

***République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère
de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique***



**Université MOULOUD MAMMERI de TIZI-
OUZOU Faculté du génie électrique et de
l'informatique Département d'électrotechnique**



Mémoire

***De fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en
électrotechnique***

Option : Machines électriques

Thème

**CONCEPTION OPTIMALE D'UN MOTEUR
ASYNCHRONE TRIPHASÉ À CAGE D'ÉCUREUIL
ALIMENTÉ PAR UN CONVERTISSEUR DE
FRÉQUENCE**

Dirigé par :

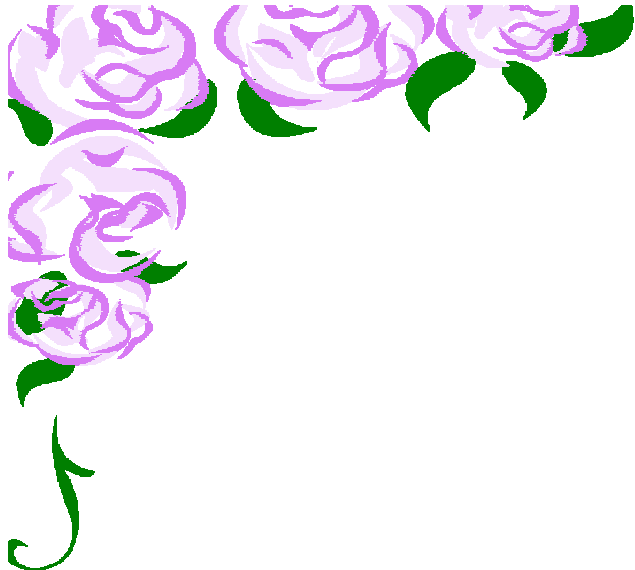
M^r : BELASSEL.M-T

Réalisé par :

M^{elle} : BELABES DJOUHER

M^{elle} : BELKADA CHABHA

Promotion : 2010-2011



Remerciements

Nous remercions tout d'abord «ALLAH» tout puissant de nous avoir donné la santé et le courage d'effectuer ce modeste travail, dans les meilleures conditions.

Comme nous tenons à remercier nos familles respectives particulièrement nos parents qui se sont tant sacrifiés pour notre instruction et réussite. Nous tenons également à adresser nos remerciements à notre promoteur M^RBELASSEL.M-T pour son aide et conseils tout au long de l'élaboration de ce travail.

Nous remercions d'avance, les membres du jury d'accepter d'examiner notre travail.



Dédicaces

Je dédie ce travail à :

A Mes très chers parents qui ont fait de leurs mieux pour que je réussisse.

A la mémoire de mes grands parents.

A mes très chères sœurs : Nassima et Kamilia.

A mes très chers frères : Mohend, Massinisa et à mon petit frère que j'aime beaucoup Khaled.

A toutes ma famille en générale.

A ma binôme : Chabha et toutes sa famille.

A mes meilleurs amies : Nabila et son marie Khalifa et Noria, Dalila et fatma.

A mes copines de chambre : Karima, Saida, Sonia, Nassira, Razika.

A tout mes amis en général.

A tout les étudiant de ma promotion.

Djouher .B

Dédicaces

Je dédis ce modeste travail :

A toute ma famille :

Mes parents en principes,

Mes frères et mes sœurs ainsi que leurs petits,

A tous mes amis :

A mon binôme Djouher

Et à tout le département d'électrotechnique

Chabha .B



Cahier Du Charge

Puissance nominale : $P_n=7.5$ KW

Tension nominale : $U_n=220$ V.

Nombre de paire de pôles : $p=2$

Fréquence du réseau d'alimentation : $f=50$ Hz

Facteur de puissance : $\cos\phi_n=0,87$

Rendement : $\eta_n=0,9$

Hauteur d'axe :

Nombre des phases : 3

Degré de protection : IP 44

Système de refroidissement : IC 0151.

La classe d'isolation : A

Sommaire

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

Chapitre I: Généralités sur les machines asynchrones

I.1 Introduction.....	3
I.2 Constitution	3
I.2.1 Stator	4
I.2.2 Rotor	5
I.2.3 Les organes mécaniques	9
I.4 Bobinage	9
I.4.1 Les différents types d'enroulement	11
I.5 Isolation	15
I.6 Principe de fonctionnement du moteur asynchrone	16
I.7 Classification des moteurs asynchrones à cage d'écureuil ..	17
I.8 Démarrage des moteurs asynchrones.....	19
I.8.1 Les types de Démarrage	20
I.9 Freinage des moteurs asynchrones	26
I.9.1 Les types de freinage	26
I.10 L'alimentation des machines asynchrones.....	27
I.10.1 Différent types de la commande MLI.....	28
I.10.2 Stratégie de la commande	28

I.11 Réglage de vitesse des moteurs à cage	30
---	-----------

Chapitre II : Dimensionnement de la machine asynchrone

II.1 Introduction	32
II.2 Calcul et choix des dimensions principales du stator...	32
II.3 Dimensionnement de la feuille statorique.....	41
II.4 Le choix de l'entrefer.....	45
II.5 Dimensionnement du rotor.....	45
II.6 Dimensionnement de la feuille rotorique.....	48
II.7 Dimensionnement de l'anneau de court-circuit	49

Chapitre III : Calcul électromagnétique

III.1 Introduction.....	51
III.2 Calcul de circuit magnétique	52
III.2.1 La force magnétomotrice dans l'entrefer	52
III.2.2 Circuit magnétique statorique	52
III.2.3 Circuit magnétique rotorique	55
III.2.4 La force magnétomotrice totale par pair de pôle...	56
III.2.5 Coefficient de saturation	56
III.2.6 Courant magnétisant.....	56
III.2.7 Réactance de magnétisation.....	56
III.3 Calcul des paramètres de circuit équivalent.....	57
III.3.1 Paramètres statoriques.....	57
III.3.2 Paramètres rotorique	61

Chapitre IV :

IV.1 Introduction	65
IV.2 Pertes principales dans le fer	65
IV.2.1 Les pertes dans les dents statorique	66
IV.2.2 Les pertes dans la culasse statorique	66
IV.3 Les pertes mécaniques	66
IV.4 Les pertes supplémentaires en régime nominale	67
IV.5 La composante réactive du courant statorique pour la Vitesse synchrone	67
IV.6 Les pertes électriques dans l'enroulement statorique	67
IV.7 La composante active du courant à vide	67
IV.8 Le courant à vide	67
IV.9 Le facteur de puissance à vide	67
IV.10 La résistance active en court-circuit	68
IV.11 La réactance active en court-circuit	68
IV.12 L'impédance en court-circuit	68
IV.13 La puissance mécanique	68
IV.14 La résistance équivalente du schéma équivalent	68
IV.15 L'impédance totale	68
IV.16 Le glissement	68
IV.17 Le composante active du courant statorique	68
IV.18 Le courant du rotor	69
IV.19 Le courant du stator, Composante active et réactive...	69
IV.20 Le facteur de puissance	69
IV.21 La densité de courant nominal statorique	69
IV.22 Le courant de la barre rotorique	69
IV.23 La densité du courant de la barre	69

IV.24 Le courant dans l'anneau.....	69
IV.25 Les pertes électriques dans le stator	70
IV.26 La somme des pertes.....	70
IV.27 La puissance absorbée.....	70
IV.28 Le rendement	70
IV.29 Le rapport du couple maximale sur le couple nominale	70

Chapitre V : Elaboration du programme de calcul

Programme.....	71
Conclusion générale	97

Introduction générale

La diversité d'application des moteurs et leurs qualités font qu'ils sont construits dans une gamme variée du point de vue caractéristique de fonctionnement que de vue de puissance, allant de petits moteurs de quelques watts pour les systèmes de commande et de régulation, aux plus grands moteurs de quelques milliers de kilowatts destinés aux grands entraînements.

Puisque la majeure partie de l'énergie électrique consommée est transformée en énergie mécanique, dans des ensembles mettant en jeux des moteurs asynchrones associés à des convertisseurs de fréquence, s'accompagne inévitablement de pertes d'énergie, il est nécessaires de les déterminer afin de pouvoir les minimiser aux maximum, Pour en faire des commande de puissance et de vitesse sont adoptées en alimentant les moteurs asynchrones via des convertisseurs électroniques de fréquence,

Il existe aujourd'hui des méthodes de calcul des machines d'une grande précision, ces méthodes reposent sur des formules jumelant la connaissance de la théorie et la pratique.

Dans le cadre de notre projet de fin d'étude, la tâche qui nous a été confiée est l'optimisation d'un moteur à cage à rendement élevé, alimenté par convertisseurs en modifiant la forme de l'encoche rotorique.

Notre travail est divisé en cinq chapitres.

Le premier est un aperçu général sur les machines, tel que la constitution, le bobinage, l'isolation, le principe de fonctionnement, les différents types de démarrage et du freinage et on a terminé avec l'alimentation et le réglage de vitesse

Dans le deuxième on donne la méthode de calcul des dimensions principales, du stator et du rotor pour les moteurs asynchrones triphasés à cage

Le troisième est réservé aux calculs électromagnétiques, tel que le calcul du circuit magnétique et les paramètres du circuit équivalent.

L'évaluation des pertes, du rendement et la détermination des performances sont effectués dans le quatrième chapitre.

Le cinquième chapitre est consacré à l'élaboration d'un programme de calcul à l'aide du logiciel **Mathcade 14**,

Nous avons terminé notre travail avec une conclusion général.

I.1 Introduction

La machine asynchrone, connue également sous le nom de machine à induction, est une machine à courant alternatif dont le stator et le rotor sont mécaniquement indépendants l'un de l'autre.

Les machines possédant un rotor en cage d'écureuil sont aussi connues sous le nom de machines à cage. 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. Dans les domaines de forte puissance, la machine asynchrone a été concurrencée par la machine à courant continu quand il est nécessaire de varier la vitesse de rotation et ce jusqu'à l'apparition de l'électronique de puissance.

I.2 Constitution

La machine asynchrone se compose essentiellement de deux parties principales, l'un est stator étant fixe, on y trouve les enroulements reliés à la source, l'autre est le rotor, il est monté sur un axe libre de tourner. Ils sont constitués de matériaux ferromagnétiques (silisium) pour la raison que le champ sera satisfaisant, mais les pertes joule liées aux courants induits seront énormes, et l'entrefer sera le plus étroit possible (de 0,2mm à 3mm suivant la puissance de la machine).

On trouve aussi les différents organes mécaniques permettant la relation du rotor et le maintien des différents sous-ensembles. Selon que les enroulements du rotor sont fermés sur eux même ou accessibles à l'extérieure on distingue deux types de rotor ; rotor bobiné et rotor à cage. La figure I-1 représente les différents composants d'un moteur asynchrone

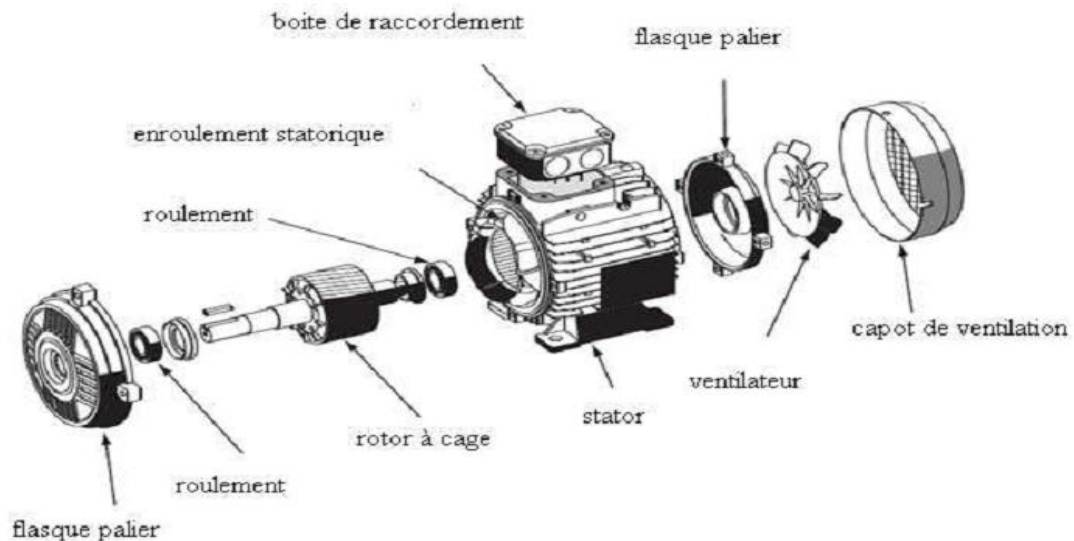


Figure I.1 Constitutions du moteur asynchrone

I.2.1 Stator

Le stator est un anneau constitué d'un empilement de tôles d'acier au silicium, encochées à l'intérieur et portant un enroulement triphasé réparti dans les encoches du circuit magnétique.

Il est aussi appelé inducteur ou primaire, car c'est au champ tournant qu'il développe que sont dûs les courants induits au rotor. Les tôles étant de faible épaisseur. Les figures I.2, I.3 représentent respectivement le schéma d'un paquet de tôles statoriques, le schéma d'un stator sans bobinage.

Dans le cas où le diamètre de la machine ne dépasse pas quelques dizaines de millimètres, les tôles sont découpées en une seule pièce. Pour celles ayant un grand diamètre les tôles sont découpées par sections.

Pour les longueurs du stator et du rotor inférieures à 200mm, on ne subdivise pas le paquet de tôles. Au-delà de 200mm on subdivise les tôles en paquets élémentaires séparés par un espace d'air dit canal de ventilation. Pour éviter que les tôles vibrent on les serre par des boulons ou des cordons de soudure.



Figure I.2)



Figure I.3)

Les encoches statoriques sont de 3 types génériques : ouvertes, semi-ouvertes et semi- fermées, voir Figure I.4. Les encoches de type ouvert sont habituellement de même largeur sur toute la profondeur, les encoches semi-ouvertes sont généralement de forme trapézoïdale.

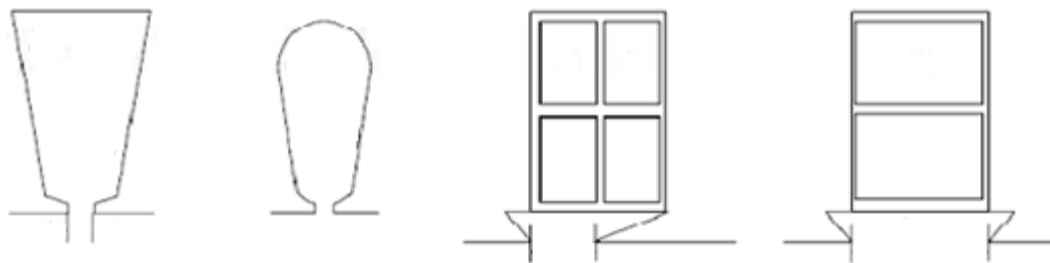


Figure I.4 Les différents types d'encoches des machines asynchrones

I.2.2 Rotor

C'est un anneau de tôle empilées et rainurées à l'extérieur. Habituellement de même matériau que le stator et séparé de lui par un entrefer. Le rotor n'est donc relié à aucune source d'énergie ce qui simplifie sa construction. Le courant dans ces enroulements est induit par le champ tournant statorique d'où son appellation induit ou secondaire.

Pour tourner il suffit au rotor d'être le siège de courants induits, il pourrait alors être de forme cylindrique massif, sans enroulements les courants induits deviennent courants de Foucault, mais un tel moteur a beaucoup d'inconvénients.

Pour améliorer les performances mécaniques et énergétiques, on a été conduit à donner au rotor deux types de formes fondamentaux, qui sont, le rotor bobiné et le rotor à cage

Le rotor bobiné comporte un enroulement triphasé bobiné à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disque en tôles empilées sur l'arbre de la machine.

Les encoches, découpées dans les tôles sont légèrement inclinées par rapport à l'axe de la machine de façon à réduire les variations de réluctance liées à la position angulaire rotor/stator et certaines pertes dues aux harmoniques. L'enroulement triphasé est branché en étoile ou en triangle, il est connecté à trois bagues qui le rendent accessible à l'extérieur par l'intermédiaire de balais.

On peut ainsi le court-circuiter comme cela ce produit en marche normale, on peut insérer des résistances dans le circuit lors de démarrage et dans certains cas spéciaux de fonctionnement on peut y raccorder un convertisseur de courant à thyristor afin de régler le courant de démarrage et la vitesse en marche normale. Ce type de moteur est utilisé essentiellement dans des applications où les démarrages sont difficiles et/ou nombreux, en effet les pertes rotoriques pendant la phase de démarrage ne sont pas toujours supportées par les cages.

Dans le rotor à cage Figure I.5 et I.6, l'enroulement triphasé est remplacé par les barres conductrices réunies à leurs extrémité par des anneaux de court-circuit, le tout rappelant la forme d'une cage d'écureuil.

Bien entendu, cette cage est à l'intérieur d'un circuit magnétique analogue à celui du moteur à rotor bobiné. Les barres sont fabriquées en cuivre ou en aluminium, suivant les caractéristiques mécaniques et électrique recherchées par le constructeur. Dans le cas de moteur de faible ou moyenne

puissance les cages sont en aluminium coulé sous vide partiel et pression. Ce procédé permet d'éviter la présence néfaste de bulles d'air dans les barres. Pour les gros moteurs les barres sont en cuivre ou en laiton.



Figure I.5) Rotor en cage d'écureuil



Figure I.6) Structure d'un rotor à
Cage d'écureuil

L'inconvénient majeur du rotor à cage est qu'il a au démarrage, de mauvaises performances (courant élevé et faible couple). C'est pour remédier à cette situation qu'on a développé deux types de cages (rotor à double cage et rotor à encoche profondes).

Le rotor à double cage peut comporter deux cages coaxiales, l'une est externe (réalisée fréquemment en laiton ou en bronze) à résistance relativement élevée et placée près de l'entrefer. L'autre est interne (réalisée en cuivre) de faible résistance et noyée dans l'entrefer. La figure I.7.b représente la forme de la tôle utilisée pour la fabrication d'un rotor à double cage.

