par l'expression suivante :

$$\lambda_{enc1} = \frac{h_1}{3.b_{enc1}} . K_{B1} + \left(\frac{h_1}{b_{enc1}} + \frac{3.h_{k1}}{b_{enc1+2.b_{f1}}} + \frac{h_{f1}}{b_{f1}} \right) . K_{B2} \quad (\text{II.75})$$

Avec :

K_{B1} et K_{B2} : Coefficients qui tiennent compte de la diminution de la dispersion pour un pas raccourci, ils sont donnés en fonction du pas relatif par la figure A₁ (voir annexe B)

λ_{1d} : Permeance différentielle qui proportionnelle à la réactance de fuite différentielle, elle est donnée par l'expression suivante :

$$\lambda_{1d} = \frac{0,9.t_1.(q_1.K_{enc1})^2}{K_\delta.\delta} . k_{rr1} . k_{dd1} . k_{f1} \quad (\text{II.76})$$

Avec :

$$k_{f1} = 1 - \left(\frac{0,033.b_{f1}^2}{\delta.t_1} \right) \quad (\text{II.77})$$

K_{rr1} : Coefficient qui dépend de q_1 , il est donné par le tableau 8 (voir annexe A)

K_{dd1} : Coefficient de fuite différentielle donné par le tableau 9 (voir annexe A) en fonction de $Z_2/2.p$ et de q_1 .

λ_{1f} : Permeance frontale proportionnelle à la réactance de fuite frontale, elle s'exprime par la formule suivante :

$$\lambda_{f1} = 0.34 \frac{q_1}{L_i} (L_{f1} - 0.64 \cdot \beta \cdot \tau) \quad (\text{II.78})$$

Avec :

β : Angle de raccourcissement [rad].

ζ : Pas polaire [mm].

❖ Calcul des Resistances

Le calcul des résistances est rapporté à la température de fonctionnement du moteur, celle-ci est donnée en fonction de la classe d'isolation utilisée. les principales classes d'isolation sont :

Classe A

La classe A est utilisée pour les machines travaillant dans une température de fonctionnement inférieure à 100°C, avec une élévation de température maximale de 60°C.

Classe B

La classe B est utilisée pour les machines travaillant dans des températures de fonctionnement comprises entre 120 °C et 130°C, avec une élévation de température de l'ordre de 180°C.

Classe H

La classe H est utilisée pour les machines fonctionnant à des températures atteignant 180°C, avec une élévation de température admise de 20°C.

Classe F

La classe F est utilisée pour les machines fonctionnant à la température de 155°C.

II.4.2. Paramètres rotorique

❖ Resistance active de la barre.

La résistance active de la barre est donnée par l'expression suivante :

$$R_b = \rho_{al}(T) \frac{L_i}{S_b} \cdot 10^3 \quad (\text{II.79})$$

Avec :

S_b : Section de la barre en [mm²].

$\rho_{al}(T)$: Résistivité de l'aluminium à la température (T) qui est donnée par l'expression suivante :

Chapitre II : Dimensionnements de la machine asynchrone

$$\rho_{al(T)} = \rho_{al(20^\circ\text{C})} \cdot [1 + \alpha_{al}(T - 20)] \quad (\text{II.80})$$

α_{al} : Coefficient de dilatation qui a pour valeur $\alpha_{al} = 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ } [^\circ\text{C}^{-1}]$

$$\rho_{al(20^\circ\text{C})} = 0,031 \cdot 10^{-3} \quad [\Omega \cdot \text{m}]. \quad (\text{II.81})$$

❖ Résistance active de l'anneau

La résistance active de l'anneau est donnée par l'expression suivante :

$$R_{an} = \rho_{al(T^\circ\text{C})} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot D_{an} \cdot 10^3}{Z_2 \cdot S_{an}} \cdot 10^3 \quad (\text{II.82})$$

Avec :

S_{an} : Section de l'anneau [mm^2].

Z_2 : Nombre d'encoches rotorique .

D_{an} : Diamètre moyen de l'anneau [mm].

❖ Résistance de l'anneau ramenée à la barre

La résistance de l'anneau ramenée à la barre est donnée par l'expression suivante :

$$R_{an \text{ ram}} = \frac{R_{an}}{K_{red}^2} \quad (\text{II.83})$$

Avec :

K_{red} : Coefficient de transformation de l'anneau vers la barre.

❖ Résistance active d'une phase rotorique

La résistance d'une phase rotorique est la somme de la résistance active de la barre et la résistance de l'anneau ramenée à la barre. Elle est donnée par la relation suivante :

$$R_2 = R_b + R_{an \text{ ram}} \quad (\text{II.84})$$

Avec:

R_b : Résistance de la barre [Ω].

$R_{an \text{ ram}}$: Résistance de l'anneau de court-circuit [Ω].

Chapitre II : Dimensionnements de la machine asynchrone

❖ Résistance active de la cage rotorique ramenée au stator

La résistance active de la cage rotorique ramenée au stator est donnée par l'expression suivante :

$$R_{2ram} = M \cdot R_2 \quad (II.85)$$

Avec :

M : Coefficient de réduction de la cage rotorique ramenée vers le stator. Il est donné par l'expression suivante :

$$M = 4 \cdot \frac{m_1}{Z_2} \left(\frac{w_1 \cdot k_{en1}}{K_{ob}} \right)^2 \quad (II.86)$$

K_{ob} : Coefficient d'obliquité qui est donné par l'expression suivante :

$$K_{ob} = \frac{\sin\left(\frac{\alpha_{ob}}{2}\right)}{\left(\frac{\alpha_{ob}}{2}\right)} \quad (II.87)$$

α_{ob} : Angle d'inclinaison des encoches qui est donné par l'expression suivante :

$$\alpha_{ob} = \frac{2 \cdot \pi \cdot p \cdot \beta_{ob}}{Z_2} \quad (II.88)$$

Avec :

$$\beta_{ob} = t_1 / t_2$$

t_1 : Pas dentaire statorique [mm].

t_2 : Pas dentaire rotorique [mm].

❖ Réactance de fuite globale et perméance du rotor

En plus des réactances de fuites rotorique, on tient compte de la réactance de fuite d'inclinaison des encoches pour le calcul de la réactance de fuite globale. Elle est donnée par l'expression suivante :

$$X_2 = 7,9 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot \lambda_2 \cdot 10^{-9} \quad (II.89)$$

Avec :

λ_2 : Perméance dispersion du rotor. Elle est donnée par la formule suivante :

Chapitre II : Dimensionnements de la machine asynchrone

$$\lambda_2 = \lambda_{2enc} + \lambda_{2d} + \lambda_{0b} \quad (II.90)$$

Ou :

λ_2 , λ_{2enc} , λ_{2d} et λ_{0b} sont respectivement des permeance d'encoches en $[\Omega]$, différentielles, frontale et d'obliquité. Elles sont calculées par les expressions suivantes :

$$\lambda_{2enc} = C_\lambda + \left(\frac{h_{f2}}{B_{f2}} \right) \quad (II.91)$$

avec :

$$C_\lambda = \Psi \cdot \left[\frac{h_2 + 0,4 \cdot b_2}{3 \cdot b_1} \left(1 - \frac{\pi \cdot b_1}{8 \cdot S_b} \right)^2 \right] + 0,66 - \frac{b_{f2}}{2 \cdot b_1} \quad (II.92)$$

La courbe de la figure A₃ (voir annexe B) donne les valeurs de Ψ en fonction de ξ .

Dans le cas du régime nominal $\Psi = 1$.

$$\lambda_{2d} = \frac{0,9 \cdot t_2 \cdot \left(\frac{Z_2}{6 \cdot P} \right)^2}{\delta \cdot k_\delta} \cdot K_{dd2} \quad (II.93)$$

Avec :

K_{dd2} : Coefficient de fuite différentielle donné en fonction de q_2 par la figure A₉ (voir annexe B)

L'équation qui correspond à l'allure de la courbe est donnée par l'expression suivante :

$$K_{dd2} = \frac{9,15}{100 \cdot \left(\frac{Z}{6 \cdot P} \right)^2} \quad (II.94)$$

$$\lambda_{2f} = \frac{2,3 \cdot D_{an \text{ moy}}}{Z_2 \cdot L_i \cdot (k_{red})^2} \cdot \log \frac{4,7 \cdot D_{an \text{ moy}}}{2 \cdot (h_{an} + L_{an})} \quad (II.95)$$

$$\lambda_{0b} = \frac{t_2 \cdot B_{0b}^2}{9,5 \cdot \delta \cdot K_\delta \cdot K_\mu} \quad (II.96)$$

Avec:

K_μ : Coefficient de saturation de la machine.

❖ Réactance du rotor ramenée au stator

La réactance du rotor ramenée au stator est donnée par l'expression suivante :

$$X_{2ram} = M \cdot X_2 \quad (II.97)$$

Avec :

M : Coefficient de réduction de la cage rotorique ramenée au stator.

II.4.3. Paramètres au démarrage

A la mise sous tension ; rotor immobile, les barres de la cage sont soumises à un champ de fréquence égale à la fréquence des tensions primaires.

La profondeur de pénétration du courant est alors faible (effet pelliculaire), seule la partie supérieure des barres est le siège des courants induits, d'où une forte résistance au démarrage.

Au régime nominal, la fréquence du champ rotorique devient faible.

Cependant, la profondeur de pénétration augmente et la résistance de la cage rotorique diminue.

❖ Profondeur de pénétration

La profondeur de pénétration du courant dans la barre rotorique est donnée par la relation suivante :

$$h_{pp} = \frac{h_p}{1 + \phi_1} \quad (II.98)$$

Avec :

h_b : Hauteur de la barre [mm].

ϕ_1 : Coefficient dépendant de la valeur de ξ il est donné par la courbe de la figure A₃ (voir annexe B).

$$\xi = 0.066 \cdot h_b \cdot \sqrt{g} \quad \text{pour } T = 75 \text{ °C}$$

$$\xi = 0.064 \cdot h_b \cdot \sqrt{g} \quad \text{pour } T = 115 \text{ °C}$$

❖ Largeur a la limite de pénétration

La largeur à la limite de pénétration est donnée par l'expression suivante :

Chapitre II : Dimensionnements de la machine asynchrone

$$b_{pp} = b_1 - \frac{(b_1 - b_2)}{h_2} \cdot (h_{pp} - \frac{b_1}{2}) \quad (\text{II.99})$$

Avec :

b_{pp} : Largeur a la limite de pénétration [mm].

❖ Section de la barre pénétrée par le courant de démarrage

La section de la barre pénétrée par le courant de démarrage est donnée par l'expression suivante :

$$S_{b,dem} = \frac{\pi}{8} \cdot b_1^2 + [0.5 \cdot (b_1 + b_{pp})(h_{pp} - 0.5 \cdot b_1)] \quad (\text{II.100})$$

$S_{b,dem}$: Section de la barre pénétrée en [mm²].

❖ Résistance de la barre au démarrage

La résistance de la barre au démarrage est donnée par la relation suivante :

$$R_{b,dem} = R_b \cdot K_{dep} \quad (\text{II.101})$$

Avec :

R_b : Résistance de la barre au régime nominal en [Ω].

K_{dep} : Coefficient de déplacement du courant qui est le rapport de la section totale de la barre à la section de la barre au démarrage.

$$K_{dep} = \frac{S_b}{S_{b,dem}} \quad (\text{II.102})$$

❖ Résistance active de la barre rotorique au démarrage

La résistance active de la barre rotorique au démarrage est donnée par l'expression suivante :

$$R_{2dem} = R_{bdem} + R_{anram} \quad (\text{II.103})$$

❖ Résistance de la cage au démarrage

La résistance de la cage au démarrage est donnée par la relation suivante :

$$R'_{2dem} = M \cdot (R_b + R_{anram}) \quad (\text{II.104})$$

Avec:

R_{anram} : Résistance de l'anneau ramenée à la barre [Ω].

❖ Réactance de fuite au démarrage

La réactance de fuite au démarrage est donnée par l'expression suivante :

$$X_{2dem} = 7.9.f_1.L_i.\lambda'_2.10^{-2} \quad (\text{II.105})$$

Avec :

λ'_2 : Permeance de dispersion du rotor au démarrage. Elle est donnée par la relation suivante :

$$\lambda'_2 = \lambda_{2enc.dem} + \lambda_{2d} + \lambda_{2f} + \lambda_{0b} \quad (\text{II.106})$$

Seule la permeance d'encoche est affectée par l'effet pelliculaire.

$$\lambda_{2enc.dem} = C'_\lambda + \frac{hf_2}{bf_2} \quad (\text{II.107})$$

Avec :

$$C'_\lambda = \Psi_2 . C_\lambda. \quad (\text{II.108})$$

Ψ_2 : Coefficient donnée par la courbe de la figure A₃ (voir annexe B) en fonction de ξ déjà calculé.

❖ Réactance de fuite au démarrage ramenée au stator

La réactance de fuite au démarrage ramenée au stator est donnée par la formule suivante :

$$X_{2.dem.nom} = M.X_{2.dem} \quad (\text{II.109})$$

$X_{2.dem.nom}$: Réactance de fuite au démarrage ramenée au stator en [Ω].

II.4. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons posé les différentes lois analytiques pour calculer les dimensions géométriques, le circuit magnétique et les paramètres électriques des différentes parties du moteur tout en respectant les critères techniques exigés.

Le chapitre suivant sera consacré au calcul des pertes et à la détermination des performances d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil en utilisant un circuit électrique équivalent.

Chapitre III

Calcul des pertes et détermination des performances de la machine à cage d'écureuil

Chapitre III : Calcul des pertes et détermination des performances de la machine à cage d'écureuil

III.1.Introduction

Dans une machine électrique, la transformation de l'énergie est toujours inévitablement accompagnée par des pertes dans les différentes parties de celle - ci, l'évolution exacte de ces pertes est très difficile notamment pour les machines asynchrones. Les sources principales de ces pertes sont le champ magnétique et le courant électrique, qui sont distribués d'une manière très complexe de telle sorte que ces sources peuvent souvent paraître ombreuses, pour palier à ce problème, les ingénieurs utilisent des formules semi-empiriques pour le calcul des machines électriques.

III.2.Calcul des pertes

On peut distinguer quatre groupes de pertes :

- ❖ Pertes principale dans le fer.
- ❖ Pertes électriques dans le cuivre et l'aluminium.
- ❖ Pertes mécaniques.
- ❖ Pertes supplémentaires.

III.2.1.Les pertes principale dans fer

Les pertes principales dans le fer sont les pertes par hystérésis, dues au déphasage entre le courant magnétique et le flux fondamentale, 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 statoriques sont les parties les plus touchées par ces pertes.les pertes magnétiques dans le rotor sont négligeables à cause de la faible fréquence de flux.

➤ Les pertes dans les dents

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

$$P_{fz1} = 1.7 \cdot P_{1/50} \cdot B_{z1max}^2 \cdot G_{z1} \quad (III.1)$$

$$P_{1/50} = 2.5 \quad [W.Kg^{-1}] \quad \text{pour l'acier 2013}$$

$$G_{z1} = 7.8 \cdot 10^{-6} \cdot L_i \cdot K_{fer} \cdot [hz1 \cdot \pi \cdot (D_1 + h_{z1}) - S_{enc1} \cdot Z_1] \quad (III.2)$$

Avec :

G_{z1} : Poids des dents statorique en [Kg].

Z_1 : Nombre des encoches au stator.

Chapitre III : Calcul des pertes et détermination des performances de la machine à cage d'écureuil

P_{fz1} : Pertes dans les dents en [W].

