

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou

Faculté de Génie Electrique et D'informatique

Département d'électrotechnique

Mémoire de fin d'études

En Vue d'Obtention Du Diplôme d'ingénieur d'état en Electrotechnique

Option : Machines Electriques

Thème :
Thème :

***Transformation d'une machine asynchrone à cage
de construction standard vers une machine à haut
rendement***

Promoteur :

➤ **M^R :KHALDI RABAH**

Candidats :

-ACHIR RACHID

-AIT MIMOUNE BELKHIR

-MOUNSI DJAMAL

PROMOTION 2012/2013

Remerciements

*Tout d'abord, nous tenons à remercier profondément le **Dieu**, le tout Puissant de nous avoir donné le courage, la patience, la volonté ainsi que la santé pour réaliser ce modeste travail.*

*Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements et nos sincères reconnaissances à **Mr KHALDI.R**, pour sa disponibilité, ses conseils judicieux, ses directives et ses orientations concernant le travail proposé tout en nous accordant sa confiance et en nous faisant profiter de sa large expérience tout au long de la réalisation de ce projet de fin d'étude.*

*Nos remerciements vont également à **Mr BELASSEL M.T** pour son aide à la réalisation de ce modeste travail.*

Nous remercions les membres du jury qui ont fait l'honneur de participer au jugement de ce travail.

Nous remercions profondément les étudiants du département d'électrotechnique.

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.



Dédicaces

Je dédie ce travail

A la mémoire de ma très chère mère. Quelle repose en paix au paradis.

A mon très cher père et sa femme.

A mes sœurs

A mes frères.

A mes chères nièces Amel, HAYAT et son fils 3imad.

A mes neveux: Djilalli, Mehena, Hakim, Dylan et Ylian.

A ma belle sœur tassadit.

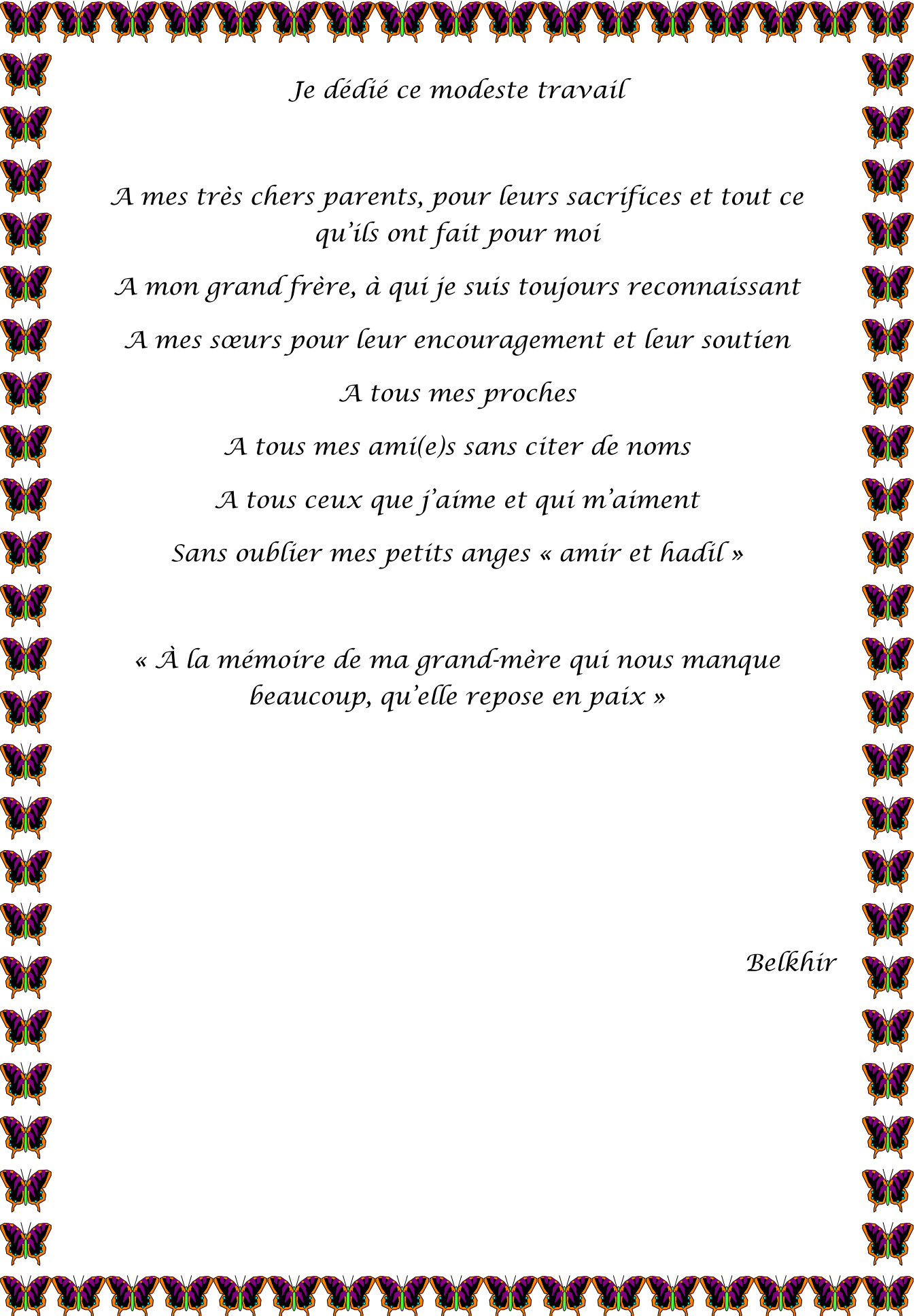
A tous mes ami(e)s en particulier : Boudinar .A, Abderrahim. M, Kacer .S, Mouhdeb .C ,Sadellah.H ,Dalli .N et Azouz .M .

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

A toute la promotion d'électrotechnique 2012 -2013.

A tous ce qu'ils ont contribués de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Rachid



Je dédié ce modeste travail

*A mes très chers parents, pour leurs sacrifices et tout ce
qu'ils ont fait pour moi*

A mon grand frère, à qui je suis toujours reconnaissant

A mes sœurs pour leur encouragement et leur soutien

A tous mes proches


A tous mes ami(e)s sans citer de noms

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

Sans oublier mes petits anges « amir et hadil »

*« À la mémoire de ma grand-mère qui nous manque
beaucoup, qu'elle repose en paix »*

Belkhir



Je dédié ce modeste travail

A mes chers parents pour leurs encouragements et leurs sacrifices qu'ils ont fait pour moi

A mon cher frère et mes chères sœurs

A mes chers amis (e) aussi

A ma sœur Noura et son mari Aïssa et leur fille Mazgha

A mon cousin Salah qui nous a quitté récemment et subitement, que dieu l'accueille dans son vaste paradis.

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

A tous les militants de la cause juste

DJAMAL

Résumé

Vu l'augmentation continue du coût de l'énergie, une nouvelle orientation économique apparait et qui oblige les constructeurs et les fabricants des moteurs électriques de réduire l'énergie consommée par ces derniers. La solution proposée à ces constructeurs est de réaliser des moteurs à haut rendement donc avec un minimum de pertes.

Pour cette raison qu'aujourd'hui dans l'industrie, on s'intéresse à avoir des machines à haut rendement, même si cela conduit à un coût plus élevé. Pour répondre à cette exigence, deux solutions s'offrent pour un constructeur déjà implanté. La première de ces solutions est réservée pour la conception de nouvelles machines. Par contre, la deuxième est appliquée aux anciennes machines déjà construites.

Dans notre mémoire l'objectif est d'augmenter le rendement d'une machine standard, pour cela on a opté pour deux méthodes, la première consiste à varier la longueur virtuelle du stator ; la diminution de nombre de conducteurs par encoche et l'augmentation de section effective des conducteurs. Avec cette méthode on a utilisé plus de matière, ce qui rend la machine plus couteuse en contre partie on a amélioré le rendement et les performances de la machine.

La seconde méthode représente la variation de la puissance nominale avec le passage du couplage triangle au couplage étoile, dans ce cas la charge imposé est réduite par rapport a la machine d'origine, bien que le rendement est meilleur.

Mots clés :

Machine asynchrone à cage, machine à haut rendement, le rendement, matcad14, déclassement de la machine asynchrone.

Sommaire

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur la Machine Asynchrone standard et à haut rendement	
I.1.1.Historique de la machine asynchrone	2
I.1.2.Description et Présentation de la machine asynchrone	3
I.1.3.Les différents types de moteurs asynchrones.....	5
I.1.3.1.Rotor à cage d'écureuil (simple)	5
I.1.3.2.Rotor bobiné	6
I.1.3.3.Rotor à double cage.....	7
I.1.3.4.Rotor à encoches profondes.....	7
I.1.4.Le bobinage.....	8
I.1.5.Le glissement	9
I.1.6. Le couple d'un moteur asynchrone.....	9
I.1.7.Principe de fonctionnement du moteur asynchrone.....	9
I.1.8.Démarrage des moteurs asynchrones.....	10
I.1.8.1. Démarrage sous tension réduite.....	11
I.1.8.2.Démarrage étoile-triangle	11
I.1.8.3. Démarrage par autotransformateur	12
I.1.8.4.Démarrage résistif.....	12
I.1.8.5.Démarrage à tension nominale	12
I.1.9. Freinage des moteurs asynchrones.....	12
I.1.9.1. Freinage en génératrice asynchrone (hyper synchrone)	12
I.1.9.2. Freinage par contre courant	12
I.1.9.3.Freinage par injection de courant continu	13
I.1.9.4.Freinage électromécanique	13
I.1.10.Classification des moteurs asynchrones selon les caractéristiques électriques et mécaniques.....	14
I.1.10.1. moteur à couple normal et a courant de démarrage normal (CEMA classe A)....	14
I.1.10.2. Moteurs à faible courant et à couple de démarrages normal (CEMA classe B)...	14
I.1.10.3. Moteurs à faible courant et à couple de démarrage élevé (NEMA classe C).....	15
I.1.10.4. Moteurs à glissement élevé (NEMA classe D).....	15
I.1.10.5. Moteur à faible couple et faible courant de démarrage (NEMA classe F).....	15
I.2. Moteur à induction à haut rendement	16
I.2.1. Spécificités des machines à induction à haut rendement	17

Sommaire

I.2.1.1. Caractéristiques techniques	17
I.2.1.2. La tension d'alimentation.....	18
I.2.1.3. La vitesse	19
I.2.1.4. Le couple	19
I.2.2. Caractéristiques des moteurs à haut rendement	19
I.2.3. Classes de rendement des moteurs à haut rendement en vigueur en Europe.....	20
I.2.4. Répartitions des nouvelles classes de rendement des moteurs électriques	20
I.2.5. Comparaison des classes de rendement anciennes et nouvelle.....	21
I.2.5.1. Classe de rendement IE1, IE2 et IE3 selon la norme CIE	22
I.2.6. Marquage de rendement sur le moteur.....	23
I.2.7. Facteurs influents sur le rendement des moteurs électriques	24
I.2.7.1. Qualité d'alimentation en énergie	24
I.2.7.2. Maintenance du moteur	24
I.2.7.3. Charge du moteur	24
I.2.7.4. Plage d'utilisation des moteurs	24
I.2.8. Avantages d'utilisation des moteurs à haut rendement	25
Conclusion.....	25
Chapitre II : dimensionnement classique d'un moteur asynchrone standard.	
Introduction	26
II. Calcul des contraintes électromagnétiques du stator est de rotor	26
II.1. Le stator	26
II.1.1. la puissance électromagnétique	26
II.1.2. la force électromotrice	27
II.1.3. Induction magnétique dans l'entrefer	28
II.1.4. courant dans la phase statorique	28
II.1.5. La charge linéaire	28
II.1.6. Flux utile par pole	28
II.1.7. Densité du courant dans les conducteurs statorique	28
II.1.8. Induction maximale dans la dent statorique	29
II.1.9. Induction magnétique dans le dos statorique	29
II.1.10. Section de l'encoche statorique	29
II.1.11. Section occupée par la cale de fermeture	30
II.1.12. La section occupé par le caniveau	30
II.1.13. La section occupée par les l'isolation de l'encoche	30

Sommaire

II.1.14. La section occupée par les conducteurs dans l'encoche	30
II.1.15. Coefficient de remplissage	30
II.2. Le rotor	30
II.2.1. Induction maximale dans la dent rotorique	30
II.2.2. Induction magnétique dans le dos rotorique	31
II.2.3. Le courant dans la barre rotorique	31
II.2.4. La section de l'encoche rotorique	31
II.2.5. Densité du courant dans la barre rotorique	32
II.3. calcul de circuit magnétiques et des paramètres électriques	32
II.3.1. Circuit magnétique statorique	34
II.3.1.1. La F.M.M dans la culasse du stator	34
II.3.1.2. La F.M.M dans la dent du stator	34
II.3.2.1. F.M.M dans l'entrefer	34
II.4. Circuit magnétique rotorique	35
II.4.1. La F.M.M dans la culasse rotorique	35
II.4.2. La F.M.M dans la dent du rotor	35
II.4.3. La F.M.M totale	35
II.4.4. Les coefficients de saturation	35
II.4.5. Le coefficient de saturation des dents	35
II.4.6. Le coefficient de saturation de la machine	35
II.4.7. Le courant magnétisant	36
II.4.8. Calcul des paramètres électriques	36
II.4.8.1 Les paramètres électriques du stator	38
II.4.8.2. Paramètres rotoriques	38
II.4.8.3. Réactance de fuite du rotor ramenée au stator	41
II.5. Calcul des pertes et du rendement	41
II.5.1. Pertes principales dans le fer	42
II.5.2. Le rendement de la machine	45
II.6. Calcul des performances du moteur	45
II.6.1. Schéma vectoriel et schémas équivalents en Let T du moteur	45
II.6.2. Caractéristiques de fonctionnement du moteur	47
Conclusion	50

Sommaire

Chapitre III : transformation d'une machine asynchrone standard vers une machine à haut rendement

Introduction	51
III.1.Organigramme de calculs	51
III.2.Transformation de la machine standard	53
III.2 .1.Variation de la longueur virtuelle	53
III.2.2.variation du nombre de conducteurs	53
III.2.3. Variation de la section effective.....	56
III.3.Courbes et interprétation	56
III.3.1.différentes courbes obtenues	56
III.3.2.Interprétation des courbes	60
III.3.2.a. Le glissement Figure (III-2)	60
III.3.2.b. Le courant absorbé Figure (III-3)	60
III.3.2.c. Le facteur de puissance $\cos\varphi$ Figure (III-4)	60
III.3.2.d. Puissance absorbée Figure (III-5)	60
III.3.2.e. Le couple utile Figure (III-6)	60
III.3.2.f. Le rendement Figure (III-7)	60
III.3.3.Comparaison	61
III.4.Observation	62
III.4.1. Entre la machine standard et les résultats pratiques	62
III.4.2. Entre la machine d'origine standard et la machine transformée	62
Conclusion	62

Chapitre IV : Transformation d'une machine asynchrone existante vers une machine à haut rendement

Introduction	63
IV.1.Action sur la puissance nominale	63
IV.1.1.caractéristique du rendement	64
IV.1.2.Interprétation de caractéristique du rendement	65
IV.2.Changement de couplage	65
IV.3.Performance et caractéristique	65
IV.3.1.Les différentes courbes obtenues	65
IV.3.2.Interprétation des courbes	69
IV.3.1.a. Le glissement	69

Sommaire

IV.3.1.b. Le courant absorbé	69
IV.3.1.c. Le facteur de puissance	69
IV.3.1.d. La puissance absorbée	69
IV.3.1.e. Le couple utile	69
IV.3.1.f. Le rendement	69
IV.3.3.Comparaison	69
IV.3.4.Observation.....	70
Conclusion	71
Conclusion générale	72
Annexe	
bibliographie	

Introduction Générale

Introduction générale

Vu la robustesse, la facilité d'entretien, le coût et la simplicité de construction, les machines asynchrones prennent une grande importance dans le monde industriel et domestique, plus particulièrement les moteurs asynchrones à cage d'écureuil, qui connaissent une large exploitation dans nombreuses applications.

Auparavant, les constructeurs et les fabricants des machines électriques s'intéressent à construire des machines à rendement optimal, au moindre coût de réalisation, d'où un minimum de matière utilisée.

Mais, vu l'augmentation continue du coût de l'énergie, une nouvelle orientation économique apparaît et qui oblige les constructeurs et les fabricants des moteurs électriques de réduire l'énergie consommée par ces derniers. La solution proposée à ces constructeurs est de réaliser des moteurs à haut rendement donc avec un minimum de pertes.

Pour cette raison qu'aujourd'hui dans l'industrie, on s'intéresse à avoir des machines à haut rendement, même si cela conduit à un coût plus élevé. Pour répondre à cette exigence, deux solutions s'offrent pour un constructeur déjà implanté. La première de ces solutions est réservée pour la conception de nouvelles machines. Par contre, la deuxième est appliquée aux anciennes machines déjà construites.

Dans cette optique, notre travail consiste à présenter ces deux solutions appliquées à une machine asynchrone, à cage d'écureuil triphasée de 2.2 kW, de construction standard. Ces dernières, sont basées sur une méthode de calcul de machines classique [4] ou sont effectuées les transformations appropriées.

Pour cette fin, nous répartissons notre mémoire en quatre chapitres, comme suit :
Dans le premier nous présentons des généralités sur la machine asynchrone standard et à haut rendement.

Puis, dans le second nous exposons la méthode de dimensionnement classique d'un moteur asynchrone standard.

Ensuite, dans le troisième chapitre nous effectuons la transformation d'une machine asynchrone standard vers une machine à haut rendement.

Tandis que dans le quatrième et le dernier chapitre nous procédons à la transformation d'une machine asynchrone standard existante vers une machine à haut rendement.

Nous précisons que tous les calculs sont effectués avec le logiciel Mathcad14.

Et enfin, nous terminons par une conclusion générale.

Chapitre I

**Généralités sur la Machine Asynchrone
standard et à haut rendement**

Introduction

Les moteurs asynchrones détrônent de plus en plus les moteurs à courant continu et cela revient à plusieurs avantages : (cout de fabrication, simplicité de construction, robustesse mécanique, entretien limité, bon rendement et aussi la facilité d'alimentation). Les moteurs asynchrones plus particulièrement ceux à cage d'écureuil, représentent environ 90-95% de la consommation d'énergie des moteurs électriques. Alors on les retrouve aujourd'hui dans nombreuses applications, notamment dans le transport (métros, trains, navires...), l'industrie et l'électroménager.

Suite a la crise énergétique une nouvelle génération de moteurs, appelés moteurs à haut rendement a fait son apparition. Ces moteurs ont un rendement supérieur à ceux des moteurs équivalents de construction classique. Ce qui a été exigé par des compétences dans le domaine industriel et énergétique a fin de réduire l'énergie consommée.

Dans ce premier chapitre nous nous intéressons à présenter quelques généralités sur le moteur asynchrone (types, paramètres, contraintes...).ensuite on va faire un aperçu sur les machines à haut rendement.

I-1-1-Historique de la machine asynchrone

La paternité de la machine asynchrone est controversée. Elle pourrait être attribuée à trois inventeurs : en 1887, **NICOLA TESLA** dépose un brevet sur la machine asynchrone, puis en mai de l'année suivante. Pendant la même période **GALILIO FERRARIS** publie des traités sur les machines tournantes, avec une expérience en 1885, puis une théorie sur le moteur asynchrone en avril 1888. En 1889, **MICHAIL OSSIPOWITSCH DOLIWO-DOBROWOLSKI** électricien allemand d'origine russe, invente le premier moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil qui sera construit industriellement a partir de 1891.

La machine asynchrone est aujourd'hui très couramment utilisée comme moteur dans une gamme de puissance allant de quelques centaines de watts à quelques milliers de kilowatts. Cela revient à sa simplicité de construction, d'utilisation et d'entretien, de sa robustesse et de son faible prix de revient. [9]

I-1-2-Description et Présentation de la machine asynchrone

Figure(I.1) Moteur asynchrone.

On appelle machine asynchrone ou machine à induction, connue également sous le terme «anglo-saxon» une machine à courant alternatif constitué de deux armatures coaxiale : L'une fixe appelée le stator et l'autre mobile appelée le rotor, ces armatures comportent des encoches ou on fait loger le bobinage. **(figure.1.2)**.

La vitesse de la rotation du rotor est inférieure à celle du champ magnétique du stator et dépend de la charge. Alors Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas forcément proportionnelle à la fréquence des courants qui les traversent. Une machine asynchrone, de même que d'autres machines électriques, est réversible, c'est à dire peut fonctionner en moteur et en génératrice.

Les Machines possèdent un rotor en «cage d'écureuil »sont aussi connues sous le nom machine a cage ou machine a cage d'écureuil.



Figure (I.2) : rotor et stator [9]

➤ **Noyau statorique:**

Le stator consiste en un empilement de tôle de fer au silicium dont l'épaisseur varie entre 0,35 à 0,50 mm. On utilise des tôles minces dans les moteurs pour lesquels on doit minimiser les pertes dans le circuit magnétique. Dans le cas où le diamètre du moteur ne dépasse pas quelques centimètres, les tôles sont découpées en une seule pièce. Pour les moteurs de grand diamètre, les tôles du stator et du rotor sont découpées par sections afin de limiter l'effet des courants de Foucault ; on recouvre habituellement les tôles d'une mince couche de vernis ou de silicate de soude. Dans ces conditions, le rapport entre l'épaisseur véritable d'acier et l'épaisseur physique de l'empilement de tôles, nommé coefficient de foisonnement, se situe entre 0,92 et 0,94.

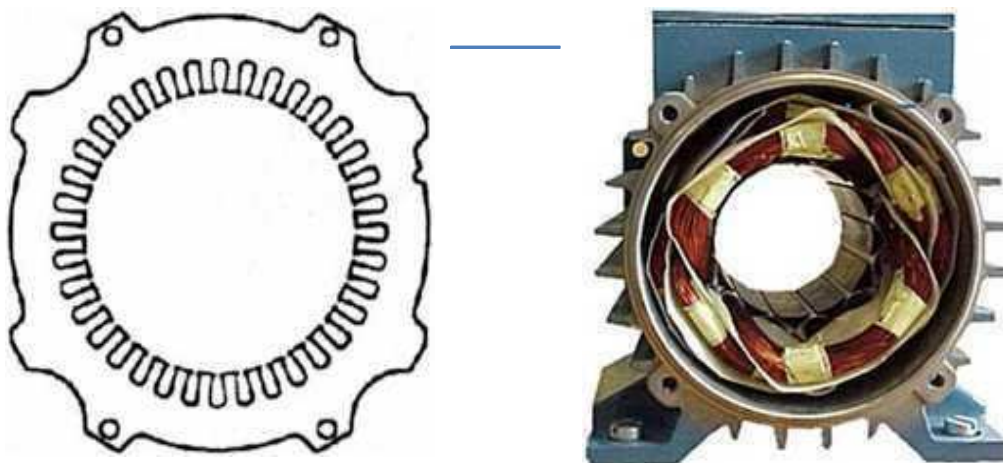


Figure (I.3): Stator d'un moteur asynchrone

➤ Noyau rotorique

Le **rotor** est fait comme le stator avec des tôles empilées et habituellement du même matériau. Il est séparé du stator par un entrefer mince de l'ordre de 0,4 à 2 mm.

Dans les petits moteurs, les tôles sont découpées en une seule pièce et assemblées sur un arbre.

Dans les plus gros moteurs, chaque lamination est constituée de plusieurs sections et montée sur un noyau. [3]

I-1- 3- les différents types de moteurs asynchrones

Les types de moteurs asynchrones sont distingués à propos du rotor.

Dans tous les cas, le stator reste, au moins dans son principe, le même ; il est constitué d'un enroulement bobiné réparti à l'intérieur d'une carcasse cylindrique faisant office de bâti et logé à l'intérieur d'un circuit magnétique supporté par cette carcasse. Ce circuit magnétique est formé d'un empilage de tôles, en forme de couronnes circulaires, dans lesquelles sont découpées les encoches parallèles à l'axe de la machine.