Ce type de moteur est beaucoup plus aisé à construire que le moteur à rotor bobiné est par conséquent d'un prix de revient inférieur et a une robustesse intrinsèquement plus grande. Il n'est donc pas étonnant qu'il constitue la plus grande partie du parc des moteurs asynchrones actuellement en service.

Le rotor à double cage est beaucoup plus difficile à construire que le rotor à simple cage, il est donc d'un coût plus élevé. On peut pallier cet inconvénient, tout en gardant une partie de ces avantages, en construisant une

cage rotorique simple avec des barres très plates s'enfonçant profondément dans le circuit magnétique.

Lors du démarrage, les lignes de courant se concentrent près de la périphérie et tendent ainsi à assigner une section de conducteur apparente réduite et par conséquent une résistance rotorique importante. En revanche, en marche normale, cet effet disparaît et les lignes de courant, en occupant la pleine section de la barre, retrouvent un circuit de faible résistance. Ce type de moteur, dit à encoche profondes, voir figure I.7.a, il est très utilisé, notamment dans le cas des moteurs à haute tension à fort couple de démarrage. Il présente cependant l'inconvénient d'entraîner une augmentation du coefficient de dispersion des enroulements, donc une diminution du facteur de puissance du moteur, et bien sûr, d'exiger un diamètre de rotor plus important. Pour remédier à ce dernier inconvénient on fait parfois appel à des conducteurs ayant des formes plus compliquées, en trapèze.



(Figure I.7)

a) Rotor à encoches profondes

b) tôle d'un moteur à double cage.

Pour former le rotor on empile généralement les tôles de façon que les conducteurs soient obliques par rapport à l'axe du moteur. Cette disposition a pour effet de réduire considérablement le bruit et les harmoniques durant l'accélération et le démarrage en plus d'éviter l'accrochage et les oscillations à faible charge.

I.2.3 Les organes mécaniques

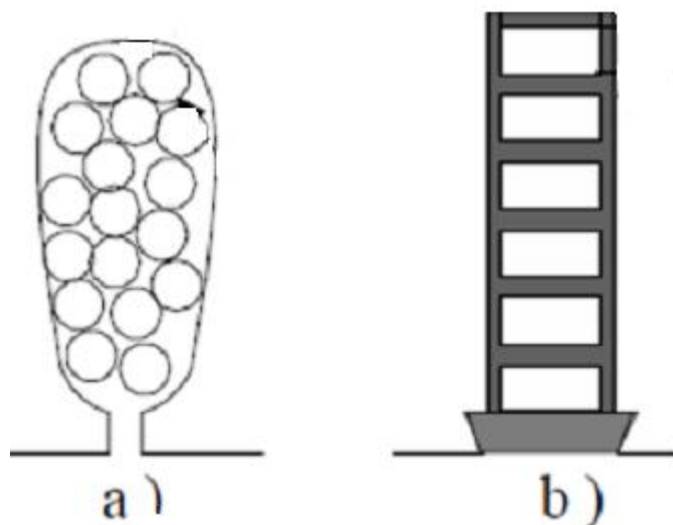
La carcasse sert de support, elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi-accouplement. Il est généralement constitué en acier moulé ou forgé. Son dimensionnement est fonction des efforts de flexion (force centrifuge qui s'exerce sur lui, attraction magnétique radiale, etc.....), des efforts radiaux et tangentiels dus aux forces centrifuges, des efforts de tension (couple électromagnétique transmis en régime permanent, transitoire). Il est supporté par un ou plusieurs paliers qui soutiennent le rotor et assurent la libre rotation. Le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre. Une isolation électrique de l'un des paliers assure l'élimination des courants dans l'arbre dus aux dissymétries des réluctances du circuit magnétique. Ils sont généralement à roulements pour les machines de petite et moyenne puissance.

I.4 Bobinage

Selon l'application on distingue trois types d'enroulements : Enroulement à une seule couche, enroulement à deux couches et enroulement mixte, qu'on peut réaliser en un enroulement imbriqué, concentrique ou ondulé .

Lorsque les bobines sont faites de fil carré ou rectangulaire d'assez fortes sections (Figure I.8.b) elles sont formées sur des gabarits et insérées globalement dans des encoches ouvertes. Dans le cas d'encoches semi-ouvertes (Figure I.8.a), on utilise arbitralement plusieurs fils ronds, de faible section pour former les conducteurs des bobines.

Comme pour les bobines carrées, elles sont formées sur des gabarits mais introduites fil par fil ou quelques fils à la fois dans les encoches.



Encoches statoriques avec les conducteurs ronds

Encoche rectangulaires

Figure I.8

Pour réaliser l'enroulement d'une machine il faut connaître les paramètres suivant :

- **Le pas polaire**

$$\tau = \frac{z}{2.p} \quad (\text{I.1})$$

- **Le pas d'enroulement**

$$y = \frac{z}{2.p} \pm \varepsilon \quad (\text{I.2})$$

- **Le nombre d'encoches par pole et par phase**

$$q = \frac{z}{2.p.m} \quad (\text{I. 3})$$

- **L'angle électrique entre deux encoches voisines**

$$\gamma = \frac{360.P}{Z} \quad (I.4)$$

- **La zone de phase**

$$\alpha = \gamma . q \quad (I.5)$$

m : nombre de phase

Z : nombre total d'encoches au stator.

P : le nombre de paire de pôles.

ε : le raccourcissement. On le prend en général pour les enroulements à deux encoches ± 1 et il est égal à 0 pour les enroulements à une seule couche (il n'ya pas de raccourcissement).

I.4.1 Les différents types d'enroulement :

a)Enroulements imbriqués à une seule couche

Dans le cas d'un enroulement imbriqué à une seule couche chaque bobine qui forme l'enroulement occupe deux encoches .Puisqu'il doit y avoir autant d'enroulement qu'il ya de phases. Prenons l'exemple d'un enroulement à Z=24 encoches et le nombre de pôles 2p=4, on obtient alors le schéma de la Figure I.9.

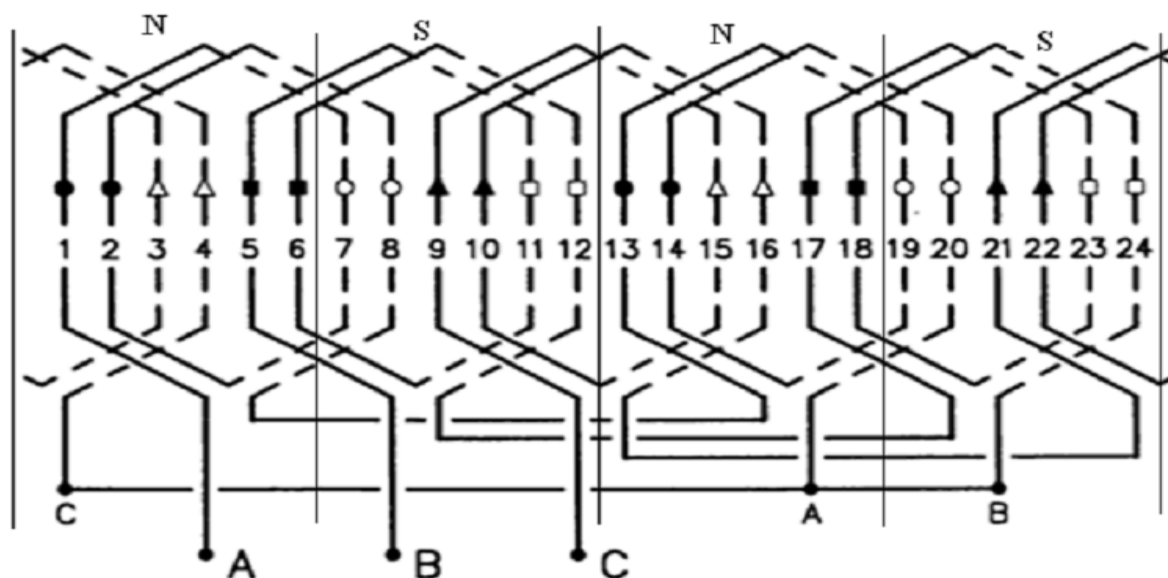


Figure I.9 Enroulement imbriqué à une seule couche d'un moteur asynchrone triphasé à 4 pôles et 24 encoches

b) Enroulements concentriques

L'enroulement concentrique est l'enroulement le plus utilisé dans la fabrication du bobinage à une seule couche. Chaque bobine occupe et remplit deux encoches. La différence entre l'enroulement imbriqué à une seule couche et l'enroulement concentrique réside dans le fait que les bobines au lieu d'être toutes identiques et décalées d'une encoches les unes par rapport aux autres, sont à l'intérieure d'une phase de dimensions différentes et placées les unes autour des autres. Prenant l'exemple d'un enroulement à $Z=12$ encoches et au nombre de pôles $2p=2$ voir Figure I.10

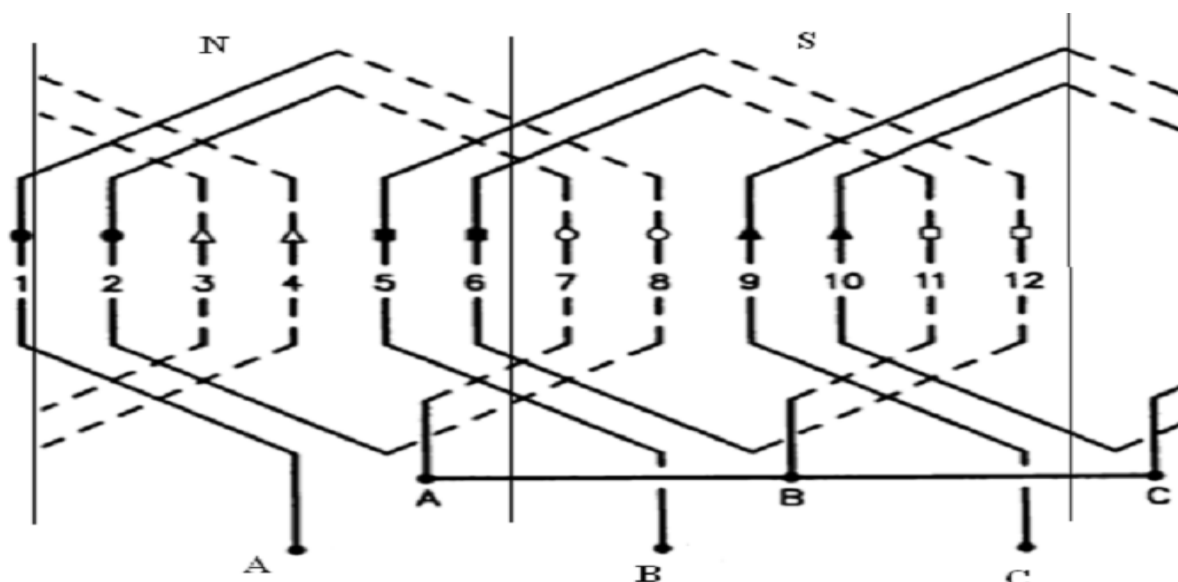


Figure I.10 Enroulement concentrique triphasé d'un moteur à 2 pôles et 12 encoches

c) Enroulements imbriqués à deux couches

L'enroulement imbriqué est le type de bobinage le plus employé dans les stators des moteurs triphasés de moyenne et grande puissance. Mais on utilise le plus souvent l'enroulement à deux couches. Chaque bobine est formée de la moitié de conducteurs contenus dans une encoche et disposés de façon que l'un des cotés de la bobine soit dans le haut d'une encoche et l'autre dans le fond. Puisque les bobines n'occupent que la moitié d'une encoche, on peut en modifier la largeur et les placer dans une paire d'encoche normale. Les bobines sont habituellement de largeur réduite et donnent un pas dit raccourci. Cette configuration complique le bobinage, mais présente l'avantage d'atténuer les harmoniques de l'onde de flux et d'améliorer le comportement du moteur. Un exemple est représenté sur la Figure I.11 ci-dessous :

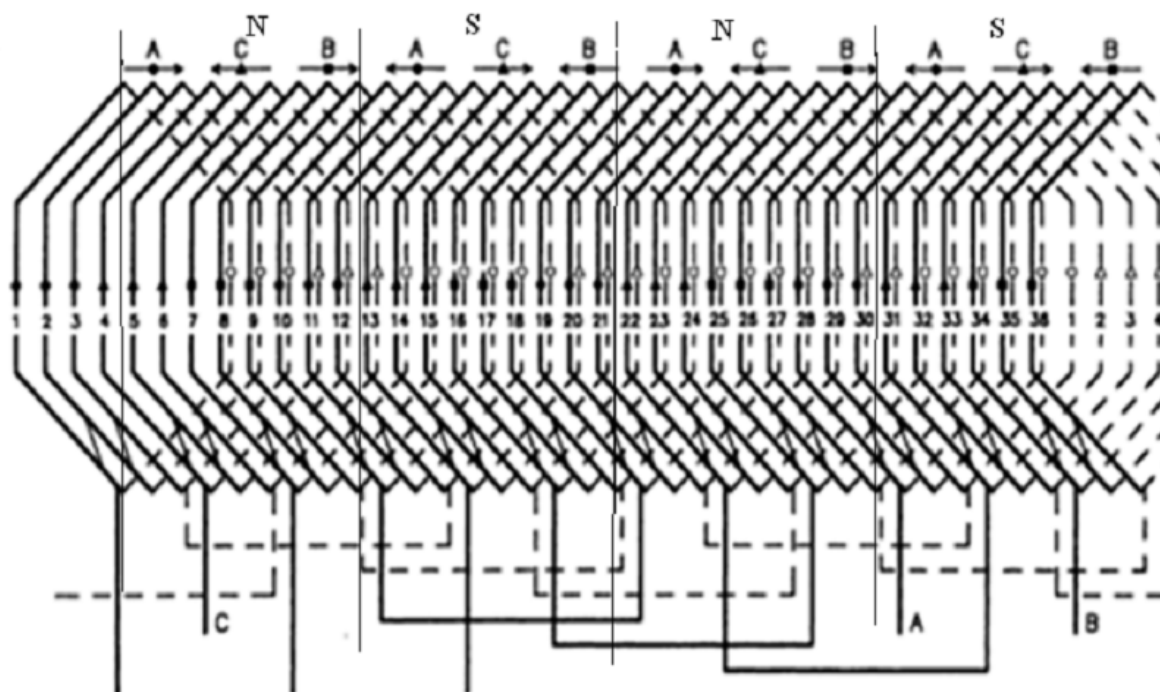


Figure I.11 Enroulement imbriqué à deux couches d'un moteur à 2 pôles et 36 encoches

d) Enroulement ondulé

L'enroulement ondulé est habituellement un bobinage à deux couches. Il doit être équilibré de point de vue électrique, c'est-à-dire que le nombre d'encoches actives doit être un multiple de produit du nombre de pôles et du nombre de phase. Dans ce type d'enroulement, les conducteurs qui occupent des places analogues sous deux pôles consécutifs sont connectés en série. Le circuit fait le tour de stator ou de rotor une ou plusieurs fois, allant d'un pôle à un autre sans revenir. Prenants l'exemple d'un enroulement à deux couches d'un moteur ayant $2p=4$ et 36 encoches présenté ci-dessous (Figure I.12)

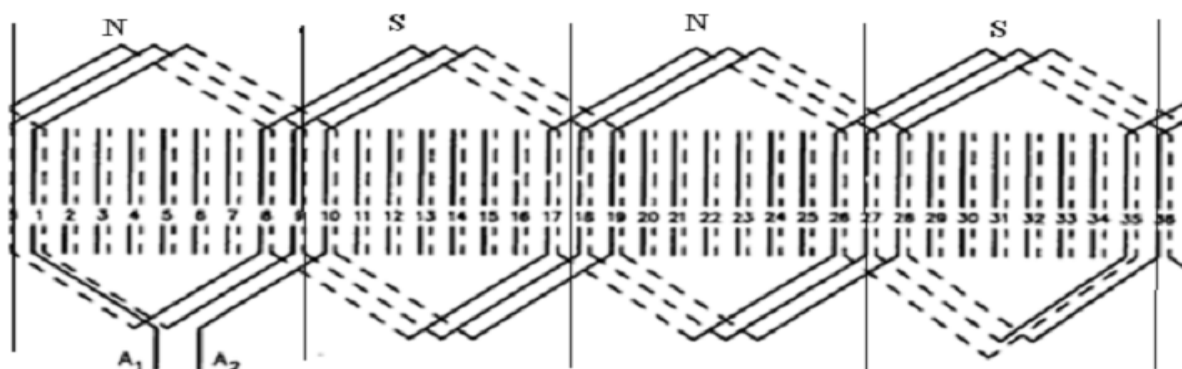


Figure I.12 enroulement ondulé d'un moteur triphasé à deux couches à 4 pôles et 36 encoches

I.5 Isolation

L'isolation entre les conducteurs, les bobines et le circuit magnétique peut s'effectuer à l'aide de plusieurs types de matériaux isolants, tels que le coton, la soie le papier et autres matériaux similaires parfois imprégnés d'huile. On utilise aussi des matières inorganiques comme le mica, la fibre de verre, utilisées seules ou agglomérées à l'aide de produits tels que l'asphalte, la gomme et les résines synthétiques. Les développements de la chimie ont amené toute une gamme de matériaux synthétique, parmi eux le polyvinyle, le polyuréthane, le nylon et le polyester qui ont des caractéristiques isolantes et thermiques spécifiques. Pour l'isolation des fils on utilise des vernis. (La figure I.13) présente les différentes isolations.