➤ Les pertes dans la culasse statorique

Les pertes dans la culasse statoriques sont proportionnelles au carré de l'induction dans la culasse.

$$P_{c1} = 1.7 \cdot P_{(1/50)} \cdot G_{c1} \cdot B_{c1}^2 \quad (\text{III.3})$$

$$G_{c1} = 7.8 \cdot 10^{-6} \cdot L_i \cdot K_{fer} \cdot h_{c1} \cdot \pi \cdot (D_{ext} - h_{c1}) \quad (\text{III.4})$$

Avec :

G_{c1} : Poids de la culasse statorique en [kg].

P_{c1} : pertes dans la culasse statorique en [W].

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

$$P_{fer} = P_{c1} + P_{fz1} \quad (\text{III.5})$$

Avec :

P_{fer} : Pertes dans le fer en [W].

III.2.2. Pertes électriques dans le cuivre et dans l'aluminium :

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

➤ Pertes joules statorique :

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

$$P_{j1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_{n1}^2 \quad (\text{III.6})$$

Avec :

P_{j1} : Pertes joules en [W].

m_1 : Nombre de phase statoriques.

R_1 : Resistances d'une phase de l'enroulement statoriques en [Ω].

I_{n1}^2 : Courant dans une phase statoriques en [A].

➤ Pertes joules rotorique :

Ce sont les pertes dans l'aluminium, elles sont données par la formule suivante :

$$P_{j2} = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 \quad (\text{III.7})$$

Chapitre III : Calcul des pertes et détermination des performances de la machine à cage d'écureuil

Avec :

P_{j2} : Pertes joules en [W].

R_2 : Résistance d'une phase rotorique en [Ω]

I_2 : Courant dans la barre en [A] .

m_2 : Nombre de phase rotorique.

III.2.3.pertes mécanique :

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 :

$$P_{mec} = K_t \cdot (N \cdot 10^{-3})^2 \cdot (D_{ext} \cdot 10^{-2})^4 \quad (III.8)$$

Avec :

$P_{méc}$: Pertes mécaniques en [W].

k_t : Facture de majoration.

$$K_t = 1.3 \cdot (1 - D_{ext} \cdot 10^{-3})$$

$$K_t = 1$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{pour } 2P = 2 \\ \text{pour } 2P > 2 \end{array} \right\} \quad (III.9)$$

III.2.4.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 :

$$P_{sup} = 0.005 \cdot \frac{P_n \cdot 10^3}{\eta_n} \quad (III.10)$$

Avec :

P_{sup} : Pertes supplémentaires en [W].

P_n : Puissance nominale de la machine en [W].

η_n : Rendement préliminaire.

III.2.5. Pertes totales

Les pertes totales sont la somme de toutes les pertes définies précédemment. Elles sont données par la relation suivante:

$$P_{tot} = P_{fre} + P_{j1} + P_{j2} + P_{mec} + P_{sup} \quad (III.11)$$

Chapitre III : Calcul des pertes et détermination des performances de la machine à cage d'écureuil

Avec :

P_{tot} : Pertes totales en [W].

III.2.6. Rendement de la machine

Le rendement de la machine est le rapport de la puissance utile à la puissance absorbée, il est donné par la relation suivante :

$$\eta = \frac{P_n \cdot 10^3}{P_n \cdot 10^3 + P_{\text{tot}}} \quad (\text{III.12})$$

III.2.7. 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 [9] :

$$I_{0a} = \frac{P_{\text{fer}} + P_{\text{mec}} + P_{a10}}{m_1 \cdot U_{n1}} = \frac{P_{\text{fer}} + P_{\text{mec}} + R_1 \cdot m_1 \cdot (I_m)^2}{m_1 \cdot U_{n1}} \quad (\text{III.13})$$

Où :

$$R_m = \frac{x_m \cdot I_m}{I_{0a}} \quad (\text{III.14})$$

Avec :

I_m : Courant magnétisant [A].

x_m : Réactance magnétisante exprimée [Ω].

R_m : Résistance magnétisante [Ω].

I_{0a} : Courant actif à vide [A].

P_{a10} : Puissance absorbée à vide [W].

$R_1 \cdot m_1 \cdot (I_m)^2$: Les pertes joules à vide [W].

III.3. Calcul des performances du moteur

Dans cette partie de calcul, nous étudions les performances des moteurs, en utilisant une méthode analytique se basant sur le schéma équivalent de la machine asynchrone.

Chapitre III : Calcul des pertes et détermination des performances de la machine à cage d'écureuil

III.3.1. Schéma équivalent approché du moteur

Le schéma équivalent en T du moteur est un schéma conventionnel monophasé ramené au stator

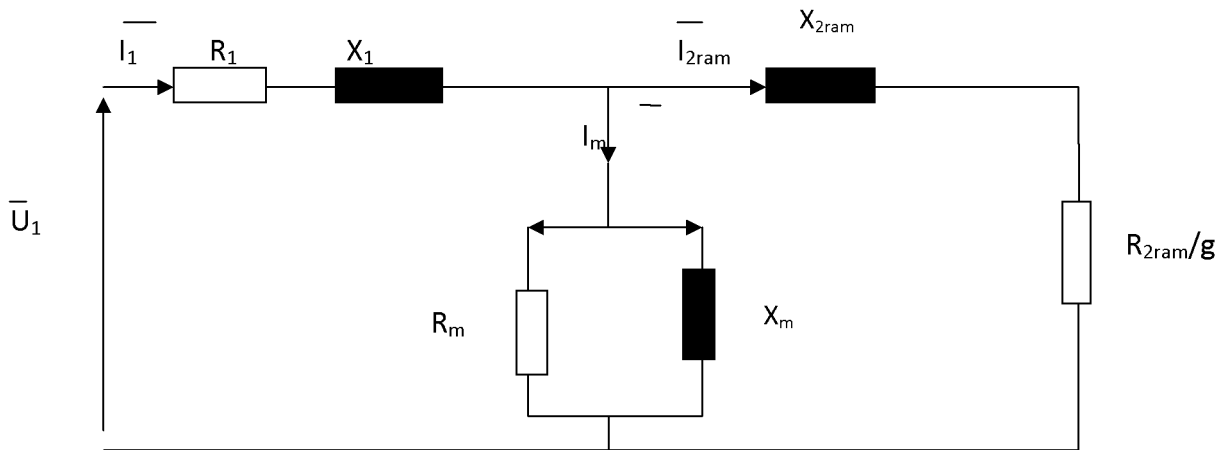


Fig III.1 : Schéma équivalent du rotor ramené au stator de la machine asynchrone

Avec :

\bar{U}_1 : Tension complexe d'une phase du réseau.

R_1 : Résistance statorique [Ω]

X_1 : Réactance de fuite du stator [Ω]

X_{2ram} : réactance de fuite du rotor ramenée au stator [Ω]

R_{2ram} : Résistance rotorique ramenée au stator [Ω]

R_m : Résistance magnétisante [Ω]

X_m : réactance magnétique [Ω]

\bar{I}_1 : Courant statorique en complexe.

E_0 : La F.e.m à vide en [V].

\bar{I}_{2ram} : Courant d'une phase rotorique ramené au stator en complexe.

Chapitre III : Calcul des pertes et détermination des performances de la machine à cage d'écureuil

et :

$$\Omega_s = \frac{2.\pi.N}{60} \quad (\text{III.16})$$

Ω_s : Vitesse du synchronisme en [rd/s].

N : Vitesse du synchronisme en [tr/min].

III.3.2. Détermination des performances du moteur

A partir du schéma équivalent ci dessous on déterminant :

- L'impédance statorique \bar{Z}_1

$$\bar{Z}_1 = R_1 + j.X_1 \quad (\text{III.17})$$

- L'impédance de magnétisation \bar{Z}_0

On à :

$$B_0 = -\frac{1}{x_m} \quad (\text{III.18})$$

$$G_0 = \frac{1}{R_m} \quad (\text{III.19})$$

$$Y_0 = G_0 + j. B_0 \quad (\text{III.20})$$

Donc on aura :

$$\bar{Z}_0 = \frac{1}{Y_0} \quad (\text{III.21})$$

- Le courant à vide en complexe

$$\bar{I}_0 = \frac{U_{nom}}{Z_1 + Z_0} \quad (\text{III.22})$$

- La F.e.m à vide du moteur en [V]

$$E_0 = U_{nom} - (I_0 \cdot |\bar{Z}_1|) \quad (\text{III.23})$$

- Les pertes fer en [w]

$$P_{fer} = 3 \cdot \frac{E_0^2}{R_m} \quad (\text{III.24})$$

En faisant varier le glissement on obtient

- La fréquence rotorique en [Hz].

$$f_r = f_s.g \quad (\text{III.25})$$

Chapitre III : Calcul des pertes et détermination des performances de la machine à cage d'écureuil

- La vitesse rotorique en [rd/s]

$$\Omega_r = \Omega_s (1-g) \quad (\text{III.26})$$

- La résistance du rotor ramené au stator

$$R_{2s} = R_{2ram} / g \quad (\text{III.27})$$

- L'impédance rotorique en complexe

$$\overline{Z}_2 = R_{2s} + j \cdot X_{2ram} \quad (\text{III.28})$$

- L'impédance totale du schéma équivalent en complexe

$$\overline{Z}_{eq} = \frac{\overline{z}_1 \cdot \overline{z}_0 + \overline{z}_1 \cdot \overline{z}_2 + \overline{z}_2 \cdot \overline{z}_0}{\overline{z}_2 \cdot \overline{z}_0} \quad (\text{III.29})$$

- Le courant statorique absorbé en complexe

$$\overline{I}_1 = \frac{U_{nom}}{\overline{Z}_{eq}} \quad (\text{III.30})$$

- Le courant rotorique en complexe

$$\overline{I}_2 = \frac{\overline{I}_1}{\overline{Z}_2 + \overline{Z}_0} \cdot \overline{Z}_0 \quad (\text{III.31})$$

- Pertes joule statorique en [W]

$$P_{j1} = 3 \cdot R_1 \cdot I_1^2 \quad (\text{III.32})$$

- Pertes joule rotorique en [W]

$$P_{j2} = 3 \cdot R_{2ram} \cdot I_2^2 \quad (\text{III.33})$$

- Pertes mécanique en [W]

$$P_{tméc} = (K_t \cdot (N \cdot (1-g)) \cdot 10^{-3})^2 \cdot (D_{ext} \cdot 10^{-2})^4 \quad (\text{III.34})$$

- La puissance transmise au rotor en [W]

$$P_{em} = \frac{P_{j2}}{g} \quad (\text{III.35})$$

- La puissance mécanique en [W]

$$P_{méc} = P_{em} \cdot (1-g) \quad (\text{III.36})$$

- La puissance absorbé en [W]

$$P_a = (P_{fer} + P_{j1} + P_e) \quad (\text{III.37})$$

- Le facteur de puissance de la machine

$$\cos \varphi_1 = \frac{\text{real}(\overline{z}_{eq})}{|\overline{Z}_{eq}|} \quad (\text{III.38})$$

- La puissance utile en [W]

$$P_u = P_{méc} - P_{tméc} \quad (\text{III.39})$$

Chapitre III : Calcul des pertes et détermination des performances de la machine à cage d'écureuil

- Le couple électromagnétique en [N.m]

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_s} \quad (III.40)$$

- Le couple utile en [N.m]

$$C_u = \frac{P_u}{\Omega_s} \quad (III.41)$$

- Le rendement de la machine

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \quad (III.42)$$

Remarque

On peut aussi classer les diverses pertes qui apparaissent dans un moteur asynchrone à cage en charge et à vide, comme le montre la figure III.2 ci-dessous

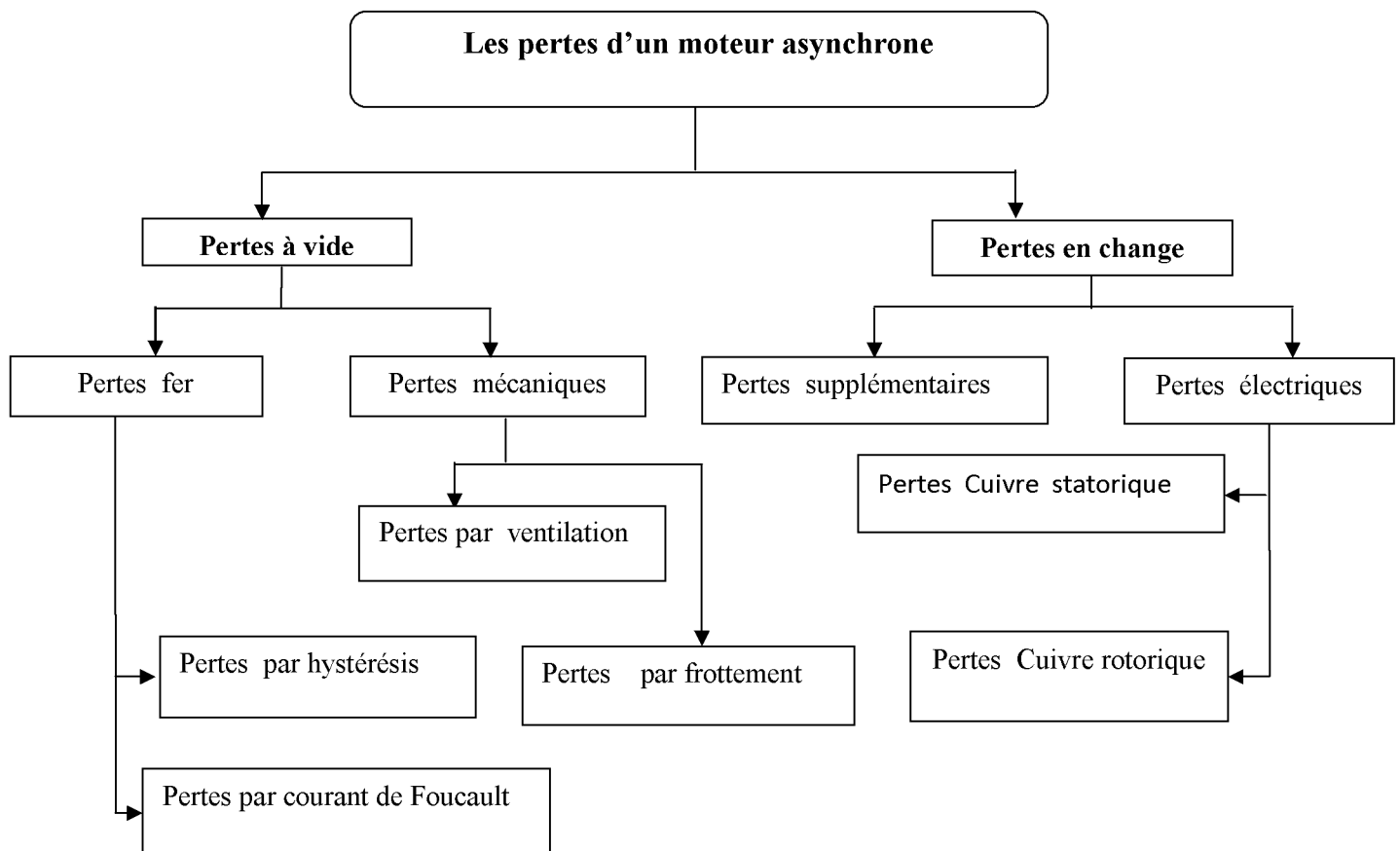


Fig III.2 : Différentes pertes dans un moteur asynchrone à cage.