Il existe alors ces types de rotor :

I.1.3.1. rotor à cage d'écureuil (simple)

Il est constitué de barres conductrices de cuivres, de bronze ou de l'aluminium suivant les caractéristiques mécaniques et électriques recherchées par le constructeur. Ces barres sont régulièrement réparties entre deux couronnes métalliques formant les extrémités. L'ensemble ressemble à une cage d'écureuil d'où le nom, ou simplement rotor à cage. Dans les moteurs de petites et moyennes puissances, les barres et les anneaux sont formés d'un seul bloc

d'aluminium coulé.

Ce type de moteur, beaucoup plus aisé à construire que le moteur à rotor bobiné, est d'un prix de revient inférieur et a une robustesse intrinsèquement plus grande.

Son inconvénient majeur est qu'il ne permet pas d'insérer un rhéostat et qu'il a au démarrage, de mauvaises performances (courant élevé et couple faible). C'est pour remédier à cette situation qu'ont été développés deux autres types de moteur (rotor à double cage et rotor à encoches profondes).

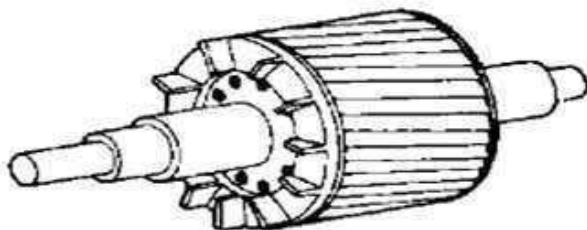
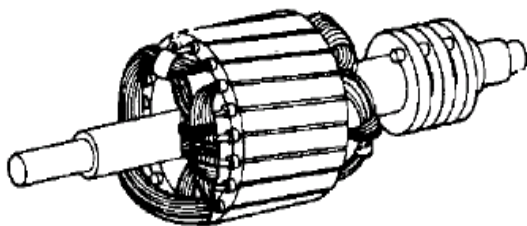


Figure (I.4): rotor à cage

I.1.3.2 rotor bobiné

Le rotor comporte un enroulement bobiné à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques empilés sur l'arbre de la machine. Cet enroulement est obligatoirement polyphasé, même si le moteur est monophasé, et, en pratique, toujours triphasé à couplage en étoile. Les encoches, découpées dans les tôles, sont théoriquement parallèles à l'axe du moteur, mais, en fait, légèrement inclinées par rapport à cet axe de façon à réduire certaines pertes dues aux harmoniques. Les extrémités de l'enroulement rotorique sont sorties et reliées à des bagues montées sur l'arbre, sur lesquelles frottent des balais en carbone. On peut ainsi mettre en série avec le circuit rotorique des éléments de circuit complémentaires qui permettent des réglages, par exemple de couple ou de vitesse. [4]



Figure(I.5) rotor bobiné

I.3.3 rotor à double cage

Ce type de rotor est constitué suivant le principe du rotor à cage simple mais avec deux cages électriquement indépendantes. Une cage externe est réalisée avec des matériaux résistifs (laiton ou bronze) à une résistance élevée, elle est active au démarrage pour réduire l'appel de courant et augmenter le couple. Une autre cage interne (en cuivre) est moins résistive, elle est active au régime nominal, et ce la pour réduire les pertes par effet Joule au rotor. [4]



Figure (I.6):tôle magnétique d'un moteur à double cage

I.1.3.4 rotors à encoches profondes

C'est un rotor à cage simple avec des barres très plates s'enfonçant dans le circuit magnétique. Au démarrage, la fréquence des courants rotoriques est égale à celle de l'alimentation et le courant n'utilise que la partie supérieure de la barre. Puis, au fur et à mesure que la vitesse de rotation du rotor augmente, la fréquence des courants rotoriques diminue et le courant utilise une surface de plus en plus importante des barres. Mais à la fonction nominale cet effet diminue avec l'augmentation de la vitesse et la diminution de la fréquence, ce qui va réduire la résistance des barres. Ces topologies de rotor permettent un démarrage avec un couple plus important lorsque la machine est alimentée par une source de tension fixe (sans variateur).



Figure (I.7) : rotor à encoches profondes

I-1-4- le bobinage

On peut effectuer le bobinage d'une machine tournante de plusieurs façons, mais on utilise habituellement trois types d'enroulements: l'enroulement imbriqué, l'enroulement concentrique et l'enroulement ondulé. Chaque type présente des avantages dans certaines applications.

L'enroulement imbriqué s'emploie généralement pour le bobinage des stators de moteurs de quelques dizaines de kilowatts et plus. Dans le cas de petits moteurs asynchrones, particulièrement lorsque le bobinage est mécanisé, on utilise généralement l'enroulement concentrique.

L'enroulement ondulé est idéal pour les rotors des moteurs asynchrones à bagues. Leur disposition dans les encoches différencie ces différents types d'enroulements. L'enroulement concentrique est un bobinage obligatoirement à couche unique, de telle sorte que chaque encoche contient un seul côté de bobine. L'enroulement imbriqué et l'enroulement ondulé peuvent être des bobinages à simple couche, mais sont plus souvent à double couche. Si tel est le cas, chaque encoche contient deux côtés de bobine et le nombre de conducteurs par encoche doit nécessairement être un nombre pair.

Il est possible de relier en série toutes les bobines de l'enroulement pour une même phase; on obtient alors un moteur qui ne peut opérer que sous une seule tension. Par contre, on peut répartir les bobines en un certain nombre de groupes à l'intérieur desquels elles sont connectées en série. Les groupes ainsi formés peuvent se relier en série ou en parallèle et permettre d'utiliser le moteur sous plusieurs tensions.

Lorsque les bobines sont faites de fils carrés ou rectangulaires d'assez forte section, elles sont formées sur des gabarits et insérées globalement dans des encoches ouvertes. Dans le cas d'encoches de type semi-ouvert, on utilise habituellement plusieurs fils ronds, vernis et de

faible section pour former les conducteurs des bobines. Comme les bobines faites de fils carrés, elles sont généralement formées sur des gabarits, mais introduites fil par filou quelques fils à la fois dans les encoches. [1]

I-1-5- le glissement

Le rotor du moteur asynchrone ne peut pas tourner à la vitesse de synchronisme (si non le champ tournant ne coupera pas les conducteurs rotoriques) et pour caractériser la vitesse du rotor, on définira le glissement g qui est l'écart relatif entre la vitesse du synchronisme N_s et la vitesse réelle N du moteur, il est donné sous la relation suivante :

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} = \frac{W_r}{W_s} \quad (I.5)$$

N_s : vitesse du synchronisme (vitesse du champ tournant) en tr/min

N : vitesse mécanique du moteur en tr/min

W_s : pulsation des courants inducteurs (courants statoriques)

W_r : pulsation des courants induits (courants rotoriques).

I-1-6 : Le couple d'un moteur asynchrone

Considérons un moteur à cage, alimenté par une source triphasée dont la tension et la fréquence sont fixes. A mesure qu'on augmente la charge mécanique, la vitesse baisse progressivement. Cependant, lorsque le couple atteint la valeur critique appelée point de décrochage, la vitesse chute subitement et le moteur s'arrête. Il existe donc une relation entre le couple développé par le moteur et sa vitesse. Cette relation n'est pas simple ; c'est pourquoi on préfère la présenter sous forme de courbe plutôt que par une équation.

I-1-7-principe de fonctionnement du moteur asynchrone

Le fonctionnement du moteur asynchrone triphasé est composé sur l'application de l'électromagnétisme (théorème d'Ampère, loi de Faraday et loi de Lenz) Au moment où l'on ferme l'interrupteur pour brancher les enroulements du stator d'un moteur asynchrone sur une ligne triphasée, ce système des courants triphasés va créer un champ tournant au stator (**loi d'ampère**). Le rotor à cage est encore au repos. Le champ tournant qui provient du stator coupe les conducteurs du rotor et il engendre une tension dans ceux-ci (**loi de faraday**). Cette tension est alternative car les conducteurs sont tantôt devant un pôle nord, tantôt devant un pôle sud du champ tournant, la valeur efficace de cette tension est égale au produit de l'induction magnétique B par la vitesse linéaire du champ V par la longueur virtuelle de

l'induit L ($\mathbf{E}=\mathbf{B}\cdot\mathbf{L} \wedge \mathbf{V}$).

La fréquence de la tension dépend du nombre de pôles N et S passant devant un conducteur en une seconde; lorsque le rotor est au repos, elle est toujours égale à la fréquence du réseau. Les conducteurs étant court-circuités à leurs extrémités par les deux anneaux, la tension induite fait circuler des courants. La résistance et l'inductance offertes par la cage sont très faibles et les courants sont intenses : quelques centaines d'ampères pour les machines de moyenne puissance. Les mêmes conducteurs du rotor portant ces courants se trouvent toujours dans le chemin du flux provenant du stator : ils sont alors soumis à des forces électromagnétiques (**force de Laplace** $\mathbf{F}=\mathbf{I}\cdot\mathbf{L} \wedge \mathbf{B}$). Ces forces tendent à faire tourner le rotor du même sens de la rotation du champ tournant. [5]

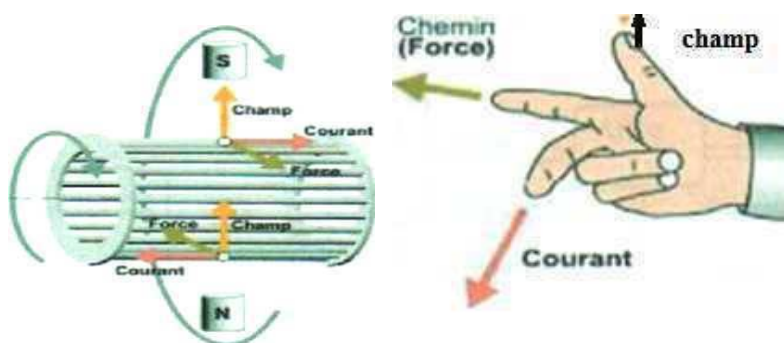


Figure (I.8) : la force produite entre champ magnétique et courant électrique.

I.1.8. démarrage des moteurs asynchrones :

Au démarrage d'un moteur asynchrone, le courant augmente et peut atteindre 8 fois le courant nominal de la machine. Si l'application utilise un variateur, c'est ce dernier qui se chargera d'adapter les tensions appliquées au moteur afin de limiter ce courant. En absence de variateur de vitesse, il existe plusieurs méthodes permettant de limiter le courant de démarrage .elles ont été développées avant l'apparition d'électronique de puissance, mais sont encore utilisées de nos jours dans les installations anciennes ou par mesure d'économie pour des applications ne nécessitant pas de variateur en dehors du démarrage.

I.1.8.1 Démarrage sous tension réduite

Pour réduire la tension aux bornes des enroulements du stator pendant la durée du démarrage du moteur, il y a plusieurs dispositifs permettent ça. L'inconvénient est que le couple moteur est également diminué et que cela augmente la durée avant laquelle le moteur atteint le régime permanent.

I.1.8.2 Démarrage étoile-triangle

Lors d'un démarrage étoile-triangle, le moteur est d'abord connecte au réseau avec un couplage étoile, puis une fois démarré on passe sur le couplage triangle.

Le fait de démarrer avec un couplage étoile permet de diviser par la racine carrée de trois la tension appliquée, aussi, le courant maximal absorbé et Le couple de démarrage sont trois fois plus faible que lors d'un démarrage en triangle. La surintensité lors du passage étoile triangle est inférieure au courant d'appel d'un démarrage effectué directement en triangle, réalisée simplement a l'aide des contacteurs, cette méthode de démarrage est très économique.

➤ Montage étoile

La tension aux bornes d'un enroulement est plus faible que la tension entre phase du réseau.

$$U' = \frac{U}{\sqrt{3}}$$

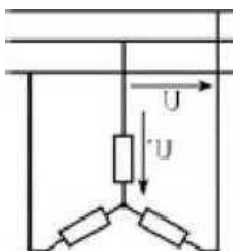


Figure (I.9) : montage étoile

➤ Montage triangle

$$U' = U$$

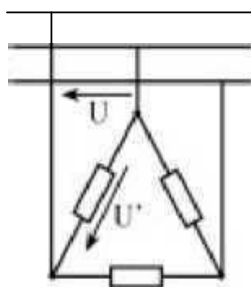


Figure (I.10) : montage triangle

I.1.8.3. Démarrage par autotransformateur

Pour utiliser ce mode de démarrage on doit relier le stator du moteur à un autotransformateur qui permet d'effectuer un démarrage sous tension variable. On augmente progressivement la tension et l'intensité du courant ne dépasse pas la valeur maximale désirée. [4]

I.1.8.4 démarrage résistif

Pour ce démarrage on insère des résistances en série avec les enroulements statoriques, ce qui a pour effet de limiter la tension à leurs bornes. Une fois le démarrage effectué on court-circuite ces résistances. Cette opération peut être effectuée progressivement par un opérateur à l'aide d'un rhéostat de démarrage.

I.1.8.5 démarrage à tension nominale

Ce type de démarrage est appelé démarrage rotorique. On insère des résistances de puissances en série avec les enroulements du rotor. Ce type de démarrage permet d'obtenir un fort couple de démarrage avec des courants de démarrage réduits mais il ne peut être mis en œuvre qu'avec des machines à rotor bobiné muni de contacts glissants (bagues et balais) ; permettent des connexions électriques des enroulements rotoriques. Ces machines ont le prix de revient plus important.

I.1.9. Freinage des moteurs asynchrones

On distingue plusieurs types de freinage

I.1.9.1. Freinage en génératrice asynchrone (hyper synchrone)

Lorsque la vitesse du moteur est supérieure à la vitesse du champ tournant, le moteur freine. On couple le moteur à un variateur de vitesse qui diminue progressivement la vitesse du moteur jusqu'à l'arrêt. Cette méthode n'est pas très efficace pour freiner rapidement le moteur car elle présente un faible couple.

I.1.9.2. Freinage par contre courant

Ce mode de freinage est équivalent à un freinage hyper synchrone. Ceci est obtenu par inversion de deux phases. Au moment de l'inversion, le glissement vaut presque 2, il se réduit ensuite rapidement sous l'effet du couple inverse par rapport au sens de rotation. Généralement, un dispositif électrique de coupure déconnecte le moteur du réseau au moment du passage à la vitesse nulle ($g=1$). Le couple de freinage moyen est, en général, supérieur au couple de démarrage pour des moteurs asynchrones à cage. La variation du couple de freinage

dépend fortement de la conception de la cage rotorique. Ce mode de freinage implique un inconvénient. C'est que le courant absorbé important, approximativement constant et supérieur au courant de démarrage. [3]

Les sollicitations thermiques, pendant le freinage, sont 3 fois plus importantes que pour une mise en vitesse.

I.1.9.3. Freinage par injection de courant continu

C'est la méthode la plus efficace pour freiner la machine, dans ce mode de freinage, le moteur asynchrone est couplé au réseau et le freinage est obtenu par coupure de la tension alternative et application d'une tension continue au stator. L'alimentation en courant continu du stator crée un champ fixe dans la machine qui s'oppose au mouvement. Cette tension est généralement fournie par une cellule de redresseur branchée sur le réseau. Les sollicitations thermiques sont approximativement 3 fois moins élevées que pour le mode de freinage par contre-courant. Le contrôle de l'intensité du courant continu permet de contrôler le freinage.

I.1.9.4. freinage électromécanique :

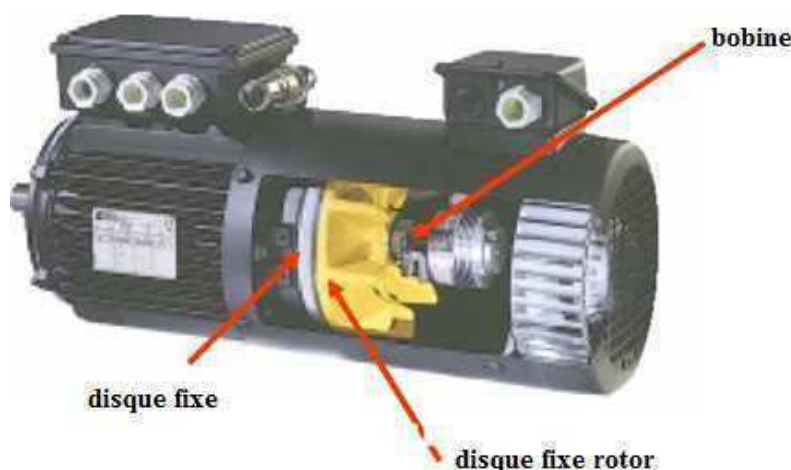


Figure (I.11) : freinage électromécanique

Il s'agit d'un frein à disque incorporé au moteur, on appelle l'ensemble MOTEUR FREIN. Alors une bobine commande le déplacement d'un disque bloqué en rotation. Ce disque vient en contact avec un disque fixé sur le rotor du moteur. Le frottement des deux disques provoque le ralentissement du moteur. Ce mode de freinage peut se réaliser par deux possibilités. [9]

➤ **frein à manque de courant**

Dès que la bobine de commande du frein n'est plus alimentée, le disque n'est plus maintenu et le freinage s'effectue. Ce type de frein est utilisé lorsque le maintien dans une position définie à l'arrêt demandé.

➤ **frein à présence de courant**

Le freinage a lieu dès que la bobine de commande du disque est alimentée

I.1.10. Classification des moteurs asynchrones selon les caractéristiques électriques et mécaniques

Pour l'utilisation de moteurs asynchrones, Il est très utile de connaître les caractéristiques de construction et d'utilisation des différents types de moteurs asynchrones triphasés, car ce sont elles qui en déterminent le choix, puisque plusieurs types de moteurs remplissent les exigences de la charge. Cette classification se base sur la variation de la Résistance et la réactance des enroulements du rotor.

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

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. [7]

I.1.10.1. moteur à couple normal et a courant de démarrage normal (CEMA classe A)

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.

I.1.10.2. Moteurs à faible courant et à couple de démarrages normal (CEMA classe B)

La grande majorité des moteurs asynchrones appartient à ce groupe. Ces moteurs, d'usage général, peuvent entraîner des ventilateurs, des pompes centrifuges, des machines-outils, etc. Ses caractéristiques découlent de l'emploi d'encoches profondes et étroites **figure**

(I.12.b). Lors du démarrage, la réactance est plus forte dans le bas 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. **figure (I.12.a).**

I.1.10.3. Moteurs à faible courant et à couple de démarrage élevé (NEMA classe C)

Ces moteurs sont utilisés dans les cas où le démarrage est difficile ou d'une durée plutôt longue. Ces moteurs comportent, en général, un rotor spécial à double cage **figure (I.12.c)**. Le fonctionnement du rotor à double cage (moteur classe C) est basé sur le fait que la fréquence du courant rotorique diminue à mesure que la vitesse du moteur croît, et que la réactance inductive est plus grande pour un conducteur logé profondément dans l'acier que pour un autre placé près de la surface du rotor. De plus, à cause de sa petite section, la résistance de la cage I est sensiblement plus grande que celle de la cage II.

Au moment où le moteur est mis sous tension, la fréquence du courant dans le rotor est égale à celle de la ligne d'alimentation. La réactance inductive de la cage 2 est alors élevée, de sorte que le courant circule surtout dans la cage 1 à haute résistance. À mesure que le moteur accélère, la réactance inductive des deux cages d'écureuil baisse et, finalement, lorsque le moteur marche en régime normal, elle devient tellement basse que le courant dans le rotor est limité seulement par les résistances en parallèle de la cage 1 et de la cage 2.

Donc on conclure que la résistance effective du rotor est élevée au démarrage est basse en régime nominale.

I.1.10.4. Moteurs à glissement élevé (NEMA classe D)

Un moteur de classe D, à un enroulement d'une grande résistance en raison de sa faible section **figure (I.12.d)**, ce qui lui confère au démarrage un fort couple ainsi qu'un faible courant. Par contre, il a un glissement à pleine charge.

I.1.10.5. moteur à faible couple et faible courant de démarrage (NEMA classe F)

Les conducteurs 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.

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 **figure (I.13)** qui, même s'il s'agit d'une cage simple, donnent un comportement qui tend beaucoup vers celui d'une double cage. [1]

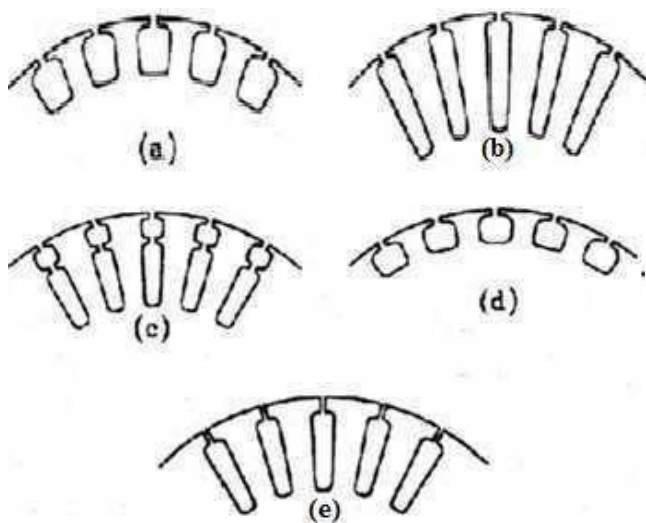


Figure (I.12) : les différents types d'encoches rotorique, suivant le classement d'NEMA

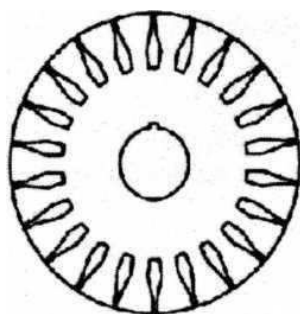


Figure (I-13) : rotor à encoches spéciales

I-2- moteur à induction à haut rendement

La transformation d'énergie électrique en énergie mécanique est caractérisée par un facteur appelé rendement (η) qui est donné par le rapport entre ce que le moteur nous offre comme puissance mécanique utile et ce qu'il absorbe comme puissance électrique : $\eta = \frac{Pu}{Pa}$

Certaines pratiques de base ainsi que les développements technologiques récents offrent des solutions efficaces pour la transformation de l'énergie et sa modulation en fonction des besoins réels de la charge raccordée. ces nouvelles technologies permet de valoriser le potentiel d'économie d'énergie disponible dans la demande de force motrice des édifices et industries.

Suite à la crise énergétique, une nouvelle génération de moteurs, appelés moteurs à haut rendement, a fait son apparition. Comme leur appellation l'indique, ces moteurs ont un

rendement et un facteur de puissance supérieur à ceux des moteurs équivalents de construction classique.

Pour les moteurs à induction à haut rendement, une diminution importante des pertes et une amélioration sensible du facteur de puissance et pour obtention de ces résultats on doit réserver le critère de conception. En premier lieu, on utilise une meilleure qualité d'aciers pour construire le circuit magnétique. Ces aciers ont des pertes spécifiques qui s'élèvent à seulement 3,3W/kg au lieu de 6,6W/kg pour l'acier de qualité usuelle. De plus on a réduit la densité de flux et accru l'isolation entre les tôles de façon à réduire à la fois les pertes par Hystérésis et les pertes dues aux courants de Foucault. Le nombre d'encoches ainsi que leur forme ont été optimisés. On utilise aussi des conducteurs de 35 à 40% plus gros afin de réduire les pertes dues à l'effet joule. [5]

I.2.1. Spécificités des machines à induction à haut rendement

I.2.1.1. caractéristiques techniques

La liste des caractéristiques techniques désirées doit être fournir à l'utilisateur lors d'achat d'un tel moteur. Les fabricants tendent à mettre l'accent sur le rendement et la qualité dans la conception de moteur plus gros. Les compromis entre divers paramètres de performance peuvent entraîner une diminution du rendement du moteur. Il est donc très important de préciser par écrit, dès le début, le rendement désiré.

Les fabricants de moteurs offrent un produit résultant d'une série de recherches et d'essais. Tout écart des plans de base du fabricant et des normes de sécurité de l'industrie pourrait entraîner des problèmes imprévus. [2]

➤ Les performances attendues du moteur

- La puissance et le facteur de service.
- L'échauffement et la classe d'isolation.
- La tension d'alimentation.
- Le courant de démarrage maximal.
- Le couple de démarrage minimal.
- Le couple de décrochage (minimal ou maximal).
- La plage des facteurs de puissance.
- La plage des rendements.