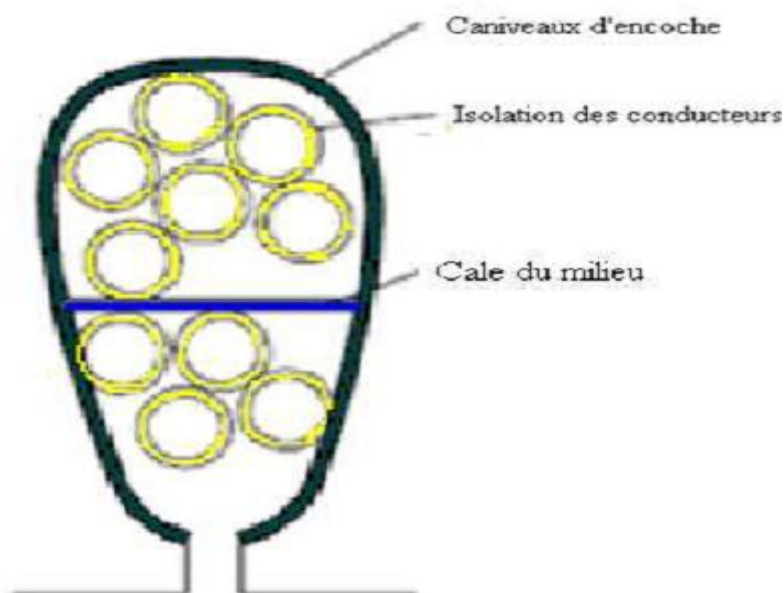


Figure I.13 Différents isolations dans l'encoche

I.6 Principe de fonctionnement du moteur asynchrone

Le fonctionnement du moteur asynchrone triphasé est basé sur l'application des principes I (théorème d'Ampère), II (loi de Faraday) et III (loi de Lenz) de l'électromagnétisme. Au moment où l'on ferme l'interrupteur pour brancher les enroulements du stator sur une ligne triphasée, les tensions appliquées produisent des courants triphasés, ces derniers créent un champ tournant (principe I) qui induit une tension dans les barres du rotor (principe III) cette tension est alternative car les conducteurs sont tantôt devant un pôle nord tantôt devant un pôle sud de champ tournant. Les conducteurs étant court-circuités à leurs extrémités par les deux anneaux, la tension induite donne naissance à des courants intenses dans les barres, ces dernières sont situées dans un champ magnétique ce qui produit des forces électromagnétiques (principe II). Les forces tendent à entraîner le rotor dans le sens de rotation du champ.

La machine est dite asynchrone car elle est dans l'impossibilité d'atteindre la vitesse de rotation du champ tournant statorique qui reste voisine de sa vitesse de rotation, ainsi on ne peut pas caractériser le fonctionnement de

la machine en le liant à sa vitesse mais c'est l'écart entre la vitesse de synchronisme et la vitesse de rotation qui est le plus significatif.

On appelle le rapport entre cet écart et la vitesse de synchronisme le glissement de la machine qui est donné par la relation suivante :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \quad (\text{I.1})$$

Avec :

Ω_s : vitesse de rotation du champ tournant en (rd /s)

Ω : vitesse de rotor en (rd/s)

En effet dans ce cas, vu dans le référentiel du rotor, il n'y aurait pas de variation de flux, les courants s'annuleraient donc pas de couple moteur.

A l'heure actuelle, la plus parts des machines asynchrones sont employées en leurs associant un convertisseur de fréquence. Parmi ces moyens on trouve la commande à **Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI)**.

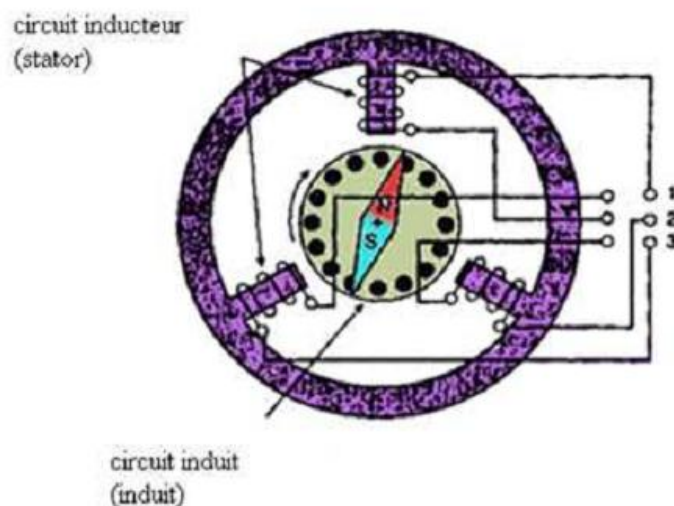


Figure I.14) Fonctionnement du moteur asynchrone

I.7 Classification des moteurs asynchrones à cage d'écureuil

La **NEMA** (National Electrical Manufacturers Association) a classifié les moteurs à cage d'écureuil en cinq classes qui sont définies dans le tableau I.1

La classe du moteur	Ses caractéristiques
Classe A	Moteur à couple normal et à courant de démarrage normal
Classe B	Moteur à couple normal et à faible courant de démarrage
Classe C	Moteur à fort couple et à faible courant de démarrage
Classe D	Moteur à fort glissement
Classe F	Moteur à faible couple et faible courant de démarrage.

Tableau I.1 Classification des moteurs à cage par la NEMA

L'encoche du rotor d'un moteur de classe A n'est pas tellement creuse et l'enroulement est à faible résistance. De même sa réactance est faible et presque uniforme pour tout le conducteur, le couple est normal et le courant de démarrage est suffisamment élevé, ce type de moteur ne se fabrique plus.

Le moteur de classe B est le plus utilisé, ses caractéristiques découlent de l'emploi d'encoche profonde et étroite. Lors du démarrage la réactance est plus forte dans le bas de conducteur cela force le courant à passer surtout dans le haut de conducteur il se retrouve ainsi limité lorsque le moteur démarre à pleine tension c'est un avantage par rapport au moteur de classe A.

Un moteur de classe C possède un rotor à double cage. Il est construit de façon différente. Le principe consiste à placer un enroulement de forte résistance près de l'entrefer et un enroulement de faible résistance loin de la surface.

Durant le démarrage, le conducteur éloigné de l'entrefer a une grande réactance, ce qui force le courant à passer dans le conducteur extérieur. Le courant est donc faible mais le couple est fort. Lorsque le rotor a atteint sa pleine vitesse, la réactance du conducteur située le plus loin de l'entrefer devient faible, la répartition du courant est alors à peu près uniforme dans le conducteur.

Un moteur de classe D a un enroulement d'une grande résistance en raison de sa faible section, ce que lui confère au démarrage un fort couple ainsi qu'un faible courant. Par contre il a un glissement à pleine charge qui peut atteindre 15% et même 20%

Les conducteurs du rotor d'un moteur de classe F sont placés loin de l'entrefer. Au démarrage, la réactance est grande le courant faible, mais le circuit est très inductif et le couple développé est faible.

Chaque classe de moteur est caractérisée par un type d'encoche bien spécifique voir figure I.15

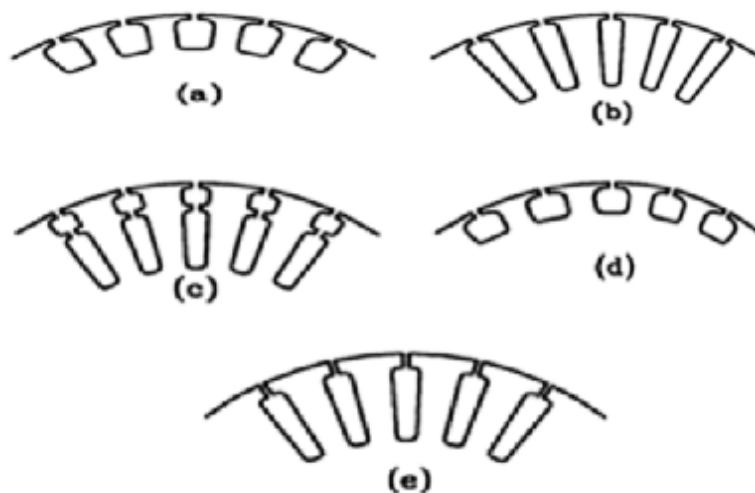


Figure I.15 Formes d'encoche a, b, c, d et e correspondants aux différentes classes A, B, C, D et F respectivement

I.8 Démarrage des moteurs asynchrones

I.8.1 Les types de démarrage

Lors d'un démarrage d'une machine asynchrone, le courant d'enclenchement peut atteindre plusieurs fois le courant nominal de la machine. Si l'application utilise un variateur ou un démarreur, c'est ce dernier qui se chargera d'adapter les tensions appliquées à la machine 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 de l'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. Les caractéristiques de couple de démarrage et du courant absorbée en fonction de la vitesse de la machine respectivement, sont représentées ci-dessous sur les figures I.16et I.17.

Ces différents dispositifs permettent de réduire la tension aux bornes des enroulements du stator pendant la durée de démarrage du moteur, ce qui est un moyen de limiter l'intensité du courant de démarrage. L'inconvénient est que le couple moteur est également diminué et que cela augmente la durée avant laquelle la machine atteint le régime permanent. Pour remédier à ce problème des solutions techniques, ont été trouvées dont on site les suivantes.

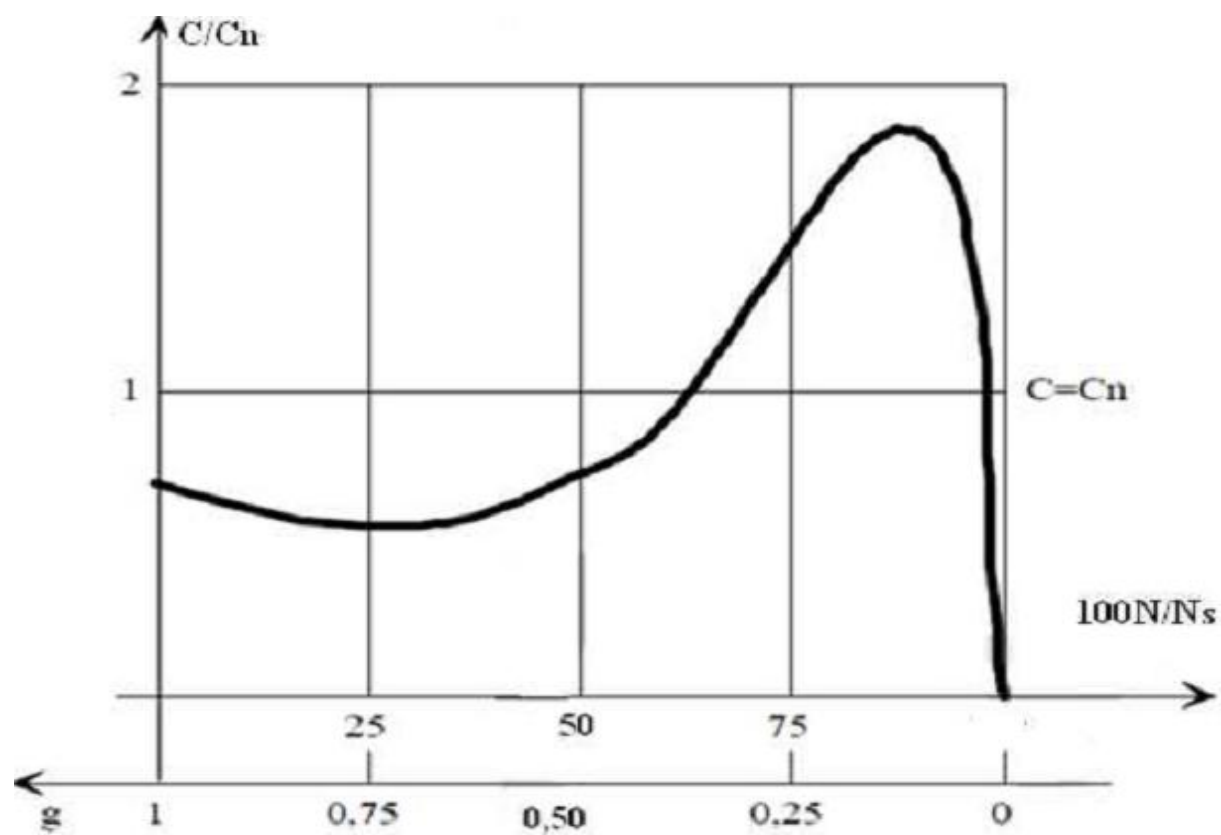


Figure I.16 Caractéristique de couple de démarrage en fonction de la vitesse
avec N étant la vitesse de rotation du moteur

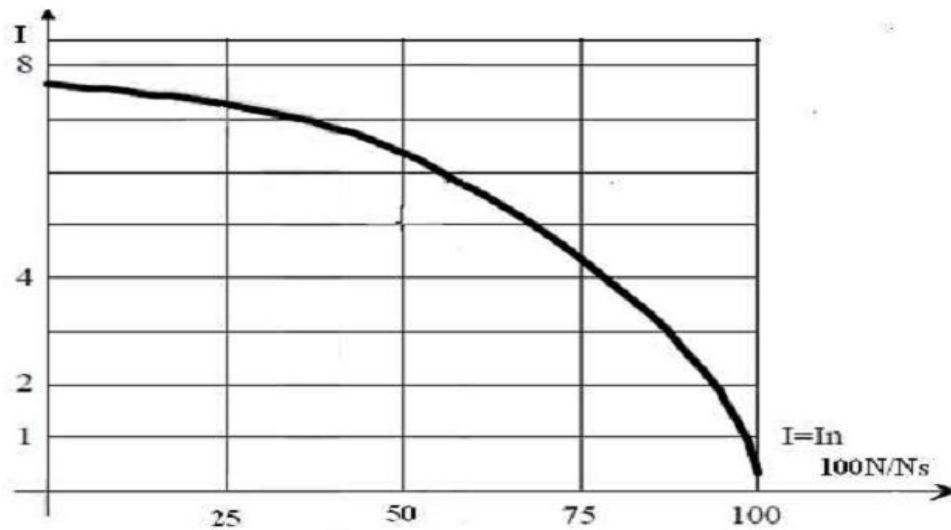
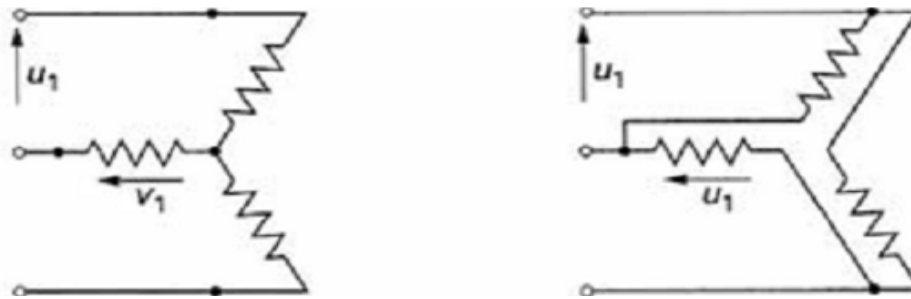


Figure I.17 Caractéristique du courant de démarrage en fonction de la vitesse

- **Démarrage étoile-triangle**

Lors d'un démarrage étoile-triangle, la machine est d'abord connectée au réseau avec un couplage étoile, puis une fois démarrée, on passe sur couplage triangle. Le fait de démarrer avec un couplage étoile permet de diviser par la racine carrée de trois la tension appliquée. Ainsi, le courant maximal absorbé est trois fois plus faible que lors d'un démarrage directement avec un couplage triangle. Le couple de démarrage est lui aussi 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 à l'aide de contacteurs, cette méthode de démarrage est très économique. (Figure I.18)



a) Branchement en démarrage étoile

b) branchement en démarrage triangle

Figure I.18 Démarrage étoile triangle

- **Insertion de résistances ou inductances statoriques**

Lors d'un démarrage résistif, on insère des résistances de types métallique ou électrolytique à variation continue 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 de rhéostats de démarrage.

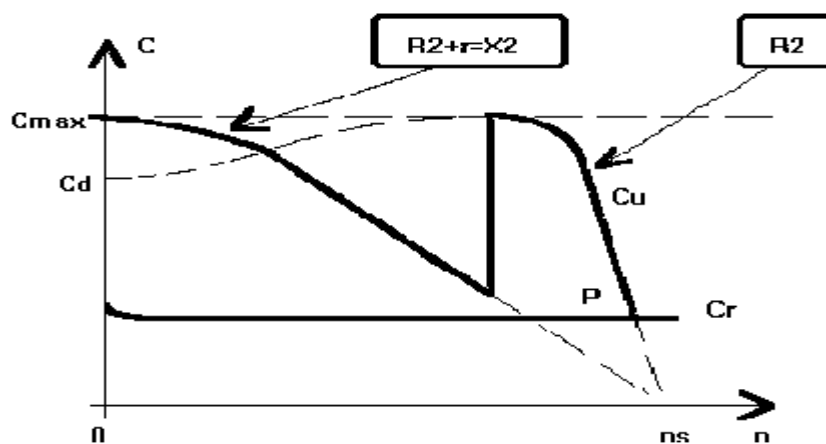
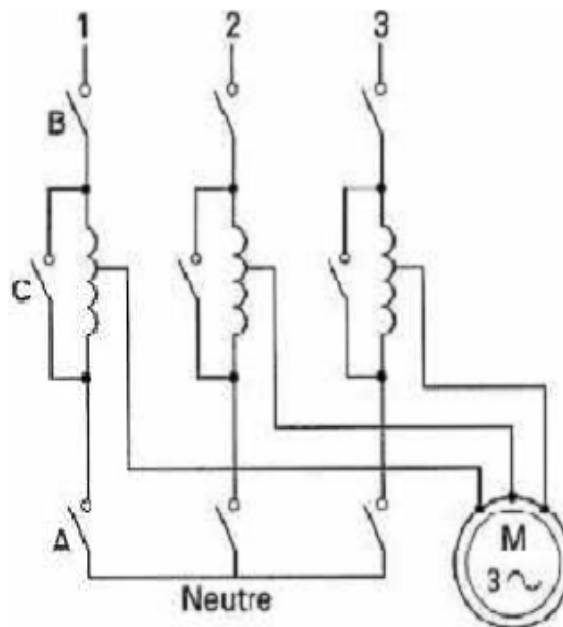


Figure I.19 Caractéristique de démarrage avec insertion de résistances statorique

- **Démarrage par un autotransformateur à une ou plusieurs prises**

Dans ce mode de démarrage, le stator de la machine asynchrone est relié à un autotransformateur qui permet d'effectuer un démarrage sous tension variable. La tension est progressivement augmentée, l'intensité du courant ne dépassant pas la valeur maximale désirée. (Figure I.20)



Première étape : A et B fermes, C ouvert

Deuxième étape : A ouvert

Troisième étape : C fermé

Figure I.20 Démarrage par autotransformateur

- **Démarrage par gradateur de tension**

Il offre les mêmes performances que la solution précédente pour un coût et encombrement moindre, le couple résistant de la charge doit permettre un démarrage, il sera donc nécessairement quadratique ($C_r = k\Omega^2$ ventilation pompage). Voir Figure I.21