Chapitre III : Calcul des pertes et détermination des performances de la machine à cage d'écureuil

III.3.Conclusion

Cette partie du travail est réservée au calcul des pertes et la détermination des performances du moteur en se basant sur le schéma équivalent de la machine asynchrone. Dans le chapitre suivant, nous allons effectuer un dimensionnement d'un moteur asynchrone de puissance 4kW en appliquant un code de calcul développé sous environnement MATLAB et en utilisant un logiciel appelé Speed PC-imd qui a été mis à notre disposition par l'entreprise industrielle Electro-Industries d'Azazga.

Chapitre IV

**Application au calcul
d'un moteur de 4kW**

Partie I

Programme de calcul d'une machine asynchrone de 4kW

IV.I.1.Introduction

L'introduction d'un outil informatique dans le calcul et dans la visualisation des machines asynchrones, revêt une grande importance eu égard aux énormes avantages qu'il présente ainsi que la rapidité de calcul.

Le but de cette partie du chapitre IV, est de décrire le fonctionnement global du programme développé sous environnement MATLAB en se basant sur un organigramme général qui décrit les différentes étapes de dimensionnement, ensuite, nous allons l'appliquer au calcul d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil. En suivant un cahier de charge donné comme suit :

- ✓ Puissance nominale $P_{nom}=4KW$.
- ✓ Tension nominale du réseau d'alimentation $U_{nom}=220V$.
- ✓ Nombre de paires de pôles $P=2$.
- ✓ Fréquence du réseau d'alimentation $f=50HZ$.
- ✓ Rendement nominal $\eta_{nom}=0.83$
- ✓ Facteur de puissance nominale $\cos\varphi=0.79$

IV.I.2.Description du programme

Dans un premier temps, nous allons déterminer les dimensions principales, pour cela il faut introduire les données du cahier de charge du moteur qui représente principalement: la puissance nominale, la tension nominale et la fréquence d'alimentation, le rendement et le facteur de puissance nominal. Après le choix en fonction des données du cahier de charge, la hauteur d'axe (h) normalisée, le diamètre extérieur D_{ext} et intérieur D_{int} , la longueur virtuelle L_i sera calculée. Après l'introduction de certaines données et coefficients qui correspondent au moteur choisi, le programme va afficher les dimensions des feuilles statorique et rotorique et le circuit magnétique (induction, champ, chute de potentiel magnétique dans les dents, culasse statorique et rotorique, et aussi au niveau de l'entrefer).

Il faut d'abord choisir la température de fonctionnement pour déterminer tous les paramètres électriques statorique (R_1 et X_1), les paramètres rotorique (R_2 et X_2), les grandeurs rotorique ramenées au stator et aussi les paramètres de la branche magnétisante (R_m et X_m). Tous ces paramètres seront aussi calculés au démarrage.

A partir du schéma équivalent du rotor ramené au stator (schéma en T), on calcule les performances du moteur qui représente principalement les allures du courant absorbée, puissance absorbée, du rendement, de la puissance électromagnétique, du couple électromagnétique et de la puissance utile, pour différentes valeurs de glissement.

IV.I.3. Organigrammes

Dans l'organigramme général et l'organigramme détaillé suivants, on décrira les étapes essentielles à suivre pour faire un calcul de dimensionnement du moteur asynchrone qui répond aux exigences du cahier de charge :

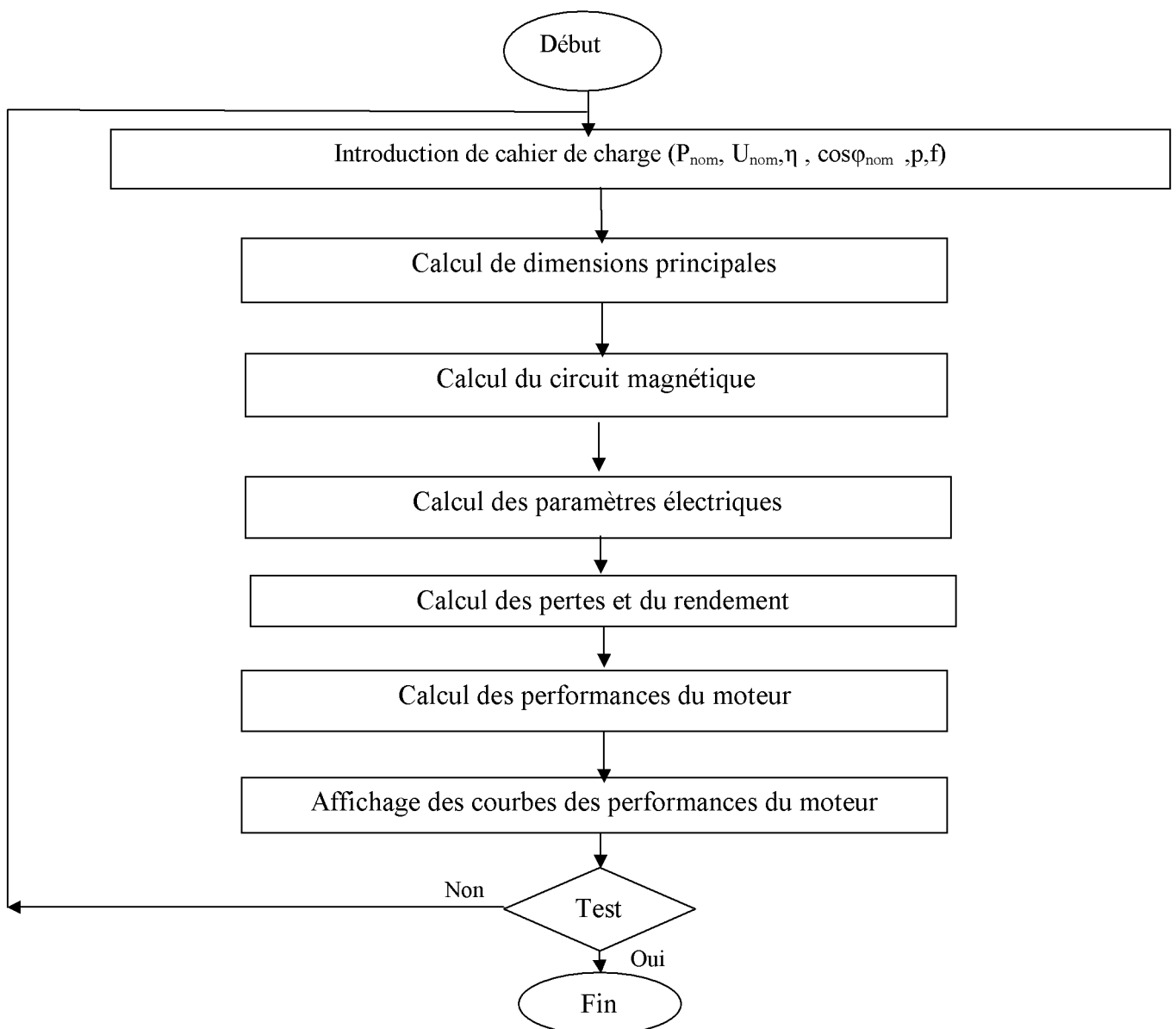
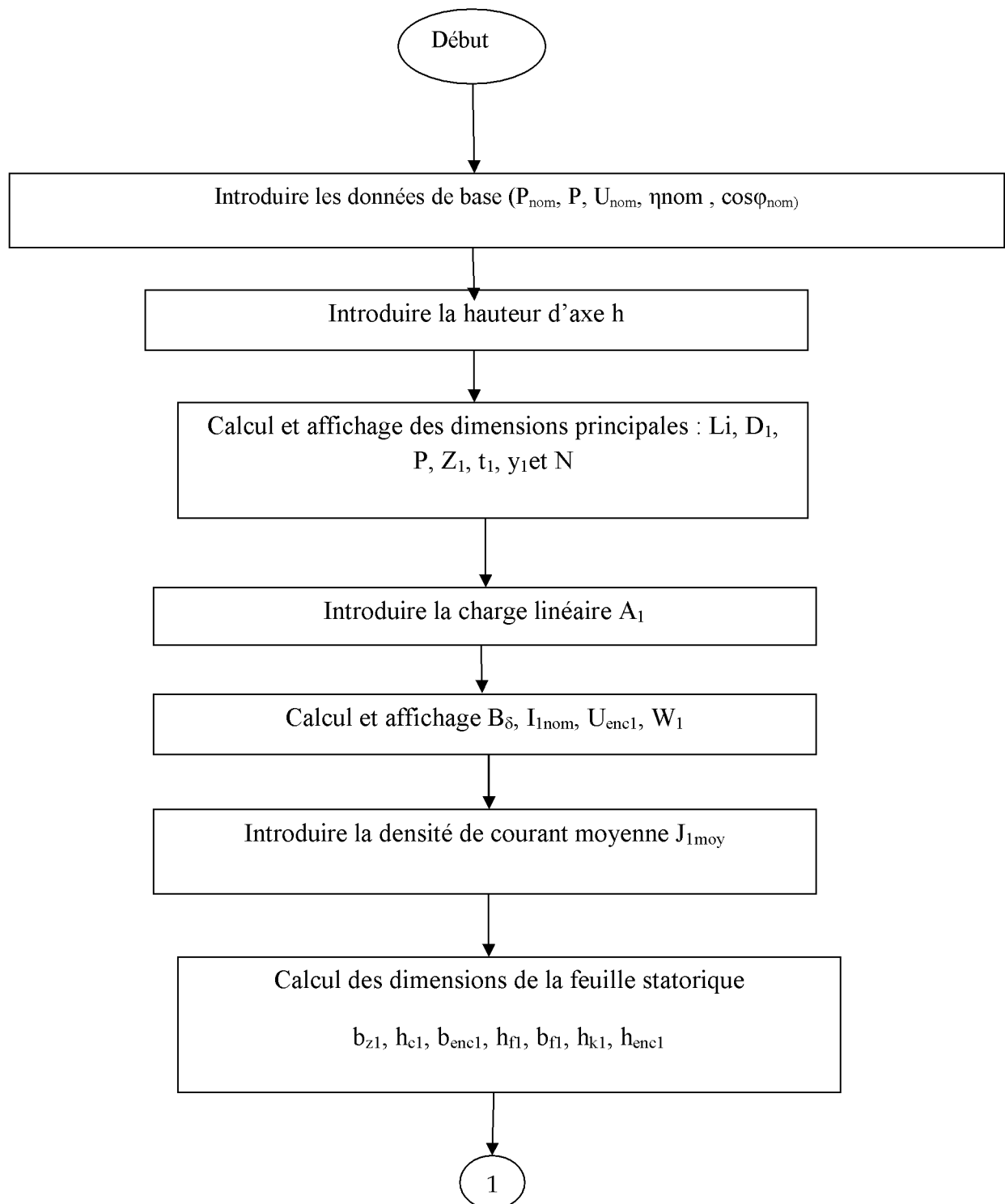
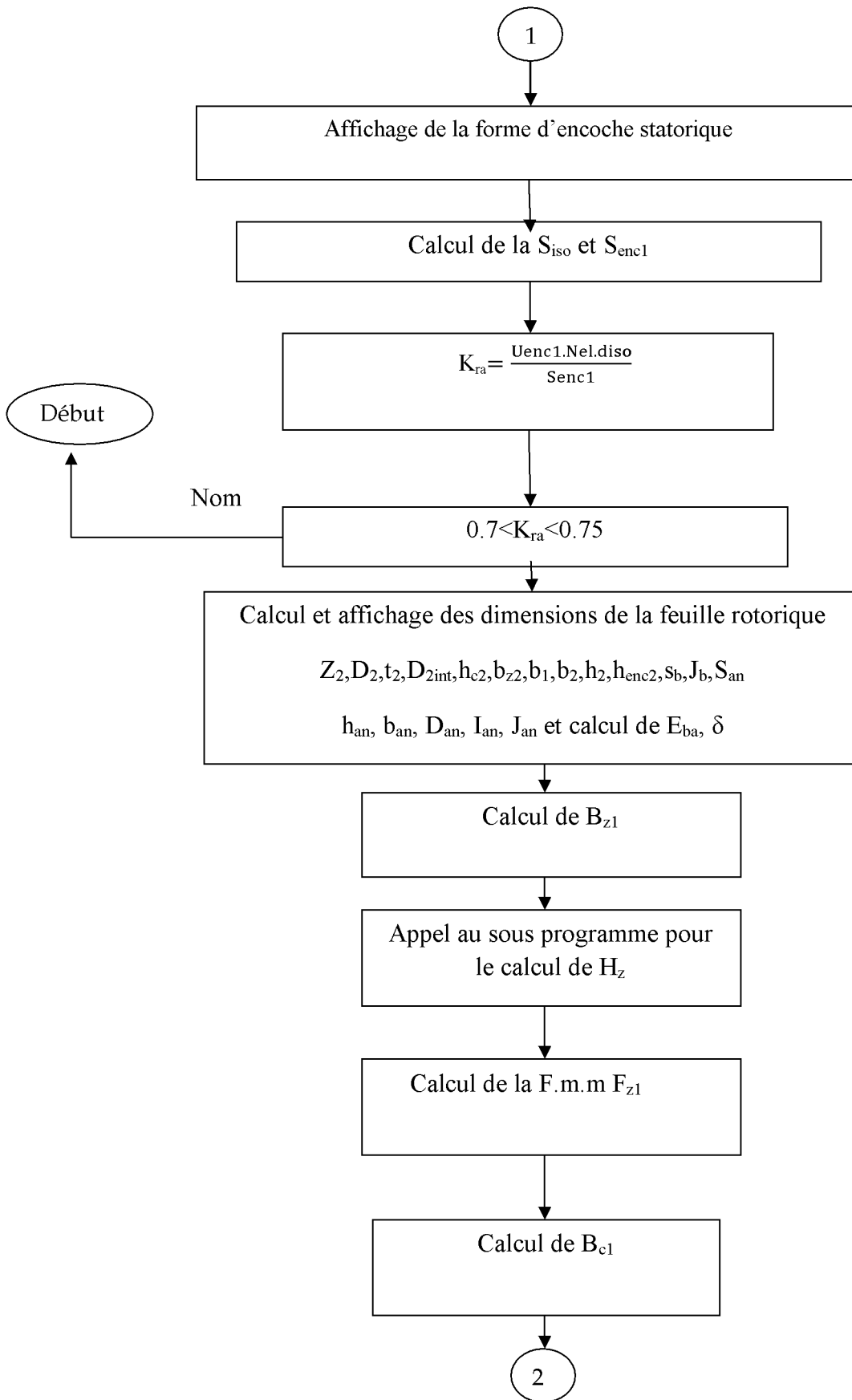
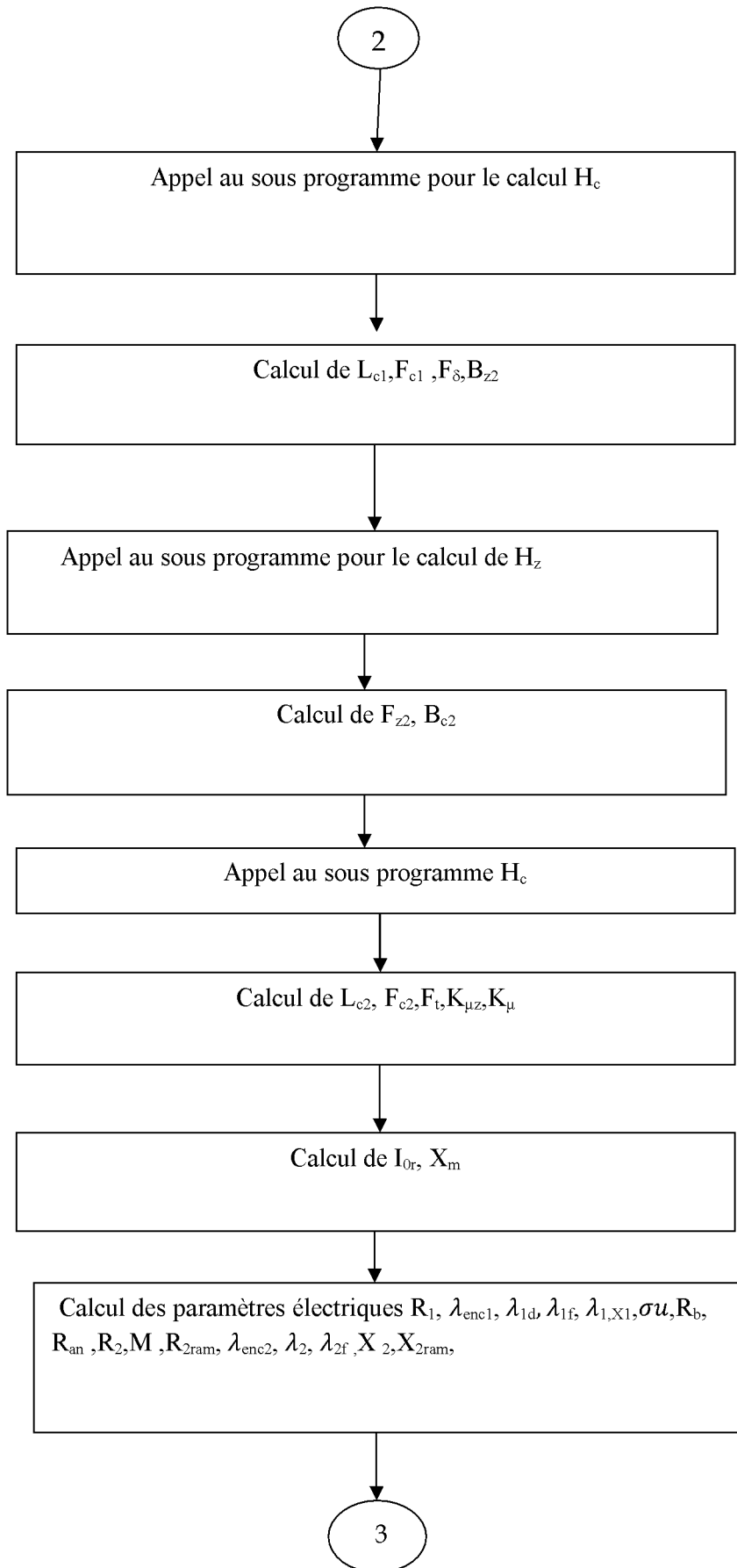