➤ **Les conditions d'environnements du moteur :**

- La température ambiante.
- L'altitude.
- Le taux d'humidité.
- Le degré d'abrasion.
- Le degré de sécurité.

➤ **La protection nécessaire ainsi que toute option supplémentaire**

- Une protection thermique (système de thermostat/thermistance).
- Un emplacement spécial pour la boîte de dérivation.

I.2.1.2. La tension d'alimentation

Les moteurs à induction triphasés sont prévus pour fonctionner de façon satisfaisante sous des variations de tension de $\pm 10\%$.

Puisque le choix de la tension d'alimentation d'un moteur est un facteur important pouvant altérer son rendement ; le tableau ci-dessous (**tableau 1**) montre les effets d'une variation de tension de 10% sur un moteur à induction type de classe B à pleine charge [3].

Tableau 1 : Effet d'une variation de tension de 10% sur un moteur à induction.

caractéristique	Tension	
	110%	90%
Glissement	-17%	+23%
rendement	+1%	-2%
Facteur de puissance	-3%	+ 1%
Intensité du courant	-7%	+ 11%
Couple de démarrage	+21%	-19%
Courant de démarrage	+10%	-10%

D'autre côté le déséquilibre des tensions de phase doit être inférieur à 1 % ; un déséquilibre de tension de 3,5 % occasionne une augmentation de température de 25 % et un accroissement de courant de l'ordre de 6 à 10 fois la valeur du déséquilibre de tension, donc détérioration significative du rendement.

I.2.1.3. La vitesse

Un meilleur rendement est très souvent obtenu dans les moteurs à vitesse élevée. Cela ne signifie pas qu'il est toujours préférable d'utiliser un moteur à vitesse élevée et d'abaisser sa vitesse à l'aide des mécanismes conçus à cet effet afin de l'adapter à la charge. Les pertes de puissance se produisant au niveau des mécanismes d'abaissement de vitesse pourraient réduire le rendement du système à une valeur inférieure à celle obtenue avec un moteur à commande directe et à faible vitesse.

I.2.1.4. Le couple

Le couple mesure la force servant à produire une rotation. Les dimensions du moteur sont proportionnelles à son couple et non à sa puissance en hp ;

(**Puissance = Couple x Vitesse**). Ainsi, un moteur à couple élevé est plus gros et coûte dans la plupart des cas plus cher. Les moteurs à induction sont classés selon leur couple (modèles A, B, C, D et F). Le modèle le plus courant est le B et c'est le modèle de notre étude.

- Les modèles C et D ont un couple de démarrage élevé.
- Le glissement est plus élevé dans le cas du modèle D que dans le cas des modèles Bou C, puisque le modèle D, au couple à pleine charge, fonctionne à un pourcentage moindre de la vitesse synchrone.

I.2.2. Caractéristiques des moteurs à haut rendement

La construction des moteurs à haut rendement est la même que celle des moteurs classique mais en tenant compte à :

- L'acier mince et de haute qualité pour les tôles des circuits magnétiques.
- En augmentant la section du stator et du rotor, on réduit la densité des flux magnétiques et, en conséquence, les pertes par hystérésis.
- Les pertes par frottement sont diminuées par l'emploi de paliers plus petits ou de meilleure qualité.
- Les pertes de ventilation peuvent être réduites en employant des ventilateurs plus petits. De toute façon, les moteurs à haut rendement fonctionnent à des températures plus basses que les moteurs classiques.
- Une minimisation de l'épaisseur de l'entrefer entre le stator et le rotor.
- Une grande longueur.
- Une augmentation de la taille de la carcasse.

Pour un coût supplémentaire de 20 à 30%. Les moteurs à haut rendement, ont un rendement

meilleur de 2 à 6 %, ce qui représente des économies d'énergie significatives.

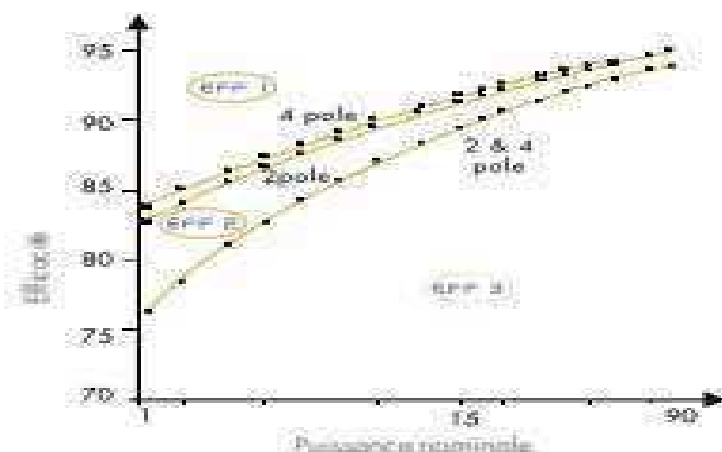
La réduction des pertes permet une élévation moindre de la température dans le moteur, aussi de plus, dans de nombreux cas :

1. augmentation de la fiabilité.
2. réduction des coûts de la maintenance.
3. Amélioration de la capacité de résistance aux surcharges.
4. amélioration de La résistance aux conditions de fonctionnent anormales - sous et sur tension aux phases non équilibrées, aux variations de la forme de la puissance et du courant (par exemple les harmoniques), etc.
5. amélioration de facteur de puissance.

I.2.3. Classes de rendement des moteurs à haut rendement en vigueur en Europe

En 1998, dans le cadre de l'accord volontaire établi entre le comité européen des fabricants est constructeurs des machines électriques et d'électroniques de puissance (CEMEP), et la commission européenne, ont été définies trois classes de rendement pour la plage de puissance comprise entre (1,1kw et 90kw). [8]

- **EFF3 : moteur à bas niveau de rendement.**
- **EFF2 : moteur à niveau de rendement amélioré.**
- **EFF1 : moteur à haut niveau de rendement.**



Figure(I.14) : Courbe de rendement en fonction de la puissance selon la norme internationale.

I.2.4. Répartitions des nouvelles classes de rendement des moteurs électriques:

Une nouvelle classification des machines électriques tournantes et des moteurs triphasés à induction à cage, a été proposée et acceptée par les principaux fabricants internationaux, suivent la norme CEI 60034-30 - 2010, qui définit les classes de rendement des moteurs de puissance comprise entre 0,75 kW et 375 kW.

L'appellation IE fait référence à l'expression (international efficiency) «rendement international», et suivre par un chiffre.[8]

- **IE 3 : rendement premium.**
- **IE 2 : haut rendement.**
- **IE 1 : rendement standard.**

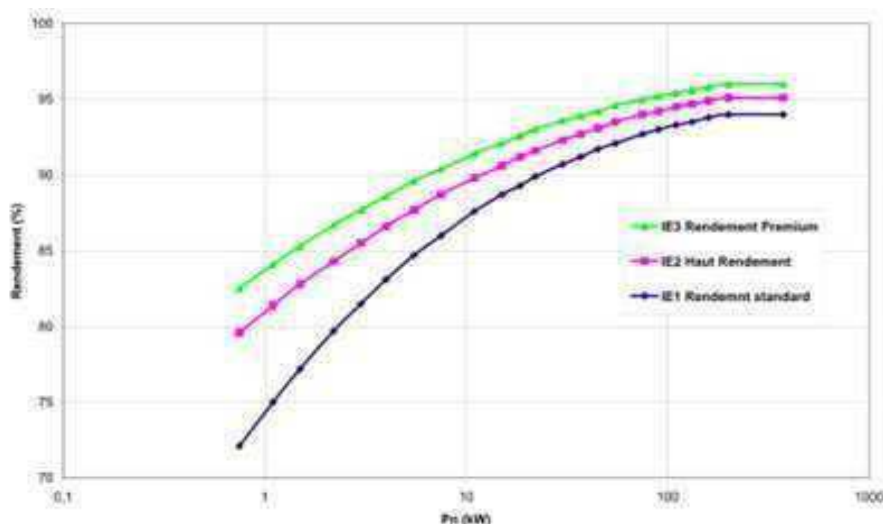


Figure I.15 Nouvelle classification de rendement des moteurs (IE).

I.2.5. Comparaison des classes de rendement anciennes et nouvelle

Le nouveau système international de classe de rendement (IE) est associé à un système de numérotation ouvert. Comparé à l'ancien système de classe de rendement (EEF), il est désormais plus facile d'ajouter des développements futurs. Il comporte une autre nouvelle classe, IE3, qui n'existe pas dans l'ancien système européen de classification EEF. Son domaine d'application a également été étendu de façon significative. Le nouveau code IE s'applique à une plus large plage de puissances, ainsi qu'aux classes 60 Hz, par exemple aux Etats-Unis.

La principale différence entre les classes de rendement (EFF et IE) réside dans la méthode utilisée pour les déterminer. En comparant directement un même moteur, le rendement déterminé selon la nouvelle méthode de mesure est censé à être inférieur. Par exemple, un moteur de classe EFF1 de 11 KW à 4 pôles présentant un rendement de 91.0 % est identique à un moteur de classe IE3 qui présente un rendement de 91.4%. [8]

I.2.5.1. Classe de rendement IE1, IE2 et IE3 selon la norme CIE**Tableau I.2 :** Classe de rendement pour les moteurs 50Hz. [8]

50 Hz									
Kw	IE1, rendement niveau « standard »			IE2, rendement niveau « haut »			IE3, rendement niveau « premium »		
	2 pôles	4 .pôles	6 pôles	2 pôles	4 pôles	6 pôles	2 pôles	4 pôles	6 pôles
0.75	72.1	72.1	70.0	77.4	73.6	75.9	80.7	82.5	80.5
1.1	75.0	75.0	72.9	79.6	81.4	78.1	82.7	84.1	81.0
1.5	77.2	77.2	75.2	81.3	82.8	79.8	84.2	85.3	82.5
2.2	79.7	79.7	77.7	83.2	84.3	81.8	85.9	86.7	84.3
3	81.5	81.5	79.7	84.6	85.5	83.3	87.1	87.7	86.6
4	83.1	83.1	81.4	85.8	86.6	84.6	88.1	88.6	86.8
5.5	84.7	84.7	83.1	87.0	87.7	86.0	89.2	89.6	88.0
7.5	86.0	86.0	84.7	88.1	88.7	87.2	90.1	90.4	89.1
11	87.6	87.6	85.4	89.4	89.8	88.7	91.2	91.4	90.3
15	88.7	88.7	87.7	90.3	90.6	89.7	91.9	92.1	91.2
18.5	89.3	89.3	88.6	90.9	91.2	90.4	92.4	92.6	91.7
22	89.9	89.9	89.2	91.3	91.6	90.9	92.7	93.0	92.2
30	90.7	90.7	90.2	92.0	92.3	91.7	93.3	93.6	92.9
37	91.2	91.2	90.8	92.5	92.7	92.2	93.7	93.9	93.3
45	91.7	91.7	91.4	92.9	93.1	92.7	94.0	94.2	93.7
55	92.1	92.1	91.9	93.2	93.5	93.1	94.3	94.6	94.1
75	92.7	92.7	92.6	93.8	94.0	93.7	94.7	95.0	94.6
90	93.0	93.0	92.9	94.1	94.2	94.0	95.0	95.2	94.9
110	93.3	93.3	93.3	94.3	94.5	94.3	95.2	95.4	96.1
132	93.5	93.5	93.5	94.6	94.7	94.6	95.4	95.6	96.4
180	93.8	93.8	93.8	94.8	94.9	94.8	95.6	95.8	96.6
200 à 375	94.0	94.0	94.0	95.0	95.1	95.0	95.8	95.3	96.8

Tableau I.3. Classe de rendement pour les moteurs 60Hz. [8]

kW	60 Hz								
	IE1, rendement niveau « standard »			IE2, rendement niveau « haut »			IE3, rendement niveau « premium »		
	2 pôles	4 pôles	6 pôles	2 pôles	4 pôles	6 pôles	2 pôles	4 pôles	6 pôles
0.75	77.0	78.0	73.0	81	82.4	80.0	82.5	85.5	82.5
1.1	78.5	79.0	75.0	82.5	84.0	85.5	84.0	86.5	87.5
1.5	81.0	81.5	77.0	84.0	84.0	86.5	85.5	86.5	88.5
2.2	81.5	83.0	78.5	85.5	87.5	87.5	87.5	86.5	89.5
3.7	84.5	85.0	83.5	87.5	87.5	87.5	88.5	89.5	89.5
5.5	85.0	87.0	85.0	88.5	89.5	89.5	89.5	91.7	91.0
7.5	87.5	87.5	86.0	89.5	89.5	89.5	90.2	91.7	91.0
11	87.5	88.5	89.0	90.2	91.0	90.2	91.0	92.4	91.7
15	88.5	89.5	89.5	90.2	91.0	90.2	91.0	93.0	91.7
18.5	89.5	90.5	90.2	91.0	92.4	91.7	91.7	93.6	93.0
22	89.5	91.0	91.0	91.0	92.4	91.7	91.7	93.6	93.0
30	90.2	91.7	91.7	91.7	93.0	93.0	92.4	94.1	94.1
37	91.5	92.4	91.7	92.4	93.0	93.0	93.0	94.5	94.1
45	91.7	93.0	91.7	93.0	93.6	93.6	93.6	95.0	94.5
55	92.4	93.0	92.1	93.0	94.1	93.6	93.6	95.4	94.5
75	93.0	93.2	93.0	93.6	94.5	94.1	94.1	95.4	95.0
90	93.0	93.2	93.0	94.5	94.5	94.1	95.0	95.4	95.0
110	93.0	93.5	94.1	94.5	95.0	95.0	95.0	96.8	95.8
150	94.1	94.5	94.1	95.0	95.0	95.0	95.4	96.2	95.8
185 à 375	94.1	94.5	94.1	95.4	95.4	95.0	95.8	96.2	95.8

I.2.6. Marquage de rendement sur le moteur

Chaque moteur doit être équipé d'une plaque signalétique. Les données figurant sur la plaque signalétique sont spécifiées dans la norme CEI 60034-1. Elles incluent notamment le niveau de rendement η du moteur à 100 % de la charge nominale uniquement. Le règlement sur les moteurs exige également d'indiquer le niveau de rendement à 75 % et 50 % de la

charge nominale. Le comité CEMEP considère qu'il est suffisant d'indiquer sur la plaque signalétique le niveau de rendement à 100 % de la charge nominale uniquement, et d'indiquer le niveau de rendement à 75 % et 50 % de la charge nominale dans la documentation du produit uniquement.[8]

I.2.7. Facteurs influents sur le rendement des moteurs électriques

On peut citer plusieurs facteurs qui influencent sur le rendement d'un moteur électrique qui sont :

I.2.7.1. Qualité d'alimentation en énergie

Pour le bon fonctionnement dans les conditions optimales des moteurs électrique en particulier moteur à induction, on doit les alimentés par des formes d'ondes sinusoïdales triphasées symétriques avec la valeur de la tension nominale. Les changements de ces conditions idéales peuvent causer la détérioration significative du rendement et une réduction de la vie de moteur.

I.2.7.2. Maintenance du moteur

Les moteurs fonctionnent plus efficacement, durent plus longtemps et nécessitent moins d'attention s'ils sont nettoyés, refroidis, séchés et lubrifiées correctement.une grande humidité et un lavage fréquent en une durée de vie largement au dessous de la moyenne. Ainsi que les branchements corrects prolonge la durée de vie de moteur et maintiennent un rendement optimal.

I.2.7.3. Charge du moteur

La charge du moteur joue aussi un rôle sur son rendement. Un moteur chargé à plus de 50 % a un rendement relativement stable. Le rendement diminue considérablement à une faible charge. Les faibles rendements sont dus aux surcharges.

I.2.7.4. Plage d'utilisation des moteurs

D'une manière générale le rendement η des moteurs électriques prend une valeur maximal pour : $0.6 \ln < I_l < 1,01n$, car dans cette plage on considère, que le rapport des pertes à la puissance consommée est minimale. En dehors de cette plage, les pertes devenant beaucoup plus prépondérantes, entraînent la croissance de ce rapport donc une réduction du rendement η . [7]

I.2.8. Avantages d'utilisation des moteurs à haut rendement

Il y a beaucoup d'avantages pour employer les moteurs à induction à haut **rendement**

- Ces moteurs à haut rendement produisent la même puissance de sortie, mais avec une puissance d'entrée électrique moindre que les moteurs standard
- Fiabilité et rendement suffisamment élevé.
- Ces moteurs à haut rendement sont disponibles aux différentes puissances et avec différentes vitesses (750, 950, 1500. et de 3000 à 3600 /mn) à 220/380 V.
- L'économie à employer un moteur à haut rendement, où son coût est plus grand que ce lui de moteur initial.
- Ces moteurs à haut rendement ont typiquement 30-50% de pertes inférieures que les moteurs standards équivalents.
- Panne réduite en raison de leur conception et construction.
- Donner beaucoup d'années de service, valable au-delà de la période de remboursement initiale.(durée de vie importante).
- L'épargne significative en raison du choix, achat, fonctionnement efficace et correct du moteur pour une telle application.
- Réduction de la sensibilité du facteur de puissance et le rendement aux fluctuations de tension et de charge.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné des généralités sur la construction du moteur asynchrone, description et classification des différents types de moteurs selon les caractéristiques électriques et mécaniques, ainsi que le glissement, le couple et le principe de fonctionnement de la machine. Nous avons présenté aussi le moteur à induction à haut rendement. L'accent dans le deuxième chapitre est mis sur la méthode de calcul des contraintes électromagnétique, pertes, performances et rendement.

Chapitre II

**Dimensionnement classique d'un moteur
asynchrone standard.**

Introduction

Le projet de construction d'une machine électrique précisée la machine asynchrone commence par le choix des dimensions et des matériaux de ces parties actives et constructives, et en premier lieu de ces dimensions principales: le diamètre et la longueur de l'armature magnétique du stator.

Dans ce chapitre, nous procédons à l'étude des caractéristiques du fonctionnement d'un moteur asynchrone triphasé à l'aide d'une méthode analytique, en considérant le schéma équivalent de type généralisé.

Dans ce travail, nous avons déterminé les contraintes électromagnétiques telles que les inductions dans les différentes parties de la machine asynchrone, la charge linéaire, les densités du courant. Ainsi que nous passons au calcul des pertes, des performances et du rendement de la machine.

II. Calcul des contraintes électromagnétiques du stator et de rotor

II.1. Le stator

II.1.1. la puissance électromagnétique

Lors du fonctionnement du moteur en régime établi, un transfert d'énergie est effectuée du stator vers le rotor par le champ tournant à travers l'entrefer cette puissance est définie comme suit :

$$P_e = m_1 \cdot E_1 \cdot I_{1nom} \cdot 10^{-3} \quad [\text{kVA}] \quad (\text{II-1})$$

Avec : m_1 : nombre de phases

E_1 : Force électromotrice ; [V]

I_1 : Courant nominal ; [A]

$$\text{Ou bien : } P_e = K_e \frac{P_n}{\cos(\Phi_n) \cdot n} \quad [\text{kVA}] \quad (\text{II-2})$$

Avec :

P_n : La puissance nominale de la machine en [KW].

$\cos(\Phi_n)$: Facteur de puissance nominal de la machine.

η_n : Le rendement nominal de la machine.

K_e : Coefficient qui tient compte de la chute de tension dans la phase statorique, il est donné en fonction du nombre de paires de pôles par l'expression suivante :

$$K_e = 0,98 - 5 \cdot P \cdot 10^{-3} \quad (\text{II-3})$$

Le nombre de paire de pôles est donné par la formule suivante :

$$P = \frac{60.f_1}{n_s} \quad (\text{II-4})$$

Avec : f_1 : la fréquence de réseau d'alimentation ; [mm]

n_s : La vitesse de synchronisme ; [tr/min]

II.1.2. la force électromotrice

Elle est donnée par la formule suivante :

$$E_1 = 4K_f \cdot K_{enr1} \cdot f_1 \cdot W_1 \cdot \Phi \quad [\text{Wb}] \quad (\text{II-5})$$

Avec :

$K_f = \frac{\pi}{2\sqrt{2}}$; Coefficient de forme d'onde d'induction dans l'entrefer.

K_{enr1} : Coefficient de l'enroulement statorique.

W_1 : Nombre de spire en série d'une phase.

Φ : Flux utile par pôle.

➤ Coefficient de l'enroulement

Il est donné par la formule suivante

$$K_{en1} = K_{d1} \cdot K_{r1} \quad (\text{II-6})$$

K_{d1} : Coefficient de distribution, il est donné par :

$$K_{d1} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2m_1}\right)}{q_1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2m_1 q_1}\right)} \quad (\text{II-7})$$

Ou bien :

$$K_{d1} = \frac{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{q_1 \sin\left(\frac{\alpha}{2q_1}\right)} \quad (\text{II-8})$$

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

$$K_{r1} = \sin\left(\frac{\beta \cdot \pi}{2}\right)$$

β : Rapport de raccourcissement.

Il est donné comme suite :

$$\beta = \frac{\gamma_1}{\tau} \quad (\text{II-9})$$

α : La zone phasique :

$$\alpha = \frac{2\pi \cdot P \cdot q_1}{Z_1} \quad \text{ou bien : } \alpha = q_1 \gamma. \quad (\text{II-10})$$

q_1 : Nombre d'encoches par pôle et par phase :

$$q_1 = \frac{Z_1}{2 \cdot p \cdot m_1} \quad (\text{II-11})$$

➤ Nombre de spire d'une voie parallèle

Donné par la formule suivante :

$$W_1 = \frac{U_{en1} \cdot Z_1}{2a_1 \cdot m_1} \quad (\text{II-12})$$

a_1 : Nombre de voies parallèle.

U_{en1} : Nombre de conducteur par encoche :

II.1.3. Induction magnétique dans l'entrefer

Elle est donnée par la formule suivante :

$$B_{\delta} = \frac{0,225 \cdot 2 \cdot P \cdot U_{\Delta} \cdot 10^6}{l_i \cdot D_{1int} \cdot W_1} \quad [\text{Gauss}] \quad (\text{II-13})$$

U_{Δ} : Tension simple nominale statorique ; [V]

D_{1int} : Diamètre intérieur du stator ; [mm]

l_i : Longueur virtuelle de l'induit ; [cm]

II.1.4. courant dans la phase statorique :

Il est donné par la formule suivante :

$$I_1 = \frac{P_n \cdot 10^3}{m_1 \cdot U_n \cdot \cos \varphi} \quad [\text{A}] \quad (\text{II-14})$$

II.1.5. La charge linéaire

Elle est donnée comme suite :

$$A_1 = \frac{2 \cdot m_1 \cdot I_1 \cdot W_1}{\pi \cdot D_{1int}} \quad [\text{A/m}] \quad (\text{II-15})$$

La marge admissible de la charge linéaire est: $23 \cdot 10^3 \div 25 \cdot 10^3$ [A/m]

II.1.6. Flux utile par pole

Il est donné par la formule suivante :

$$\Phi = \alpha_i \cdot \tau \cdot l_i \cdot \beta_{\delta} \cdot 10^{-6} \quad [\text{Web}] \quad (\text{II-16})$$

Avec :

α_i : Coefficient de recouvrement polaire il est donné par la formule suivante :

$$\alpha_i = \frac{2}{\pi} = 0,64$$

τ : Pas polaire ; c'est la distance entre deux axes de pôles voisins distincts, il est donné par :

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_{1int}}{2p} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II-17})$$

II.1.7. Densité du courant dans les conducteurs statorique

Elle est donnée par la formule suivante :

$$J_1 = \frac{I_{1nY}}{S_{eff} \cdot a_1} \quad [\text{A/mm}^2] \quad (\text{II-18})$$

La marge admissible de la densité pour le cuivre est : $5,5 \div 8,5$ [A/mm²] Avec :

I_{1nY} : Courant nominale dans une phase statorique en couplage étoile, il est donné comme suit :

$$I_{1nY} = I_1$$

S_{eff} : La section effective d'un conducteur.