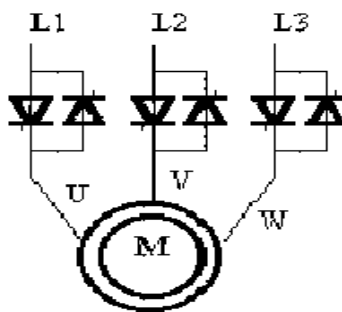


Figure I.22 Démarrage par gradateur de tension

- **Utilisation d'un onduleur de tension**

Quoi que le plus souvent utilisé pour faire de la variation de vitesse, l'onduleur de tension peut permettre de faire un démarrage souple avec limitation du courant dans les situations où aucune baisse de couple n'est possible. Pour les moteurs à rotor bobiné, on a la possibilité d'insérer, lors d'un démarrage des résistances dans le circuit rotorique. Cette solution permet à la fois de diminuer le courant de démarrage et d'augmenter le couple moteur. Les résistances sont de type métallique ou électrolytique à variation continue. Dans ce cas des solutions électriques (gradateur rotorique) sont disponibles. Voir Figure I.23

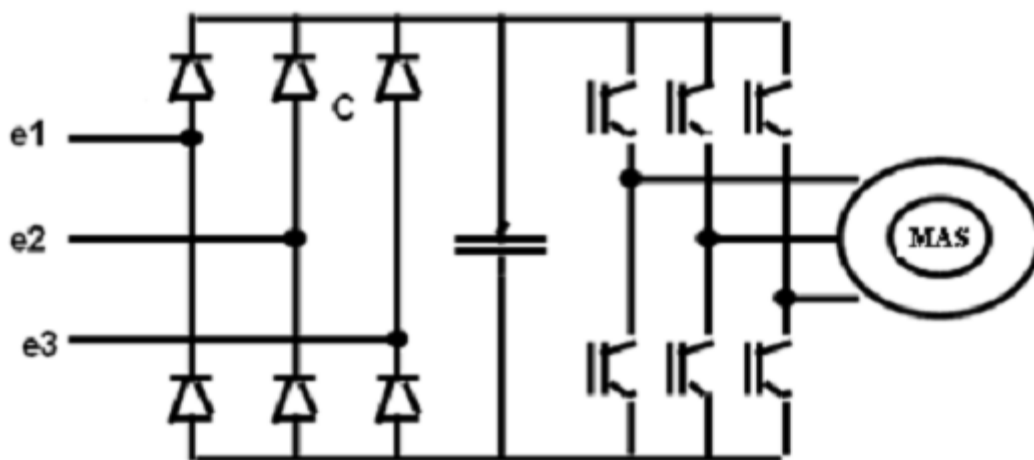


Figure I.23 Démarrage par onduleur de tension

I.9 Freinage des moteurs asynchrones

I.9.1 Les types de freinage

- **Freinage par contre courant**

Ce mode de freinage est obtenu par inversion des deux phases. Au moment de l'inversion le glissement vaut presque 2, il se réduit ensuite rapidement sous l'effet de 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 générale supérieure au couple de démarrage pour des moteurs asynchrones à cage. La variation du couple de freinage dépend fortement de la conception de la cage rotorique. Ce mode de freinage implique un courant absorbé important, approximativement constant et légèrement supérieure au courant de démarrage.

- **Freinage par injection du courant continu**

Dans ce mode de freinage, le moteur asynchrone est couplé au réseau et le freinage est obtenu par la coupure de la tension alternative et application

d'une tension contenue au stator. Quatre couplages des enroulements sur la tension continue peuvent être réalisés et représentés sur la (Figure I .24)

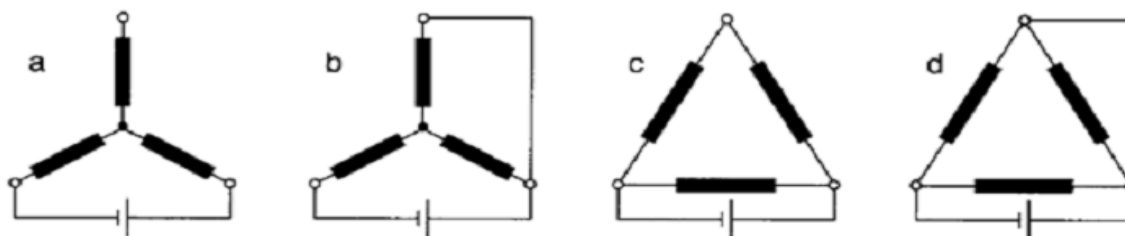


Figure I.24 couplage des enroulements du moteur sur la tension continue

- **Freinage en génératrice asynchrone**

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

- **Freinage mécanique**

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

I.10 Alimentation des moteurs asynchrone

On peut alimenter un moteur asynchrone à partir d'un alternateur à vitesse variable ou grâce à une tension secondaire d'une machine à induction ou d'une commutatrice, ces procédés n'ont comme avantage que leur robustesse et leur fiabilité, leur encombrement et leurs prix limitent leur utilisation.

A l'heure actuelle, la plus part des machines asynchrones sont alimentées à partir des convertisseurs de fréquence avec lesquels les tensions d'alimentation sont réglés grâce au pend redresseur commandés. Parmi les moyens de commande on trouve la commande à Modulation de Largeur d'Impulsion, qui facilite le filtrage des harmoniques indésirables, en les repoussant vers des fréquences plus élevées.

I.10.1 Différents types de la commande en MLI

- **Modulation calculée**

Pour ce type de modulation les angles de commutations sont calculés au préalable puis mémorisés sous forme de table dans la mémoire d'un microordinateur

- **Modulation vectorielle**

Les angles de commutation sont calculés de façon à suivre aux mieux le vecteur de tension qu'on veut produire

- **Modulation en delta**

Pour laquelle on utilise une bascule à hystérésis commandée par la différence entre une onde de fréquence et l'intégrale de sortie d'un onduleur

- **Modulation sinus triangle :**

L'intersection de deux ondes, l'un dite de référence u et l'autre de modulation v , détermine les instants de l'ouverture et de la fermeture des semis conducteurs.

I.10.2 Stratégie de la commande :

L'onduleur de tension (onduleur en pond à modulation sinus triangle) délivre à sa sortie une onde rectangulaire riche en harmoniques, cette inconvénient disparaît si la tension se fait par un découpage approprié qui neutralise les harmoniques de rang inférieur, ce procédé qui peut être réalisé par une commande à MLI qui permet à partir de la tension u d'entrée d'obtenir en

sortie une tension u_1 égale à $+u$ ou à $-u$. on forme l'alternance positive avec des créneaux d'amplitude $+u$ et l'alternance négative avec des créneau de même amplitude mais de signe opposé.

Dans ce cas l'enroulement d'un moteur asynchrone est alimenté par une série d'impulsion de forme sensiblement rectangulaire avec une variation très rapide de la tension dans le temps (du/dt) ce qui provoque la création d'un processus ondulatoire dans l'enroulement. Ce processus est un phénomène physique compliqué d'apparition, de propagation et de variation rapide de l'impulsion électromagnétique à travers un circuit réparti (dans le cas considéré c'est l'enroulement et le système magnétique d'une machine électrique)

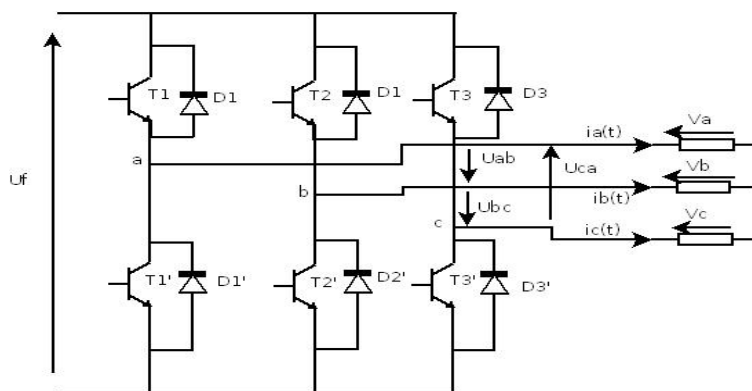


Figure 25 : Onduleur de tension triphasé

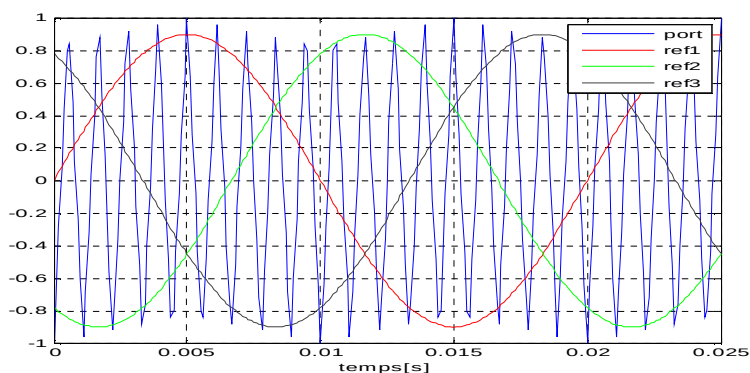


Figure 26 : onde à MLI

I.11 Réglage de vitesse des moteurs asynchrones

Les moteurs asynchrones vus leurs robustesse, leurs facilité de construction et leurs prix moins onéreux et si on arrive à résoudre le problème de réglage et de régulation de leurs vitesse peuvent remplacer les moteurs à courant continu, cette vitesse peut être modifié, par action sur :

- Le nombre de pair de pôles
- Le glissement de la machine
- La fréquence d'alimentation

I.12 Réglage de vitesse des moteurs à cage

Les moteurs à cage dont la vitesse de rotation est presque constante ne se prêtent pas bien à un réglage de vitesse, le seul moyen efficace de faire varier leur vitesse de rotation de façon appréciable, est de modifier la fréquence d'alimentation.

Une diminution de la fréquence entraîne une diminution de la vitesse, pour éviter la saturation du noyau il faut aussi modifier la tension suivant le même rapport que la fréquence, mais si la fréquence est supérieur à la fréquence nominale, il est déconseillé d'augmenter la tension : les pertes dans l'acier seront trop importantes et il y'aurait aussi un risque de soumettre les isolations à des contraintes excessives qui pourrait entrainer la destruction du moteur. On limitera donc la tension à la tension nominale du moteur.

De la même façon on ne doit jamais faire circuler dans les enroulements du moteur des courants supérieurs au courant nominal. La caractéristique du couple en fonction de la vitesse Pour un moteur alimenté à diverses fréquences est représentée dans la figure I.27.

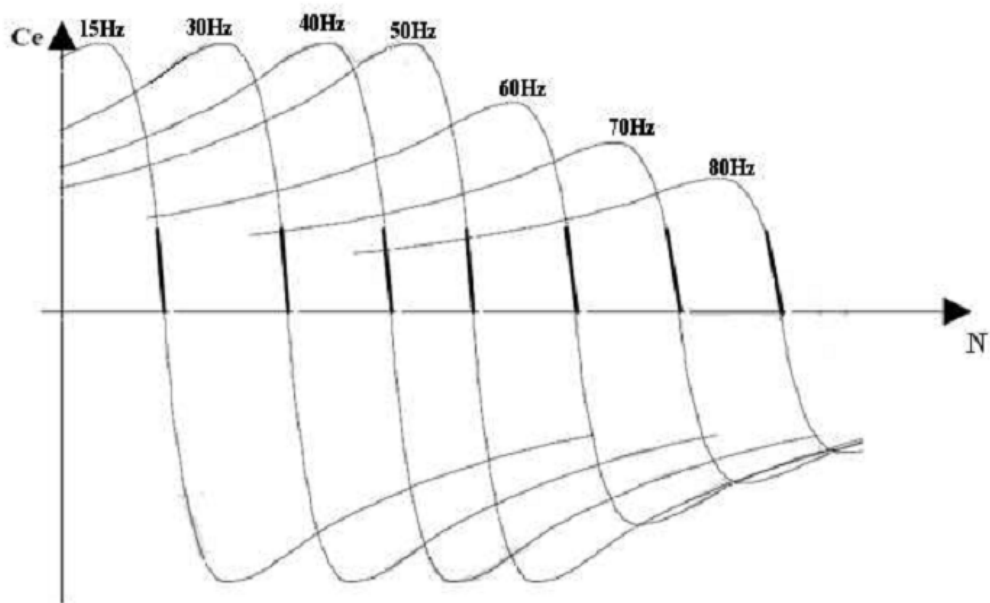


Figure I.27 caractéristique du couple en fonction de la vitesse
Pour un moteur alimenté à diverses fréquences

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous déterminons toutes les dimensions géométriques du stator et du rotor ainsi que l'épaisseur de l'entrefer. Tout en respectant les critères technico-économique exigés, voir figure II.1 et II.2.

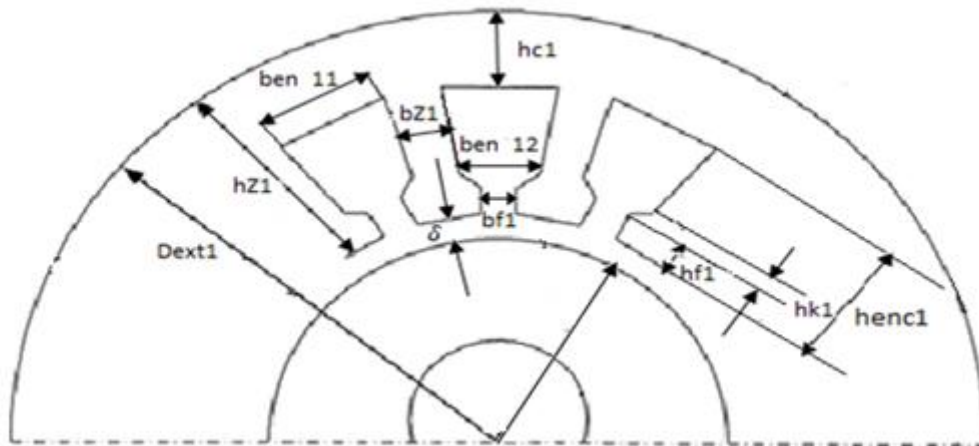


Figure II.1 Schéma d'une tôle statorique

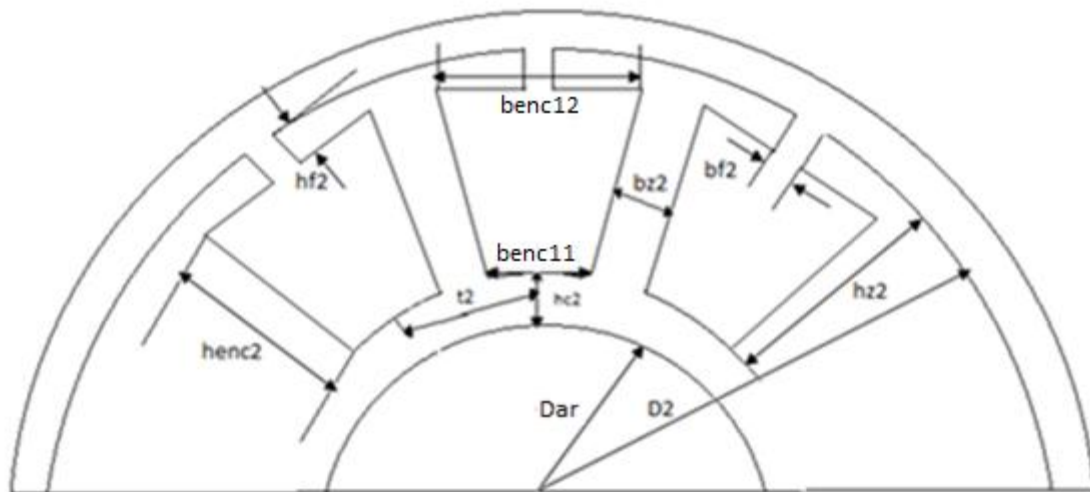


Figure II.2 Schéma d'une tôle rotorique

II.2 Calcul et choix des dimensions principales du stator

a) Choix du diamètre extérieur

Le diamètre extérieur du stator des machines asynchrones pour différentes hauteurs d'axes est donné suivant le tableau II-1

Dext [mm]	h [mm]	Puissance nominale en [KW] en fonction de 2p		
		2p=2	2p=4	2p=6
81	50	0.09 0.12	0.06 0.09	—
89	65	0.18 0.25	0.12 0.18	—
100	63	0.37 0.55	0.25 0.37	0.18 0.25
116	71	0.75 1.1	0.55 0.75	0.37 0.55
131	80	1.5 2.2	1.1 1.5	0.75 1.1
149	90	3.0	2.2	1.5
168	100	4.0 5.5	3.0 4.0	— 2.2
191	112	7.5	5.5	3.0 4.0
225	132	1.1	7.5 11	5.5 7.5
272	160	15	15	11

		18.5	18.5	15
313	180	22 30	22 30	— 18.5
349	200	37 45	37 45	22 30
392	225	55	55	37
437	250	75 90	75 90	45 55
520	280	110 132	110 132	75 90
520	315	160 200	160 200	110 132
590	355	250 315	250 315	160 200

Tableau II. 1 Le diamètre extérieur du stator des machines asynchrones en fonction de la hauteur d'axe.

b) Choix du diamètre intérieur

Le diamètre intérieur du stator déduit de la relation suivante :

$$D_1 = K_D \cdot D_{ext1} - 5 \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.1})$$

Et le coefficient K_D est donné en fonction du nombre de pôles $2p$ comme indiqué sur le tableau II-2.

2p	2	4	6
K_D	[0,52 0,6]	[0,62 0,68]	[0,7 0,72]

Tableau II.2 K_D en fonction du nombre de pôles

c) Puissance électromagnétique

C'est la puissance transmise du stator vers le rotor à travers l'entrefer lors du fonctionnement du moteur. Elle est définie comme suit :

$$P_e = k_e \cdot \frac{P_n \cdot 10^2}{\eta_n \cdot \cos \varphi_n} \quad [\text{W}] \quad (\text{II.2})$$

Avec:

P_n - la puissance nominale de la machine en [W].