Figure .IV.1 : Organigramme général du programme

IV.1.4.Organigramme détaillé







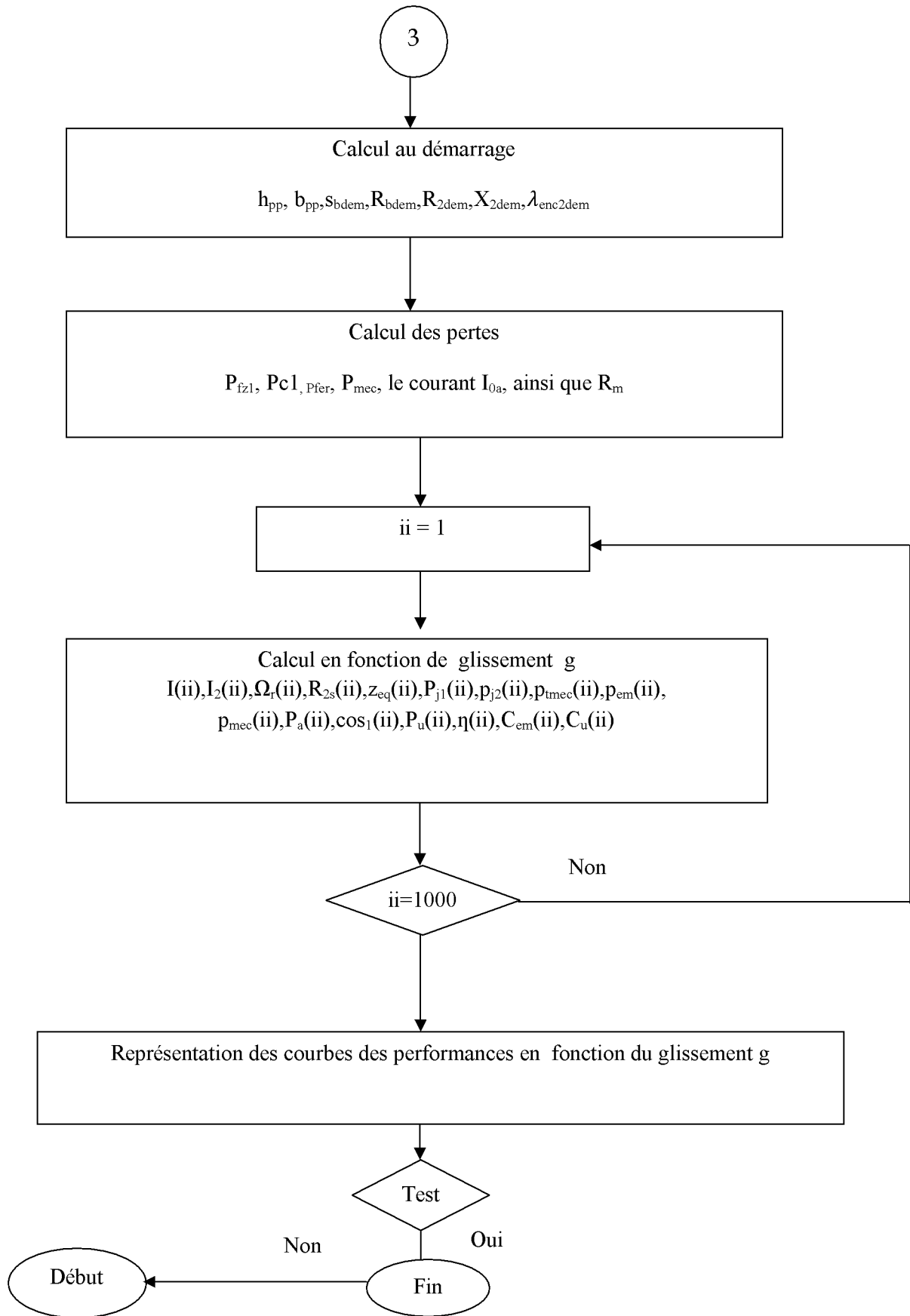


Figure IV.2 : Organigramme détaillé du programme

IV.I.5. Résultats de simulation par le programme développée

Après simulation en utilisant le programme de calcul développé, nous avons obtenus les résultats qui sont donnés par les tableaux de IV.1 à IV.10 suivants :

Tableau IV.1 : Dimensions principales du stator

Composante	Valeur	Unité
Nombre de phase m_1	3	–
Diamètre extérieur D_{ext}	168	mm
Diamètre intérieur D_{int}	109.24	mm
Longueur virtuelle de l'induit L_i	146.4603	mm
Facteur de géométrie de la machine λ	1.34	–
Pas polaire ζ	85.7969	mm
Puissance électromagnétique P_e	5.9173	W
Charge linéaire A_1	26000	A/mm
Pas dentaire t_1	9.533	mm
Nombre d'encoches Z_1	36	–
Densité de courant J_1	6.5	A/mm ²
L'induction dans l'entrefer B_δ	0.78155	T
Pas d'enroulement Y_1	9	mm
Nombre d'encoches par pôle et par phase q_1	3	–
Rapport de raccourcissement β	1	–

Tableau IV.2 : Enroulement statorique

Composant	Valeur	Unité
Courant nominal dans une phase I_{1nom}	9.243	A
Nombre de conducteur effectifs U_{enc}	27	–
Nombre de spires par phase W_1	162	–
Section effective d'un conducteur S_{eff}	1.422	mm ²
Diamètre nu d'un conducteur D_{nu}	1.320	mm
Diamètre avec isolation d'un conducteur D_{iso}	1.405	mm
Nombre de voies parallèle a_2	1	–

Tableau IV.3. : Dimensionnement de la feuille statorique

Composant	Valeur	Unité
Larguer de la dent b_{z1}	4.0219	mm
Hauteur du dos h_{c1}	13.6167	mm
Larguer minimale de l'encoche b_{enc1}	5.7862	mm
Larguer maximale de l'encoche b_{enc2}	8.2623	mm
Hauteur de la dent h_{z1}	15.7633	mm
Hauteur de l'encoche h_{enc1}	11.9322	mm
Hauteur de la clavette h_{k1}	2.6312	mm
Ouverture de l'encoche b_{f1}	3	mm
Section occupée par les conducteurs S_{enc1}	73.5106	mm ²
Section occupée par l'isolation S_{iso}	10.3045	mm ²
Coefficient de remplissage K_{ra}	0.72505	–
Hauteur de la fente h_{f1}	1.2	mm

Tableau IV.4 : Dimensions de la feuille rotorique

Composant	Valeur	Unité
Nombre d'encoche Z_2	28	–
Nombre de phase m_2	28	–
Diamètre extérieur D_2	108.56	mm
Pas dentaire t_2	12.1804	mm
Force électromotrice à vide dans une barre E_{ba}	2.0587	Kv
Courant dans la barre I_2	270.0522	A
Hauteur de la dent h_{z2}	18.1875	mm
Larguer minimale de l'encoche b_1	6.2102	mm
Larguer maximale de l'encoche b_2	7.7799	mm
Hauteur de la culasse h_{c2}	18.7229	mm
Larguer de la dent b_{z2}	5.1388	mm
Diamètre intérieur D_{2int}	34.7392	mm
L'entrefer δ	0.346	–
Hauteur de l'encoche h_{enc2}	17.5875	mm
Larguer de la fente b_{f2}	1.25	mm
Section de la barre S_b	113.0085	mm ²
Densité de courant J_b	2.3897	A/mm ²

Tableau IV.5 : Les dimensions de l'anneau

Composant	Valeur	Unité
Section de l'anneau S_{an}	316.4237	mm ²
Hauteur de l'anneau h_{an}	21.825	mm
Larguer de l'anneau b_{an}	14.4982	mm
Diamètre de l'anneau D_{an}	86.735	mm
Densité de l'anneau J_{an}	1.9177	A/mm ²
Courant dans l'anneau I_{an}	606.8018	A
Coefficient de réduction K_{red}	0.44504	–

Tableau IV.6 : Les paramètres électrique statorique et rotorique

Composant	Valeur	Unité
Resistance active d'une phase statorique R_1	1.8045	Ω
Réactance de fuite totale du stator X_1	2.7784	Ω
Résistance active de la barre R_b	$5.7087 \cdot 10^{-5}$	Ω
Résistance active de l'anneau R_{an}	$2.7094 \cdot 10^{-6}$	Ω
Resistance de l'anneau ramenée a la barre R_{an-ram}	$1.368 \cdot 10^{-5}$	Ω
Resistance active d'une phase rotorique R_2	$7.0766 \cdot 10^{-5}$	Ω
Resistance active de la cage rotorique ramenée au stator R_{2ram}	0.74081	Ω
Coefficient de réduction de la cage rotorique ramenée vers le stator M	10468.3947	–
réactance de fuite globale X_2	$2.8659 \cdot 10^{-4}$	Ω
Réactance du rotor ramenée au stator X_{2ram}	3.0002	Ω

Tableau IV.7 : Les paramètres du circuit magnétique statorique et rotorique

Composant	Valeur	Unité
La F.M.M dans les dents statorique F_{z1}	38.3453	A
Induction dans la culasse du stator B_{c1}	1.65	T
Induction dans les dents du stator B_{z1}	1.95	T
La F.M.M dans la culasse statorique F_{c1}	114.7048	A
La F.M.M dans l'entrefer F_{δ}	348.1039	A
Coefficient de Carter K_{δ}	1.2686	–
La F.M.M dans les dents rotorique F_{z2}	36.6722	A
Induction dans la culasse du rotor B_{c2}	1.2	T
Induction dans les dents du rotor B_{z2}	1.95	T
La F.M.M dans la culasse rotorique F_{c2}	21.2296	A
La F.M.M totale à vide F_i	982.1772	A
Coefficient de saturation des dents $K_{\mu z}$	1.2155	–
Coefficient de saturation de la machine K_{μ}	1.4108	–
Courant magnétisant I_m	4.6791	A
Réactance de magnétisation X_m	45.607	Ω
Coefficient de dispersion magnétique du stator σ_m	0.060921	–
La force électromotrice à vide E_0	207.367	V
L'intensité du champ dans la culasse statorique H_{c1}	946	A/m
Longueur moyenne du parcours de la ligne du champ dans la culasse statorique L_{c1}	121.25	mm
L'intensité du champ dans la culasse statorique H_{c2}	262	A/m
Longueur moyenne du parcours de la ligne du champ dans la culasse statorique L_{c2}	75.4169	mm
Resistance de magnétisation R_m	500.4683	Ω

Tableau IV.8 : Les paramètres au démarrage

Composant	Valeur	Unité
La profondeur de pénétration du courant h_{pp}	17.5875	mm
Larguer à la limite de pénétration b_{pp}	8.3563	mm
Section de la barre au démarrage S_{b-dem}	120.6242	mm ²
Resistance de la barre au démarrage R_{b-dem}	5.3483.10 ⁻⁵	Ω
Resistance active de la barre rotorique au démarrage R_{2dem}	10.3802.10 ⁻⁵	Ω
Resistance de la cage au démarrage $R_{2dem-ram}$	0.74081	Ω
Réactance de fuite au démarrage X_{2dem}	2.8659.10 ⁻⁴	Ω
Réactance de fuite au démarrage ramenée au stator $X_{2dem-ram}$	3.0002	Ω
Coefficient du déplacement K_{dep}	0.93686	–

Tableau IV.9: Les pertes de la machine

Composante	Valeur	Unité
Les pertes fer de la machine P_{fer}	145.0048	W
Les pertes joules statorique P_{j1}	462.4918	W
Les pertes joules rotorique P_{j2}	144.5034	W
Les pertes mécaniques P_{mec}	17.9233	W
Les pertes supplémentaires P_{sup}	24.0963	W
Les pertes totales P_{tot}	794.0196	W
le rendement η	0.8343	-
Le courant magnétisant active I_{0a}	4.264	A

Tableau IV.10 : Les performances du moteur asynchrone

Composant	Valeur	Unité
Glissement g	0.035	-
Rendement η	83	%
Couple nominal C_n	30.5	N.m
Couple maximal C_{max}	54.66	N.m
Facteur de puissance $\cos\phi$	0.8366	-
Vitesse de rotation N	1447	tr/min

IV.I.6.Caractéristiques obtenue par le schéma équivalent

Les allures donnant les caractéristiques et les performances du moteur en utilisant le schéma électrique équivalent sont illustrées dans les figures IV.3 à IV.8. Ces allures représentent respectivement, le courant absorbé, le facteur de puissance, le rendement, le couple électromagnétique, la puissance utile en fonction de glissement ainsi que le couple électromagnétique en fonction de la vitesse.

À partir de la figure IV.3, on voit bien qu'il y'a un fort appel de courant lors du démarrage du moteur, il est d'environ 36 A qui correspond à 3.89 fois le courant nominal. En faisant diminuer le glissement le courant absorbé diminue jusqu'à la valeur de 4.54 A qui correspond au courant à vide. On peut dire que le courant absorbé dépend de l'impédance du schéma équivalent qui dépend à son tour du glissement comme le montre la relation (III.30).