Si la section effective calculée d'un conducteur est supérieure à 1.8 mm^2 , on doit deviser celle-ci en sections élémentaires. Et comme la section des conducteurs étant normalisé, on choisira la plus proche de celle calculée.

$$S_{el} = \frac{S_{eff}}{N_{el}} \quad [mm^2] \quad (II-19)$$

N_{el} : Nombre de conducteurs élémentaires

II.1.8. Induction maximale dans la dent statorique

Elle est basée sur la loi de la conservation du flux et donnée par l'expression suivante :

$$B_{z1max} = \frac{t_1 \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot b_{z1}} \quad [T] \quad (II-20)$$

Avec :

K_{fer} : Coefficient de remplissage des tôles statoriques ; il est donné par la formule suivante :

$$K_{fer} = 0.985 - 5 \cdot P \cdot 10^{-3} \quad (II-21)$$

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

t_1 : Pas dentaire qui est définie comme étant la distance qui sépare deux axes de deux encoches voisines. [mm]

II.1.9. Induction magnétique dans le dos statorique

Elle est donnée par la formule suivante :

$$B_{c1} = 0.5 \cdot \frac{\alpha_i \cdot \tau \beta_\delta}{K_{fer} \cdot h_{c1}} \quad [T] \quad (II-22)$$

Avec :

h_{c1} : La hauteur du dos statorique.

$$h_{c1} = \frac{D_{1int} - D_{moy}}{2} \quad [mm] \quad (II-23)$$

D_{1int} : Diamètre extérieure de stator [mm]

D_{moy} : Diamètre moyen du stator [mm]

Les plages admissibles de l'induction dans les feuilles statorique pour un acier 2013 sont

$$B_{z1max} : 1,6 \div 1,95 \quad [T]$$

$$B_{c1max} : 1,5 \div 1,65 \quad [T]$$

II.1.10. Section de l'encoche statorique

La section occupée par les conducteurs, elle est donnée par la formule suivante :

$$S_{enc1} = \left(\frac{b_{en1} + b'_{en1}}{2} \right) \cdot h_{en1} + \frac{\pi \cdot r^2}{2} \quad [mm^2] \quad (II-24)$$

b_{en1} : La largeur maximale de l'encoche statorique ; [mm]

b'_{en1} : La largeur minimale de l'encoche statorique; [mm]

r : Le rayon de la tête de l'encoche statorique ; [mm]

h_{en1} : La hauteur utile de l'encoche statorique ; [mm]

II.1.11. Section occupée par la cale de fermeture

Elle est donnée par la formule suivante :

$$S_{cal} = l'_{cal} \cdot e_{cal} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{II-25})$$

Avec :

l'_{cal} : La largeur de la cale de fermeture. [mm]

e_{cal} : L'épaisseur de la cale de fermeture. [mm]

II.1.12. La section occupé par le caniveau

Elle est donnée par la formule suivante :

$$S_{can} = \left(\frac{2 \cdot h_{z1} \cdot e_{can}}{\cos \theta} \right) + \left(\pi \cdot e_{can} \cdot \frac{2 \cdot r - e_{can}}{2} \right) \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{II-26})$$

Avec :

e_{can} : Épaisseur du papier isolant (caniveau). [mm]

h_{z1} : La hauteur de l'encoche. [mm]

θ : L'angle entre deux parois d'encoche statorique.

II.1.13. La section occupée par les l'isolation de l'encoche

$$S_{iso} = S_{cal} - S_{can} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{II-27})$$

II.1.14. La section occupée par les conducteurs dans l'encoche

$$S_{en1} = S_{enc1} - S_{iso} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{II-28})$$

II.1.15. Coefficient de remplissage

Le coefficient de remplissage est défini comme étant le rapport de la section des conducteurs occupant l'encoche à la section utile de l'encoche, il doit varier dans l'intervalle (0,7-0,75), il est donné par l'expression suivante :

$$K_{rempl} = \frac{N_{el} \cdot U_{en1} \cdot d_{iso}^2}{S_{en1}} \quad (\text{II-29})$$

La marge admissible : $K_{rempl} = 0,7 \div 0,75$.

II.2. Le rotor

II.2.1. Induction maximale dans la dent rotorique

Le calcul est basé sur la loi de conservation du flux, elle est donnée par la formule suivante :

$$B_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_2}{b_{z2} \cdot K_{fer}} \quad [T] \quad (II-30)$$

Avec :

t_2 : pas d'entaille; [mm]

$$t_2 = \frac{\pi \cdot D_{2ext}}{Z_2} \quad [mm] \quad (II-31)$$

Z_2 : Le nombre d'encoches rotorique ;

D_2 : Le diamètre extérieur du rotor en [mm] ;

K_{fer} : Coefficient de remplissage des tôles ; $K_{fer} = 0.975$

b_{z2} : largeur de la dent r otorique;

II.2.2. Induction magnétique dans le dos rotorique

Elle est donnée par la formule suivante :

$$B_{c2} = \frac{0,5 \cdot \alpha_i \cdot \tau \cdot B_{\delta}}{h_{c2} \cdot K_{fer}} \quad (II-32)$$

Avec :

h_{c2} : Hauteur du dos rotorique. [mm]

Les plages admissibles de l'induction dans les feuilles rotorique pour un acier 2013 sont :

$$B_{z2max}: 1,7 \div 1,95 \quad [T]$$

$$B_{c2}: 1,35 \div 1,50 \quad [T]$$

II.2.3. Le courant dans la barre rotorique

En général, le courant dans une phase de l'enroulement rotorique est donné par la relation suivante

$$I_2 = K_i \cdot \frac{2m_1 J_1 W_1 K_{enr1}}{Z_2} \quad [T] \quad (II-33)$$

Avec :

K_i : Déterminé en fonction du facteur de puissance ;

II.2.4. La section de l'encoche rotorique

Elle est donnée par :

$$S_{enc2} = \left(\frac{b_{en2} + b'_{en2}}{2} \right) \cdot h_{en2} + \frac{\pi \cdot r_1^2}{2} + \frac{\pi \cdot r_1^2}{2} \quad [mm] \quad (II-34)$$

Avec

b_{en2} : La largeur maximale de l'encoche ; [mm]

b'_{en2} : La largeur minimale de l'encoche ; [mm]

r_1 : Le rayon de la tête extérieure de l'encoche ; [mm]

r_2 : Le rayon de la tête intérieure de l'encoche ; [mm]

h_{en2} : La hauteur utile de l'encoche rotorique; [mm]

II.2.5. Densité du courant dans la barre rotorique

Elle est donnée par la formule suivante :

$$J_2 = \frac{I_2}{s_{enr2}} \quad [\text{A/mm}^2] \quad (\text{II-35})$$

La marge admissible de la densité de courant pour l'aluminium est : $5,5 \div 8,5$ [A/mm²]

II.3. calcul de circuit magnétiques et des paramètres électriques

Le circuit magnétique dans les machines électriques en particulier les machines asynchrones sert à canaliser les lignes d'induction, pour retenir un flux le plus grand possible. Le calcul magnétique a pour but de déterminer la F.M.M totale nécessaire à l'aimantation de la machine, ainsi le courant magnétisant, responsable de la création du champ magnétique tournant statorique. Le principe de calcul est basé sur la loi d'Ampère de circulation du champ magnétique suivante :

$$F = \int H \cdot dl$$

$$F = W \cdot I$$

Avec :

F : Force magnétomotrice ; [A]

H : Intensité du champ magnétique dans le circuit magnétique ; [Am]

W: Nombre de spires ;

I : Courant magnétisant ; [A]

dl : Élément de ligne de champ ;

Afin de faciliter le calcul on repartie le circuit magnétique en tronçons élémentaires de façon à obtenir la valeur du champ magnétique dans chaque élément soit constante, l'intégral sera $\int H \cdot dl$ remplacé par la somme suivante :

$$\sum_{i=1}^n L_i \cdot H_i$$

Avec :

L : Représente la longueur moyenne du tronçon choisi ; [mm]

H : Intensité du champ magnétique dans le tronçon choisi ;

En effet, le calcul des F.M.M s'effectue comme suit :

- Premièrement, on calcul le parcours des lignes de champ magnétique de

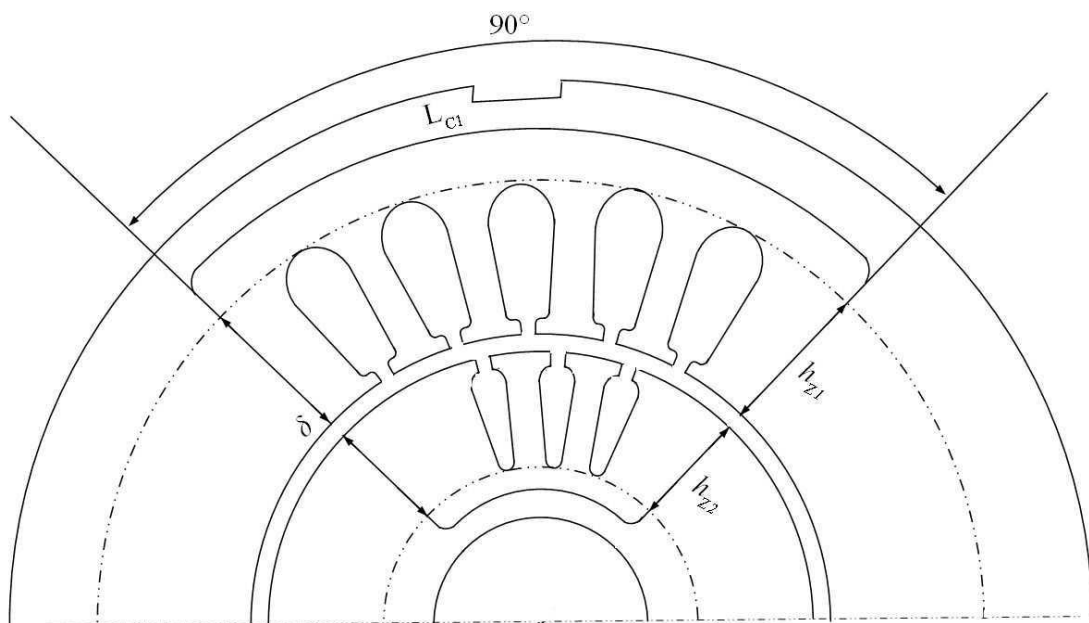
chaque tronçon à partir des dimensions de la machine.

- Deuxièmement, on détermine l'intensité du champ magnétique à partir du tableau d'aimantation $B_i = f(H_i)$
- Dans la dernière étape .on passe au calcul de F.M.M de chaque tronçon, puis la F.M.M totale.

Sachant que, le calcul F.M.M totale s'effectue pour une paire de pôle, le circuit est alors compose de cinq tronçons :

- ▶ La culasse statorique
- ▶ Les dents statoriques
- ▶ La culasse rotorique
- ▶ Les dents rotoriques
- ▶ L'entrefer

Une fois que les F.M.M du circuit magnétique sont calculées, les paramètres du circuit équivalent de la machine peuvent être calculés.



Figure(II.1) : schéma du circuit magnétique

II.3.1. Circuit magnétique statorique

II.3.1.1. La F.M.M dans la culasse du stator

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$F_{c1} = H_{c1} \cdot L_{c1} \cdot 10^{-3} \quad [A] \quad (II-36)$$

Avec :

H_{c1} : Intensité du champ magnétique dans la culasse statorique qui correspond à l'induction B_{c1} .

H_{c1} : est déterminé de la courbe $H_{c1} = f(B_{c1})$. Représenté dans le tableau (voir annexe)

L_{c1} : Longueur moyenne des lignes de champs dans la culasse statorique :

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$L_{c1} = hc1 + \frac{\pi \cdot (D_{1ext} - hc1)}{2 \cdot P} \quad [mm] \quad (II-37)$$

II.3.1.2. La F.M.M dans la dent du stator

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$F_{z1} = H_{z1} \cdot h_{z1} \cdot 10^{-3} \quad [A] \quad (II-38)$$

Avec :

H_{z1} : Intensité du champ magnétique qui correspond à l'induction B_{z1} .

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

II.3.2.1. F.M.M dans l'entrefer

La force magnétomotrice dans l'entrefer est proportionnelle à la valeur de l'induction dans l'entrefer ($B\delta$) et de l'épaisseur de celui-ci (δ), elle est donnée

Par l'expression suivante :

$$F_{\delta} = 0,8 \cdot B_{\delta} \cdot K_{\delta} \cdot \delta \cdot 10^{-3} \quad [A] \quad (II-39)$$

Avec :

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

$$K_{\delta} = K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2} \quad (II-40)$$

Avec :

$$K_{\delta 1} = 1 + \frac{b_{f1}}{t_1 - b_{f1} + (5 \cdot \delta \cdot \frac{t_2}{b_{f2}})} \quad (II-41)$$

$$K_{\delta 2} = 1 + \frac{b_{f2}}{t_2 - b_{f2} + (5 \cdot \delta \cdot \frac{t_2}{b_{f2}})} \quad (II-42)$$

b_{f1} Et b_{f2} : sont respectivement les largeurs des fentes des dents statorique et rotorique en [mm].

II.4.Circuit magnétique rotorique :**II.4.1. La F.M.M dans la culasse rotorique :**

La F.M.M dans la culasse du rotor est donnée par l'expression suivante :

$$F_{C2} = H_{C2} \cdot L_{C2} \cdot 10^{-3} \quad [A] \quad (II-43)$$

H_{C2} : Intensité du champ magnétique dans la culasse rotorique qui correspond à l'induction B_{C2} .

L_{C2} : Longueur moyenne des lignes du champ magnétique dans la culasse du rotor :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$L_{C2} = (D_2 - 2 \cdot h_{Z2} - h_{C2}) \cdot \frac{\pi}{2 \cdot p} + h_{C2} \quad [mm] \quad (II-44)$$

Avec :

h_{Z2} : Hauteur de la dent rotorique en [mm].

h_{C2} : Hauteur de la culasse rotorique en [mm].

II.4.2. La F.M.M dans la dent du rotor

Elle est exprimée par la formule suivante :

$$F_{Z2} = H_{Z2} \cdot (h_{Z2} - 0,4 \cdot d_2) \cdot 10^{-3} \quad [A] \quad (II-45)$$

H_{Z2} : Intensité du champ magnétique dans la dent rotorique qui correspond à l'induction B_{Z2} .

d_2 : Le diamètre inférieure de l'encoche rotorique ; [mm]

II.4.3. La F.M.M totale

$$F = \sum F_i = 2 \cdot (F_{\delta} + F_{Z1} + F_{Z2}) + F_{c1} + F_{c2} \quad [A] \quad (II-46)$$

Le numéro 2 est du fait que l'entrefer, les dents statorique et rotorique sont parcourus deux fois par les lignes de champ magnétique.

II.4.4. Les coefficients de saturation :**II.4.5. Le coefficient de saturation des dents**

Il est donné par l'expression suivante :

$$K_{\mu Z} = \frac{F_{\delta} + F_{Z1} + F_{Z2}}{F_{\delta}} \quad (II-47)$$

II.4.6. Le coefficient de saturation de la machine

Le coefficient de saturation de la machine est défini comme étant le rapport de la F.M.M totale sur la F.M.M dans l'entrefer. Le coefficient de saturation est compris entre 1,1 et 1,4, il est donné par l'expression suivante :

$$K_{\mu} = \frac{\sum F_i}{2 \cdot F_{\delta}} \quad (II-48)$$

II.4.7. Le courant magnétisant

Pour un circuit fermé, le courant magnétisant représente la partie réactive, sa valeur est donnée par la forme suivante :

$$I_{\mu} = \frac{p \cdot \Sigma F_i}{0,9 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot K_{en1}} \quad [A] \quad (II-49)$$

II.4.8. Calcul des paramètres électriques

II.4.8.1 Les paramètres électriques du stator

➤ La résistance d'une phase du stator

Elle est donnée par la formule suivante :

$$R_1 = \rho_{cu}(T) \frac{W_1 \cdot L_{W1} \cdot 10^{+3}}{a_1 \cdot N_{el} \cdot S_{eff}} \quad [\Omega] \quad (II-50)$$

Avec :

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

$$\begin{aligned} T = 115^{\circ}\text{C} & \quad \rho_{cu} = 24,4 \cdot 10^{-9} \quad [\Omega \cdot \text{m}] \\ T = 20^{\circ}\text{C} & \quad \rho_{CU} = 17,2 \cdot 10^{-9} \quad [\Omega \cdot \text{m}] \end{aligned}$$

S_{eff} : Section standard d'un conducteur.

L_{W1} : Longueur moyenne d'une spire de l'enroulement statorique, calculée comme suit :

$$L_{W1} = 2 \cdot (L_i + L_{f1}) \quad [\text{mm}] \quad (II-51)$$

Avec :

L_i : Longueur virtuelle de l'induit.

L_{f1} : Longueur moyenne de la partie frontale d'une demi spire, tel que :

$$L_{f1} = (1,16 + 0,14 \cdot P) \cdot b_{1moy} + 15 \quad [\text{mm}] \quad (II-52)$$

b_{1moy} : Largeur moyenne d'une section.

$$b_{1moy} = \frac{\pi \cdot (D_{1int} + h_{Z1}) \cdot Y_{1moy}}{Z_1} \quad [\text{mm}] \quad (II-53)$$

Y_{1moy} : Pas moyen d'un groupe de section.

➤ Réactance de fuite statorique

La réactance de fuite globale du stator comprend :

- Réactance de fuite d'encoche

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

$$X_{enc1} = \frac{1,58 \cdot f_1 \cdot L_f \cdot W_1^2}{q_1 \cdot p \cdot 10^8} \cdot \lambda_{enc1} \quad [\Omega] \quad (II-54)$$

- Réactance de fuite différentielle

C'est le résultat des flux suivants :

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

Elle est donnée par :

$$X_{1d} = \frac{1,58 \cdot f_1 \cdot W_1^2}{q_1 \cdot P \cdot 10^8} \cdot \lambda_{1d} \quad [\Omega] \quad (\text{II-55})$$

- Réactance de fuite frontale :

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

Elle est donnée par :

$$X_{1f} = \frac{1,58 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot W_1^2}{q_1 \cdot P \cdot 10^8} \cdot \lambda_{1f} \quad [\Omega] \quad (\text{II-56})$$

La réactance totale est donnée par :

$$X_1 = 1,58 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot W_1^2 \cdot \frac{\lambda_1}{q_1 \cdot P \cdot 10^3} \quad [\Omega] \quad (\text{II-57})$$

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

$$\lambda_1 = \lambda_{enc1} + \lambda_{1d} + \lambda_{1f} \quad (\text{II-58})$$

λ_{enc1} : Perméance d'encoche, elle est donnée par :

$$\lambda_{enc1} = \frac{h_1}{3 \cdot b'_{en1}} \cdot K_{B1} + \left(\frac{e_1}{b'_{en1}} + \frac{3 \cdot e_1}{b'_{en1} + 2 \cdot b_{f1}} + \frac{h_{f1}}{b_{f1}} \right) \cdot K_{B2} \quad (\text{II-59})$$

K_{b1}, K_{b2} : Coefficients qui tiennent compte de la diminution de dispersion :

Pour un pas raccourci, ils sont donnés en fonction de pas relatif :

$$K_{b1} = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot K_{b2}) \quad (\text{II-60})$$

$$K_{b2} = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot \beta) \quad (\text{II-61})$$

$$\beta = \frac{2}{3} \left(\frac{q_1 + 1}{q_1} \right) \quad (\text{II-62})$$

$K_{b1} = K_{b2} = 1$ pour l'enroulement concentrique.

λ_{1d} : Perméance différentielle proportionnelle à la réactance de fuite différentielle.

Elle est donnée par la formule suivante :

$$\lambda_{1d} = \frac{0,9 \cdot t_1 \cdot (q_1 \cdot K_{enr1})^2}{K_\delta \cdot \delta} \cdot K_{rr1} \cdot K_{dd1} \cdot K_{f1} \quad (\text{II-63})$$

$$K_{f1} = 1 - \frac{0,033 \cdot b_{f1}^2}{\delta \cdot t_1} \quad (\text{II-64})$$

k_{ad1} : Coefficient qui dépend de Q_1 donnée par le tableau suivant :

Q_1	1,5	2	2,5	3	4	5	6
k_{rr1}	—	0,085	—	0,0141	0,0065	0,0052	—

K_{ad1} : Coefficient de fuite différentielle donnée en fonction de $\frac{z_2}{p}$ et q_1

$$K_{ad1} = 0,965$$

λ_{1f} : Perméance frontale proportionnelle à la réactance de fuite frontale. Elle est donnée par l'expression suivante :

$$\lambda_{1f} = 0,34 \cdot \frac{q_1 \cdot (L_{f1} - 0,64 \cdot \beta \cdot \tau)}{L_i} \quad (\text{II-65})$$

Avec :

β : coefficient de raccourcissement ;

$$\beta = \frac{y_1}{\tau}$$

L_{f1} : La longueur moyenne du frontal d'une demie spire ; [mm]

τ : Pas polaire ; [mm]

➤ **Réactance de magnétisation**

Elle est exprimée par :

$$X_m = \frac{K_e \cdot U_{nom}}{I_\mu} \quad [\Omega] \quad (\text{II-66})$$

K_e : Facteur de majoration, il varie entre 0,9 et 0,98.

➤ **Coefficient de dispersion magnétique du stator**

Il est donné par :

$$\sigma_\mu = \frac{X_1}{X_m} \quad (\text{II-67})$$

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

II.4.8.2. Paramètres rotoriques

➤ **Resistance rotorique**

a-Resistance active de la barre

La résistance active de la barre est donnée selon le type d'encoche, notre machine son rotor a des encoches trapézoïdales, alors la résistance active de la barre est calculée comme suit :

$$R_b = \rho_{al}(T) \cdot \frac{l_i}{S_b} \cdot 10^3 \quad [\Omega] \quad (\text{II-68})$$

Pour :

$$T = 20^\circ\text{C} \quad \rho_{al}(T) = 28 \cdot 10^{-9} \quad [\Omega \cdot \text{m}]$$

$$T = 115^\circ\text{C} \quad \rho_{al}(T) = 48,8 \cdot 10^{-9} \quad [\Omega \cdot \text{m}]$$

Ici en tenant compte à $T=115^\circ\text{C}$

S_b : Section de la barre ; [mm^2]

➤ **Résistance de l'anneau**

La résistance de l'anneau est la résistance d'une partie de l'anneau qui appartient à une phase rotorique, elle est donnée par la formule suivante :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$R_{an} = \frac{\rho_{al}(T) \cdot 2\pi \cdot D_{an} \cdot 10^{+3}}{Z_2 \cdot S_{an}} \quad [\Omega] \quad (\text{II-69})$$

Avec :

S_{an} : Section de l'anneau est calculée comme suite :

$$S_{an} = \frac{0,35 \cdot Z_2 \cdot S_b}{2P} \quad [\text{mm}^2]. \quad (\text{II-70})$$

D_{an} : Diamètre moyen de l'anneau en

$$D_{an} = D_{2ext} - h_{an} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II-71})$$

h_{an} : Hauteur de l'anneau, elle est calculée comme suit :

$$h_{an} = 1,13 \cdot h_{z2} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II-72})$$

h_{z2} : Hauteur de l'encoche rotorique ;

➤ **Résistance de l'anneau ramenée à la barre**

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

$$R'_{an} = \frac{R_{an}}{\Delta^2} \quad (\text{II-63})$$

Avec :

Δ : Coefficient de réduction de l'anneau vers la barre, il est donné par la formule

$$\text{suivante : } \Delta = 2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot P}{Z_2}\right) \quad (\text{II-64})$$

➤ **Résistance active d'une phase rotorique**

Elle représente la somme des résistances de la barre et celle de l'anneau ramenée à la barre. Pour notre type d'encoche, elle est donnée comme suit :

$$R_2 = R_b + R'_{an} \quad [\Omega] \quad (\text{II-65})$$

➤ **Résistance d'une phase rotorique ramenée au stator**

Pour notre type d'encoche elle est donnée comme suit :

$$R_2' = M \cdot R_2 \quad [\Omega] \quad (\text{II-66})$$

M: Coefficient de réduction de la cage rotorique vers le stator, il calculé

Comme suit :

$$M = \frac{4 \cdot m_1}{z_2} \cdot \left(\frac{W_1 \cdot K_{en1}}{K_{ob}} \right)^2 \quad (\text{II-67})$$

K_{ob} : Coefficient d'obliquité des encoches rotorique, donnée comme suit :

$$K_{ob} = \frac{\sin(\alpha_{ob}/2)}{(\alpha_{ob}/2)} \quad (\text{II-68})$$

α_{ob} : Angle d'inclinaison des encoches.

$$\alpha_{ob} = \frac{2 \cdot \pi \cdot p \cdot \beta_{ob}}{z_2} \quad [\text{rad}] \quad (\text{II-69})$$

➤ **Réactance de fuite globale du rotor**

La réactance de fuite globale du rotor comprend: la réactance de fuite d'encoches, la réactance de fuite différentielle, la réactance de fuite frontale et la réactance de fuite due à l'obliquité des encoches, elle est donnée par l'expression suivante :

$$X_2 = 7,9 \cdot f_1 \cdot l_i \cdot 10^{-3} \cdot (\lambda_{enc2} + \lambda_{d2} + \lambda_{ob} + \lambda_{f2}) \quad [\Omega] \quad (\text{II-70})$$

λ_{enc2} , λ_{d2} , λ_{2f} , λ_{ob} : Sont respectivement les perméances : d'encoche, différentielle, frontale et oblique.

a-Perméance d'encoche :

$$\lambda_{2enc} = C_\lambda + \left(\frac{h_{f2}}{b_{f2}} \right) \quad (\text{II-71})$$

Avec :

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

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

C_λ : Il est calculé comme suit :

$$C_\lambda = \Psi \left[\left(\frac{h_2 + 0,4 \cdot d_2}{3 \cdot d_1} \right) \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot d_1^2}{8 \cdot S_b} \right) + 0,66 - \left(\frac{b_{f2}}{2 \cdot d_1} \right) \right] \quad (\text{II-72})$$

Avec :

h_2 : Hauteur utile de l'encoche rotorique ; [mm]

d_2 : Diamètre inférieur de l'encoche rotorique ; [mm]

S_b : Section de la barre [mm²].