$\cos \varphi_n$ - facteur de puissance nominale 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

$$K_e = 0,987 - 5 \cdot p \cdot 10^{-3} \quad (P \text{ nombre de paires de pôles})$$

d) coefficient d'enroulement statorique

Il est défini comme étant le produit de coefficient de distribution par le coefficient de raccourcissement.

$$K_{enr1} = K_{d1} \cdot K_{r1} \quad (\text{II. 3})$$

Avec :

K_{d1} - le coefficient de distribution, il est calculé comme suit :

$$K_{d1} = \frac{\sin(\alpha / 2)}{q_1 \cdot \sin(\alpha / 2 \cdot q_1)} \quad (\text{II.4})$$

K_{R1} - coefficient de raccourcissement il est donné par la formule suivante :

$$K_{R1} = \sin\left(\frac{\beta \pi}{2}\right) \quad (\text{II.5})$$

$\beta = Y/\tau$: rapport de raccourcissement

e) longueur virtuelle de l'induit

La longueur virtuelle de l'induit est la longueur de l'induit présentant la même reluctance d'induit réelle.

$$L_i = \frac{8,2 \cdot 10^7 \cdot P_e}{K_{enr11} \cdot A_1 \cdot B_{\delta 1} \cdot D_1^2 \cdot n} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.6})$$

d) Facteur de géométrie de la machine

Le facteur λ décrit la géométrie de la machine d'une manière générale.

Si λ est petit la machine aura un bon refroidissement et le montage des enroulements plus facile mais aura un grand diamètre donc un grand flux par rapport à la longueur, et cela conduit à une consommation très élevée de cuivre. Lorsqu'il est élevé le moment d'inertie de la machine est plus petit et la quantité du cuivre pour les parties frontales est plus faible. λ doit être dans l'intervalle $[0.5 \ 0.8]$.

(II.7)

- Le pas polaire en nombre d'encoche

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

- Le pas polaire en mm

C'est la distance entre deux pôles voisins de nom différents, il est donné par l'expression suivante :

$$\tau_{p1} = \frac{\pi \cdot D_1}{2 \cdot p} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.9})$$

- Pas dentaire

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

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D_1}{Z_1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.10})$$

Avec :

D_1 - Diamètre intérieure du stator

Z_1 - Nombre d'encoches statoriques

f) Le courant nominal :

Il est donné par l'expression suivante :

$$I_{n1} = \frac{P_n \cdot 10^3}{m_1 \cdot U_{n1} \cdot \eta_n \cdot \cos \varphi_n} \quad [\text{A}] \quad (\text{II.11})$$

Avec :

P_n - puissance nominale, en [KW]

U_{n1} -la tension simple nominale, en [V]

η_n - Le rendement nominale

$\cos \varphi_n$ - Facteur de puissance nominale

g) le flux utile

$$\phi = \frac{B_{\delta 1} \cdot D_1 \cdot L_i \cdot 10^{-6}}{p} \quad [\text{Weber}] \quad (\text{II.12})$$

h) Nombre de conducteurs effectifs

Il est défini comme étant le nombre de conducteurs occupants une encoche. Il est donné sous la formule suivante :

$$N_{\text{eff}} = \frac{a_1 \cdot t_1 \cdot A_1 \cdot 10^{-3}}{I_{n1}} \quad (\text{II.13})$$

Avec :

A_1 - La charge linéaire, en [A/m]

a_1 - nombre de voix parallèles

i) Nombre de spires par phase

C'est le nombre de spires que contient une phase statorique. Il est donné par :

$$W_1 = \frac{N_{\text{eff}} \cdot p \cdot q_1}{a_1} \quad (\text{II.14})$$

- Angle électrique

$$\gamma = \frac{p \cdot 360}{Z_1} \quad (\text{II.15})$$

- Nombre d'encoche par pôle et par phase

$$q_1 = \frac{Z_1}{2 \cdot p \cdot m_1} \quad (\text{II.16})$$

- le pas d'enroulement

$$y_1 = \frac{Z_1}{2 \cdot p} - \varepsilon \quad (\text{II.17})$$

ε – Raccourcissement

j) Charge linéaire :

Elle représente le courant total de la partie d'encoche par unité de longueur du périmètre de l'induit, elle caractérise l'utilisation électrique de la machine, elle est donnée en fonction du diamètre extérieur pour différentes paires de pôle. Elle s'exprime comme suit :

$$A_1 = \frac{m_1 \cdot 2 \cdot I_{n1} \cdot W_1}{\pi \cdot D_1} \quad [\text{A/m}] \quad (\text{II.18})$$

Avec :

m_1 - nombre de phase statorique.

I_{n1} - courant nominal dans une phase statorique donné en, [A]

k) L'induction magnétique dans l'entrefer

L'induction magnétique dans l'entrefer, est une grandeur importante dans la détermination des dimensions de la machine. Car c'est elle qui détermine la f.e.m et le couple d'où la puissance de la machine, ce que nous amène à choisir une valeur de l'induction aussi élevée que possible, mais la saturation du fer limite notre choix, pour cela nous devons toujours veiller à ce que la valeur de l'induction soit comprise entre 0,6 et 0,9. Elle s'écrit comme suit :

$$B_{\delta} = \frac{6,1.10^{12}.P_e}{K_f.K_{enr1}.\alpha_i.n.A_1.L_i.D^2_1} \quad [T] \quad (II.19)$$

Avec :

A_1 - la charge linéaire en [A/m]

P_e - la puissance électromagnétique en [KW]

α_i - coefficient de recouvrement polaire.

l) Section effective d'un conducteur

Elle donnée sous la formule suivante :

$$S_{eff1} = \frac{I_{n1}}{a_1.J_1} \quad [mm^2] \quad (II.20)$$

Avec :

J_1 - densité de courant dans l'enroulement statorique, il est donné en fonction du diamètre extérieure.

Si la section effective calculée est supérieure à 1.8 mm² on doit diviser celle-ci en sections élémentaires et comme la section des conducteurs étant normalisée on choisira la section standard la plus proche de celle calculée

$$S_{elt1} = \frac{S_{eff1}}{N_{elt1}} \quad [mm^2] \quad (II.21)$$

Où

N_{elt1} - Est entier définit comme étant un nombre des conducteurs élémentaires

Toutes ces opérations se font automatiquement par le programme informatique, les sections standards sont données dans le tableau II.2

$S_{eff1} [mm^2]$	$D_{nu} [mm]$	$d_{iso1} [mm]$
0.221	0.53	0.585
0.246	0.56	0.615
0.283	0.60	0.655
0.312	0.63	0.690
0.335	0.67	0.730
0.396	0.71	0.770
0.442	0.750	0.815
0.503	0.800	0.865
0.567	0.850	0.915
0.636	0.900	0.965
0.709	0.950	1.015
0.785	1.000	1.080
0.883	1.060	1.140
0.895	1.120	1.200
1.094	1.180	1.260
1.227	1.250	1.330

1.368	1.320	1.405
1.539	1.400	1.485
1.767	1.500	1.585

Tableau II.2 Les sections standards

II.3) Dimensionnement de la feuille statorique

La feuille statorique est dimensionnée comme suit :

a) Largeur de la dent

La largeur de la dent est calculée à partir de la conservation du flux à travers le pas dentaire elle est donnée comme suit

$$b_{Z1} = \frac{t_1 \cdot B_8}{K_{fer} \cdot B_{Z1}} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.22})$$

b) Hauteur du dos statorique

Elle est donnée par la formule suivante

$$h_{c1} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2 \cdot L_i \cdot K_{fer} \cdot B_{C1}} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.23})$$

Avec :

B_{C1} : L'induction magnétique dans le dos du stator en [T], donné par le tableau suivant :

Avec :

K_{fer} - le coefficient de remplissage de paquet des tôles statoriques et rotoriques

$K_{fer} = 0,95$ pour l'isolation avec oxydation

$K_{fer} = 0,97$ pour l'isolation en vernis

B_{Z1} : induction maximale dans la dent statorique en [Tesla], il est donné dans le tableau II.3

2p	B _{Z1} (Tesla)	B _{C1} (Tesla)	h (mm)	2p	Types d'encoche	B _{Z2} (Tesla)	B _{C2} (Tesla)
2	1.75-1.95	1.50-1.65	50-132	2	a	1.75-1.95	1.35-1.45
4	1.75-1.95	1.50-1.65		4	a	1.75-1.95	1.15-1.25
6	1.75-1.95	1.45-1.60		6	a	1.75-1.95	1.05-1.15
2	1.75-2.00	1.45-1.70	160-225	2	a	1.75-1.95	1.35-1.45
4	1.75-2.00	1.45-1.70		4	b	1.55-1.80	1.20-1.35
6	1.75-1.85	1.35-1.50		6	b	1.65-1.90	1.05-1.15
2	1.70-1.90	1.45-1.65	250	2	d	1.70-1.95	1.35-1.45
4	1.70-1.90	1.45-1.65		4	a	1.65-1.90	1.15-1.25
6	1.70-1.90	1.45-1.65		6	a	1.65-1.90	1.05-1.15
2	1.70-1.90	1.40-1.60	280-355	2	b	1.60-1.85	1.35-1.45
4	1.60-1.80	1.30-1.45		4	b	1.80-2.00	1.15-1.25
6	1.60-1.80	1.15-1.30		6	b	1.65-1.90	1.05-1.15

Figure II.3 induction maximale dans la dent et la culasse statorique en fonction du nombre de pôle, hauteur d'axe et du type d'encoche.

c) Hauteur de la dent

Elle est donnée par la formule suivante

$$h_{z1} = 0,5. (D_{\text{ext}1} - D_1) - h_{c1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.24})$$

d) La largeur minimale de l'encoche

Elle est donnée par la formule suivante

$$b_{en11} = \frac{\pi.(D_1+0,2.h_{z1})}{Z_1} - b_{z1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.25})$$

e) La largeur maximale de l'encoche

Elle est donnée par la formule suivante

$$b_{en12} = \frac{\pi.(D_1+2h_{z1})}{Z_1} - b_{z1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.26})$$

f) Hauteur de l'encoche

Elle est donnée comme s

$$h_{enc1} = h_{z1} - (h_{k1} + h_{f1}) \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.27})$$

Avec:

h_{f1} -la hauteur de la fonte de l'encoche statorique, elle varie entre $(1,2 \div 1,18)$ en [mm]

h_{k1} : La largeur de la clavette, elle est donnée sous la formule suivante

$$h_{k1} = 0,5. (d_{enc1} - b_{f1}) \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.28})$$

b_{f1} : La largeur de la fente de l'encoche statorique, $b_{f1} \leq 4$

g) Section de l'encoche

C'est la section occupée par les conducteurs logés dans les encoches statoriques .Pour une encoche trapézoïdale, elle est donnée avec la formule suivante :

$$S_{enc1} = 0,5. (b_{en11} + b_{en12}). (h_{enc11} - h_{f1}) - \frac{b_{en12}-b_{f1}}{2} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{II.29})$$

h) La section occupée par l'isolation

La section occupée par l'isolation est calculée comme suit

$$S_{iso} = b_{is} \cdot (b_{en11} + b_{en12} + 2 \cdot h_{enc1}) + 0,75 \cdot b_{en12} + 0,5 \cdot b_{en11} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (\text{II.30})$$

i) La section de l'encoche occupée par l'enroulement

$$S_{eel} = S_{enc1} - S_{is} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{II.31})$$

- Coefficient de remplissage

C'est le rapport entre la section des conducteurs occupant l'encoche et la section utile de l'encoche, il est donné par :

$$K_{rem} = \frac{N_{eff} \cdot N_{elt1} \cdot (d_{iso1})^2}{S_{eel}} \quad (\text{II.32})$$

Avec :

d_{iso1} -diamètre du conducteur avec isolation en [mm], donné par le tableau précédent.

Le coefficient de remplissage doit appartenir à l'intervalle [0.7 0.75]

k) Vérification des charges électromagnétique

Après avoir définitivement choisi les valeurs de N_{eff} et la section normalisée, on passera à la vérification de la charge linéaire A_1 , l'induction B_8 et la densité du courant J_1 .

Les différences relatives entre les valeurs vérifiées et les valeurs préliminaires ne doivent pas excéder les 10%.

l) Charge linéaire :

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

$$A_1 = \frac{N_{eff} \cdot I_{1n} \cdot Z_1}{\pi \cdot a_1 \cdot D_1 \cdot 10^{-3}} \quad [\text{A/m}] \quad (\text{II.33})$$

m) Induction magnétique dans l'entrefer :

Induction magnétique dans l'entrefer caractérise l'utilisation électrique.

$$B_{\delta} = \frac{\phi}{\alpha_1 \cdot \tau \cdot L_i \cdot 10^{-6}} \quad (\text{II.34})$$

n) Flux sous un pôle :

$$\phi = \frac{K_e \cdot U_n}{4 \cdot K_f \cdot W_1 \cdot K_{enr1}} \quad [\text{Weber}] \quad (\text{II.35})$$

II.4 Le choix de l'entrefer :

Pour des raisons mécaniques, on choisit l'entrefer aussi grand que possible, un entrefer aussi grand est également avantageux pour réduire les pertes supplémentaires dans le fer produites par les pulsations du champ, et de la dispersion provoquée par les champs harmoniques supérieurs. Comme il doit être aussi le plus petit possible afin d'avoir un facteur de puissance qui s'approche au maximum de l'unité, et un courant magnétique minimal. L'épaisseur de l'entrefer est liée à la puissance de la machine. Elle est donnée en fonction de la hauteur de l'axe et les nombres de paires de pôles.

II.5 Dimensionnement du rotor

Le rotor est à cage d'écureuil, celle-ci est constituée de barres logées dans des encoches trapézoïdales semi-ouvertes, court-circuitées à leurs extrémités.

La cage d'écureuil peut être présentée comme un enroulement polyphasé dont le nombre de paires de pôles est égale au nombre de paires de pôles du champ tournant.

b) Choix du nombre d'encoches rotoriques

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

$$(Z_1 - Z_2 \neq \pm 2P) \text{ et } (Z_1 - Z_2 \neq \pm 1 + 2P)$$

Le tableau suivant représente le nombre d'encoches statorique en fonction du nombre d'encoches rotorique :

P	Z1	Z2
2	24	18, 20, 22, 28, 30, 33,
	36	34
	48	25, 27, 28, 29, 30, 43
		30, 37, 39, 40, 41
4	24	16, 18, 20, 30, 33, 34,
	36	35, 36
	48	28, 30, 32, 34, 45, 48
	72	36, 40, 44, 57, 59
6		42, 48, 54, 56, 60, 61,
		62, 68, 76
	36	20, 22, 28, 44, 47, 49
	54	34, 36, 38, 40, 44, 46
8	72	44, 46, 50, 60, 61, 62,
		82, 83
8	48	26, 30, 34, 35, 36, 38,

	72	58 42, 46, 48, 50, 52, 56, 60
12	72 90	69, 75, 80 86, 87, 93, 94

Tableau II.4 Nombre d'encoche statorique en fonction de nombre d'encoche rotorique

b) Diamètre extérieur du rotor

Il est donné par la formule suivante :

$$D_2 = D_1 - 2 \cdot \delta_e \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.36})$$

Avec :

δ_e -est l'épaisseur de l'entrefer, en [mm]

- Pas dentaire rotorique

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

$$t_2 = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.37})$$

Avec :

Z_2 -est le nombre d'encoches rotoriques.

- Pas polaire en nombre d'encoche

$$\tau_p = \frac{Z_2}{2 \cdot p} \quad (\text{II.38})$$

- Le pas polaire en mm

C'est la distance entre deux pôles voisins de nom différents, il est donné par l'expression suivante :

$$\tau_{p2} = \frac{\pi \cdot D_2}{2 \cdot p} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.39})$$

c) Courant dans la barre

$$I_2 = 1,11 \cdot \frac{6 \cdot I_{1n} \cdot W_1 \cdot K_{\text{enr}1} \cdot \cos \varphi_n}{m_2 \cdot W_2 \cdot K_{\text{enr}2}} \quad [\text{A}] \quad (\text{II.40})$$

Le rotor de notre machine est à cage d'écureuil, on considère cette cage comme un enroulement polyphasé à un nombre de phase m_2 égal au nombre d'encoche Z_2 . Donc $K_{\text{enr}2} = 1$, $W_2 = 1/2$. Dans ce cas on aura :

$$I_2 = 1,11 \cdot \frac{6 \cdot I_{1n} \cdot W_1 \cdot K_{\text{enr}2} \cdot \cos \varphi_n}{Z_2} \quad [\text{A}] \quad (\text{II.41})$$

II.6) Dimensionnement de la feuille rotorique

La feuille rotorique est dimensionnée comme suit :

a) Hauteur de la culasse rotorique

$$h_{c2} = 0,5 \cdot \frac{\alpha_i \cdot \tau_{p2} \cdot \beta_\delta}{K_{\text{fer}} \cdot B_{c2}} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.42})$$

Avec :

B_{c2} -l'induction dans la culasse rotorique.

b) Hauteur de la dent rotorique

$$h_{z2} = 0,5 \cdot (D_2 - D_{\text{int}2}) - h_{c2} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.43})$$

Avec :

$D_{\text{int}2}$ -diamètre intérieur du rotor :

$$D_{2\text{int}} = (0,3 \div 0,35) \cdot D_2 \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.44})$$

c) Largeur moyenne de la dent

$$b_{z2} = \frac{t_2 \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot B_{z2}} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.45})$$

d) largeur minimale de l'encoche rotorique

$$b_{enc11} = \frac{\pi \cdot (D_{int2} + 2 \cdot h_{c2})}{Z_2} - b_{z2} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.46})$$

e) largeur maximale de l'encoche rotorique

$$b_{enc11} = \frac{\pi \cdot (D_{int2} + 2 \cdot h_{z2})}{Z_2} - b_{z2} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.47})$$

f) Hauteur de l'encoche

$$h_{enc2} = h_{z2} - h_{f2} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.48})$$

g) La cage rotorique

Elle est constituée des barres logées dans les encoches rotorique, qui représentent les différentes phases. Ces barres sont court-circuitées à leurs extrémités par deux anneaux.

h) Section de la barre

$$S_{en2} = \frac{b_{enc11} + b_{enc12}}{2} \cdot h_{enc2} \quad (\text{II.50})$$

II.7) Dimensionnement de l'anneau de court-circuit

Le dimensionnement de l'anneau se fait comme suit :

a) Hauteur de l'anneau

Elle est donnée par l'expression suivante:

$$h_{an} = (1,1 \div 1,25) \cdot h_{z2} \quad (\text{II.51})$$

b) Section de l'anneau

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$S_{an} = (0,35 \div 0,45) \cdot \frac{Z_2 \cdot S_{enc2}}{2 \cdot p} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{II.52})$$

c) Largeur de l'anneau

Elle est donnée par l'expression :

$$L_{an} = \frac{S_{an}}{h_{an}} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.53})$$

d) Diamètre moyen intérieur de l'anneau

Elle est donnée par l'expression :

$$D_{an} = D_2 - h_{an} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.54})$$

III.1 Introduction

Le circuit magnétique des machines à courant alternatif, et les machines asynchrones en particulier, doit canaliser les lignes de forces du champ magnétique tournant, le but de ce calcul est de déterminer les forces magnétomotrices (fmm) qui nous permettra de calculer le courant magnétique nécessaire pour créer dans l'entrefer un flux d'une valeur bien déterminée pour le calcul de la réactance magnétique.