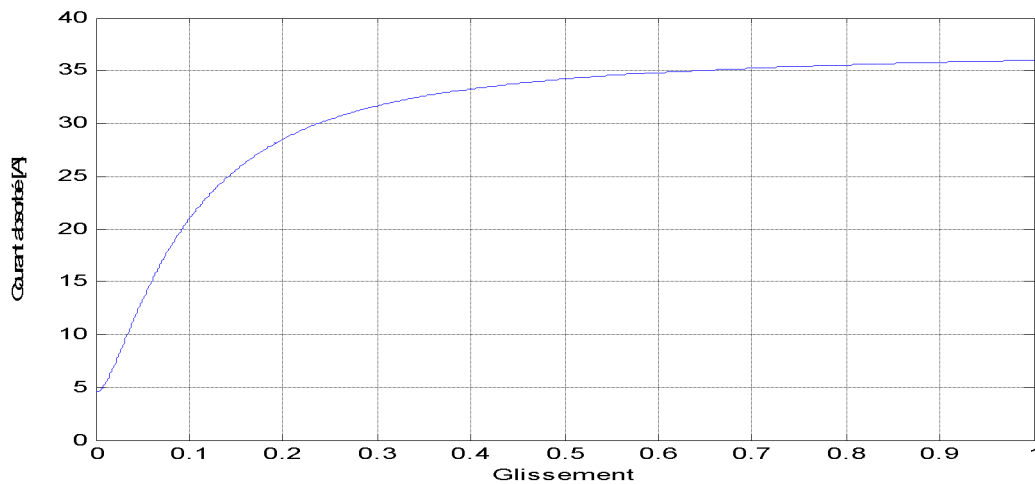


Fig. IV.3. Courant absorbé en fonction du glissement

La figure (IV.4) montre l'allure du facteur de puissance en fonction du glissement, on remarque qu'il atteint une valeur maximale de 0.83. Le facteur de puissance nominal correspond à 0.8151 pour un glissement nominal de 0.035.

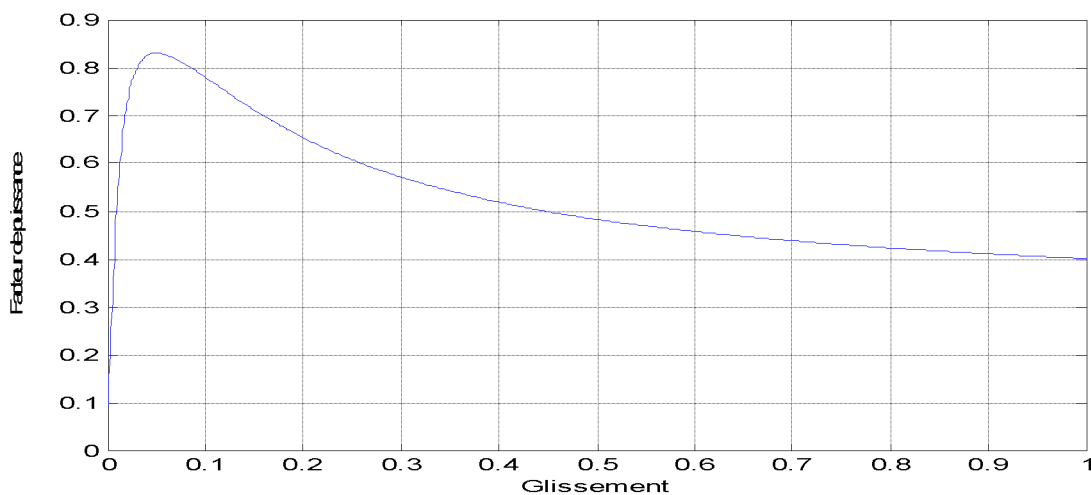


Fig. IV.4. Facteur de puissance en fonction du glissement

La figure (IV.5) illustre l'allure de la puissance absorbée en fonction du glissement. En fonctionnement à vide, la puissance absorbée est de 536.67 W qui correspond aux pertes totales à vide, donc toute la puissance lors du fonctionnement à vide est perdue dans la machine, c'est ce qui est montré dans la figure(IV.6) où le rendement est nul.

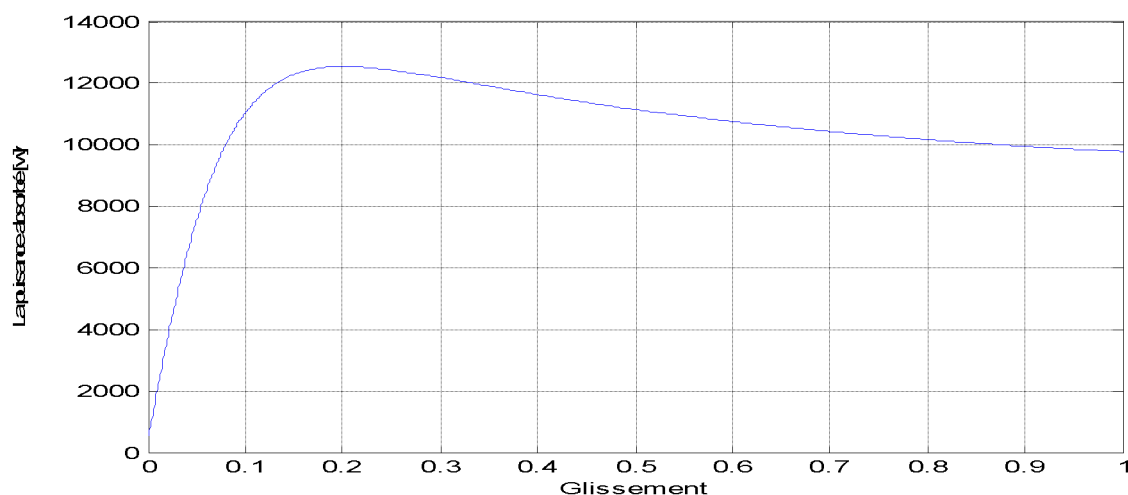


Fig. IV.5. Puissance absorbée en fonction du glissement

La figure (IV.6) donne l'allure du rendement en fonction du glissement. Le rendement est nul à vide et aussi à rotor bloqué (pour les valeurs du glissement $g=0, g=1$). Il atteint des valeurs importantes au voisinage du fonctionnement nominal. La valeur maximale du rendement est de 0.836. Sa valeur nominale correspond à 0.8247 pour un glissement nominal de 0.035.

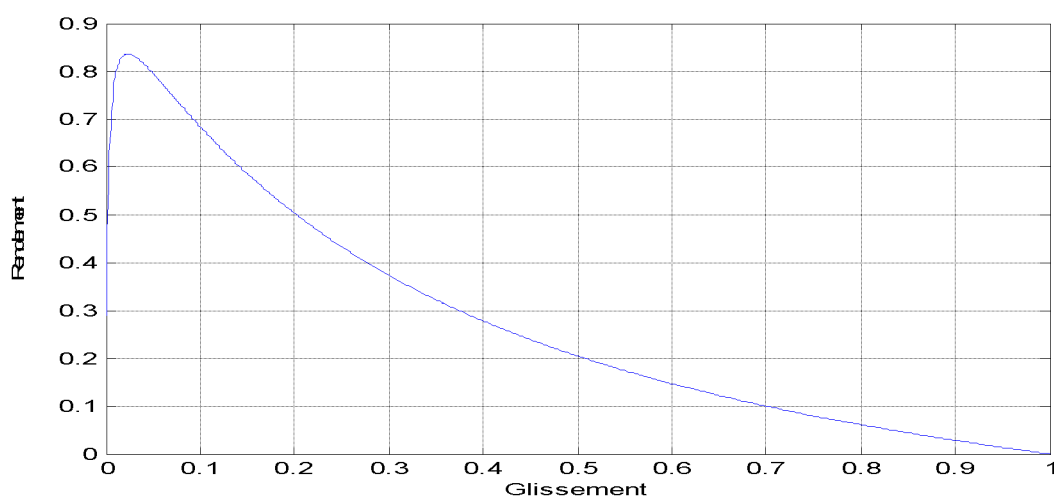


Fig. IV.6. Rendement en fonction du glissement

Les figures (IV.7) et(IV.8) montrent respectivement le couple électromagnétique et la puissance utile. Le couple électromagnétique est proportionnel à la puissance utile jusqu'à atteindre la valeur maximale qui est d'environ de 54.66 N.m pour un glissement $g=0.125$ puis il diminue progressivement jusqu'à l'arrêt ($g=0$) comme le montre la relation (III.39) et (III.40).

La courbe du couple électromagnétique en fonction du glissement donnée par la figure IV.7 et celle en fonction de la vitesse donnée par la figure IV.9 ont la même forme car la vitesse dépend du glissement.

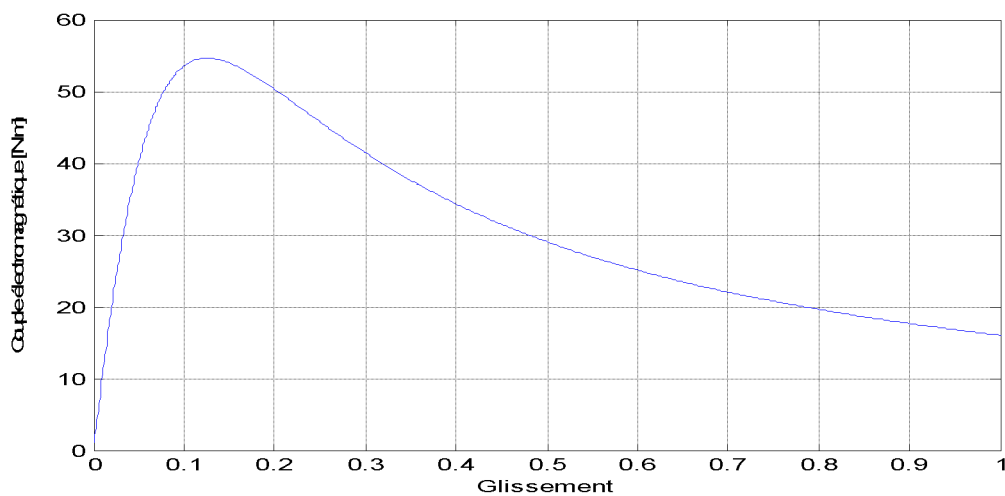


Fig. IV.7. Couple électromagnétique en fonction du glissement

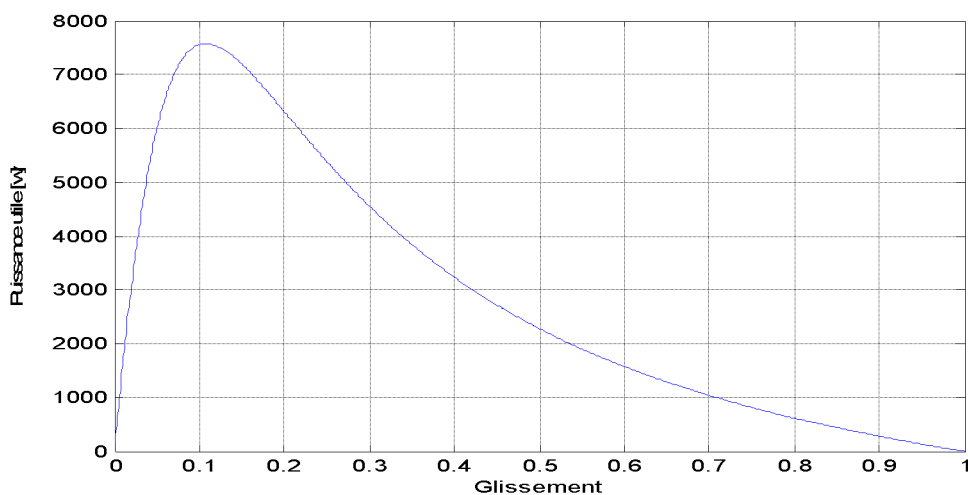


Fig. IV.8. Puissance utile en fonction du glissement

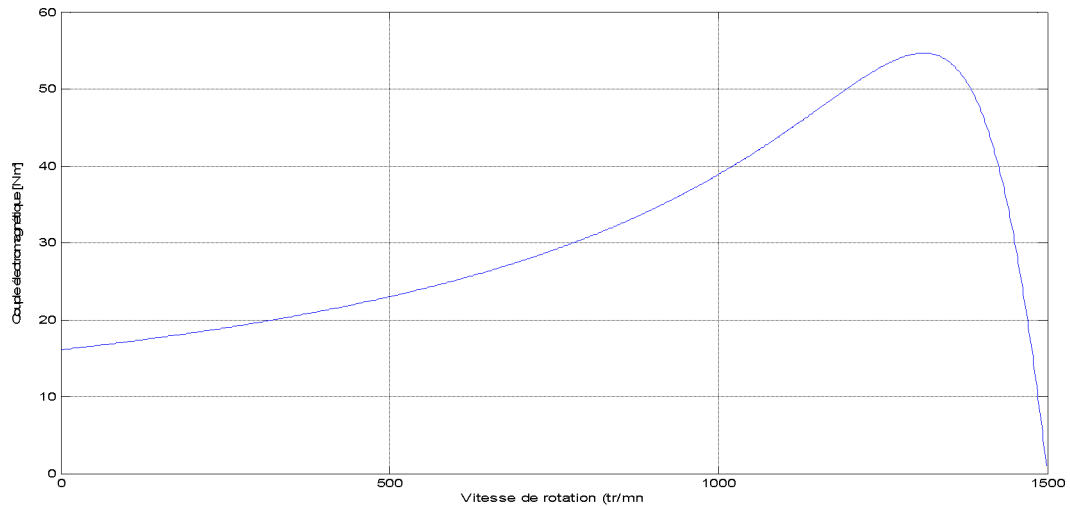


Fig. IV.9. Couple électromagnétique en fonction de la vitesse rotorique

IV.I.8. Conclusion

Le programme informatique que nous avons développé sous environnement MATLAB nous a permis de dimensionner le moteur asynchrone de 4 kW. Le dimensionnement a consisté à la détermination des différentes caractéristiques géométriques, électriques et magnétiques ainsi que l'évaluation de ses performances en utilisant le schéma électrique équivalent. Dans la partie suivante nous allons présenter les résultats obtenus après un calcul du moteur de 4kW en utilisant le logiciel Speed mis à notre disposition par l'entreprise Electro-Industries. Nous allons ensuite présenter une comparaison entre les résultats obtenus par le programme développé et ceux obtenus avec le logiciel Speed PC-imd.

Partie II

**Calcul du moteur de
4kW en
Utilisant le logiciel
Speed**

IV.II.1. Introduction

Speed PC-imd est un outil de dimensionnement de moteurs électriques le plus avancé sur le marché, il dispose de nombreuses bibliothèques permettant à l'utilisateur de définir la géométrie, le bobinage ainsi que la commande de la machine à modéliser [10]. De plus il permet de visualiser les caractéristiques telles que le couple, les courants, les pertes, le rendement.....

Grace à une bibliothèque complète (type de moteur, type d'encoche, type de barres, type de schéma de bobinage) un moteur peut être facilement et rapidement dimensionné à partir de son cahier de charge [10]. Le but de cette partie est de décrire brièvement le fonctionnement du logiciel Speed PC-imd puis la détermination des caractéristiques représentant les performances du moteur asynchrone 4kW. Enfin, une comparaison entre les résultats obtenus en utilisant ce logiciel et ceux obtenue avec le programme développé sera effectuée.