En régime nominal $\Psi = 1$.

➤ **Coefficient de perméance différentielle**

Il est donné par l'expression suivante :

$$\lambda_{d2} = \frac{t_2}{12\delta K_\delta} \quad (\text{II-73})$$

➤ **Coefficient de perméance frontale :**

Le coefficient de perméance frontale est donné par l'expression suivante :

$$\lambda_{f2} = \frac{2,3.D_{an}}{Z_2.l_i.(\Delta)^2} \cdot \log\left(\frac{4,7.D_{an}}{2.(h_{an}+b_{an})}\right) \quad (\text{II-74})$$

b_{an} : La largeur de l'anneau ; [mm]

➤ **Coefficient de perméance dû à l'obliquité des encoches rotorique**

Coefficient de perméance dû à l'obliquité des encoches rotorique est calculé comme suit :

$$\lambda_{0b} = \frac{t_2.B_{0b}^2}{9,5.\delta.K_\delta.K_\mu} \quad (\text{II-75})$$

Avec :

K_μ : Coefficient de saturation de la machine.

B_{0b} : C'est un coefficient qui est calculé par la formule suivante :

$$B_{0b} = \frac{t_1}{t_2} \quad (\text{II-76})$$

II.4.8.3. Réactance de fuite du rotor ramenée au stator

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$X'_2 = M.X_2 \quad [\Omega] \quad (\text{II-77})$$

➤ **Résistance magnétisante**

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$R_m = \frac{X_m.I_\mu}{I_{0a}} \quad [\Omega] \quad (\text{II-78})$$

Avec :

I_μ : Courant magnétisant.

X_m : Résistance magnétisante exprimée.

I_{0a} : Courant actif à vide ; [A].

II.5. Calcul des pertes et du rendement

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

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

On peut distinguer quatre groupes de pertes :

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

II.5.1. Pertes principales dans le fer

Les pertes principales dans le fer sont les pertes par hystérésis, dues au déphasage entre le courant magnétisant et le flux fondamental, et les pertes par courant de Foucault dues à la circulation des courants induits par le flux fondamental dans les tôles magnétiques. Les dents et la culasse statorique sont les parties les plus touchées par ces pertes. Les pertes magnétiques dans le rotor sont négligeables à cause de la faible fréquence de flux.

➤ Pertes dans les dents

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

$$P_{c1} = P_{10} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^\beta \cdot (K_{dc} \cdot B_{c1max}^2 \cdot G_{c1}) \quad (\text{II-79})$$

Coefficient totale de majoration des pertes tenant compte de l'imperfection de la technologie

$K_{dc} = (1,3 \div 1,7)$; on le prend 1,7

B_{c1max} : L'induction magnétique maximale dans la culasse du stator

f_1 : Fréquence du réseau d'alimentation ;

$$\beta = \frac{3}{2} ;$$

G_{c1} : Le poids total de la culasse, il est donné par formule suivante ;

$$G_{c1} = \pi \cdot [D_{1ext} - h_{c1}] \cdot K_{fer} \cdot l_i \cdot h_{c1} \cdot \gamma_c \cdot 10^{-9} \quad [\text{Kg}] \quad (\text{II-80})$$

$$\gamma_c = 7,8 \cdot 10^3 \quad [\text{Kg/m}^3]$$

➤ Les pertes dans les dents statorique

Les dents sont soumises à une magnétisation pulsatrice. On a donc ici à tenir compte seulement de l'augmentation des pertes dues à l'imperfection de la technologie et des pertes liées aux harmoniques supérieure de l'induction

Les pertes dans les dents statorique sont calculées par la formule suivante :

$$P_{fz1} = K_{dz} \cdot B_{z1max}^2 \cdot G_{z1} \cdot P_{10} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^\beta \quad [W] \quad (II-81)$$

K_{dz} : Coefficient de majoration des pertes (coefficient de pertes Supplémentaires). on le prend 1,8

B_{z1max} : Induction maximale dans la dent statorique ;

G_{z1} : Poids total des dents statoriques, il est donné par la formule suivante :

$$G_{z1} = h_{z1} \cdot b_{z1} \cdot l_i \cdot Z_1 \cdot K_{fer} \cdot \gamma_c \cdot 10^{-9} \quad [Kg] \quad (II-82)$$

➤ Pertes magnétiques principales d'acier

Les pertes principales sont données par la somme des pertes dans la culasse et dans les dents statoriques et elle son calculées comme suite :

$$P_{fer} = P_{fc1} + P_{fz1} \quad [W] \quad (II-83)$$

➤ Pertes magnétiques supplémentaires d'acier

Ce qui concerne les pertes supplémentaires dans l'acier, on distingue : les pertes à la surface du rotor, et les pertes par harmonique du flux dans les dents statoriques et rotoriques.

➤ Pertes à la surface du rotor (pertes superficielles)

Les pertes superficielles apparaissent à la surface du rotor par la présence d'encoche ouverte du stator.

$$P_{sr} = P_{sr2} \cdot (t_2 - b_{f2}) \cdot l_i \cdot Z_2 \cdot 10^{-6} \quad [W] \quad (II-84)$$

Avec :

t_2 : Pas dentaire rotorique ;

b_{f2} : La largeur de la fente rotorique ;

P_{sr2} : Calculé comme suit

$$P_{sr2} = 0,5 K_{02} \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n_1}{10^4}\right)^{3/2} \cdot (B_{02} \cdot t_1)^2 \quad [W] \quad (II-85)$$

$$K_{02} = 2 \quad B_{02} = B_{02} \cdot K_\delta \cdot B_\delta \quad (II-86)$$

$$B_{02} = 0,275$$

➤ Pertes mécaniques

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

$$P_{mec} = K_t \left(\frac{n_1}{10}\right)^2 \cdot (D_{ext} \cdot 10^{-3})^4 \quad [W] \quad (II-87)$$

K_t : Facteur de majoration, il est donné en fonction de nombre de paires pôles et du diamètre extérieur du stator, donc pour :

$$2P \geq 4 \quad ; K_t = 1,3 \cdot (1 - D_{1ext}) \quad (\text{II-88})$$

$$2P = 2 \quad ; K_t = 1$$

➤ Pertes électriques

Ce sont des pertes par effet joule dans les enroulements elles sont proportionnelles aux carré du courant qui traverse les conducteurs. Donc, on peut distingues les pertes joules statoriques et rotoriques.

• Pertes joules statorique

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

$$P_{cu1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_1^2 \quad [\text{W}] \quad (\text{II-89})$$

Avec :

R_1 : Résistance d'une phase de l'enroulement statorique.

I_1 : Courant dans une phase statorique.

• Pertes joules rotorique

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

$$P_{al2} = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 \quad [\text{W}] \quad (\text{II-90})$$

Avec :

m_2 : Nombre de phase rotorique. ($m_2 = Z_2$).

I_2 : Courant dans la barre.

R_2 : Résistance d'une phase rotorique.

➤ 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 :

$$P_{sup} = 0,005 \cdot \frac{P_{2nom} \cdot 10^3}{\eta_n} \quad [\text{W}] \quad (\text{II-91})$$

P_{2nom} : Puissance utile ; [W]

η_n : Rendement nominal

➤ Pertes totales

Elles sont données par la relation suivante :

$$P_T = +P_{cu1} + P_{al2} + P_{mec} + P_{sup} + P_{ac\Sigma} \quad [\text{W}] \quad (\text{II-92})$$

II.5.2. Le rendement de la machine

Le rendement de la machine est donné par la relation suivante :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_T} \quad (\text{II-93})$$

II.6. Calcul des performances du moteur

Dans cette partie de calcul, nous allons étudier les performances des moteurs, en utilisant une méthode analytique se basant sur les schémas équivalents de la machine asynchrone. IL existe plusieurs schémas équivalents des machines asynchrones qui sont analogues à celui d'un transformateur :

- Schéma réel de substitution du circuit primaire et de circuit secondaire.
- Schéma physique équivalent ramené au rotor immobile.
- Schéma équivalent d'une machine asynchrone considérée comme un transformateur (schéma équivalent en T).
- Schéma équivalent d'une machine asynchrone avec circuit magnétisant rapporté aux bornes du réseau (schéma équivalent en L).

II.6.1. Schéma vectoriel et schémas équivalents en L et T du moteur

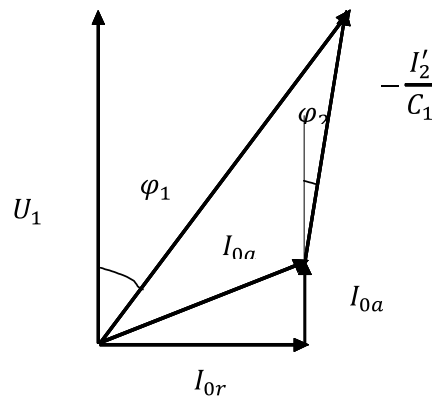


Figure (II.2) : Schéma vectoriel

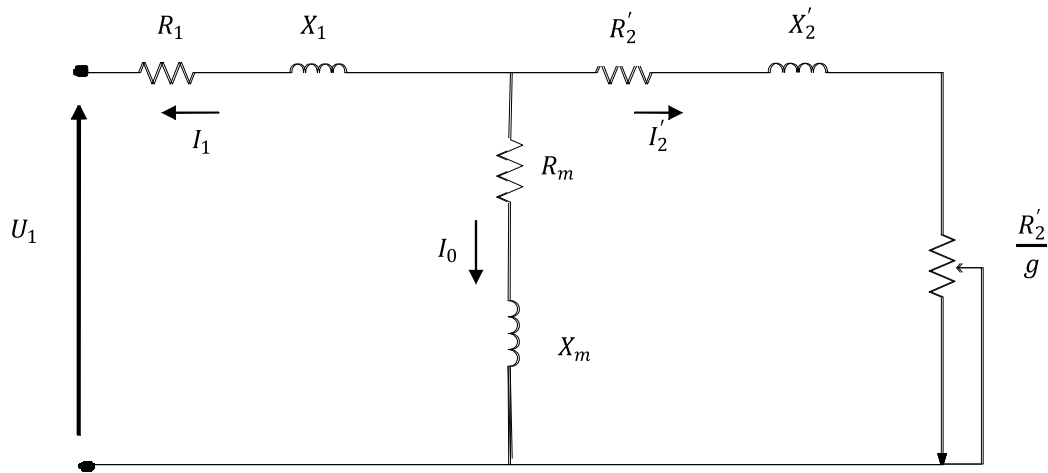


Figure (II.3) : schéma équivalent en(T) ramené au stator

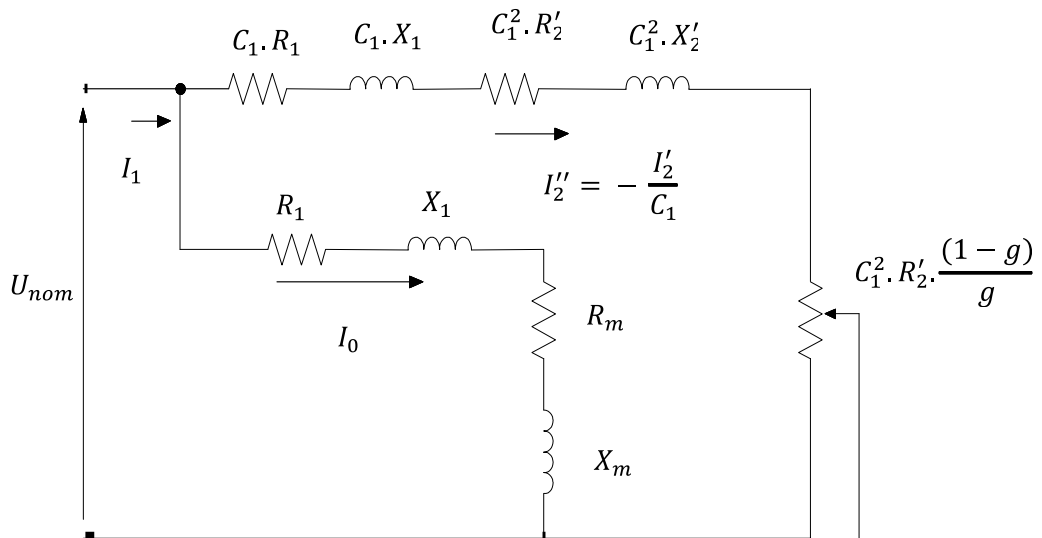


Figure (II.4) : schéma équivalent en(L) ramené au stator.

Avec :

- R_1 : Résistance statorique en $[\Omega]$.
- X_1 : Réactance de fuite du stator en $[\Omega]$.
- X_{2ram} : Réactance de fuite du rotor ramenée au stator en $[\Omega]$.
- R_{2ram} : Résistance rotorique ramenée au stator en $[\Omega]$.
- R_m : Résistance magnétisante en $[\Omega]$.
- X_m : Réactance magnétique en $[\Omega]$
- C_1 : Constante de transformation du schéma en T vers le schéma en L.

Elle est donnée par :

$$C_1 = 1 + \frac{X_1}{X_m} \quad (\text{II-94})$$

II.6.2. Caractéristiques de fonctionnement du moteur

En se référant au schéma équivalent, on détermine :

➤ Le glissement

$$g = \frac{A - \sqrt{A^2 - C_1^2 \cdot R_2' \cdot B_p}}{B_p} \quad (\text{II-95})$$

Avec :

$$A = \frac{m_1 \cdot U_{\hat{n}0m}^2}{2P_2'} - R_1 \quad [\Omega] \quad (\text{II-96})$$

$$B_p = 2 \cdot A_p + R_{cal} \quad (\text{II-97})$$

$$R_{cal} = R_2' \left[\left(\frac{R_1}{R_2'} \left(1 + \frac{X_2'}{X_m} \right) \right)^2 + \left(\frac{X_1}{R_2'} \left(1 + \frac{X_2'}{X_m} \right) + \frac{X_2'}{R_2'} \right)^2 \right] \quad [\Omega] \quad (\text{II-98})$$

➤ Puissance rapportée du circuit primaire au circuit secondaire (puissance mécanique)

La puissance rapportée du circuit primaire au circuit secondaire est donnée comme suit :

$$P_2' = P_2 + P_{sup} + P_{mec} \quad [\text{W}] \quad (\text{II-99})$$

P_2' : Puissance utile ;

P_{sup} : Pertes supplémentaires ;

P_{mec} : Pertes mécanique ;

➤ Impédance équivalente

Elle est exprimée comme suit :

$$Z_{2eq} = \sqrt{R_{eq}^2 + X_{eq}^2} \quad [\Omega] \quad (\text{II-100})$$

Avec :

$$R_{eq} = C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot \frac{R_2'}{g} \quad [\Omega] \quad (\text{II-101})$$

$$X_{eq} = C_1 \cdot X_1 + C_1^2 \cdot X_2' \quad [\Omega]$$

➤ **Calcul du courant secondaire**

Le courant dans le circuit secondaire est donné par :

$$I_2'' = \frac{U_{nom}}{Z_{eq}} \quad [\text{A}] \quad (\text{II-102})$$

$$I_2' = C_1 \cdot I_2'' \quad [\text{A}] \quad (\text{II-103})$$

Avec :

I_2'' : Le courant dans le circuit secondaire transformé en **L**.

I_2' : Le courant dans le circuit secondaire ramené au primaire du schéma en **T**.

➤ **Facteur de puissance au secondaire**

Le facteur de puissance rotorique est donné par :

$$\cos \phi_2' = \frac{R_{eq}}{Z_{eq}} \quad (\text{II-104})$$

➤ **Courant actif au secondaire**

$$I_{2a}'' = I_2'' \cdot \cos \phi_2' \quad [\text{A}] \quad (\text{II-105})$$

➤ **Courant réactif au secondaire**

$$I_{2r}'' = I_2'' \cdot \sin \phi_2' \quad [\text{A}] \quad (\text{II-106})$$

➤ **Courant à vide**

Ce courant comprend deux composantes :

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

$$I_{0a} = \frac{P_{a10} + P_{acp} + P_{mec}}{m_1 \cdot U_{nom}} \quad [\text{A}] \quad (\text{II-107})$$

Avec:

P_{10} : Puissance active à vide;

$$P_{10} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_u^2 \quad (\text{II-108})$$

P_{acp} : Pertes fer principales ;

- **courant réactif correspond à la réaction de flux magnétique**

$$I_{0r} = I_u = \frac{P_{FT}}{0,9 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot K_{enr1}} \quad [\text{A}] \quad (\text{II-109})$$

➤ **Courant total à vide**

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2} \quad [\text{A}] \quad (\text{II-110})$$

➤ **Courant primaire absorbé**

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1r}^2} \quad [A] \quad (II-111)$$

Avec:

I_{1a} : Composante active du courant du primaire;

$$I_{1a} = I_{0a} + I_{2a}'' \quad [A] \quad (II-112)$$

I_{1r} : Composante réactive du courant primaire;

$$I_{1r} = I_{0r} + I_{2r}'' \quad [A] \quad (II-113)$$

➤ **facteur de puissance de la machine**

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

$$\cos\varphi_1 = \frac{I_{1a}}{I_1} \quad (II-114)$$

➤ **Puissance absorbée par le moteur**

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$P_1 = m_1 \cdot U_{nom} \cdot I_{1a} \quad [W] \quad (II-115)$$

➤ **puissance électromagnétique**

Elle est calculée comme suite :

$$P_{em} = P_1 - (P_{cu1} + P_{acp}) \quad [W] \quad (II-116)$$

➤ **Vitesse de rotation du moteur**

Elle est donnée par la relation suivante :

$$n_2 = (1 - g) \cdot n_1 \quad [tr/min] \quad (II-117)$$

Avec :

n_1 : Vitesse du synchronisme.

g : Glissement.

➤ **Le couple électromagnétique**

Il est donné comme suite :

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_1} \quad [N/m] \quad (II-118)$$

Ω_1 : vitesse de synchronisme :

$$\Omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60} \quad [rd/s] \quad (II-119)$$

➤ **couple utile**

Il est donné par :

$$C_u = \frac{P_2 \cdot 10^3}{\Omega_1} \quad [N/m] \quad (II-120)$$

Avec:

$$\Omega_1 = \frac{2\pi n_2}{60} \quad [\text{rd/s}] \quad (\text{II-121})$$

D'où:

$$C_u = 9,55 \frac{P_2 \cdot 10^3}{n_2} \quad [\text{N.m}] \quad (\text{II-122})$$

n_2 : vitesse de rotor ;

P_2 : La puissance utile ;

➤ **le rendement**

Le rendement du moteur est donné par le rapport de la puissance utile sur la puissance absorbée :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (\text{II-123})$$

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons passé en revue les différentes lois sur le calcul des contraintes électromagnétique de stator et de rotor d'un moteur asynchrone; en effet, les inductions magnétique, la charge linéaire et la densité du courant des deux armateurs. Ainsi que le calcul des pertes, des performances et de rendement de la machine.

Chapitre III

**Transformation d'une machine
asynchrone standard vers une machine à
haut rendement**

Introduction

Actuellement la tendance pour les constructeurs de machine électrique déjà implanté est de réaliser des machines à haut rendement, mais vu que les processus de la fabrication sont fait pour la machine standard, les dimensions de la tôle nous est imposé.

Pour cette raison dans ce chapitre on s'intéresse à la transformation de la machine avant sa construction. Cela, on agissant d'abord sur la longueur du stator, puis sur le nombre de conducteurs par encoche et enfin sur la section effective des conducteurs, tout en imposant un haut rendement.

En s'appuyant sur les calculs du chapitre précédant, on effectuera un programme de calcul, avec le logiciel mathcad 14, pour vérifier les différents paramètres de la machines standard.

Pour valider notre programme on va comparer les résultats obtenus théoriquement avec ceux obtenus expérimentalement, une fois le programme est validé, la machine standard théorique nous servira de référence à la machine transformée

Les modifications seront entamées successivement sur la machine standard simulée obtenue, en suivant ces étapes :

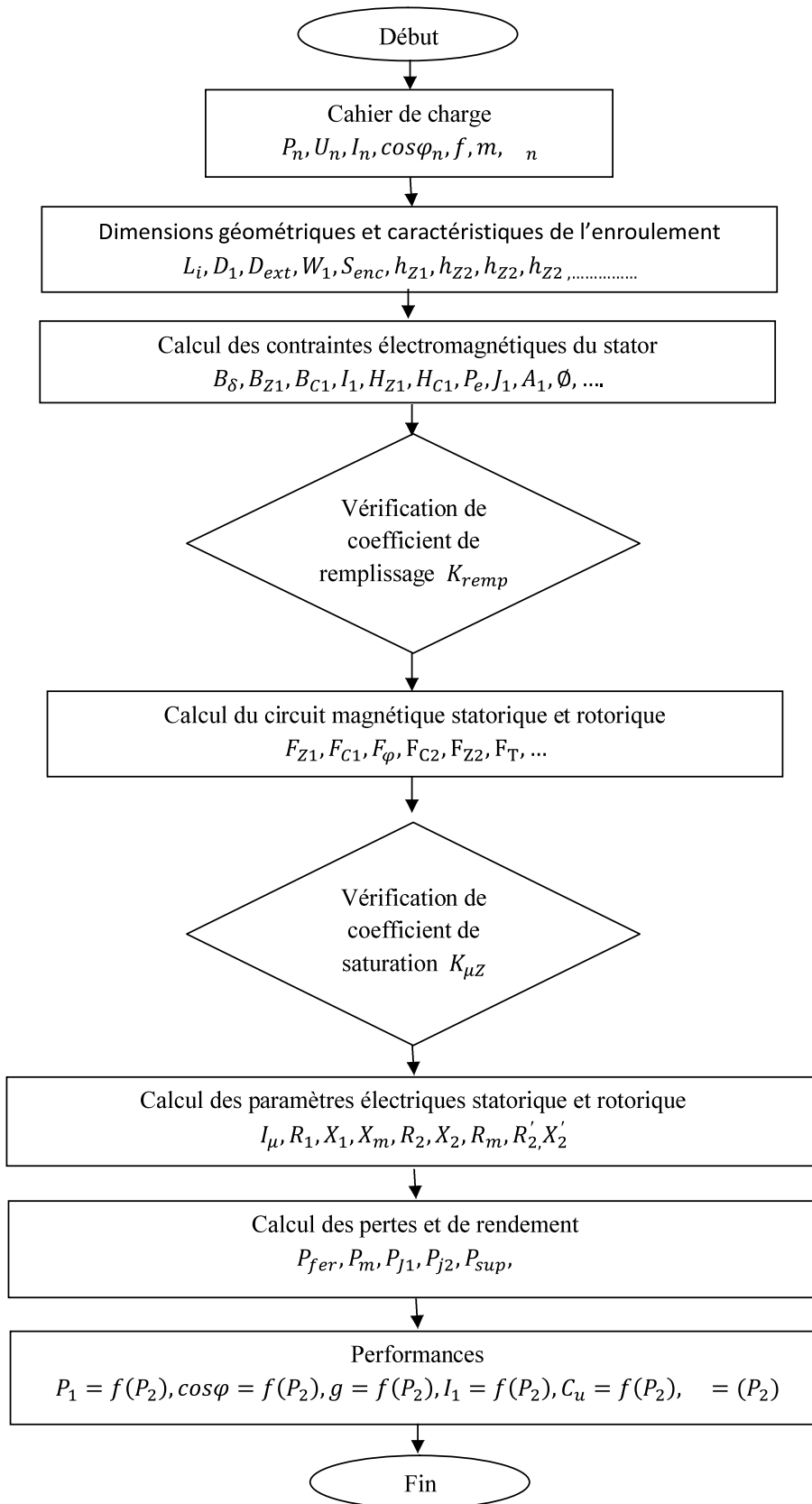
- a- action sur la longueur virtuelle
- b- action sur le nombre du conducteur du stator
- c- action sur la section effective des conducteurs

Les paramètres géométriques et électriques sont figés (paramètres de la machine standard).