Le principe de calcul est basé sur la loi générale de la circulation du champ magnétique (la figure III.1).

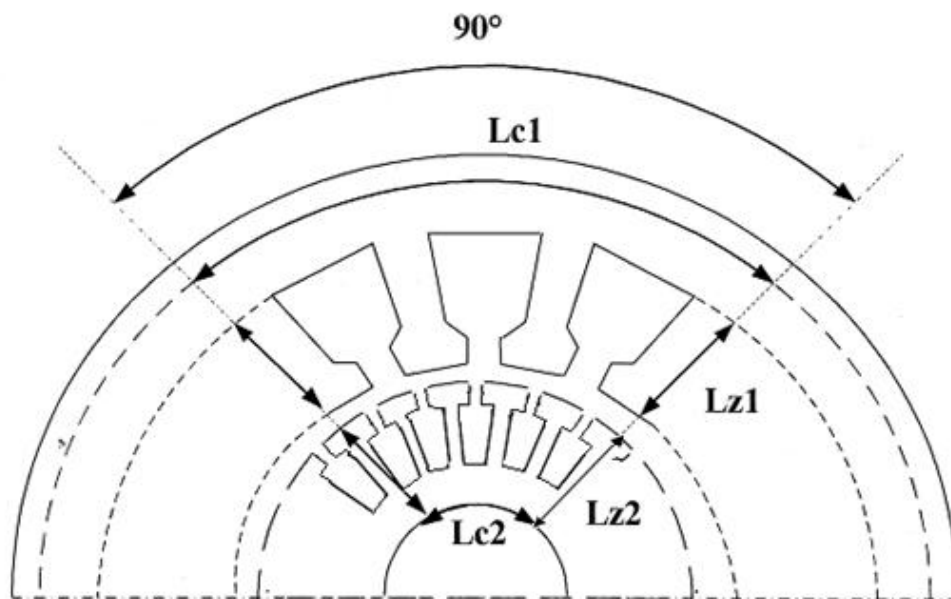


Figure III.1 Schéma du circuit magnétique

La force magnétomotrice est donnée par :

$$\oint H dl = \sum I = \sum F = (F_{\delta} + F_{Z1} + F_{Z2}) + F_{C1} + F_{C2}$$

$$= 2(F_{\delta} + F_{Z1} + F_{Z2}) + F_{C1} + F_{C2} \quad [A] \quad (III.1)$$

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

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

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

- ü Entrefer
- ü La culasse statorique
- ü La culasse rotorique
- ü Les dents statoriques
- ü Les dents rotoriques

III.2 Calcul du circuit magnétique

III.2.1 La force magnétomotrice dans l'entrefer :

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$F_{\delta} = 0,8 \cdot B_{\delta} \cdot K_{\delta} \cdot \delta \cdot 10^3 \quad [A] \quad (III.2)$$

Avec :

K_{δ} : coefficient de CARTER qui tient compte du non uniformité de l'entrefer, dû à l'ouverture des encoches statoriques et rotoriques il est donné par la relation suivante :

$$K_{\delta} = K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2}$$

$$k_{\delta 1} = 1 + \frac{b_{f1}}{t_1 - b_{f1} + (5 \cdot \delta \cdot t_1 / b_{f1})} \quad (III.3)$$

$$k_{\delta 2} = 1 + \frac{b_{f2}}{t_2 - b_{f2} + (5 \cdot \delta \cdot t_1 / b_{f2})} \quad (III.4)$$

b_{f1} : la largeur de la fente statorique, [mm]

b_{f2} : la largeur de la fente rotorique, [mm]

III.2.2 Circuit magnétique statorique

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

a) La force magnétomotrice dans la dent du stator

Elle est donnée par la formule suivante :

$$F_{Z1} = H_{Z1} \cdot h_{Z1} \cdot 10^{-3} \quad [A] \quad (III.5)$$

Avec :

H_{Z1} -l'intensité du champ magnétomotrice dans la dent qui correspond à B_{Z1} . Voir le tableau (III.1)

B(H)	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.4	124	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	324	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	495	504	514	524	533	563	574	585	585
1.4	586	595	610	622	634	646	658	670	683	696
1.5	706	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	1290	1330	1360	1400	1440	1480
1.8	1520	1570	1620	1670	1720	1770	1830	1890	1950	2010
1.9	2070	2160	2250	2320	2480	2520	2640	2760	2890	3020
2.0	3150	3320	3500	3500	3860	4040	4260	4480	4700	4920

2.1	5110	5440	5740	5740	6360	6670	7120	7570	8020	8470
2.2	8920	9430	9940	9940	10980	11500	12000	12600	13200	13800
2.3	14400	15100	15800	16500	17200	18000	18800	19600	20500	21400

Figure III.1 l'intensité du champ magnétomotrice dans la dent en fonction de B_{z1} .

b) Longueur moyenne des lignes du champ dans la culasse statorique

Elle est donnée par la formule suivante :

$$L_{c1} = \frac{\pi.(D_{ext1} - h_{c1})}{2.P} \quad [mm] \quad (III.6)$$

c) La force magnétomotrice dans la culasse du rotor

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$F_{C1} = L_{C1}.H_{C1}.10^{-3} \quad [A] \quad (III.7)$$

Avec :

H_{C1} -l'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 (III.2)

B(H)	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.4	52	53	54	55	56	57	58	59	60	62
0.5	64	65	66	67	69	71	72	74	76	79
0.6	80	81	83	85	87	89	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	349	359	365	373	382	391
1.4	400	410	420	430	440	450	464	478	492	506
1.5	520	542	564	586	608	630	654	678	702	726
1.6	750	788	826	864	902	946	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	8409	9000	9700

Figure III.2 l'intensité du champ magnétique dans la culasse statorique en fonction de B_{C1} .

III.2.3 Circuit magnétique rotorique

Le calcul du circuit magnétique se fait comme suit :

a) Calcul de la force magnétomotrice dans les dents du rotor

$$F_{Z2} = H_{Z2} \cdot h_{Z2} \cdot 10^{-3} \quad [A] \quad (III.8)$$

H_{Z2} : Intensité du champ correspondant à l'induction dans les dents B_{Z2} . Voir le tableau (III.1).

b) Longueur moyenne des lignes du champ dans la culasse du rotor

Elle est donnée par la relation suivante :

$$L_{C2} = \frac{\pi}{2.P} (D_2 - 2 \cdot h_{Z1} - h_{C2}) + h_{C2} \quad [mm] \quad (III.9)$$

c) La force magnétomotrice dans la culasse du rotor :

Elle est donnée par la relation suivante :

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

H_{C2} : Intensité du champ correspondant à l'induction dans la culasse B_{C2} . Voir le tableau (III.2).

III.2.4 La force magnétomotrice totale par pair de pôle

$$\sum F = 2(F_{\delta} + F_{Z1} + F_{Z2}) + F_{C1} + F_{C2} \quad [A] \quad (III.11)$$

III.2.5 Coefficient de saturation

a) Coefficient de saturation des dents

Il est donné par :

$$k_{\mu} = \frac{F_{\delta} + F_{Z1} + F_{Z2}}{F_{\delta}} \quad (III.12)$$

b) Coefficient de saturation de la machine

Il est donné par :

$$k_{\mu} = \frac{\sum F}{2 \cdot F_{\delta}} \quad (III.13)$$

III.2.6 Courant magnétisant

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

$$I_{\mu} = \frac{P \cdot \sum F_i}{0,9 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot K_{en1}} \quad [A] \quad (III.14)$$

Pour avoir de bonnes performances il faut assurer un courant magnétisant ne dépassant pas 10% de courant nominal

III.2.7 Réactance de magnétisation

Elle est exprimée par :

$$X_m = \frac{k_e \cdot V_1}{I_m} \quad [\Omega] \quad (III.15)$$

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

a) Coefficient de dispersion magnétique du stator

Il est donné par :

$$\sigma_1 = \frac{X_1}{X_m} \quad (\text{III.16})$$

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

b) Force électromotrice à vide E_0

Elle est donnée par :

$$E_0 = \frac{U_{n1}}{1+\sigma_1} \quad (\text{III.17})$$

III.3 Calcul des paramètres de circuit équivalent :

III.3.1 Paramètres statoriques :

On calcul les paramètres statoriques comme suit :

a) **Resistance active d'une phase du stator :**

La résistance par phase est calculée par la formule suivante :

$$R_1 = \rho_{cu}(T) \frac{W_1 \cdot L_{w1} \cdot 10^3}{a_1 \cdot N_{el} \cdot S_{eff1}} \quad [\Omega] \quad (\text{III.18})$$

Avec :

$\rho_{cu}(T)$: résistivité de cuivre à la température (T)

$\rho_{cu}(75) = 21,3 \cdot 10^{-9} \quad [\Omega.m]$.

$\rho_{cu}(115) = 24,4 \cdot 10^{-9} \quad [\Omega.m]$.

$\rho_{cu}(20) = 17,2 \cdot 10^{-9} \quad [\Omega.m]$.

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

$$L_{w1} = 2 \cdot (L_i + L_{f1}) \quad [mm] \quad (\text{III.19})$$

L_i : la longueur virtuelle de l'induit.

L_{f1} : la longueur moyenne de la partie frontale d'une demi-spire : telle que

$$L_{f1} = (1,16 + 0,14.P) \cdot b_{1\text{moy}} + 15 \quad [\text{mm}] \quad (\text{III.20})$$

$b_{1\text{moy}}$: la longueur moyenne d'une section

$$b_{1\text{moy}} = \frac{\pi \cdot (D_1 + h_{Z1}) \cdot y_{1\text{moy}}}{Z_1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III.21})$$

$y_{1\text{moy}}$: pas moyen d'un groupe de section.

b) Réactances de fuite et Perméances de fuites du stator

- **La Perméance d'encoche**

Elle est donnée par

$$\lambda_{\text{enc1}} = \frac{h_{Z1}}{3 \cdot b_{\text{en12}}} \cdot k_{\beta 2} + \left(\frac{3 \cdot h_{k1}}{b_{\text{en12}} + 2 \cdot b_{f1}} + \frac{h_{f1}}{b_{f1}} + \frac{h_{k1}}{b_{\text{en12}}} \right) \cdot k_{\beta 11} \quad (\text{III.22})$$

$K_{\beta 1} = K_{\beta 11} = 1$, pour un enroulement concentrique.

- La réactance de fuite d'encoche :

Elle est due au flux de fuite qui se referment autour de conducteurs, elle est donnée par :

$$X_{\text{enc1}} = \frac{1,58 \cdot L_i \cdot f \cdot W_1^2}{p \cdot q_1 \cdot 10^{+8}} \cdot \lambda_{\text{enc1}} \quad \text{enc1} \quad [\Omega]$$

(III.23)

- Perméance de fuite différentielle

Elle présente la différence existante entre le champ réel contenue tout les harmoniques d'espace, et le champ dû à l'harmonique fondamental. Elle est donnée par l'expression suivante :

$$\lambda_{1d} = \frac{0,9.(t_1.k_{enr1})^2.k_{rr1}.k_{f1}.k_{de1}}{k_\delta.\delta_e} \quad (\text{III.24})$$

Avec:

$$K_{f1} = 1 - [0,033b_{f1}^2/\delta.t_1]$$

K_{de1} : Coefficient dépendent de q_1 donné par le tableau III-3

K_{rr1} : Coefficient de fuite différentielle, il s'exprime en fonction du rapport Z_2/P donnée par le tableau III-4

q_1	1.5	2	2.5	3	4	5	6	8
K_{de1}	–	0.0285	–	0.0141	0.0089	0.0065	0.0052	–

Tableau III.3 : le coefficient K_{de1} en fonction de q_1

q_1	Z_2/p						
	10	15	20	25	30	35	40
2	0,99/0,94	0,94/0,87	–	–	–	–	–
3	0,98/0,92	0,93/0,87	0,88/0,84	0,85/0,78	–	–	–
4	–	0,90/0,81	0,84/0,77	0,80/0,75	0,77/0,72	–	–
5	–	–	–	0,75/0,69	0,72/0,67	0,70/0,65	–
6	–	–	–	0,70/0,62	0,66/0,60	0,62/0,58	–
8	–	–	–	–	–	0,53/0,47	0,51/0,46

Tableau III-4 : le coefficient K_{rr1} en fonction du rapport Z_2/P

- Réactance de fuite différentielle

La réactance de fuite différentielle est due au flux de fuite qui se forme d'une dent à une autre à travers l'entrefer, au flux différentielle de phase et au flux différentielle de l'encoche, elle est donnée par :

$$X_{1d} = \frac{1.58.f.L_1.W_1^2}{p.q_1.10^8} \cdot \lambda_{1d} \quad [\Omega] \quad (III.25)$$

- **Perméance de fuite frontale**

La Perméance frontal (partie non active du conducteur) est représentée par les lignes de dispersion autour des têtes de bobines. Le calcul de Perméance frontale ne peut être effectué que de façon approximative, car le parcours des lignes de dispersion autour des têtes des bobines se présente sous forme de courbes très compliquées.

$$\lambda_{1f} = 0,34. \frac{q_1.(L_{f1}-0,64.\beta.\tau_{p1})}{l_\delta} \quad (III.26)$$

Avec :

β : le rapport de raccourcissement, exprime en [rad]

L_{f1} : est la longueur moyenne de la partie frontale d'une demi spire telle-que :

$$L_{f1} = (2.y - 0,04).10^3 \text{ .Pour } 2p=2 \quad [\text{mm}] \quad (III.27)$$

$$L_{f1} = (2.y - 0,02).10^3 \text{ .Pour } 2p=4 \quad [\text{mm}] \quad (III.28)$$

$$L_{f1} = \left(\frac{\pi}{2}.y - 0,018\right).10^3 \text{ .Pour } 2p=6 \quad [\text{mm}] \quad (III.29)$$

$$L_{f1} = (2,2.y - 0,012).10^3 \text{ .Pour } 2p=8 \quad [\text{mm}] \quad (III.30)$$

- **Réactance de fuit frontal**

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

$$X_{1f} = \frac{1.58.f.L_i.W_1^2}{p.q_1.10^8} \cdot \lambda_{1f} \quad [\Omega] \quad (III.31)$$

- **La réactance totale**

La réactance totale est donnée par :

$$X_1 = \frac{1.58.f_1.L_i.W_1^2}{P.q_1.10^8} \lambda_1 \quad [\Omega] \quad (III.32)$$

- **La Perméance totale**

$$\lambda_1 = \lambda_{1d} + \lambda_{enc1} + \lambda_{1f} \quad (III.33)$$

III-3-2 Paramètres Rotoriques :

Les paramètres rotoriques sont donnés comme suit :

a) Résistance rotorique

- **Résistance active de la barre**

La résistance active de la barre est donnée comme suit :

$$R_b = \rho_{AL}(T) \frac{L_2.10^3}{S_b} \quad [\Omega] \quad (III.34)$$

$\rho_{al}(T)$: résistivité de l'aluminium à la température T, donnée comme suit :

$$T=20^\circ C \quad \rho_{al}(T)=36,6.10^{-9} \quad [\Omega.m]$$

$$S_b = S_{en2}$$

L_i : la longueur de l'induit.

- Coefficient de réduction du courant de l'anneau ramené au courant de la barre

$$k_{red2} = \frac{2.\pi.p}{Z_2} \quad (III.35)$$

- Résistance de l'anneau ramené au courant de la barre:

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

$$R_{an} = \rho_{AL}(T) \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot P \cdot D_{an} \cdot 10^3}{k_{red}^2 \cdot Z_2 \cdot S_{an}} \quad [\Omega] \quad (III.36)$$

Avec :

D_{an} : diamètre de l'anneau, en [mm]

S_{an} : section de l'anneau, en [mm²]

$$S_{an} = k_{an} \cdot \frac{Z_2 \cdot S_b}{2 \cdot P} \quad [mm^2] \quad (III.37)$$

$$K_{an} = (0,35 \div 0,45)$$

- **Le coefficient de réduction de la résistance de l'enroulement du rotor ramené à l'enroulement de stator**

$$k_{red1} = \frac{4 \cdot m_1}{Z_2} \cdot \frac{(K_{enr1} \cdot W_1)^2}{(K_{ob})^2} \quad (III.38)$$

- **Résistance active de l'enroulement du rotor ramenée à l'enroulement du stator**

$$R_{21} = K_{red1} \cdot (R_b + R_{an}) \quad [\Omega] \quad (III.39)$$

K_{ob} : coefficient oblique des encoches rotoriques donné par :

$$k_{ob} = \frac{\sin(\alpha_{ob}/2)}{\alpha_{ob}/2} \quad (III.40)$$

α_{ob} : angle d'inclinaison des encoches donné par

$$\alpha_{ob} = \frac{2 \cdot p \cdot \pi \cdot \beta_{ob}}{Z_1} \quad (III.41)$$

$$\beta_{ob} = k_{ob} \cdot \frac{t_1}{t_2} \quad (III.42)$$

b) Perméance et réactance de dispersion du rotor

- Perméance différentielle

Elle est donnée par :

$$\lambda_{2d} = \frac{0.9.t_2.\left(\frac{Z_2}{6.\pi}\right)^2.k_{d2}}{\delta.k_\delta} \quad (\text{III.43})$$

Avec:

K_{d2} : Coefficient de fuite différentielle, il est donné en fonction de q_2 .