Actuellement les interfaces d'automation sont fournies dans **PC-imd, PC-bdc, PC-srd, PC-dcm, PC-wfc, PC-Ipm** .dans notre cas on s'intéressera à PC-imd.

IV.II.2. Définition de PC-imd

Le logiciel Speed PC-imd est destiné à la conception et le calcul de moteur à induction. il est basé sur la théorie classique du moteur à induction, avec quelques extensions de cette théorie développée par le laboratoire SPEED et ses associés. La conception à base de PC-imd est interactive et rapide.

IV.II.3. Utilisation de PC-imd

On peut utiliser PC-imd dans les cas suivants :

- ❖ Conception et étude des performances des machines à induction et leur commande
- ❖ Conception préliminaire
- ❖ Effectuer des calculs de conception pour des gammes entières de produits de moteur à induction.

IV.II.4. Les différentes étapes de PC_imd

IV.II.4.1. Outline Editor

Cette étape est consacrée au dimensionnement géométrique du moteur, en particulier la sélection transversale et la dimension axiale. Nous nous intéresserons au dimensionnement de la feuille statorique et rotorique.

IV.II.4.2. Dimensionnement du stator

Pour dimensionner la feuille statorique, il suffit de cliquer sur n'importe quel paramètre pour introduire sa valeur. Cette dernière est calculée en utilisant la méthode classique, les résultats sont illustrés par la figure IV.10 .

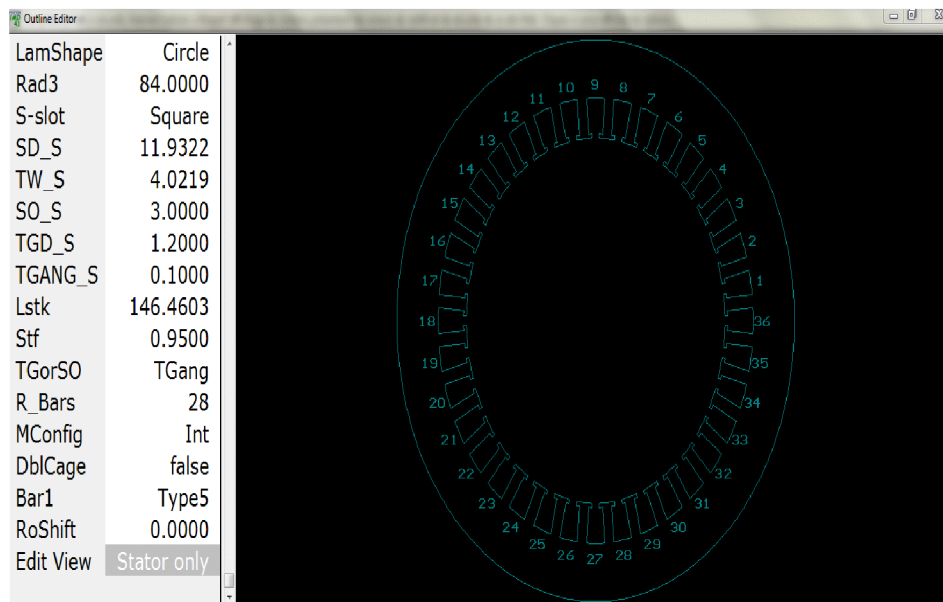


Fig. IV.10. Forme géométrique de la feuille statorique

IV.II.4.3. Dimensionnement de la feuille rotorique

Après avoir terminé la partie précédente on procède de la même manière que pour le stator, on clique sur « **le rotor only** » pour dimensionner la feuille rotorique, une interface graphique apparaît telle que représentée sur la figure IV.11.

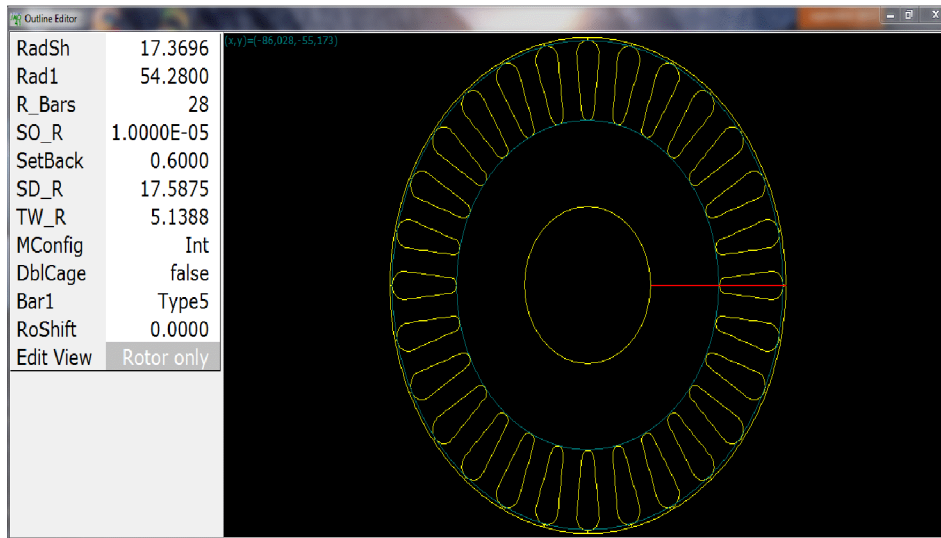


Fig. IV.11. Forme géométrique de la feuille rotorique

A la fin de ces deux étapes, on peut visualiser les deux feuilles statorique et rotoriques simultanément, en cliquant sur « **full moteur** » comme le montre la figure suivante :

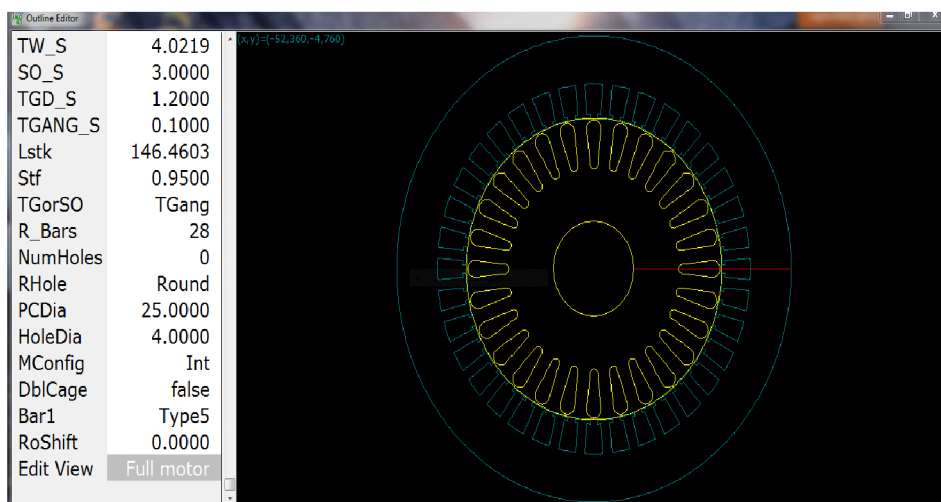


Fig. IV.12. Forme géométrique du moteur

IV.II.4.4. Template Editor, Ted

Dans le PC-imd on a de nombreux paramètres d'entrée, comme l'éditeur plan affiche uniquement les paramètres géométriques (dimensions), nous avons besoin alors d'un éditeur modèle **Template Editor** pour afficher les paramètres non géométriques.

Cette étape est composée de plusieurs parties : **Main, Winding, Rotor, Losses, Thermal, Test data, Simulation et Settings** ; chaque partie a ses propres paramètres.

Toutefois, on ne peut pas vérifier la validité des paramètres définis jusqu'à ce que l'analyse complète soit effectuée. Cela est fait dans le module **Analyse**. Le menu principal du Template editor est illustré sur la figure IV.13, le menu principal du Template editor.

Configuration and dimensions							
Connex	3-Ph Delt	Poles	4	Slots	36	MConfig	Int
Rad3	84.0000	Rad1	54.6200	R_Bars	28	Lstk	146.4603
Control							
Vs	380.0000	CalcMode	f/slip	TorqCalc	Load Pt	DoPart	false
Freq	50.0000	Slip	0.035	rpm	1435.5000	rpmS	1500.0000
PowrSh..	4000.0000	TorqSh..	0.0000	rpmNL	1500.0000		
Windings							
WdgType	ConcEqual	TC	27	PPaths	1		
Rotor							
PC1	50.0000	PCEndR	61.4200	Skew	0.0000	Bar1	Type5
Losses							
Wf0	70.0000	RPM0	1498.0000	NWFT	1.0000		
Temperatures							
TempCalc	Fixed	Ambient	20.0000				
T_wdg	68.0000	T_rtr	75.0000				

Fig. IV.13 : Interface principale de Template editor.

Cette interface est composée de plusieurs sous-interfaces, on prend quelques exemples :

- ✓ Winding paramètres : Cette sous interface est donnée par la figure IV.14 suivante

Winding Parameters						
Poles	4	Slots	36			CoilForm
Connex	3-Ph Delt	WdgType	ConcEqual	Throw	9	CPP
TC	27	NSH_1	2	PPaths	1	Ext
Wire_1	BareDia	WDia_1	1.0000	wb_1	0.3500	InsThk_1
Wire_2	None	WDia_2	0.3500	wb_2	0.3500	InsThk_2
Liner	0.2000	EndFill	0.5000	XET	1.0000	NSH_2
PC	100.0000	TCC	0.3930	WireDens	8890.0000	
Slot wedges						
TopStick	false	TwjWid	3.6000	TwjLeg	1.9500	TwjThk
PhsWid	3.0000	PhsLeg	3.4000	PhsThk	0.2000	
Magnetic wedges						
SWedge	NonMag	muWedge	1.0000			

Fig. IV.14 : Interface de paramètre d'enroulement.

IV.II.4.5. Winding Editor

PC-imd possède un éditeur spécialisé pour la visualisation et la configuration d'un enroulement du stator, cette partie est composée de plusieurs sous-interfaces : **One phase, All phases, MMF, Harmonics, WDG FACTORS**. On donnera l'exemple d'all phases dans la figure IV.15 suivante :

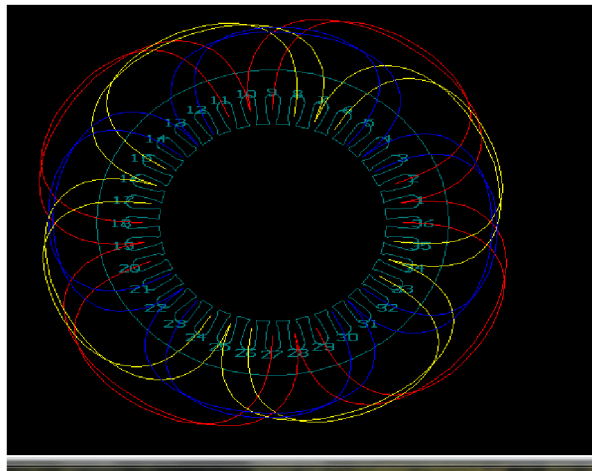


Fig. IV.15 : Schéma de bobinage des trois phases.

IV.II.4.6. Sélection des matériaux à partir de la banque de données

Le moteur que nous proposons de dimensionner présente une hauteur d'axe de 100mm avec 4 pôles, il est réalisé à base d'une tôle magnétique (M800650 A). Les caractéristiques de cette dernière doivent être insérées dans la banque de données du logiciel. Cette insertion se fait à travers différentes interfaces : **Discrétisation, Magnétisation, Losses, Mechanical,**

Electrical, Thermal. Un résumé est alors fourni automatiquement dans **Datasheet**. Notons que Speed possède une bibliothèque de matériaux prédéfinie que l'utilisateur peut directement exploiter.

Après avoir effectué toutes les étapes précédente on passe à l'analyse puis on déduit les résultats dans le bloque **design sheet**.

IV.II.4.7. Design sheet

La feuille de conception montre tous les paramètres de conception d'entrée et de rendement, et leurs unités appropriées. Cette partie est composée de plusieurs interfaces.

IV.II.4.7.1. DIMENSIONS : La figure IV.16 représente les dimensionnements de la feuille statorique et rotorique :



Fig. IV.16. Interface de dimensionnement

IV.II.5. Résultats de simulation par le logiciel Speed PC -imd

Les résultats obtenus en utilisant le logiciel Speed pour le calcul du moteur asynchrone 4kW sont donnés par le tableau IV.11 qui résume certaines caractéristiques ainsi que les figures IV.17, IV.18 et IV.19 donnent les allures du couple électromagnétique, du courant, du rendement principalement en fonction du glissement.

Tableau IV.11 : Caractéristiques du moteur asynchrone à cage d'écureuil 4kW.

Composant	Valeur	Unité
Glissement g	0.035	-
Rendement η	87	%
Couple nominal C_n	28.09	N.m
Couple maximal C_{max}	57	N.m
Facteur de puissance $\cos\phi$	0.84	-
La vitesse de rotation N	1447	tr/min
Pertes fer P_{fer}	152	W
Pertes Joule statorique P_{j1}	480	W
Pertes Joule rotorique P_{j2}	150	W
Pertes mécanique P_{mec}	25	W
Courant de ligne I_n	8.2374	A

➤ Couple électromagnétique

La figure IV.17 montre le couple électromagnétique en fonction du glissement qui est nul à vide, croit à peu près proportionnellement au glissement, il passe par un maximum pour un glissement de ($g=0.125$), ensuite il diminue pour arriver au couple électromagnétique de démarrage lorsque $g=1$.

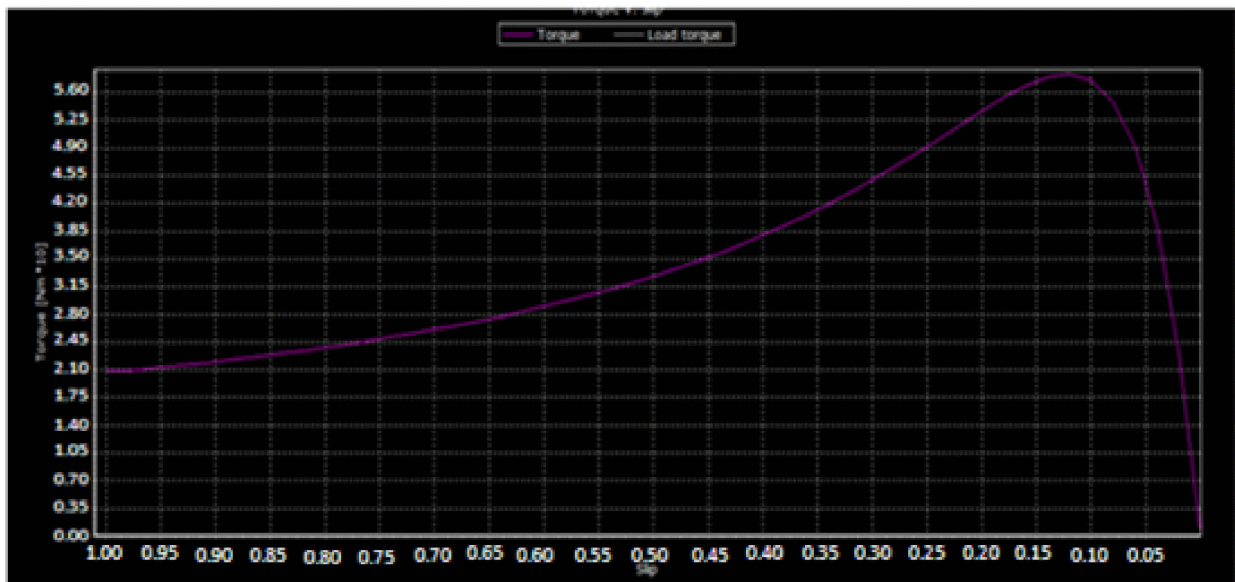


Fig. IV.17. Couple électromagnétique en fonction de glissement

➤ Courant absorbé

Le courant absorbé part d'une valeur correspondant au courant à vide $I_0=4.2A$ relativement forte, 45% du courant nominale. Il augmente proportionnellement au glissement et il atteint sa valeur nominale correspondant au glissement nominal, ensuite il atteint une valeur maximale pour $g=1$.