III.1.Organigramme de calculs

L'organigramme suivant représente le programme de calculs d'une machine standard, qu'on a réalisé avec le logiciel mathcad 14.

Chapitre III : Transformation d'une machine asynchrone standard vers une machine à haut rendement



Vérification du programme

Pour valider notre programme, on fera une comparaison entre les résultats obtenus dans nos calculs, et ceux obtenus expérimentalement, des essais ont été déjà fait sur la machine réelle. Voir le **tableau I** de l'expérimental inséré dans l'annexe.

Une fois le programme est validé, la machine standard simulée nous servira pour référence, dans le travail qui suit.

III.2. Transformation de la machine standard

Pour atteindre le but voulu, qui est à l'objet d'augmenter le rendement, on va procéder à des transformations, seront portés sur la machine réalisée théoriquement, tout en utilisant le programme mathcad14.

Les changements seront faits successivement, commençant par la variation de la longueur virtuelle, puis le nombre de conducteurs, et en fin la section effective, un haut rendement est imposé dans tout ces modifications.

III.2 .1. Variation de la longueur virtuelle

Après avoir varié la longueur virtuelle de 110 à 150mm, on fixe cette dernière à 130mm qui est le point qui donne un rendement plus élevé sans réduire les autres paramètres (restent dans les zones admissibles)

III.2.2. variation du nombre de conducteurs

La variation est faite comme suit :

- A. nombre de conducteur $U_{en1}=64$
- B. nombre de conducteur $U_{en1}=60$
- C. nombre de conducteur $U_{en1}=58$
- D. nombre de conducteur $U_{en1}=56$

Les résultats obtenus sont notés dans le tableau(III.1)

Chapitre III : Transformation d'une machine asynchrone standard vers une machine à haut rendement

Tableau(III.1) : le rendement avec la variation de la longueur virtuelle et le nombre de conducteurs

Li [mm]	Rendement à Uen1=64	Rendement à Uen1=60	Rendement à Uen1=58	Rendement à Uen1=56
110	0,824	--	--	--
112,5	0,823	--	--	--
115	0,822	--	--	--
117,5	0,822	--	--	--
120	0,821	0,826	--	--
122,5	0,82	0,826	0,828	--
125	0,819	0,825	0,827	--
127,5	0,819	0,824	0,827	0,829
130	0,818	0,824	0,826	0,829
132,5	0,817	0,823	0,826	0,828
135	0,816	0,822	0,825	0,828
137,5	0,815	0,822	0,825	0,827
140	0,814	0,821	0,824	0,827
142,5	0,813	0,82	0,823	0,826
145	0,813	0,82	0,823	0,826
147,5	0,812	0,819	0,822	0,825
150	0,811	0,818	0,821	0,825

Les différents résultats trouvés dans le tableau sont représentés dans les courbes suivantes :

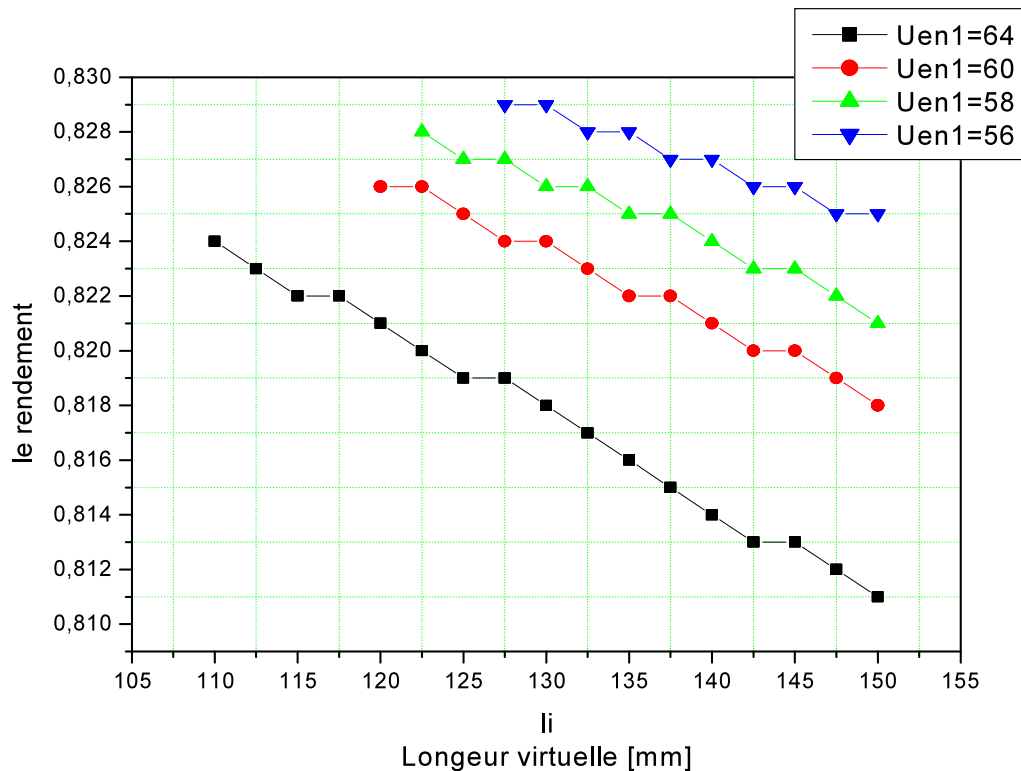


Figure (III-1) : variation du rendement en fonction de la longueur virtuelle, avec le nombre de conducteur (64-60-58-56)

• **Interprétation de la figure (III-1)**

- Le rendement diminue avec l'augmentation de la longueur virtuelle et il augmente avec la diminution du nombre du conducteur,
- Le fait d'imposer uniquement un haut rendement, on aura la diminution de courant statorique et rotorique ainsi que la charge linéaire, ce qui diminue la densité de courant, donc moins de pertes joules rotorique et statorique.
- L'augmentation de la longueur virtuelle provoque une augmentation de la résistance et la réactance rotorique et statorique, ce qui augmente les pertes.
- La diminution du nombre de conducteurs augmente l'induction dans l'entrefer et les fmm, par contre la densité de courant, la résistance et la réactance statorique ainsi la somme des pertes diminue.

III.2.3. Variation de la section effective

Après avoir choisis la longueur qui donne le rendement le plus élevé, avec la variation de l_i , et du nombre de conducteurs ($l_i=130$ mm, $U_{en1}=56$) on va maintenant varier la section effective, et ce la on gardant le coefficient de remplissage dans la plage admissible.

La section effective est calculée comme suit :

$$S_{eff} = \frac{I_{n1}}{a_1 \cdot J_1}$$

Où

I_{n1} : le courant nominal en étoile

J_1 : la densité de courant statorique

a_1 : nombre de voix parallèle

On variant la densité du courant statorique et en veillant que le coefficient de remplissage soit dans la marge admissible, la section effective prend la valeur de $0,4773$ mm² où le coefficient de remplissage est d'ordre de $0,7$. Alors que dans la machine d'origine simulée est de $0,396$ mm².

Ainsi le rendement augmente pour atteindre 84%

III.3. Courbes et interprétation

Afin de valider nos résultats, on représentera les différentes figures des caractéristiques de fonctionnement des deux machines standard et transformée ainsi que les résultats obtenus expérimentalement, puis s'on suivra une comparaison entre les courbes.

III.3.1. différentes courbes obtenues

Les figures suivantes représentent les caractéristiques de la machine standard simulée, machine réelle testée et la machine transformée simulée :

➤ Le glissement en fonction de la charge

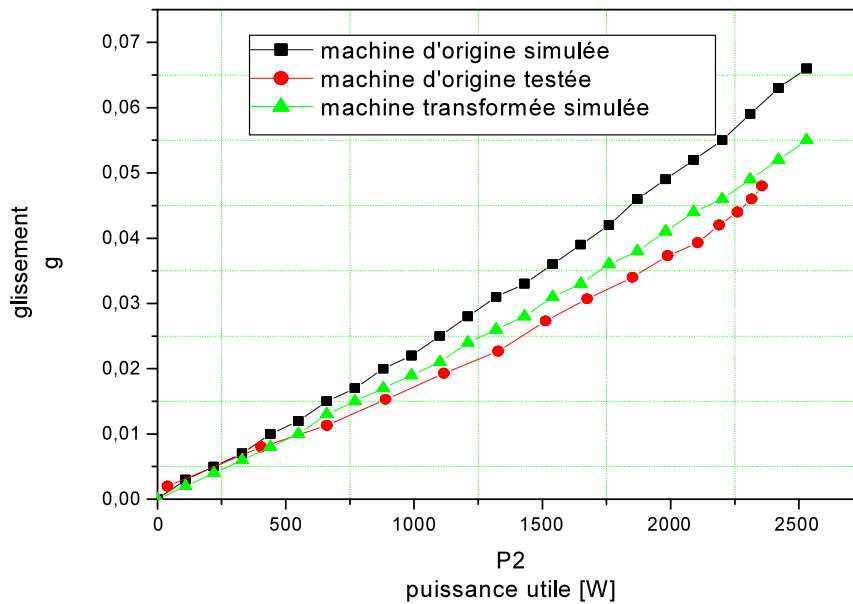


Figure (III-2) : le glissement en fonction de la puissance utile

➤ Le courant absorbé en fonction de la charge

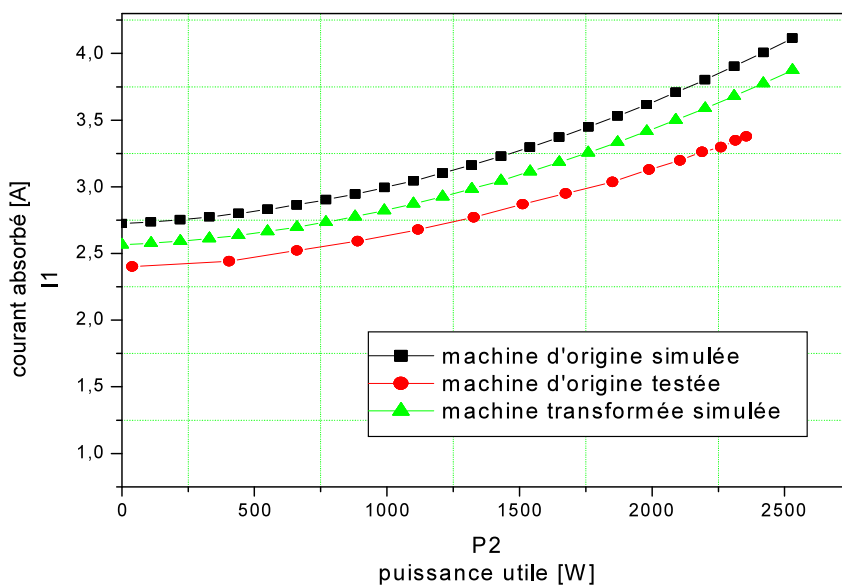


figure (III-3) : le courant absorbé en fonction de la puissance utile

➤ facteur de puissance $\cos(\varphi)$ en fonction de la charge

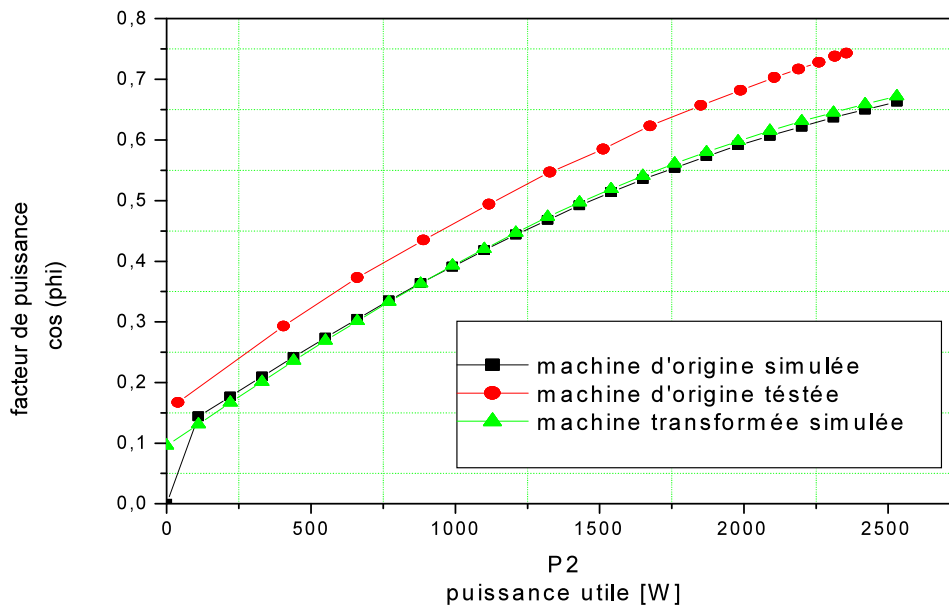


Figure (III-4) : le facteur de puissance en fonction de la puissance utile

➤ Puissance absorbée en fonction de la charge

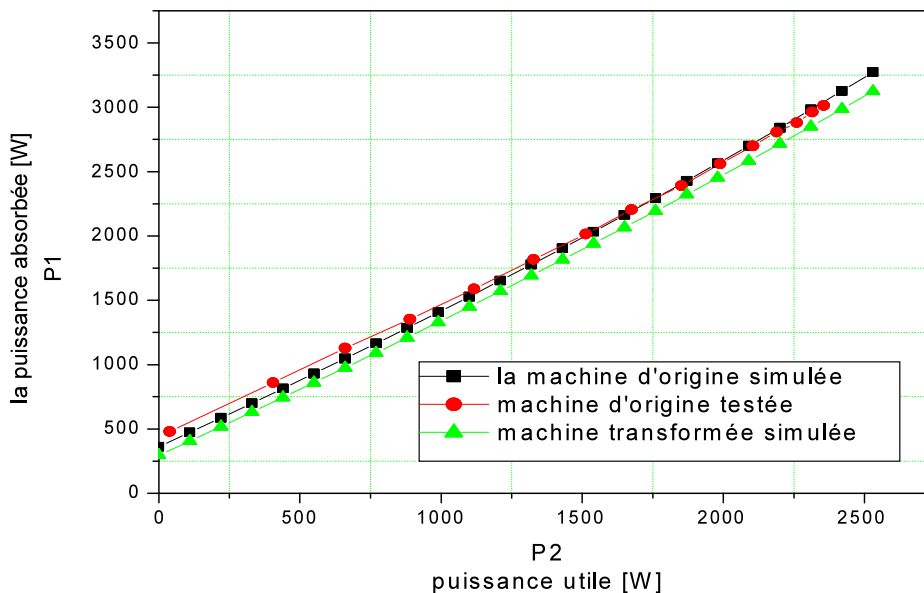


Figure (III-5) : la puissance absorbée en fonction de la puissance utile

➤ Le couple utile en fonction de la charge

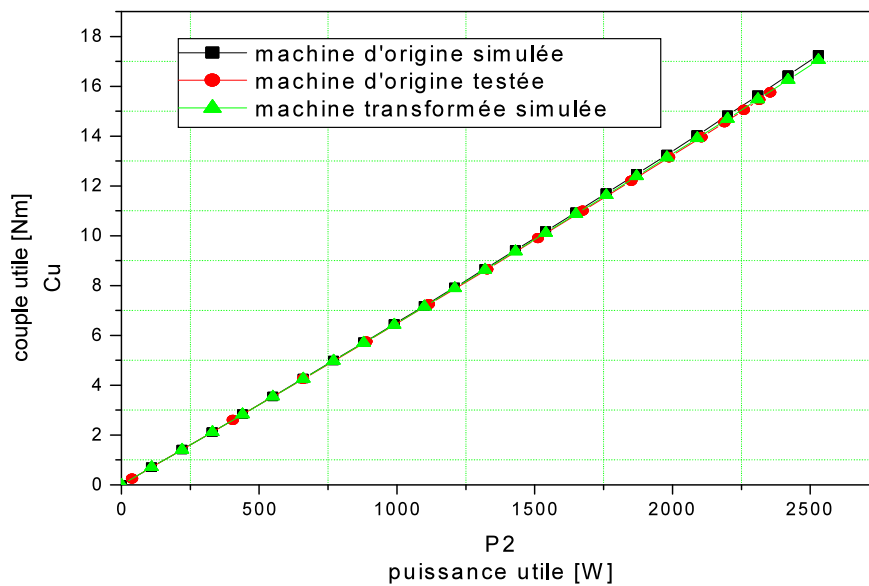


Figure (III-6) : le couple utile en fonction de la puissance utile

➤ le rendement en fonction de la charge

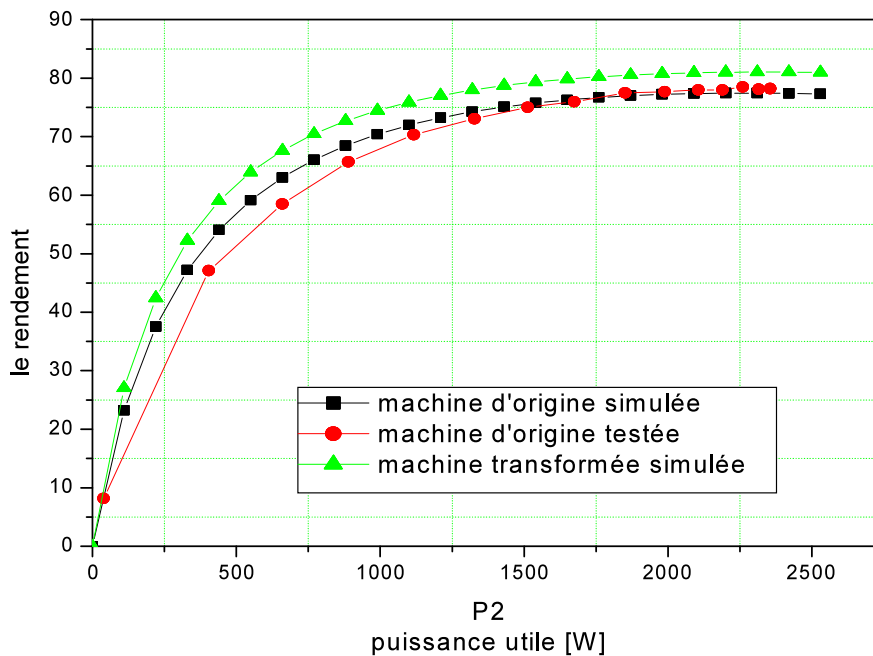


Figure (III-7) : le rendement en fonction de la puissance utile

III.3.2. Interprétation des courbes

III.3.2.a. Le glissement Figure (III-2)

Dans le cas de la machine théorique standard et transformée et réelle, le glissement est presque une droite qui passe par l'origine, ce dernier augmente avec l'augmentation de la puissance utile.

La courbe de glissement de la machine standard est dans la partie supérieure de celle de l'expérimentale. Donc il y a une différence entre les valeurs théorique et celle de la pratique.

La courbe de glissement de la machine transformée est dans la partie inférieure de celle de la machine d'origine, donc le glissement a diminué.

III.3.2.b. Le courant absorbé Figure (III-3)

Les trois courbes ont la même allure, avec une petite différence, le courant absorbé augmente avec l'augmentation de la puissance utile.

Le courant de la machine transformée est légèrement inférieur par rapport à la machine standard calculée.

III.3.2.c. Le facteur de puissance $\cos\varphi$ Figure (III-4)

Le facteur de puissance augmente avec l'augmentation de la puissance utile. Dans la machine standard et ce lui de la machine transformée, il est identique, par contre avec ce lui de l'expérimentale, il y a un écart engendré par le décalage des glissements théoriques et ceux de pratiques.

III.3.2.d. Puissance absorbée Figure (III-5)

Dans les trois courbes, en augmentant la puissance utile, la puissance absorbée augmente d'une manière presque linéaire, les courbes sont presque des droites mais elles ne passent pas par l'origine, il y a un petit écart entre la machine standard et la machine transformée. Cela est dû à la diminution des pertes totales.

III.3.2.e. Le couple utile Figure (III-6)

Dans les trois courbes, le couple utile est proportionnel à la puissance utile, les courbes sont des droites qui passent par l'origine, donc on peut dire qu'on a gardé le même couple dans la machine transformée que ce lui de la machine d'origine.

III.3.2.f. Le rendement Figure (III-7)

Dans les trois courbes, on a la zone de 0 jusqu'à 300 watt, le rendement est proportionnel à la puissance utile, les courbes forment des droites qui passent par l'origine, la zone entre 300 watt et 1500 watt les courbes forment des coudes donc le rendement n'est plus

Chapitre III : Transformation d'une machine asynchrone standard vers une machine à haut rendement

proportionnel à la puissance utile, à partir de 1500 watt on trouve la zone de saturation, ou il n'y a pas grande variation du rendement.

Le rendement théoriques de la machine standard et le rendement pratique dans la première et la deuxième zone, sont un peu différents, mais dans la zone de saturation, sont presque identiques.

Après avoir modifié la machine, le rendement est supérieur à ce lui de la machine d'origine, au régime nominal, il atteint l'ordre de 81% alors qu'il a été d'ordre 77,5%

III.3.3.Comparaison

Pour obtenir la machine transformée, on a changé la longueur virtuelle de la machine standard simulée de 110 mm à 130 mm, le nombre de conducteurs par encoche de 64 à 56 conducteurs et on a augmenté la section effective des conducteurs du 0,396 à 0,4773 mm²

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant

Tableau(III.2) : résultats obtenus dans la pratique, machine standard et la machine transformée

	Résultats pratiques	Machine standard	Machine transformée
g_n	0,037	0,055	0.046
I_l [A] (γ)	3,26	3,803	3.609
$\cos(\varphi)$	0,72	0,622	0.627
P_1 [W]	2800	2840,502	2716
C_u [Nm]	14 ,5	14,83	14.687
Le rendement %	78,05	77,5	81
N [tr /min]	1436	1417	1430
$B\delta$ [T]	–	0.963	0.931
Φ [Weber]	–	$4,712.10^{-3}$	$5.386.10^{-3}$
j_l [A/mm ²]	–	7,151	5.253
P_T [W]	–	565,944	419.505
F_T [A]	–	1347	1112
P_2 [W]	2200	2200	2200
U [V]	400	400	400

III.4.Observation

Après avoir fait les calculs on remarque que :

III.4.1. Entre la machine standard et les résultats pratiques

- les valeurs trouvées dans le programme de calcul de la machine d'origine, sont très proches des valeurs expérimentales, il existe une petite différence qui peut être expliquée par les erreurs humaines, ou bien celle des appareils pour la partie expérimentale. D'autre part, le programme utilisé est basé sur les abaques et des tôles magnétiques différents de ceux de constructeur.