L'équation régissant la courbe est :

- Perméance frontale

Elle est donnée par:

$$\lambda_{f2} = \frac{2.3.D_{an}}{Z_2.l_\delta.k_{red2}^2} \log \left[\frac{4.7.D_{an}}{2.(h_{an}+l_{an})} \right] \quad (\text{III.44})$$

- Perméance d'encoche

$$\lambda_{enc2} = \frac{2.h_{enc2}}{3.b_{enc12}+b_{enc22}} + \frac{h_{f2}}{b_{f2}} \quad (\text{III.45})$$

- Perméance de dispersion magnétique d'obliquité au rotor

Elle caractérise l'influence de l'obliquité de l'encoche sur la réactance du rotor. Elle est donnée comme suit :

$$\lambda_{ob} = \frac{t_2.\beta_{ob2}}{9.5.\delta_e.k_\delta.k_\mu} \quad (\text{III.46})$$

Avec:

- Perméance de dispersion du rotor

Elle est donnée comme suit :

$$\lambda_2 = \lambda_{2enc} + \lambda_{2d} + \lambda_{2f} + \lambda_{ob} \quad (III.47)$$

- **Réactance de fuite globale de rotor**

Elle est donnée comme suit:

$$X_2 = 7,9 \cdot f \cdot L_i \cdot \lambda_2 \cdot 10^{-9} \quad [\Omega] \quad (III.48)$$

- **Coefficient de dispersion statorique**

$$\sigma_1 = \frac{X_1}{X_m} \quad (III.49)$$

- **Coefficient des résistances statorique**

$$\rho_1 = \frac{R_1 \cdot m_T}{X_1 + X_m} \quad (III.50)$$

IV.1 Introduction

Tout processus de conservation électromagnétique de l'énergie est accompagné inévitablement des pertes. La machine asynchrone, comme toute autre machines électriques, est sujette à ce type de transformation. Par ailleurs, les sources principales des pertes sont le champ magnétique et le courant électrique.

L'étude quantitative des pertes nécessite la connaissance parfaite de la distribution du courant électrique et du champ magnétique dans les différents tronçons de la machine.

Une fraction de puissance absorbée par la machine électrique se dissipe dans les différentes parties qui constituent la machine, essentiellement dans :

Le circuit magnétique

Les enroulements statoriques et rotoriques

Les différentes parties mécaniques

IV.2 Les pertes principales dans le fer

Ce sont les pertes par hystérésis et par courant de Foucault dues au flux principal, la grande partie de ces pertes est localisées au niveau des dents et de la culasse statorique, car les pertes fers au rotor sont négligeables car ces dernières dépendent de la fréquence des courants qui induisent le champ magnétique dans le fer. Or la fréquence des courants dans le rotor (g.f), lors du fonctionnement normal de la machine alimentée en régime sinusoïdal de courant, est très faible. Néanmoins il faut parfois en tenir compte lorsque la machine est alimentée par un onduleur ou dans certains types de fonctionnement à fort glissement.

Les pertes sont généralement notées en minuscule.

IV.2.1 Les pertes dans les dents statorique

Elles sont données par la relation suivante :

$$p_{fz1} = 4,4 \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1} \quad [W] \quad (VI.1)$$

$$m_{z1} = 7,8 \cdot Z_1 \cdot b_{z1} \cdot h_{enc1} \cdot l_\delta \cdot k_{fer} \cdot 10^{-6} \quad [Kg] \quad (VI.2)$$

m_{z1} : la masse des dents dans les dents statoriques.

IV.2.2 Les pertes dans la culasse statorique

Ces pertes sont proportionnelles au carré de l'induction dans la culasse, elle est donnée par :

$$p_{c1} = 4,4 \cdot B_{c1} \cdot m_{c1} \quad [W] \quad (IV.3)$$

$$m_{c1} = 7,8 \cdot \pi \cdot (D_{ext1} - h_{c1}) \cdot h_{c1} \cdot l_\delta \cdot k_{fer} \cdot 10^{-6} \quad [Kg] \quad (IV.4)$$

m_{c1} : la masse de la culasse pour une encoche trapézoïdale.

B_{c1} : l'induction dans la culasse statorique

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

$$p_{c\Sigma} = p_{z1} \cdot \left[1 + 2 \cdot (k_\delta - 1) \cdot \left(\frac{t_1}{10} \right)^{0,5} \right] + p_{c1} \quad [W] \quad (IV.5)$$

IV.3 Les 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 sur l'air (ou l'hydrogène). Elles sont exprimées par :

$$p_m = k_{m0} \cdot \left(\frac{n}{1000} \right)^2 \cdot \left(\frac{D_{ext1}}{100} \right)^4 \quad [W] \quad (IV.6)$$

Avec:

K_{m0} — facteur de majoration, il est donné par :

$$2p=2\ldots\ldots\ldots K_{m0}=1,3.(1-D_{ext1}.10^{-3})$$

$$2p>2 \ldots\ldots\ldots K_{m0}=1$$

IV.4 Les Pertes supplémentaires en régime nominale

Elles sont données à 0,5% de la puissance absorbée par la machine.

Elles sont exprimées comme suit :

$$p_{sno} = 0.005 \frac{P_n}{\eta_n} \quad [W] \quad (IV.7)$$

IV.5 La composante réactive du courant statorique pour la vitesse synchrone

$$I_{or} = \frac{U_{n1}}{X_m.(1+\sigma_1).(1+\rho_1^2)} \quad [A] \quad (IV.8)$$

IV.6 Les pertes électriques dans l'enroulement statorique pour la vitesse synchrone

$$p_{el} = m_1.I_{or}^2.R_{11}.(1 + \rho_1^2) \quad [W] \quad (IV.9)$$

IV.7 La composante active du courant à vide

$$I_{0a} = \frac{p_{el}+p_{c\Sigma}+p_m}{m_1.U_{n1}} \quad [A] \quad (IV.10)$$

IV.8 Le courant à vide

$$I_0 = \sqrt{I_{or}^2 + I_{0a}^2} \quad [A] \quad (IV.11)$$

IV.9 Le facteur de puissance à vide

$$\cos \varphi_0 = \frac{I_{0a}}{I_0} \quad (IV.12)$$

IV.10 La résistance active en court-circuit

$$R_{cc} = R_1 + R_{211} \quad [\Omega] \quad (IV.13)$$

IV.11 La réactance active en court-circuit

$$X_{cc} = X_1 + X_{211} \quad [\Omega] \quad (IV.14)$$

IV.12 L'impédance en court-circuit

$$Z_{cc} = \sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2} \quad [\Omega] \quad (IV.15)$$

IV.13 La puissance mécanique

$$P_{méc} = P_n \cdot 10^3 + p_m + p_{sno} \quad [W] \quad (IV.16)$$

IV.14 La résistance équivalente du schéma équivalent

$$R_n = \frac{m_1 \cdot U_n^2}{2 \cdot p_{méc}} - R_{cc} + \sqrt{\left(\frac{m_1 \cdot U_n^2}{2 \cdot p_{méc}} - R_{cc}\right)^2 - Z_{cc}^2} \quad [W] \quad (IV.17)$$

IV.15 L'impédance totale

$$Z_n = \sqrt{(R_n + R_{cc})^2 + X_{cc}^2} \quad [\Omega] \quad (IV.18)$$

IV.16 Le glissement

$$g_n = \frac{1}{1 + \frac{R_n}{R_{211}}} \quad (IV.19)$$

IV.17 La composante active du courant statorique

$$I_{ca} = \frac{P_{el} + P_{m\Sigma}}{m_1 \cdot U_{n1}} \quad [A] \quad (IV.20)$$

IV.18 Le Courant du rotor

$$I_{211} = \frac{U_{n1}}{Z_n} \quad [A] \quad (IV.21)$$

IV.19 Le Courant du stator, Composante active et réactive

$$I_{a1} = I_{ca} + I_{211} \cdot \frac{R_n + R_{cc}}{Z_n} \cdot \left[\frac{(1 - \rho_1)^2}{(1 + \rho_1)^2} + \frac{X_{cc} \cdot 2 \cdot \rho_1}{Z_n \cdot (1 + \rho_1^2)} \right] \quad [A] \quad (IV.22)$$

$$I_{r1} = I_{0r} + I_{211} \cdot \frac{X_{cc}}{Z_n} \cdot \left[\frac{(1 - \rho_1)^2}{(1 + \rho_1)^2} - \frac{R_{cc} + R_n}{Z_n} \cdot \frac{2 \cdot \rho_1}{1 + \rho_1^2} \right] \quad [A] \quad (IV.23)$$

$$I_1 = \sqrt{I_{a1}^2 + I_{r1}^2} \quad [A] \quad (IV.24)$$

IV.20 Le facteur de puissance

$$\cos \phi = \frac{I_{a1}}{I_1} \quad (IV.25)$$

IV.21 La densité de courant nominal statorique

$$J_{1n} = \frac{I_1}{N_{elt1} \cdot S_{elt1}} \quad [A/mm^2] \quad (IV.26)$$

IV.22 Le courant de la barre rotorique

$$I_b = I_{211} \cdot \frac{2 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot k_{enr2} \cdot (1 + \sigma_1) \cdot \sqrt{1 + \rho_1^2}}{Z_2 \cdot k_{ob}} \quad [A] \quad (IV.27)$$

IV.23 La densité de courant de la barre

$$J_b = \frac{I_b}{S_{en2}} \quad [A/mm^2] \quad (IV.28)$$

IV.24 Le courant dans l'anneau

$$I_{an} = \frac{I_b}{k_{red2}} \quad [A] \quad (IV.29)$$

IV.25 Les Pertes électriques dans le stator et le rotor

Elles constituent les pertes par effet joule dissipées dans l'enroulement statorique et la cage rotorique. Elles sont proportionnelles au carré des courants qui circulent dans ces enroulements

$$p_{\text{él1}} = m_1 \cdot I_1^2 \cdot R_{11} \quad [\text{W}] \quad (\text{IV.30})$$

$$p_{\text{él2}} = m_2 \cdot I_{211}^2 \cdot R_{211} \quad [\text{W}] \quad (\text{IV.31})$$

m_1 : nombre de phase statorique

m_2 : nombre de phase rotorique

IV.26 La somme des pertes

$$p_{\Sigma} = p_{\text{él1}} + p_{\text{él2}} + p_{\text{c}\Sigma} + p_{\text{m}\Sigma} + p_{\text{sno}} \quad [\text{W}] \quad (\text{IV.32})$$

IV.27 La puissance absorbée

$$P_1 = P_n \cdot 10^3 + p_{\Sigma} \quad [\text{W}] \quad (\text{IV.33})$$

IV.28 Le rendement

$$\eta_n = 1 - \frac{p_{\Sigma}}{P_1} \quad (\text{IV.34})$$

IV.29 Le rapport du couple maximale sur le couple nominale :

$$C_{\text{maxno}} = \frac{m_1 \cdot U_{n1}^2 (1 - g_n)}{2 \cdot R_m \cdot P_n \cdot 10^3} \quad (\text{IV.35})$$

- **Les résistances transformées**

$$R_{11} = m_T \cdot R_1 \quad [\Omega] \quad (\text{III.51})$$

$$R_{211} = m_T \cdot R_{22} \cdot (1 + \sigma_1^2) \cdot (1 + \rho_1^2) \quad [\Omega] \quad (\text{III.52})$$

$$X_{211} = m_T \cdot R_{21} \cdot (1 + \sigma_1^2) \cdot (1 + \rho_1^2) \quad [\Omega] \quad (\text{III.53})$$

$$X_{11} = X_1 \cdot (1 + \sigma_1) \cdot (1 + R_1)$$

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous déterminons toutes les dimensions géométriques du stator et du rotor ainsi que l'épaisseur de l'entrefer. Tout en respectant les critères technico-économique exigés, voir figure II.1 et II.2.

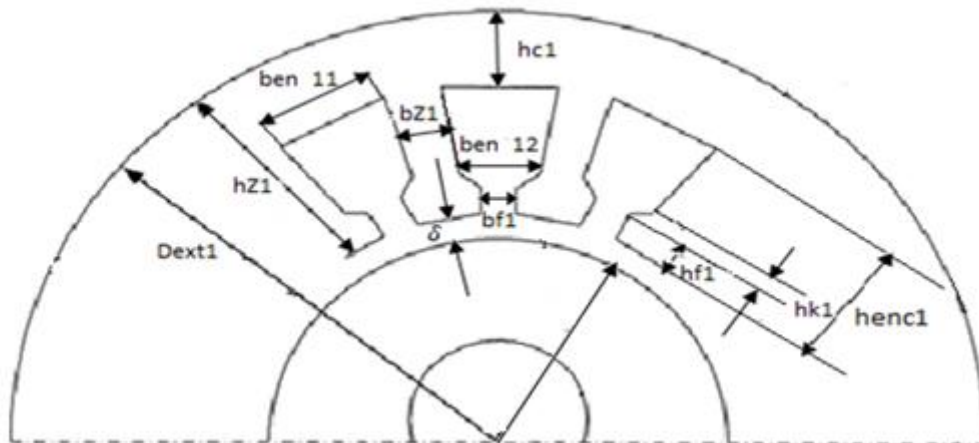


Figure II.1 Schéma d'une tôle statorique

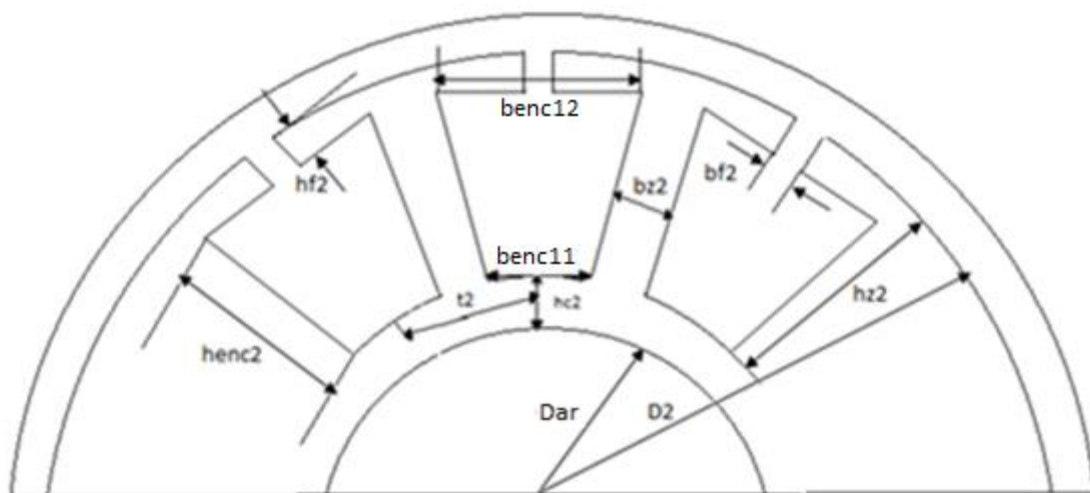


Figure II.2 Schéma d'une tôle rotorique

II.2 Calcul et choix des dimensions principales du stator

a) Choix du diamètre extérieur

Le diamètre extérieur du stator des machines asynchrones pour différentes hauteurs d'axes est donné suivant le tableau II-1

Dext [mm]	h [mm]	Puissance nominale en [KW] en fonction de 2p		
		2p=2	2p=4	2p=6
81	50	0.09	0.06	—
		0.12	0.09	
89	65	0.18	0.12	—
		0.25	0.18	
100	63	0.37	0.25	0.18
		0.55	0.37	0.25
116	71	0.75	0.55	0.37
		1.1	0.75	0.55
131	80	1.5	1.1	0.75
		2.2	1.5	1.1
149	90	3.0	2.2	1.5
168	100	4.0	3.0	—
		5.5	4.0	2.2
191	112	7.5	5.5	3.0
				4.0
225	132	1.1	7.5	5.5
			11	7.5

272	160	15 18.5	15 18.5	11 15
313	180	22 30	22 30	— 18.5
349	200	37 45	37 45	22 30
392	225	55	55	37
437	250	75 90	75 90	45 55
520	280	110 132	110 132	75 90
520	315	160 200	160 200	110 132
590	355	250 315	250 315	160 200

Tableau II. 1 Le diamètre extérieur du stator des machines asynchrones en fonction de la hauteur d'axe.

b) Choix du diamètre intérieur

Le diamètre intérieur du stator déduit de la relation suivante :

$$D_1 = K_D \cdot D_{ext1} - 5 \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.1})$$

Et le coefficient K_D est donné en fonction du nombre de pôles $2p$ comme indiqué sur le tableau II-2.

2p	2	4	6
K_D	[0,52 0,6]	[0,62 0,68]	[0,7 0,72]

Tableau II.2 K_D en fonction du nombre de pôles

c) Puissance électromagnétique

C'est la puissance transmise du stator vers le rotor à travers l'entrefer lors du fonctionnement du moteur. Elle est définie comme suit :

$$P_e = k_e \cdot \frac{P_n \cdot 10^2}{\eta_n \cdot \cos \varphi_n} \quad [\text{W}] \quad (\text{II.2})$$

Avec:

P_n la puissance nominale de la machine en [W].

$\cos \varphi_n$ - facteur de puissance nominale 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

$$K_e = 0,987 - 5 \cdot p \cdot 10^{-3} \quad (P \text{ nombre de paires de pôles})$$

d) coefficient d'enroulement statorique

Il est défini comme étant le produit de coefficient de distribution par le coefficient de raccourcissement.

$$K_{enr1} = K_{d1} \cdot K_{r1} \quad (\text{II. 3})$$

Avec :

K_{d1} -le coefficient de distribution, il est calculé comme suit :

$$K_{d1} = \frac{\sin(\alpha / 2)}{q_1 \cdot \sin(\alpha / 2 \cdot q_1)} \quad (\text{II.4})$$

K_{R1} - coefficient de raccourcissement il est donné par la formule suivante :

$$K_{R1} = \sin\left(\frac{\beta \pi}{2}\right) \quad (\text{II.5})$$

$\beta = Y/\tau$: rapport de raccourcissement

e) longueur virtuelle de l'induit

La longueur virtuelle de l'induit est la longueur de l'induit présentant la même reluctance d'induit réelle.

$$L_i = \frac{8,2 \cdot 10^7 \cdot P_e}{K_{enr11} \cdot A_1 \cdot B_{\delta 1} \cdot D_1^2 \cdot n} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.6})$$

d) Facteur de géométrie de la machine

Le facteur λ décrit la géométrie de la machine d'une manière générale.