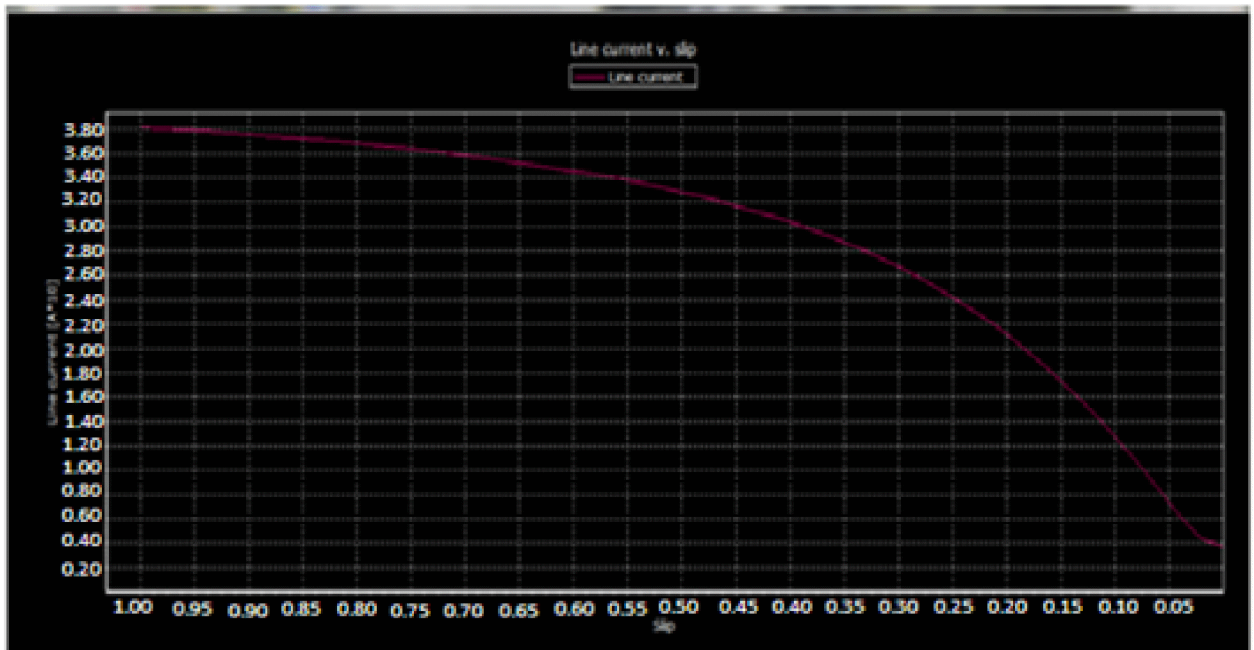


Fig. IV.18. Courant en fonction de glissement.

➤ Rendement

Le rendement part de zéro à vide puis il augmente pour atteindre sa valeur maximale de 0.87 qui correspond au glissement ($g=0.05$), puis il diminue de plus en plus rapidement pour redevenir nul à l'arrêt.

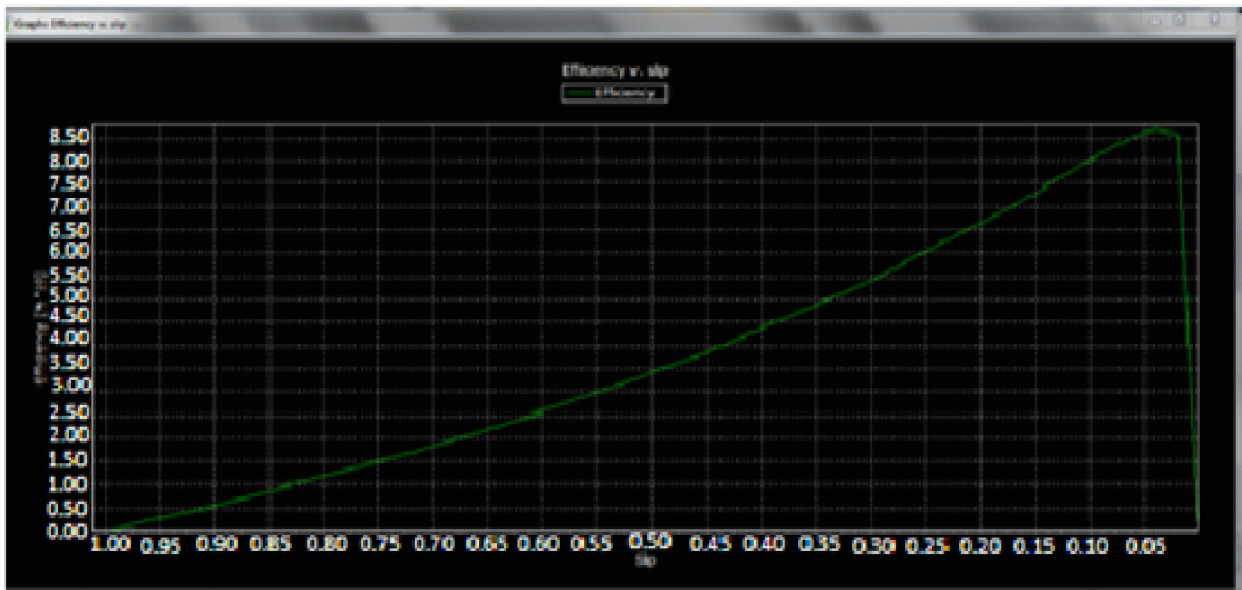


Fig. IV.19. Rendement en fonction de glissement

IV.II.6.Comparaisons des résultats

Tableau IV.12 : Comparaison des caractéristiques obtenues en utilisant le logiciel Speed et le programme de calcul développé

	Speed PC-IMD	Programme développé	Erreur relative(%)
Couple nominal (N.m)	28.09	30.5	-4.73
Couple maximal(N.m)	57	54.66	-4.28
Le rendement maximal	0.87	0.83	-4.81
Facteur de puissance maximal	0.84	0.83	-1.20
Perte Joules statorique(W)	480	462.19	-3.78
Perte Joule rotorique(W)	150	144.5034	-3.80
Perte fer (W)	152	145.0048	-4.82
Le courant maximal absorbé (A)	37.65	36	-4.72

IV.II.7.Conclusion

Dans cette partie, un calcul de dimensionnement d'un moteur asynchrone d'une puissance de 4kW a été effectué, en exploitant le logiciel Speed PC-imd. Après analyse, on remarque que les résultats obtenus par le programme développé sous MATLAB concordent avec ceux obtenus par le logiciel Speed PC-imd où l'erreur relative ne dépasse pas 5% ce qui nous permet de valider le programme développé.

Chapitre V

Exemple d'étude d'une machine asynchrone

Conclusion générale

Conclusion générale

Le processus de fabrication d'une machine électrique nécessite une étude profonde et des recherches intenses, ainsi que des moyens, ce qui induit une longue durée de travail.

Lorsqu'on veut construire une machine électrique, on ne doit pas seulement tenir compte de ses propriétés électromagnétiques, mais faire en sorte qu'elle soit la plus performante possible. Le dimensionnement doit satisfaire avant tout les lois de la physique en particulier magnétiques, électriques et mécaniques, d'autre part il doit en même temps répondre aux exigences d'un cahier de charges.

L'objectif visé par ce travail est l'étude et la conception virtuelle d'un moteur asynchrone à cage qui se résume au:

- Calcul et dimensionnement de la machine asynchrone d'une puissance de 4kW à partir d'un cahier de charge en utilisant un code de calcul développé sous environnement MATLAB, nous avons déterminé les dimension géométrique, électriques, magnétique ainsi que ses performances.
- Calcul et dimensionnement de la machine asynchrone en utilisant un logiciel appelé Speed PC-imd et visualisation de ses performances et détermination de ces caractéristiques magnétique et électrique.

A fin de valider les résultats obtenu par le programme développé, nous les avons comparé avec ceux obtenus en utilisant le logiciel Speed PC-imd où nous avons constaté une bonne concordance.

Annexe

Annexe A

Tableau 1 : H_{axe} et D_{ext} en fonction de P_{nom}

H_{axe} [mm]	D_{ext} [mm]	Puissance nominale en[Kw] en fonction de 2p		
		2p=2	2p=4	2p=6
71	116	0.75	-	-
		1.1	0.75	-
80	131	1.5	1.1	0.75
		2.2	1.5	1.1
90	149	3	2.2	1.5
		-	-	-
100	168	4	3	2.2
		5.5	4	-
112	191	7.5	5.5	3
		-	-	4
132	225	11	7.5	5.5
		-	11	7.5
160	272	15	15	11
		18.5	18.5	15
180	313	22	22	18.5
		30	30	-
200	349	-	-	22
		-	-	30

Tableau 2 : D_1 en fonction de 2P et D_{ext}

2P	2	4	6
D_1	$0.61 \cdot D_{\text{ext}} - 4$	$0.68 \cdot D_{\text{ext}} - 5$	$0.72 \cdot D_{\text{ext}} - 3$
$k_p \lambda$	0.95	1	1.05

Annexe A

Tableau 3 : champ magnétique H

H[mm]	2p	B_{z1max} [T]	B_{c1} [T]	B_{z2max} [T]	B_{c2} [T]
50 ÷ 132	2	1.75 ÷ 1.95	1.50 ÷ 1.65	1.75 ÷ 1.95	1.35 ÷ 1.45
	4	1.75 ÷ 1.95	1.50 ÷ 1.65	1.75 ÷ 1.95	1.15 ÷ 1.25
	6	1.75 ÷ 1.95	1.40 ÷ 1.65	1.75 ÷ 1.95	1.05 ÷ 1.15
160	2	1.75 ÷ 2.0	1.45 ÷ 1.70	1.75 ÷ 1.95	1.35 ÷ 1.45
	4	1.75 ÷ 2.0	1.45 ÷ 1.70	1.55 ÷ 1.80	1.20 ÷ 1.35
	6	1.70 ÷ 1.85	1.34 ÷ 1.50	1.65 ÷ 1.90	1.05 ÷ 1.15
180 ÷ 225	2	1.70 ÷ 1.90	1.45 ÷ 1.65	1.75 ÷ 1.95	1.35 ÷ 1.45
	4	1.70 ÷ 1.90	1.45 ÷ 1.65	1.55 ÷ 1.80	1.20 ÷ 1.35
	6	1.70 ÷ 1.90	1.45 ÷ 1.65	1.65 ÷ 1.90	1.05 ÷ 1.15

Tableau 4 : Epaisseur de l'isolation en fonction de e_1 , e_2 et e_3

Indice	Désignation	Epaisseur de l'isolation en [mm] à deux couches	Epaisseur de l'isolation en [mm] à une seule couche
e_1	Revêtement d'encoche	0.57 ÷ 0.4	0.25
e_2	Fermeture d'encoche	0.5	0.35
e_3	Cale du milieu	0.5	0

Tableau 5 : H en fonction de Z_1/Z_2 et de 2p

H[mm]	Z_1/Z_2 en fonction de 2p		
	2	4	6
71	24/20	24/18	36/28
80 ÷ 100	24/20	36/28	36/28
112	24/22	36/34	54/51
132	24/19	36/34	54/51
160	36/28	48/38	54/60
180 ÷ 200	36/28	48/38	72/58

Annexe A

Tableau 6 : Magnétisation des dents des machines a courant alternatif de l'acier 2013(B_{z1} et B_{z2}

B[T]	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
	H[A/Cm]									
0.4	1.24	0.27	1.30	1.33	1.36	1.38	1.41	1.44	1.47	1.50
0.5	1.54	0.57	1.60	1.64	1.67	1.71	1.74	1.77	1.80	1.84
0.6	1.88	0.91	1.94	1.98	2.01	2.05	2.08	2.12	2.16	2.24
0.7	2.23	0.26	2.29	2.33	2.36	2.40	2.43	2.47	2.50	2.53
0.8	2.58	0.58	2.62	2.65	2.68	2.71	2.74	2.77	2.80	2.83
0.9	2.68	0.90	2.93	2.97	3.01	3.04	3.08	3.12	3.16	3.20
1.0	3.24	0.29	3.33	3.38	3.42	3.46	3.50	3.55	3.6	3.65
1.1	3.70	0.75	3.80	3.85	3.91	3.96	4.01	4.06	4.11	4.17
1.2	4.24	0.30	4.36	4.42	4.48	4.55	4.61	4.67	4.73	4.97
1.3	4.86	0.95	5.04	5.14	5.24	2.33	5.63	5.74	5.84	594
1.4	5.86	0.98	6.10	6.22	6.34	6.46	6.58	6.70	6.83	6.69
1.5	7.09	0.22	7.35	7.49	7.63	7.76	7.91	8.05	8.20	8.35
1.6	8.50	0.78	9.06	9.34	9.02	9.90	10.2	10.5	10.8	11.1
1.7	11.5	1.8	12.2	12.5	12.9	13.3	13.6	14.0	14.1	14.8
1.8	15.2	5.7	16.2	16.7	17.2	17.7	18.3	18.9	19.5	20.1
1.9	20.7	1.6	22.5	23.4	24.3	25.2	26.4	27.6	28.9	30.2
2.0	31.5	3.2	35.0	36.8	38.6	40.4	42.6	44.8	47.0	49.2
2.1	51.1	4.4	57.4	60.5	63.6	86.7	71.2	75.7	80.2	84.7
2.2	89.2	4.3	99.4	104.6	109.8	115	120	126	132	138
2.3	144	151	158	165	172	180	188	198	205	214

Annexe A

Tableau 7 : Magnétisation des culasses des machines a courant alternatif de l'acier 2013 (B_{c1} et B_{c2})

B[T]	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
	H[A/Cm]									
0.4	0.52	0.53	0.54	0.55	0.56	0.58	0.59	0.60	0.61	0.62
0.5	0.64	0.65	0.66	0.67	0.69	0.71	0.72	0.74	0.76	0.78
0.6	0.80	0.81	0.89	0.85	0.87	0.89	0.91	0.93	0.95	0.97
0.7	1.00	1.02	1.04	1.06	1.08	1.11	1.13	1.15	1.18	1.21
0.8	1.24	1.28	1.29	1.32	1.35	1.36	1.40	1.43	1.46	1.49
0.9	1.52	1.55	1.58	1.61	1.64	1.68	1.71	1.74	1.77	1.81
1.0	1.85	1.88	1.91	1.95	1.99	2.03	2.06	2.09	2.13	2.17
1.1	2.21	2.25	2.29	2.31	2.37	2.11	2.45	2.40	2.58	2.57
1.2	2.62	2.67	2.72	2.77	2.83	2.89	2.95	3.01	3.07	3.13
1.3	3.20	3.27	3.34	3.41	3.49	3.57	3.65	3.73	3.82	3.91
1.4	4.00	4.10	4.20	4.30	4.40	4.50	4.64	4.78	4.92	5.06
1.5	5.20	5.42	5.64	5.86	6.08	6.30	6.54	6.78	7.02	7.26
1.6	7.50	7.88	8.26	8.64	9.02	9.40	9.82	10.2	10.7	11.10
1.7	11.50	12.2	12.9	13.6	14.3	15.0	16.0	17.0	18.0	19.0
1.8	20.0	21.6	23.2	24.9	26.5	28.1	29.6	31.1	32.7	34.2
1.9	35.7	38.0	40.30	42.6	44.0	47.2	49.3	51.4	53.5	55.6
2.0	57.7	60.0	63.0	60.0	70.0	74.0	79.0	84.0	90.0	97.00