III.4.2. Entre la machine d'origine standard et la machine transformée

- l'augmentation de la longueur virtuelle engendre une augmentation du volume de la machine, par rapport au volume initial.
- une diminution de nombre de conducteurs.
- la section des conducteurs a augmentée, ce qui diminue la densité de courant.
- la vitesse de rotation du rotor a augmenté, ce là est dû à la diminution du glissement.
- les changements qui sont faits, ont engendrés une diminution du courant absorbé, l'induction dans l'entrefer, les forces magnétomotrices et aussi les pertes totales. Par contre le flux, la vitesse de rotation ainsi que le glissement, ont augmentés. Tout en gardant le même couple utile et la même puissance absorbée.
- toutes ces modifications ont contribué à l'augmentation du rendement, de 77,5% jusqu'à la valeur de 81%, bien qu'une augmentation de 3,5%

Conclusion

La variation de la longueur virtuelle, la section effective et le nombre de conducteurs, nous a permis d'améliorer les caractéristiques et les performances de la machine standard. La diminution des pertes totales et la densité de courant ont contribué à l'augmentation du rendement.

L'augmentation de la longueur virtuelle de la machine a engendré l'augmentation du volume de la machine donc plus de matière, mais en contre partie, du point de vue énergétique, on a diminué les pertes.

Les résultats des modifications portées sur la machine standard ont permis d'augmenter le rendement de 3,5%.

Chapitre IV

**Transformation d'une machine
asynchrone existante vers une machine à
haut rendement**

Introduction

La nouvelle réglementation exige aux constructeurs de fabriquer des machines à haut rendement. L'idée est de proposer une solution pour les machines standard déjà construites ou l'action ne peut s'effectuer que sur les paramètres externes de la machine, et non sur les paramètres de construction qui sont dans ce cas figés.

Ce chapitre, comporte deux étapes : la première consiste à faire varier seulement la puissance nominale pour déterminer le point qui donne le meilleur rendement. Puis, dans la deuxième nous changeons le couplage triangle des phases statorique en couplage étoile.

Toutes ces transformations sont faites on utilisant le programme effectué pour la machine standard dans le chapitre précédent.

IV.1.Action sur la puissance nominale

La plaque signalétique de la machine d'origine simulée (voir annexe)

On variant la puissance nominale de 1 kW à 2,2 kW avec un pas de 0,1 kW, nous notons les rendements obtenus,

Les résultats sont représentés dans le tableau suivant :

Pn	1,00	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,00	2,1	2,2
η	0,825	0,826	0,826	0,824	0,823	0,82	0,818	0,814	0,811	0,807	0,804	0,8	0,795

Tableau IV-1 : le rendement en fonction de la puissance nominale

Les résultats de ce tableau sont représentés sur la courbe suivante :

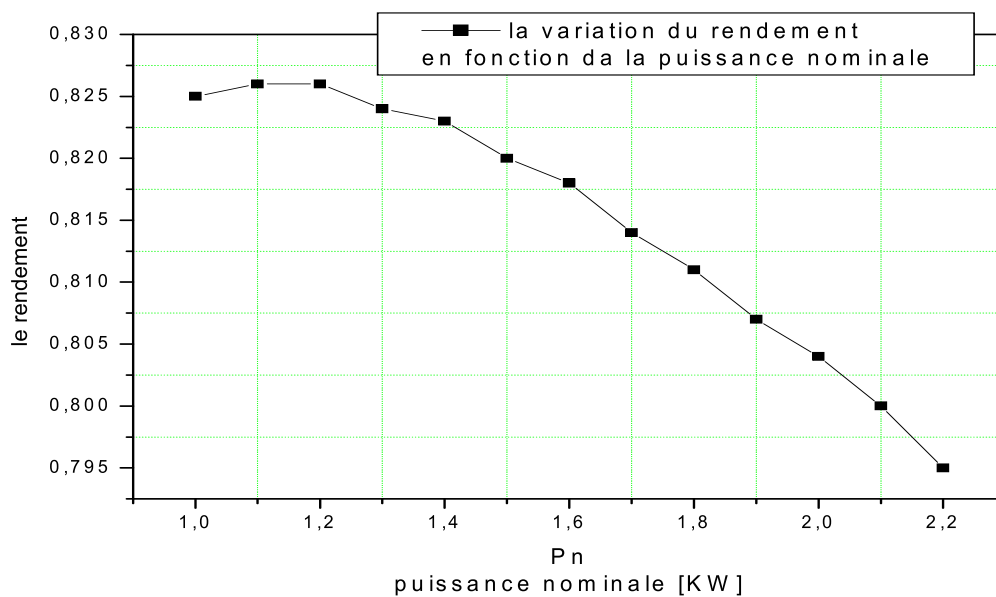


Figure (IV-1) : le rendement en fonction de la puissance nominale

IV.1.1.Caractéristique du rendement

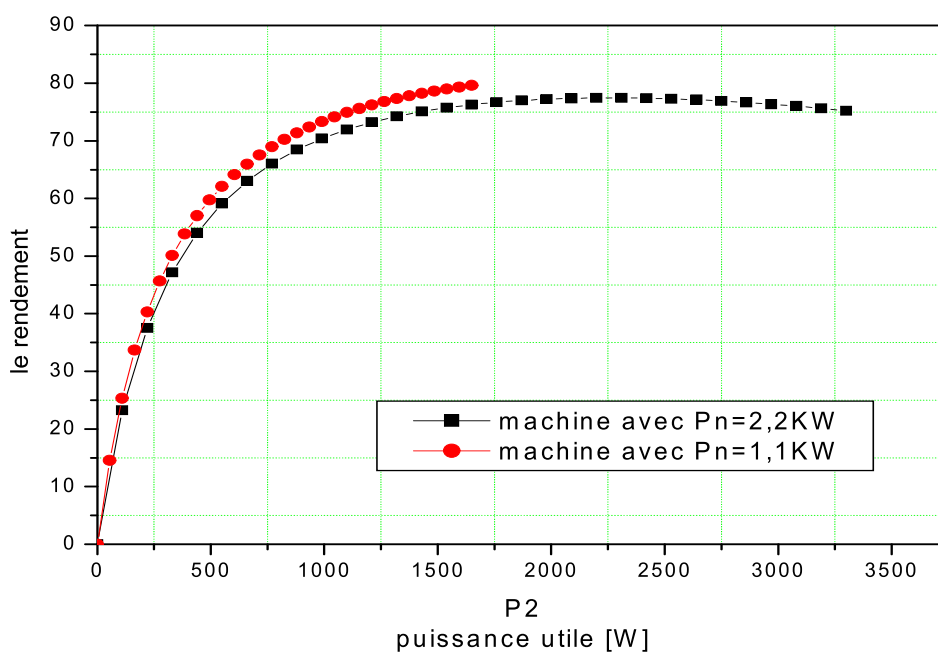


Figure (IV-2) : le rendement en fonction de la puissance utile

IV.1.2. Interprétation de la caractéristique du rendement

Figure (IV-1) : le rendement atteint son maximum à 1,1 et 1,2 kW puis il diminue avec l'augmentation de la puissance nominale, dans cette partie de calcul, le courant calculé est en fonction de facteur de puissance qu'on a considéré comme constante,

Figure (IV-2) : la caractéristique du rendement dans la machine transformée représente la partie de 0 à 1400 W de la machine d'origine, où le rendement est faible, il y a une petite différence entre les courbes données par les deux puissances 1,1 et 2,2 et ce revient à la diminution des résistances statoriques et rotoriques.

Le rendement n'augmente pas avec la décharge de la machine d'où la nécessité de toucher à d'autres paramètres extérieurs, comme le couplage des phases statoriques, en prenant la puissance nominale de 1,1 kW vue l'existence des machines standards avec cette puissance nominale

IV.2. Changement de couplage

La variation seule de la puissance nominale, ne peut atteindre l'objectif requis, et puisque la machine est déjà construite, donc on ne peut toucher à ses paramètres intérieurs, tels que les paramètres géométriques, par ailleurs d'autres paramètres peuvent être touchés, comme l'alimentation de la machine,

Pour changer l'alimentation de la machine, on passe du couplage triangle au couplage étoile des phases statoriques, ainsi on aura une tension composée $U_n=230V$ au lieu de la tension simple $U_n=400V$.

IV.3. Performance et caractéristique

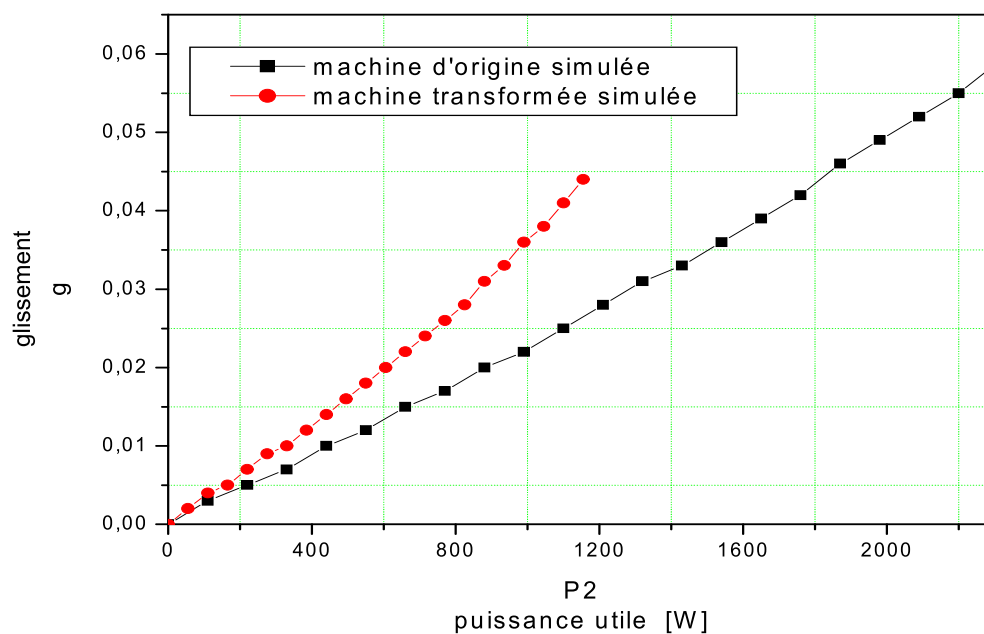
Afin de valider nos résultats, on interprétera les différentes figures des caractéristiques de fonctionnement de la machine obtenue dans le programme de calcul après les transformations, et on fera la comparaison avec la machine standard théorique.

C'est le programme de calcul de la machine standard qui est utilisé dans ce cas.

IV.3.1 Les différentes courbes obtenues

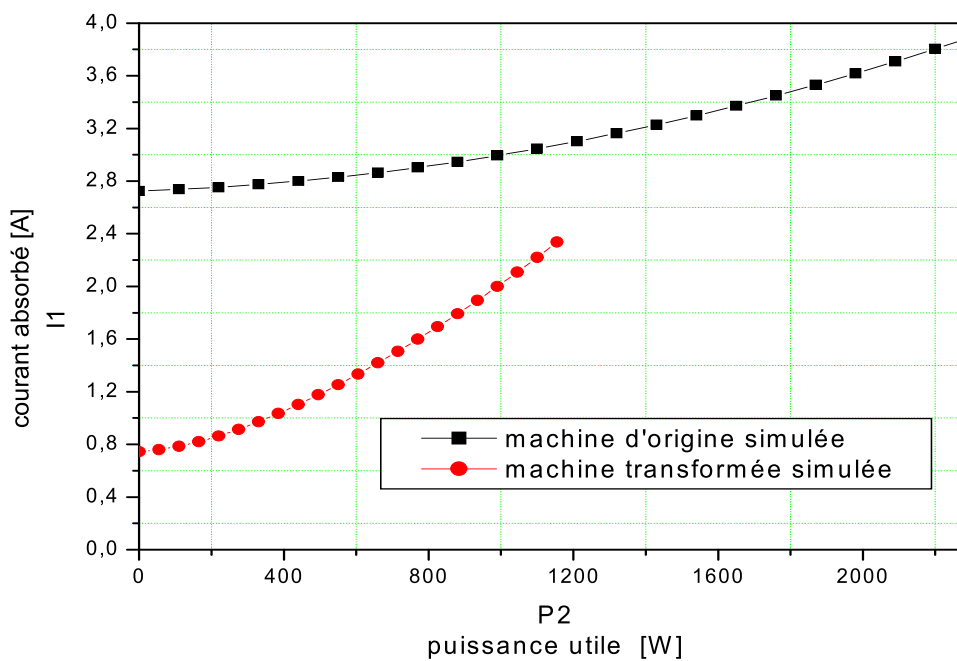
Les caractéristiques obtenues sont représentées dans les figures suivantes :

Glissement en fonction de la charge



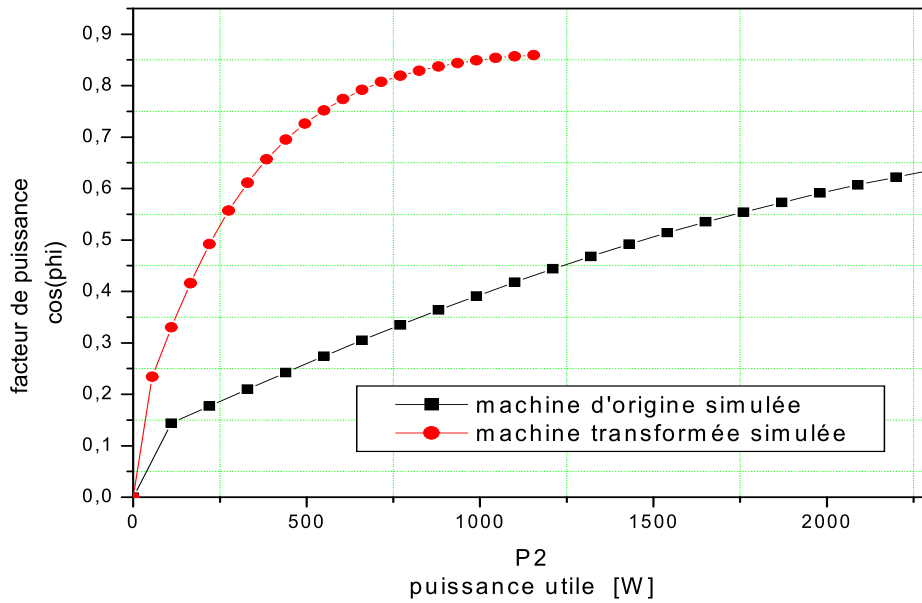
Figure(IV.3) : glissement en fonction de la charge

Courant absorbé en fonction de la charge



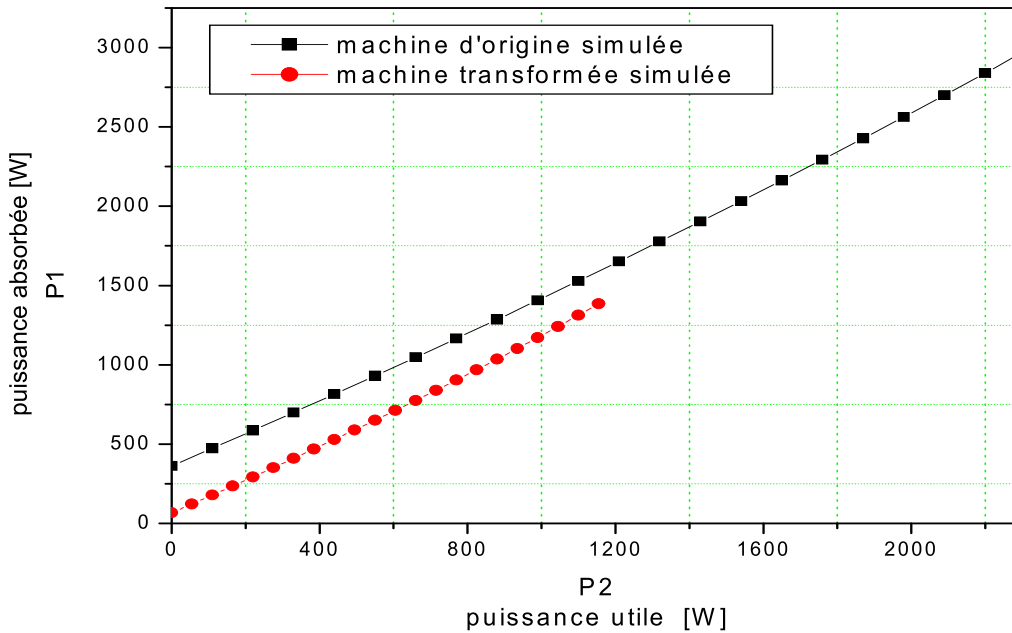
Figure(IV.4) : courant absorbé en fonction de la charge

Facteur de puissance en fonction de la charge



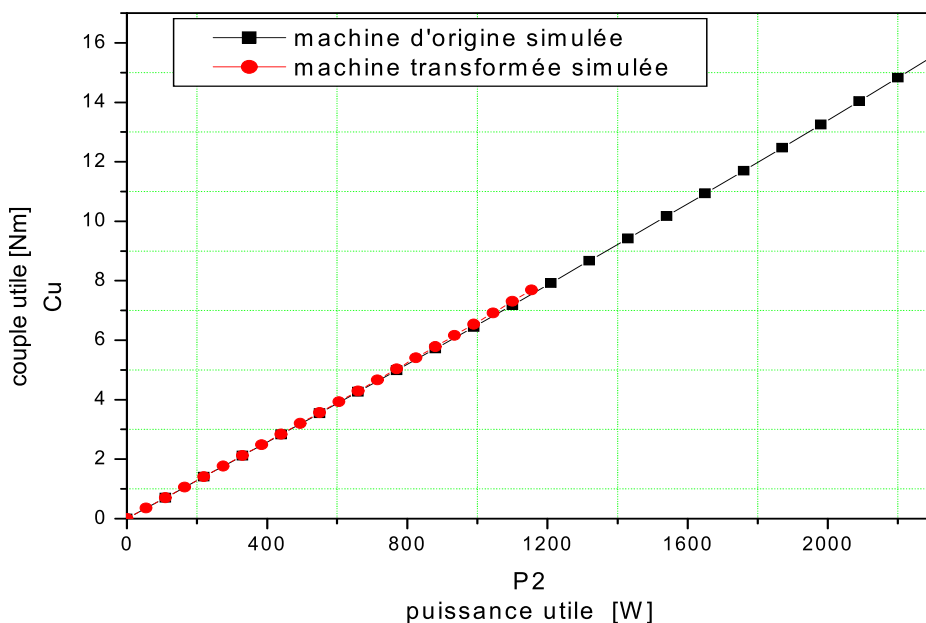
Figure(IV.5) : facteur de puissance en fonction de la charge

Puissance absorbée en fonction de la charge



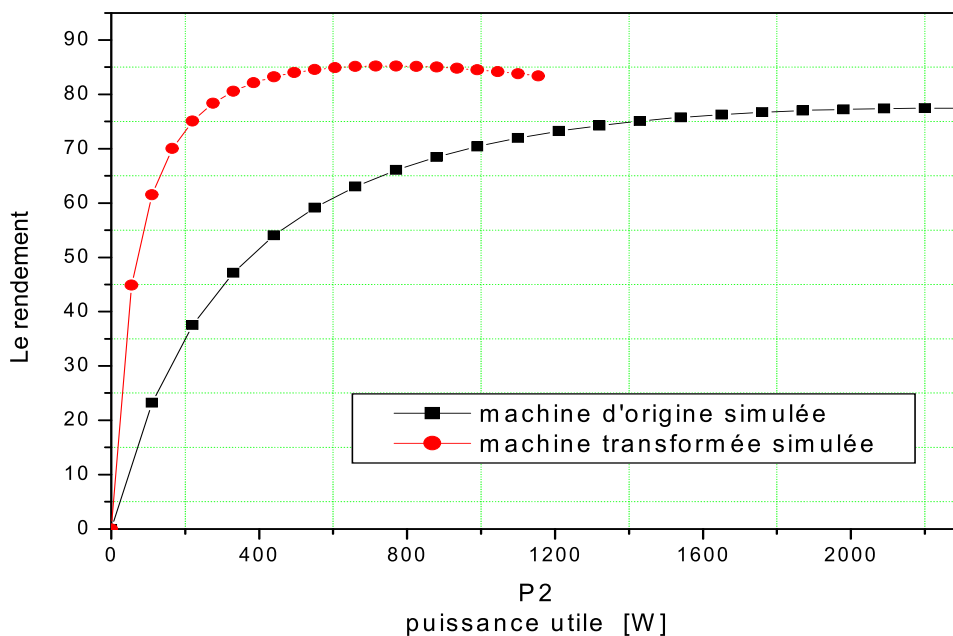
Figure(IV.6) : puissance absorbée en fonction de la charge

Couple utile en fonction de la charge



Figure(IV.7) : couple utile en fonction de la charge

Le rendement en fonction de la charge



Figure(IV.8) : le rendement en fonction de la charge

IV.3.2. Interprétation des courbes

IV.3.1.a. Le glissement : Figure(IV.3)

La courbe forme presque une droite, qui passe par l'origine, il augmente avec l'augmentation de la puissance utile,

IV.3.1.b. Le courant absorbé : Figure(IV.4)

À vide le courant absorbé ne s'annule pas, à cause d'existences de la partie magnétisante et des pertes joules et pertes fer statorique, puis il commence à augmenter avec l'augmentation de la puissance utile. Le courant est nettement inférieur à celui de la machine d'origine simulée.

IV.3.1.c. Le facteur de puissance : Figure(IV.5)

La courbe forme une exponentiel croissante, avec la variation de la puissance utile. il est de l'ordre de 0,85 à 1,1 kw.

IV.3.1.d. La puissance absorbée : Figure(IV.6)

La courbe forme une droite, qui ne passe pas par l'origine, donc elle est proportionnelle à la puissance utile. Elle est inférieure à celle de la machine standard simulée.

IV.3.1.e. Le couple utile : Figure(IV.7)

L'allure du couple utile est une droite, qui passe par l'origine, donc il est proportionnel à la puissance utile. les deux courbes sont confondues. Avec $C_N = 7,30Nm$ pour la machine transformée simulée.

IV.3.1.f. Le rendement : Figure(IV.8)

On distingue trois zones la première qui prend l'allure d'une droite, la seconde qui forme un coude, et en fin la troisième qui représente la zone de saturation.

IV.3.3. Comparaison

Après avoir varié la puissance nominale, et changer le couplage des trois phases statorique, du triangle à l'étoile, on obtient la machine transformée.

Les principaux résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau (IV.2) : résultats obtenus dans les deux machines

	Machine standard	Machine transformée
G	0,055	0.041
I1 [A] γ	3,803	2.22
Cos (phi)	0,622	0.857
P1 [W]	2840,502	1313
Cu [Nm]	14,83	7.304
Le rendement	77,5	0.838
N [tr /min]	1417	1438
B δ [T]	0.963	0.554
Φ [weber]	$4.712 \cdot 10^{-3}$	$2,71 \cdot 10^{-3}$
J1 [A/mm]	7.151	5.718
PT [W]	565.944	248.157
FT [A]	1347	366.968
U [V]	400	230

IV.3.4.Observation

A travers les résultats obtenus on remarque :

- La diminution de glissement, causée par la diminution de chacune des puissances mécaniques et la résistance de la phase statorique.
- La diminution du courant absorbé, ce la revient a la diminution de chacune des pertes joules et pertes fer statorique, la résistance des phases statorique, la résistance de la cage de rotor et aussi les fmm.
- Le facteur de puissance atteint des valeurs importantes contrairement au facteur initial.
- La puissance absorbée au régime nominal est presque la moitié de celle de la machine standard, et ce la revient a la diminution de la puissance nominale et les pertes totales.
- Le couple utile a diminué, il est presque la moitié de la valeur du couple initial. Ce la s'explique par la diminution de la charge.

- L'augmentation de la vitesse de rotation rotorique, s'explique par la diminution du glissement. Donc de la charge
- Les changements portés dans la machine, ont engendrés la diminution de : l'induction dans l'entrefer, les champs magnétiques, les fmm ainsi la densité de courant et les pertes totales, ce qui a permis l'augmentation du rendement de 77,5% à 83,8%, une amélioration de 6,3%.