Annexe A

Tableau 8 : q_1 en fonction de K_{rr1}

q_1	1.5	2	2.5	3	4	5	6
K_{rr1}	-	0.0285	-	0.0141	0.0089	0.0065	0.0052

Tableau 9 : q_1 en fonction de K_{dd}

Q1	K_{dd1} en fonction de Z_2/p						
	10	15	20	25	30	35	40
2	0.99	0.94	-	-	-	-	-
3	0.98	0.93	0.88	0.85	-	-	-
4	-	0.90	0.84	0.80	0.77	-	-
5	-	-	-	0.75	0.72	0.70	-
6	-	-	-	0.70	0.66	0.62	-
8	-	-	-	-	-	0.53	0.51

Tableau 10 : Section normalisée

S_{eff} [mm]	D_{nu} [mm]	D_{iso} [mm]
0.442	0.750	0.815
0.503	0.800	0.865
0.567	0.850	0.915
0.636	0.900	0.965
0.709	0.950	1.015
0.785	1.000	1.080
0.883	1.060	1.140
0.985	1.120	1.200
1.094	1.180	1.260
1.227	1.250	1.330
1.368	1.320	1.405
1.539	1.400	1.485
1.767	1.500	1.585

Annexe A

Tableau 11 : q1 en fonction de H et 2p

H[mm]	q1 en fonction de 2p		
	2	4	6
71	4	2	2
80 ÷ 100	4	3	2
112 ÷ 132	4	3	3
160	6	4	3
180 ÷ 225	6	4	4
250	8	5	4
280 ÷ 355	8	5	4

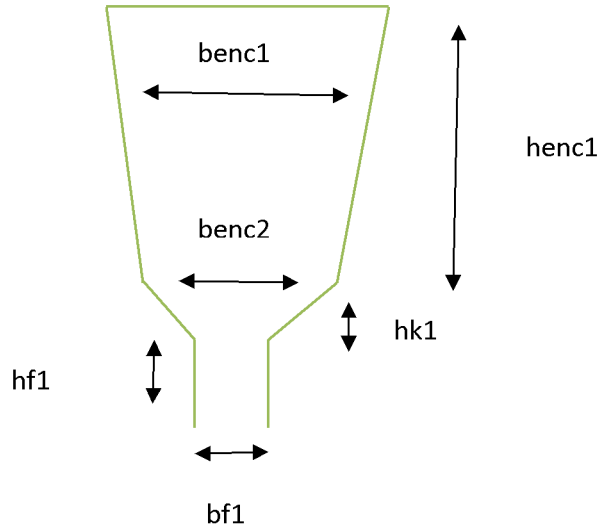


Fig1.a. L'encoche statorique

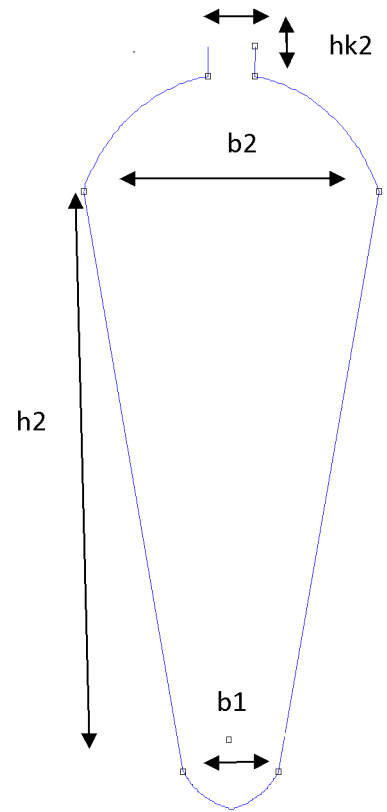


Fig1.b. L'encoche rotorique

Annexe B

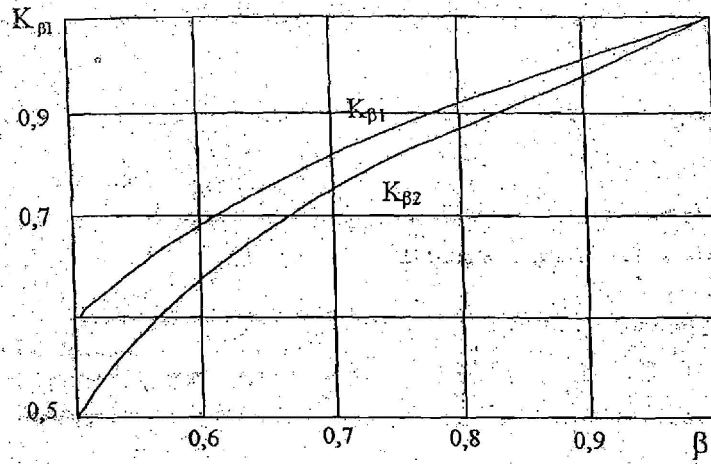


Figure A1

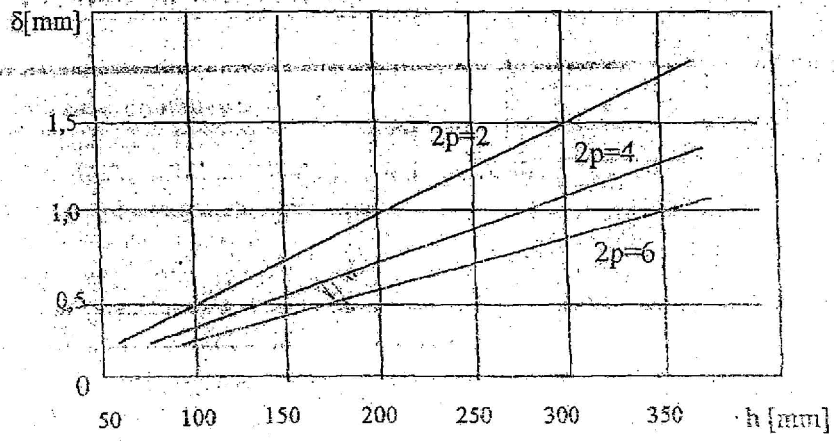
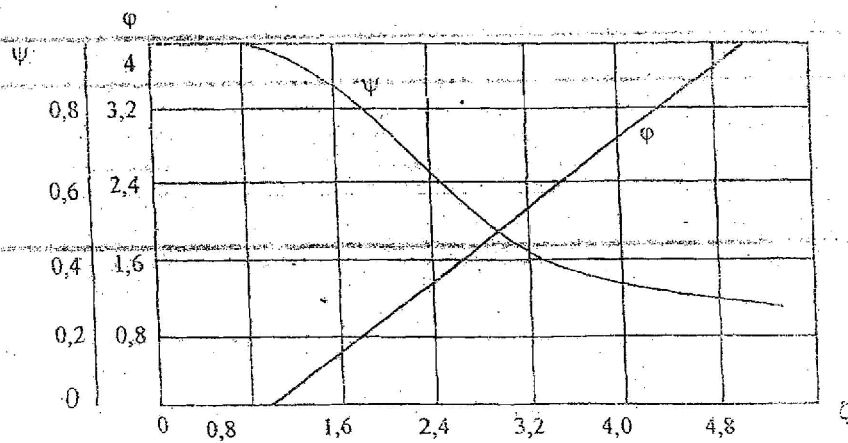


Figure A2



Annexe B

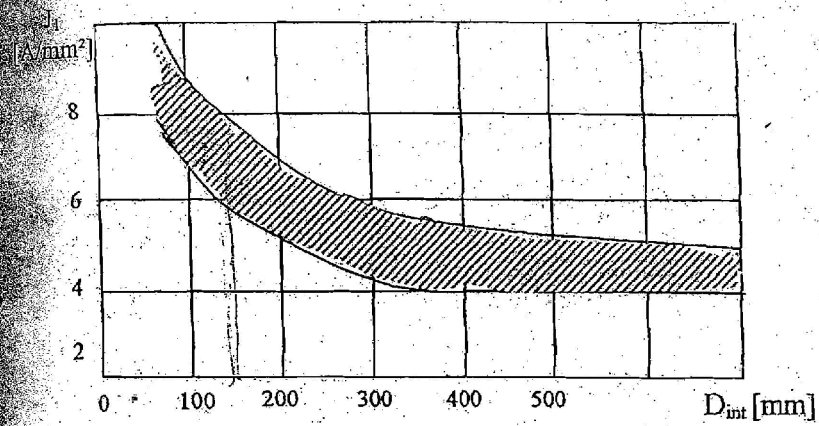


Figure A6

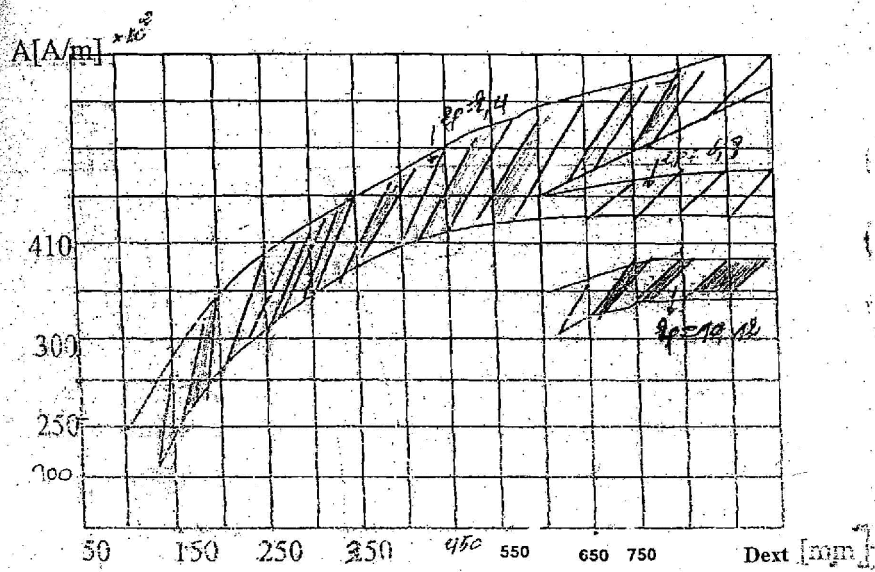
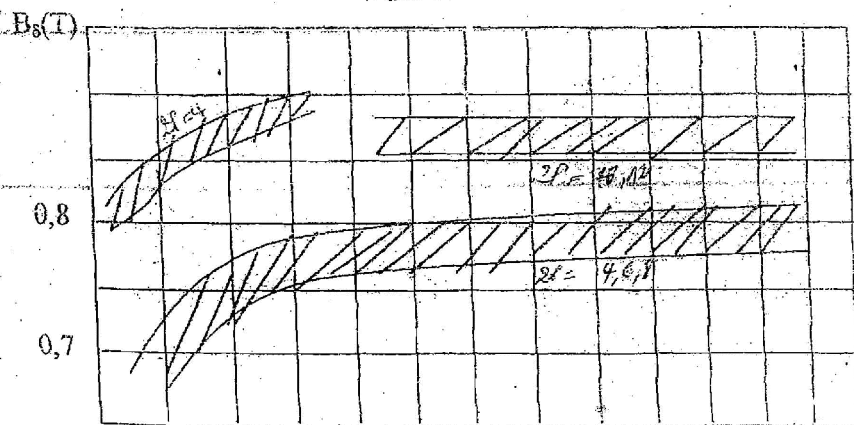


Figure A7



Annexe B

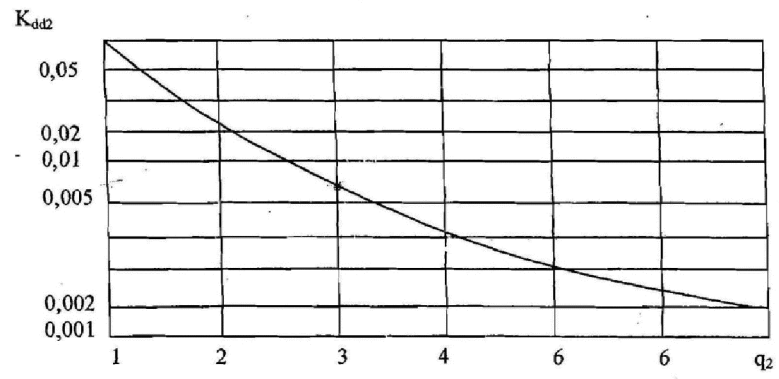


Fig A₉

Bibliographie

Bibliographie

- [1] : **Rabah Redjem**, «Calcul et conception assisté par ordinateur des machines électriques », Mémoire de Magistère en électrotechnique Université Mentouri Constantine, 2006.
- [2] : **A. Djamila**, « Analyse et construction d'un Moteur Asynchrone à rotor à cage », Mémoire de Magistère en électrotechnique ENP El- Harrach-Alger, mars 2006.
- [3] : **Patrick Abati**, « Réglage de la vitesse de rotation des moteurs asynchrones triphasés », article de Wikipédia, Etats-Unis , 23 février 2002.
- [4] : **Boucharde Réal-Paul et Olivier Guy**, « Conception de moteurs asynchrones triphasés», édition L'Ecole polytechnique, Montréal, 1997.
- [5] : **Claude Divoux**, « Cours moteur asynchrone »,1999.
- [6] :**Chaib.M, Rahab.T**, « Conception optimale d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil a haut rendement», Mémoire de Master en électrotechnique U.M.M.T.O ,2010-2011.
- [7] : **Belaidi Louiza, Boucherak Amrane**, « Identification des paramètres d'un moteurs asynchrones triphasés à cage avec la méthode des éléments finis », Mémoire d'ingénieur d'état en Electrotechnique U.M.M.T.O, 2011-2012.
- [8] : **Mansouri Khalida, Belaid Lynda**, « Dimensionnements d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil d'une puissance de 5.5kW en utilisant le logiciel Speed PC -imd», Mémoire de Master professionnelle en électrotechnique U.M.M.T.O ,2011-2012.
- [9] : **H.Naguib, K.Mouhand Said, M.Ahmed**, «Contribution a l'élaboration d'un logiciel de calcul d'une série de machines asynchrones à cage d'écureuil », Mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique U.M.M.T.O ,1998.
- [10]: **D.Staton**, « Speed PC-IMD User's Guide». University of Glasgow, 2004.

Bibliographie

[11] : **Ould Ouali Samy.H**, «Intégration de l'hystérésis magnétique dans un calcul élément finis en vue de l'estimation des pertes dans les tôles des machines électriques », Thèse de Doctorat en électrotechnique U.M.M.T.O ,26/09/2010.

[12] : **Bouzida Ahcene**, « Diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage par la technique des ondelettes », Mémoire de Magister en électrotechnique, ENP, 10 Avenue Hassen Badi, El-Harrach, Alger, 20 Janvier 2008.

[13] : **S.Malika, H.Souhila**, « Elaboration d'un programme de calcul d'une série de machines asynchrones triphasés à cage d'écureuil sous environnement Matlab », Mémoire de Master académique U.M.M.T.O ,2011.