Conclusion

Vu les caractéristiques obtenues dans la machine transformée simulée, et les comparant à celles de la machine d'origine simulée, on peut dire qu'on a apporté une amélioration importante à la machine transformée, les changements portés nous ont permis de diminuer les pertes totales dans la machine, bien que le rendement a augmenté de 6,3%.

Cette machine obtenue est utilisée à des charges inférieures à celle d'origine, et cela pour atteindre le bon fonctionnement, et les performances désirées.

Dans ce cas la transformation de la machine asynchrone déjà construite, vers une machine à haut rendement ne peut se faire que par son déclassement.

Conclusion Générale

Conclusion générale

La transformation d'une machine électrique nécessite une étude profonde et des recherches intenses ainsi que des moyens humains et matériels. Ce qui induit a une longue durée de travail.

Dans notre mémoire l'objectif est d'augmenter le rendement d'une machine standard, pour cela on a opté pour deux méthodes, la première consiste à varier la longueur virtuelle du stator ; la diminution de nombre de conducteurs par encoche et l'augmentation de section effective des conducteurs. Avec cette méthode on a utilisé plus de matière, ce qui rend la machine plus couteuse en contre partie on a amélioré le rendement et les performances de la machine.

La seconde méthode représente la variation de la puissance nominale avec le passage du couplage triangle au couplage étoile, dans ce cas la charge imposé est réduite par rapport a la machine d'origine, bien que le rendement est meilleur.

Ce travail nous a permis d'approfondir nos connaissances dans la construction des machines électriques plus exactement les machines asynchrones qui ont une grande importance dans le domaine industriel et domestique. et a ce familiarisé aux logiciels mathcad 14 et origine qui nous ont été d'un apport important en matière de calcul et de temps.

Enfin, le domaine de calcul d'une machine électrique s'avère très vaste et que l'amélioration du rendement est un sujet d'actualité.

Annexe

Annexes

B.T	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H . A/M									
0,4	121	127	130	133	136	138	141	144	147	150
0,5	154	157	160	164	167	171	174	177	180	184
0,6	188	191	194	198	201	205	208	212	216	220
0,7	223	226	229	233	236	240	243	247	250	253
0,8	256	259	262	265	268	271	274	277	280	283
0,9	286	290	293	297	301	304	308	312	316	320
1,0	321	329	333	338	342	346	350	355	360	365
1,1	370	375	380	385	391	396	401	406	411	417
1,2	424	430	436	442	448	455	461	467	473	479
1,3	486	493	504	514	524	533	563	574	584	585
1,4	580	598	610	622	634	646	658	670	683	696
1,5	709	722	735	749	763	777	791	805	820	835
1,6	850	878	906	934	962	990	1020	1050	1080	1110
1,7	1150	1180	1220	1250	1200	1330	1360	1400	1440	1480
1,8	1520	1570	1620	1670	1720	1770	1830	1890	1950	2010
1,9	2070	2160	2250	2340	2430	2520	2640	2760	2890	3020
2,0	3150	3320	3500	3680	3860	4040	4260	4480	4700	4920
2,1	5140	5440	5740	6050	6360	6670	7120	7570	8020	8470
2,2	8920	9430	9910	10460	10980	11500	12000	12600	13200	13800
2,3	14400	15100	15800	16500	17200	18000	18800	19600	20500	21400

Tableau 2 : caractéristique magnétique au niveau des dents (stator et rotor)

B.T	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H . A/M									
0,4	52	53	54	55	56	58	59	60	61	62
0,5	64	65	66	67	69	71	72	74	76	78
0,6	80	81	83	85	87	91	91	93	95	97
0,7	100	102	104	106	108	111	113	115	118	121
0,8	124	126	129	132	135	138	140	143	146	149
0,9	152	155	158	161	164	168	171	174	177	181
1,0	185	188	191	195	199	203	206	209	213	217
1,1	221	225	229	233	237	241	245	249	253	257
1,2	262	267	272	277	283	289	295	301	307	313
1,3	320	327	334	341	319	357	365	373	382	391
1,4	400	410	420	430	440	450	464	478	492	506
1,5	520	542	561	586	608	630	654	678	702	726
1,6	750	788	826	864	902	940	982	1020	1070	1110
1,7	1150	1220	1290	1360	1430	1500	1600	1700	1800	1900
1,8	2000	2160	2320	2490	2650	2810	2960	3110	3270	3420
1,9	3570	3800	4030	4260	4490	4720	4930	5140	5350	5560
2,0	5770	6000	6300	6600	7000	7400	7900	8400	9000	9700

Tableau 3 : caractéristique magnétique au niveau de la culasse (stator et rotor)

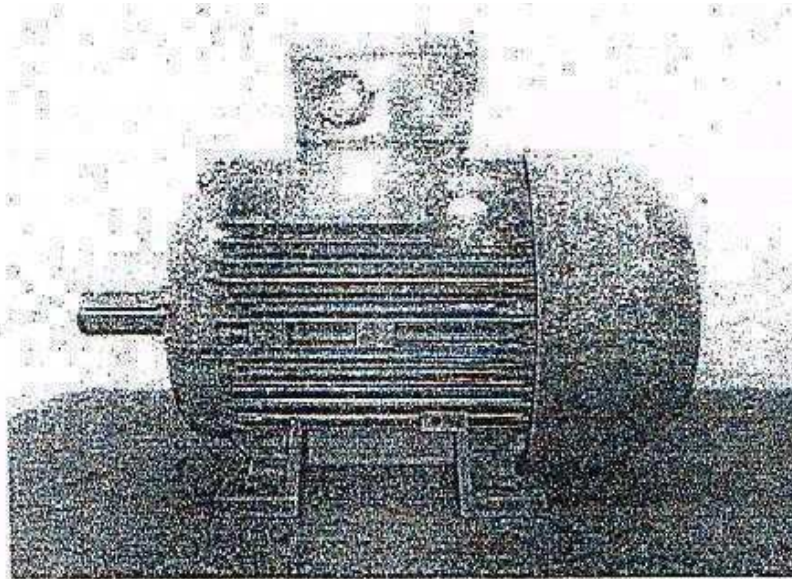
Annexes

B.T	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H. A/M									
0,4	121	127	130	133	136	138	141	144	147	150
0,5	154	157	160	164	167	171	174	177	180	184
0,6	188	191	194	198	201	205	208	212	216	220
0,7	223	226	229	233	236	240	243	247	250	253
0,8	256	259	262	265	268	271	274	277	280	283
0,9	286	290	293	297	301	304	308	312	316	320
1,0	321	329	333	338	342	346	350	355	360	365
1,1	370	373	380	385	391	396	401	406	411	417
1,2	424	430	436	442	448	455	461	467	473	479
1,3	486	493	504	514	524	533	563	574	584	585
1,4	580	598	610	622	634	646	658	670	683	696
1,5	709	722	735	749	763	777	791	805	820	835
1,6	850	878	906	934	962	990	1020	1050	1080	1110
1,7	1150	1180	1220	1250	1200	1330	1360	1400	1440	1480
1,8	1520	1570	1620	1670	1720	1770	1830	1890	1950	2010
1,9	2070	2160	2250	2340	2430	2520	2640	2760	2890	3020
2,0	3150	3320	3500	3680	3860	4040	4260	4480	4700	4920
2,1	5140	5440	5740	6050	6360	6670	7120	7570	8020	8470
2,2	8920	9430	9910	10460	10980	11500	12000	12600	13200	13800
2,3	14400	15100	15800	16500	17200	18000	18800	19600	20500	21400

Tableau 2 : caractéristique magnétique au niveau des dents (stator et rotor)

B.T	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H. A/M									
0,4	52	53	54	55	56	58	59	60	61	62
0,5	64	65	66	67	69	71	72	74	76	78
0,6	80	81	83	85	87	91	91	93	95	97
0,7	100	102	104	106	108	111	113	115	118	121
0,8	124	126	129	132	135	138	140	143	146	149
0,9	152	155	158	161	164	168	171	174	177	181
1,0	185	188	191	195	199	203	206	209	213	217
1,1	221	225	229	233	237	241	245	249	253	257
1,2	262	267	272	277	283	289	295	301	307	313
1,3	320	327	334	341	319	357	365	373	382	391
1,4	400	410	420	430	440	450	464	478	492	506
1,5	520	542	561	586	608	630	654	678	702	726
1,6	750	788	826	864	902	940	982	1020	1070	1110
1,7	1150	1220	1290	1360	1430	1500	1600	1700	1800	1900
1,8	2000	2160	2320	2490	2650	2810	2960	3110	3270	3420
1,9	3570	3800	4030	4260	4490	4720	4930	5140	5350	5560
2,0	5770	6000	6300	6600	7000	7400	7900	8400	9000	9700

Tableau 3 : caractéristique magnétique au niveau de la culasse (stator et rotor)



Cahier De Charge

Désignation	: moteur asynchrone triphasé à cage
Puissance nominale	: $P_n = 2,2 \text{ KW}$.
Hauteur d'axe	: $h = 100 \text{ mm}$.
Tension nominale	: $U_n = 380 \text{ V}$.
Courant nominal	: $I_n = 5,2 \text{ A}$.
Couple nominal	: $C_n = 15 \text{ N.m}$
Vitesse	: $N_n = 1410 \text{ Tr/min}$
Fréquence du réseau d'alimentation	: $f = 50 \text{ Hz}$.
Facteur de puissance	: $\cos \phi_n = 0,83$.
Rendement	: $\eta_n = 78 \%$.
Nombre de phase	: $m = 3$.
Classe d'isolation	: F.
Degré de protection	: IP 44.
Couplage	: (Δ)

Annexes

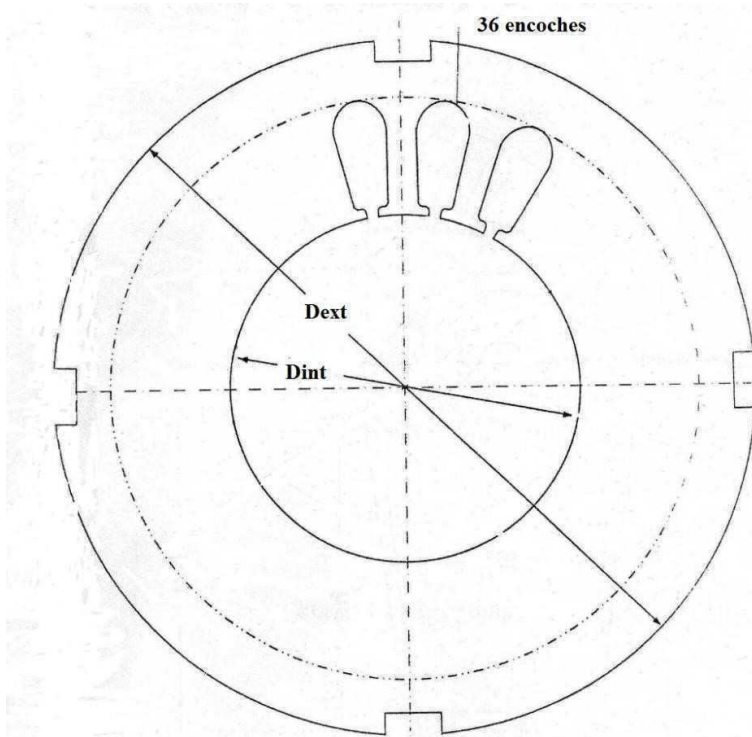


Fig.1: la tôle statorique

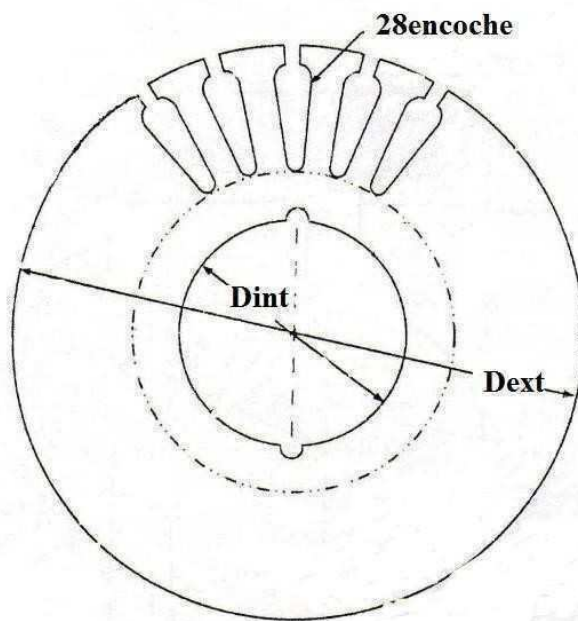


Fig.2: la tôle rotorique

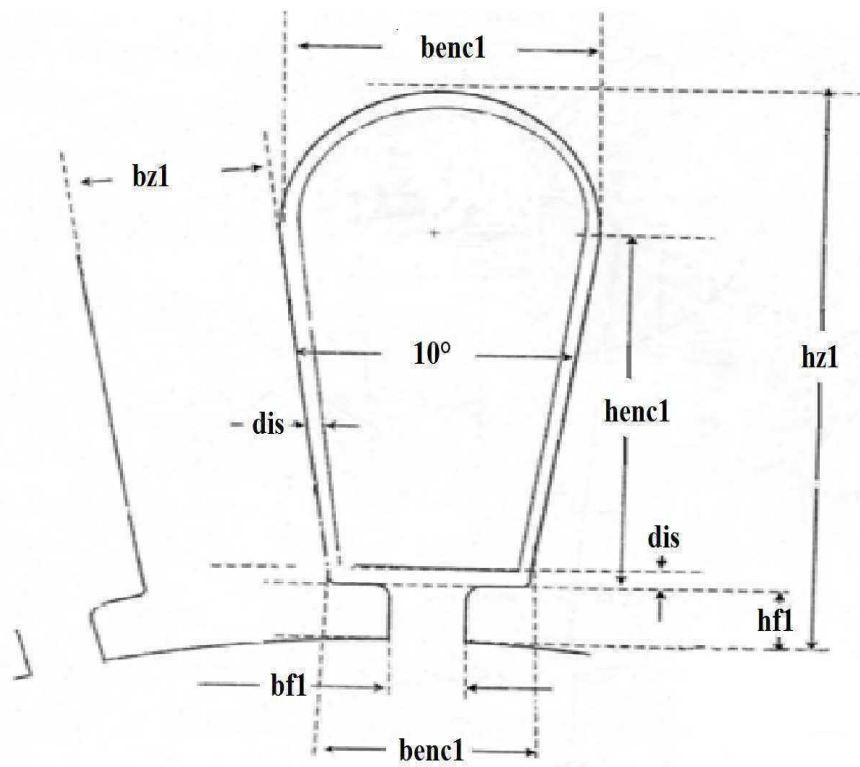


Fig.3: Encoche statorique

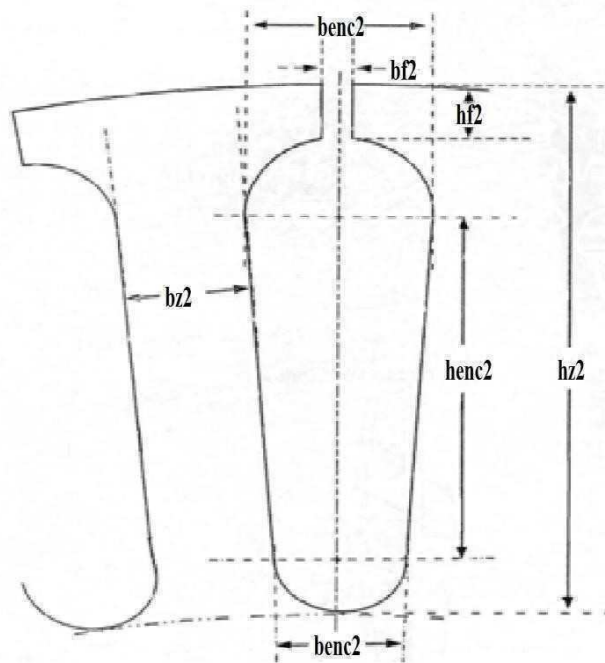


Fig.4: Encoche rotorique

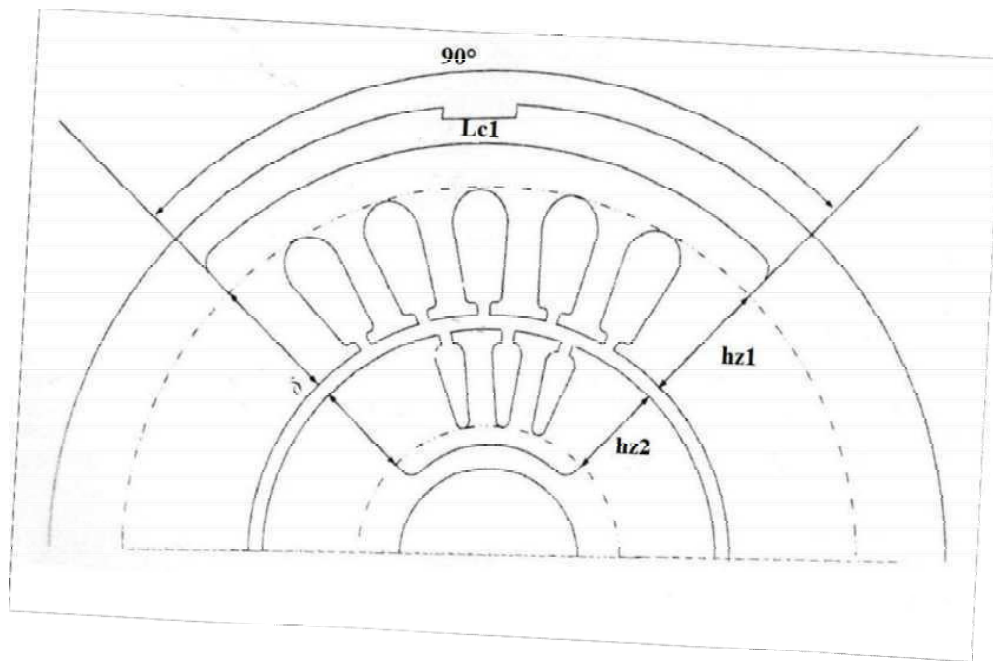


Fig.5: schéma du circuit magnétique

Annexes

Tableau T1 : section normalisé.

Section nominale S_{nom} en mm^2	Diamètre nu d_{nu} en mm	Diamètre avec isolation d_{iso} en mm
0.00785	0.1	0.125
0.00882	0.106	0.131
0.00985	0.112	0.139
0.01094	0.118	0.145
0.01227	0.125	0.153
0.01368	0.132	0.161
0.01539	0.14	0.170
0.01767	0.15	0.181
0.02011	0.16	0.192
0.02270	0.17	0.293
0.02545	0.18	0.215
0.02835	0.19	0.225
0.03142	0.2	0.236
0.03530	0.217	0.250
0.03941	0.224	0.262
0.04374	0.236	0.276
0.04909	0.25	0.290
0.05515	0.265	0.307
0.06158	0.28	0.322
0.07069	0.30	0.344
0.07793	0.315	0.360
0.08814	0.335	0.381
0.09898	0.355	0.403
0.1104	0.375	0.424
0.1257	0.4	0.450
0.1419	0.425	0.478
0.1590	0.45	0.503
0.1772	0.475	0.531
0.1964	0.5	0.556
0.2124	0.52	0.576
0.2206	0.53	0.587
0.2463	0.56	0.619
0.2642	0.58	0.640
0.2827	0.6	0.661
0.3117	0.63	0.692
0.3318	0.65	0.713
0.3526	0.67	0.735
0.3959	0.71	0.776
0.4418	0.75	0.817
0.4778	0.78	0.848
0.5027	0.8	0.869
0.5281	0.82	0.890
0.5674	0.85	0.921
0.6082	0.88	0.952

Annexes

0.6362	0.9	0.973
0.7088	0.95	1.024
0.7854	1.00	1.076
0.8825	1.06	1.137
0.9852	1.12	1.199
1.095	1.18	1.260
1.227	1.25	1.332
1.368	1.32	1.404
1.539	1.4	1.485
1.767	1.5	1.585
2.011	1.6	1.685
2.27	1.7	1.785
2.54	1.8	1.895
2.83	1.9	1.995
3.14	2	2.095
3.53	2.12	2.2
3.94	2.24	2.34
4.36	2.36	2.46

V _c (V)	400	400	400	399	399	399	399	399	400	400	400	400	400	400	400
I _{cy}	2.4018	2.4422	2.5230	2.5923	2.6789	2.7713	2.8694	2.9503	3.0369	3.1292	3.1985	3.2620	3.2967	3.3488	3.3775
P(W)	480	860	1128	1354	1588	1818	2016	2204	2390	2560	2700	2808	2880	2964	3012
N(tr/min)	1497	1488	1483	1477	1471	1466	1459	1454	1449	1444	1441	1437	1434	1431	1428
d(m)	0.005	0.052	0.085	0.115	0.145	0.173	0.198	0.22	0.242	0.263	0.279	0.291	0.301	0.309	0.315
T (°C)	45.6	59.9	62.6	66	69.4	72.2	75.7	79.6	82.2	85.5	88.2	92.2	94.0	97.8	100.1
R _c (Ω)	8.246	8.666	8.745	8.845	8.945	9.027	9.130	9.245	9.321	9.418	9.497	9.615	9.668	9.780	9.847
C _u (N.m)	2.5	2.6	4.25	5.75	7.25	8.65	9.90	11	12.20	13.15	13.95	14.55	15.05	15.45	15.75
P _β (W)	142.70	155.06	167.01	178.32	192.59	207.99	225.53	241.41	257.90	276.68	291.50	306.94	315.22	328.99	337.00
P _{tr} (W)	137.3	504.9	761.0	975.7	1195.4	1410.0	1590.5	1762.6	1932.1	2083.3	2208.5	2301.1	2364.8	2435.0	2475.0
P _r (W)	0.2746	4.0395	8.6245	14.963	23.1112	31.9601	43.4728	54.0528	65.6912	76.7772	86.8675	96.644	104.05	112.01	118.79
P _{sup} (W)	7.200	12.900	16.92	20.31	23.82	27.27	30.24	33.06	35085	38.40	40.50	42.12	43.20	44.46	45.18
g	0.0020	0.0080	0.0130	0.0153	0.0193	0.0227	0.0273	0.0307	0.0340	0.0373	0.0393	0.0420	0.0440	0.0460	0.0480
P _i (W)	39.2	405.1	660.0	889.4	1116.8	1327.9	1512.6	1674.9	1851.2	1988.5	2105.1	2189.5	2260.0	2315.1	2355.3
η(%)	8.16	47.11	58.51	65.68	70.33	73.04	75.03	75.99	77.46	77.68	77.97	77.97	78.47	78.11	78.2

Tableau II-3 : résultats de mesure et de calcul de l'essai en charge expérimental [6]

Bibliographie

Bibliographie

- [1] : BOUCHARD REAL- PAUL, GUY OLIVIER «conception de moteurs asynchrones triphasés», édition de l'école polytechnique de Montréal, 1997.
- [2] :M. KOSTINCO et L. PIOTROVSKI, « machine électrique » édition MIR Moscou 1979.
- [3] : CHAIB MOKRANE et RAHAB TARIK «conception optimale d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil à haut rendement (IE2)», mémoire de master. Université de tizi ouzou, ETH 2011
- [4] : A. GUEMRAOUI et B.DOUDJEDID. « Calcul d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil», mémoire de D.E.U.A .Université de tizi ouzou, ETH 2008.
- [5] : HOSNI HASSENE et LADJEL FAHIM «calcul optimal d'un moteur asynchrone à double cages à haut rendement», mémoire de master. Université de tizi ouzou, ETH 2012.
- [6] : ALIMIRAOUSSAID KARIMA et SEKKAI YASMINA «étude des pertes et leurs répartition dans un moteur asynchrone à cage 2,2 KW», mémoire de master. Université de tizi- ouzou, ETH 2013.
- [7] : PHILIPPE LEBRUN «machine asynchrone, technologie, choix et alimentation des machines asynchrones », édition de lycée luise. Strasbourg.
- [8] : KEFSI MARZOUK et MEGHERBI MOHAND SAID «conception optimal d'une série de moteurs asynchrones alimentée par un convertisseur de fréquence », mémoire de master. Université de tizi- ouzou, ETH 2013.
- [9] : site internet www.moteur.asynchrone.com