Si λ est petit la machine aura un bon refroidissement et le montage des enroulements plus facile mais aura un grand diamètre donc un grand flux par rapport à la longueur, et cela conduit à une consommation très élevée de cuivre. Lorsqu'il est élevé le moment d'inertie de la machine est plus petit et la quantité du cuivre pour les parties frontales est plus faible. λ doit être dans l'intervalle $[0.5 \ 0.8]$.

(II.7)

- Le pas polaire en nombre d'encoche

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

- Le pas polaire en mm

C'est la distance entre deux pôles voisins de nom différents, il est donné par l'expression suivante :

$$\tau_{p1} = \frac{\pi \cdot D_1}{2 \cdot p} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.9})$$

- Pas dentaire

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

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D_1}{Z_1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.10})$$

Avec :

D_1 - Diamètre intérieure du stator

Z_1 - Nombre d'encoches statoriques

f) Le courant nominal :

Il est donné par l'expression suivante :

$$I_{n1} = \frac{P_n \cdot 10^3}{m_1 \cdot U_{n1} \cdot \eta_n \cdot \cos \varphi_n} \quad [\text{A}] \quad (\text{II.11})$$

Avec :

P_n - puissance nominale, en [KW]

U_{n1} -la tension simple nominale, en [V]

η_n - Le rendement nominale

$\cos \varphi_n$ - Facteur de puissance nominale

g) le flux utile

$$\phi = \frac{B_{\delta 1} \cdot D_1 \cdot L_i \cdot 10^{-6}}{p} \quad [\text{Weber}] \quad (\text{II.12})$$

h) Nombre de conducteurs effectifs

Il est défini comme étant le nombre de conducteurs occupants une encoche. Il est donné sous la formule suivante :

$$N_{\text{eff}} = \frac{a_1 \cdot t_1 \cdot A_1 \cdot 10^{-3}}{I_{n1}} \quad (\text{II.13})$$

Avec :

A_1 - La charge linéaire, en [A/m]

a_1 - nombre de voix parallèles

i) Nombre de spires par phase

C'est le nombre de spires que contient une phase statorique. Il est donné par :

$$W_1 = \frac{N_{\text{eff}} \cdot p \cdot q_1}{a_1} \quad (\text{II.14})$$

- Angle électrique

$$\gamma = \frac{p \cdot 360}{Z_1} \quad (\text{II.15})$$

- Nombre d'encoche par pôle et par phase

$$q_1 = \frac{Z_1}{2 \cdot p \cdot m_1} \quad (\text{II.16})$$

- le pas d'enroulement

$$y_1 = \frac{Z_1}{2 \cdot p} - \varepsilon \quad (\text{II.17})$$

ε – Raccourcissement

j) Charge linéaire :

Elle représente le courant total de la partie d'encoche par unité de longueur du périmètre de l'induit, elle caractérise l'utilisation électrique de la machine, elle est donnée en fonction du diamètre extérieur pour différentes paires de pôle. Elle s'exprime comme suit :

$$A_1 = \frac{m_1 \cdot 2 \cdot I_{n1} \cdot W_1}{\pi \cdot D_1} \quad [\text{A/m}] \quad (\text{II.18})$$

Avec :

m_1 - nombre de phase statorique.

I_{n1} - courant nominal dans une phase statorique donné en, [A]

k) L'induction magnétique dans l'entrefer

L'induction magnétique dans l'entrefer, est une grandeur importante dans la détermination des dimensions de la machine. Car c'est elle qui détermine la f.e.m et le couple d'où la puissance de la machine, ce que nous amène à choisir une valeur de l'induction aussi élevée que possible, mais la saturation du fer limite notre choix, pour cela nous devons toujours veiller à ce que la valeur de l'induction soit comprise entre 0,6 et 0,9. Elle s'écrit comme suit :

$$B_{\delta} = \frac{6,1.10^{12}.P_e}{K_f.K_{enr1}.\alpha_i.n.A_1.L_i.D^2_1} \quad [T] \quad (II.19)$$

Avec :

A_1 - la charge linéaire en [A/m]

P_e - la puissance électromagnétique en [KW]

α_i - coefficient de recouvrement polaire.

l) Section effective d'un conducteur

Elle donnée sous la formule suivante :

$$S_{eff1} = \frac{I_{n1}}{a_1.J_1} \quad [mm^2] \quad (II.20)$$

Avec :

J_1 - densité de courant dans l'enroulement statorique, il est donné en fonction du diamètre extérieure.

Si la section effective calculée est supérieure à 1.8 mm² on doit diviser celle-ci en sections élémentaires et comme la section des conducteurs étant normalisée on choisira la section standard la plus proche de celle calculée

$$S_{elt1} = \frac{S_{eff1}}{N_{elt1}} \quad [mm^2] \quad (II.21)$$

Où

N_{elt1} - Est entier définit comme étant un nombre des conducteurs élémentaires

Toutes ces opérations se font automatiquement par le programme informatique, les sections standards sont données dans le tableau II.2

S_{eff1} [mm ²]	D_{nu} [mm]	d_{iso1} [mm]
0.221	0.53	0.585
0.246	0.56	0.615
0.283	0.60	0.655
0.312	0.63	0.690
0.335	0.67	0.730
0.396	0.71	0.770
0.442	0.750	0.815
0.503	0.800	0.865
0.567	0.850	0.915
0.636	0.900	0.965
0.709	0.950	1.015
0.785	1.000	1.080
0.883	1.060	1.140
0.895	1.120	1.200
1.094	1.180	1.260
1.227	1.250	1.330

1.368	1.320	1.405
1.539	1.400	1.485
1.767	1.500	1.585

Tableau II.2 Les sections standards

II.3) Dimensionnement de la feuille statorique

La feuille statorique est dimensionnée comme suit :

a) Largeur de la dent

La largeur de la dent est calculée à partir de la conservation du flux à travers le pas dentaire elle est donnée comme suit

$$b_{Z1} = \frac{t_1 \cdot B_8}{K_{fer} \cdot B_{Z1}} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.22})$$

b) Hauteur du dos statorique

Elle est donnée par la formule suivante

$$h_{c1} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2 \cdot L_i \cdot K_{fer} \cdot B_{C1}} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.23})$$

Avec :

B_{C1} : L'induction magnétique dans le dos du stator en [T], donné par le tableau suivant :

Avec :

K_{fer} - le coefficient de remplissage de paquet des tôles statoriques et rotoriques

$K_{fer} = 0,95$ pour l'isolation avec oxydation

$K_{fer} = 0,97$ pour l'isolation en vernis

B_{Z1} : induction maximale dans la dent statorique en [Tesla], il est donné dans le tableau II.3

2p	B _{Z1} (Tesla)	B _{C1} (Tesla)	h (mm)	2p	Types d'encoche	B _{Z2} (Tesla)	B _{C2} (Tesla)
2	1.75-1.95	1.50-1.65	50-132	2	a	1.75-1.95	1.35-1.45
4	1.75-1.95	1.50-1.65		4	a	1.75-1.95	1.15-1.25
6	1.75-1.95	1.45-1.60		6	a	1.75-1.95	1.05-1.15
2	1.75-2.00	1.45-1.70	160-225	2	a	1.75-1.95	1.35-1.45
4	1.75-2.00	1.45-1.70		4	b	1.55-1.80	1.20-1.35
6	1.75-1.85	1.35-1.50		6	b	1.65-1.90	1.05-1.15
2	1.70-1.90	1.45-1.65	250	2	d	1.70-1.95	1.35-1.45
4	1.70-1.90	1.45-1.65		4	a	1.65-1.90	1.15-1.25
6	1.70-1.90	1.45-1.65		6	a	1.65-1.90	1.05-1.15
2	1.70-1.90	1.40-1.60	280-355	2	b	1.60-1.85	1.35-1.45
4	1.60-1.80	1.30-1.45		4	b	1.80-2.00	1.15-1.25
6	1.60-1.80	1.15-1.30		6	b	1.65-1.90	1.05-1.15

Figure II.3 induction maximale dans la dent et la culasse statorique en fonction du nombre de pôle, hauteur d'axe et du type d'encoche.

c) Hauteur de la dent

Elle est donnée par la formule suivante

$$h_{z1} = 0,5. (D_{\text{ext}1} - D_1) - h_{c1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.24})$$

d) La largeur minimale de l'encoche

Elle est donnée par la formule suivante

$$b_{en11} = \frac{\pi.(D_1+0,2.h_{z1})}{Z_1} - b_{z1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.25})$$

e) La largeur maximale de l'encoche

Elle est donnée par la formule suivante

$$b_{en12} = \frac{\pi.(D_1+2h_{z1})}{Z_1} - b_{z1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.26})$$

f) Hauteur de l'encoche

Elle est donnée comme s

$$h_{enc1} = h_{z1} - (h_{k1} + h_{f1}) \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.27})$$

Avec:

h_{f1} -la hauteur de la fonte de l'encoche statorique, elle varie entre $(1,2 \div 1,18)$ en [mm]

h_{k1} : La largeur de la clavette, elle est donnée sous la formule suivante

$$h_{k1} = 0,5. (d_{enc1} - b_{f1}) \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.28})$$

b_{f1} : La largeur de la fente de l'encoche statorique, $b_{f1} \leq 4$

g) Section de l'encoche

C'est la section occupée par les conducteurs logés dans les encoches statoriques .Pour une encoche trapézoïdale, elle est donnée avec la formule suivante :

$$S_{enc1} = 0,5. (b_{en11} + b_{en12}). (h_{enc11} - h_{f1}) - \frac{b_{en12}-b_{f1}}{2} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{II.29})$$

h) La section occupée par l'isolation

La section occupée par l'isolation est calculée comme suit

$$S_{iso} = b_{is} \cdot (b_{en11} + b_{en12} + 2 \cdot h_{enc1}) + 0,75 \cdot b_{en12} + 0,5 \cdot b_{en11} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (\text{II.30})$$

i) La section de l'encoche occupée par l'enroulement

$$S_{eel} = S_{enc1} - S_{is} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{II.31})$$

- Coefficient de remplissage

C'est le rapport entre la section des conducteurs occupant l'encoche et la section utile de l'encoche, il est donné par :

$$K_{rem} = \frac{N_{eff} \cdot N_{elt1} \cdot (d_{iso1})^2}{S_{ee1}} \quad (\text{II.32})$$

Avec :

d_{iso1} -diamètre du conducteur avec isolation en [mm], donné par le tableau précédent.

Le coefficient de remplissage doit appartenir à l'intervalle [0.7 0.75]

k) Vérification des charges électromagnétique

Après avoir définitivement choisi les valeurs de N_{eff} et la section normalisée, on passera à la vérification de la charge linéaire A_1 , l'induction B_8 et la densité du courant J_1 .

Les différences relatives entre les valeurs vérifiées et les valeurs préliminaires ne doivent pas excéder les 10%.

l) Charge linéaire :

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

$$A_1 = \frac{N_{eff} \cdot I_{1n} \cdot Z_1}{\pi \cdot a_1 \cdot D_1 \cdot 10^{-3}} \quad [\text{A/m}] \quad (\text{II.33})$$

m) Induction magnétique dans l'entrefer :

Induction magnétique dans l'entrefer caractérise l'utilisation électrique.

$$B_{\delta} = \frac{\phi}{\alpha_1 \cdot \tau \cdot L_i \cdot 10^{-6}} \quad (\text{II.34})$$

n) Flux sous un pôle :

$$\phi = \frac{K_e \cdot U_n}{4 \cdot K_f \cdot W_1 \cdot K_{enr1}} \quad [\text{Weber}] \quad (\text{II.35})$$

II.4 Le choix de l'entrefer :

Pour des raisons mécaniques, on choisit l'entrefer aussi grand que possible, un entrefer aussi grand est également avantageux pour réduire les pertes supplémentaires dans le fer produites par les pulsations du champ, et de la dispersion provoquée par les champs harmoniques supérieurs. Comme il doit être aussi le plus petit possible afin d'avoir un facteur de puissance qui s'approche au maximum de l'unité, et un courant magnétique minimal. L'épaisseur de l'entrefer est liée à la puissance de la machine. Elle est donnée en fonction de la hauteur de l'axe et les nombres de paires de pôles.

II.5 Dimensionnement du rotor

Le rotor est à cage d'écureuil, celle-ci est constituée de barres logées dans des encoches trapézoïdales semi-ouvertes, court-circuitées à leurs extrémités.

La cage d'écureuil peut être présentée comme un enroulement polyphasé dont le nombre de paires de pôles est égale au nombre de paires de pôles du champ tournant.

b) Choix du nombre d'encoches rotoriques

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

$$(Z_1 - Z_2 \neq \pm 2P) \text{ et } (Z_1 - Z_2 \neq \pm 1 + 2P)$$

Le tableau suivant représente le nombre d'encoches statorique en fonction du nombre d'encoches rotorique :

P	Z1	Z2
2	24	18, 20, 22, 28, 30, 33,
	36	34
	48	25, 27, 28, 29, 30, 43
		30, 37, 39, 40, 41
4	24	16, 18, 20, 30, 33, 34,
	36	35, 36
	48	28, 30, 32, 34, 45, 48
	72	36, 40, 44, 57, 59
6	36	42, 48, 54, 56, 60, 61,
	54	62, 68, 76
	72	20, 22, 28, 44, 47, 49
		34, 36, 38, 40, 44, 46
8	48	44, 46, 50, 60, 61, 62,
		82, 83
		26, 30, 34, 35, 36, 38,

	72	58 42, 46, 48, 50, 52, 56, 60
12	72 90	69, 75, 80 86, 87, 93, 94

Tableau II.4 Nombre d'encoche statorique en fonction de nombre d'encoche rotorique

b) Diamètre extérieur du rotor

Il est donné par la formule suivante :

$$D_2 = D_1 - 2 \cdot \delta_e \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.36})$$

Avec :

δ_e -est l'épaisseur de l'entrefer, en [mm]

- Pas dentaire rotorique

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

$$t_2 = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.37})$$

Avec :

Z_2 -est le nombre d'encoches rotoriques.

- Pas polaire en nombre d'encoche

$$\tau_p = \frac{Z_2}{2 \cdot p} \quad (\text{II.38})$$

- Le pas polaire en mm

C'est la distance entre deux pôles voisins de nom différents, il est donné par l'expression suivante :

$$\tau_{p2} = \frac{\pi \cdot D_2}{2 \cdot p} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.39})$$

c) Courant dans la barre

$$I_2 = 1,11 \cdot \frac{6 \cdot I_{1n} \cdot W_1 \cdot K_{\text{enr}1} \cdot \cos \varphi_n}{m_2 \cdot W_2 \cdot K_{\text{enr}2}} \quad [\text{A}] \quad (\text{II.40})$$

Le rotor de notre machine est à cage d'écureuil, on considère cette cage comme un enroulement polyphasé à un nombre de phase m_2 égal au nombre d'encoche Z_2 . Donc $K_{\text{enr}2} = 1$, $W_2 = 1/2$. Dans ce cas on aura :

$$I_2 = 1,11 \cdot \frac{6 \cdot I_{1n} \cdot W_1 \cdot K_{\text{enr}2} \cdot \cos \varphi_n}{Z_2} \quad [\text{A}] \quad (\text{II.41})$$

II.6) Dimensionnement de la feuille rotorique

La feuille rotorique est dimensionnée comme suit :

a) Hauteur de la culasse rotorique

$$h_{c2} = 0,5 \cdot \frac{\alpha_i \cdot \tau_{p2} \cdot \beta_\delta}{K_{\text{fer}} \cdot B_{c2}} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.42})$$

Avec :

B_{c2} -l'induction dans la culasse rotorique.

b) Hauteur de la dent rotorique

$$h_{z2} = 0,5 \cdot (D_2 - D_{\text{int}2}) - h_{c2} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.43})$$

Avec :

$D_{\text{int}2}$ -diamètre intérieur du rotor :

$$D_{2\text{int}} = (0,3 \div 0,35) \cdot D_2 \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.44})$$

c) Largeur moyenne de la dent

$$b_{z2} = \frac{t_2 \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot B_{z2}} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.45})$$

d) largeur minimale de l'encoche rotorique

$$b_{enc11} = \frac{\pi \cdot (D_{int2} + 2 \cdot h_{c2})}{Z_2} - b_{z2} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.46})$$

e) largeur maximale de l'encoche rotorique

$$b_{enc11} = \frac{\pi \cdot (D_{int2} + 2 \cdot h_{z2})}{Z_2} - b_{z2} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.47})$$

f) Hauteur de l'encoche

$$h_{enc2} = h_{z2} - h_{f2} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.48})$$

g) La cage rotorique

Elle est constituée des barres logées dans les encoches rotorique, qui représentent les différentes phases. Ces barres sont court-circuitées à leurs extrémités par deux anneaux.

h) Section de la barre

$$S_{en2} = \frac{b_{enc11} + b_{enc12}}{2} \cdot h_{enc2} \quad (\text{II.50})$$

II.7) Dimensionnement de l'anneau de court-circuit

Le dimensionnement de l'anneau se fait comme suit :

a) Hauteur de l'anneau

Elle est donnée par l'expression suivante:

$$h_{an} = (1,1 \div 1,25) \cdot h_{z2} \quad (\text{II.51})$$

b) Section de l'anneau

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$S_{an} = (0,35 \div 0,45) \cdot \frac{Z_2 \cdot S_{enc2}}{2 \cdot p} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{II.52})$$

c) Largeur de l'anneau

Elle est donnée par l'expression :

$$L_{an} = \frac{S_{an}}{h_{an}} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.53})$$

d) Diamètre moyen intérieur de l'anneau

Elle est donnée par l'expression :

$$D_{an} = D_2 - h_{an} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.54})$$

III.1 Introduction

Le circuit magnétique des machines à courant alternatif, et les machines asynchrones en particulier, doit canaliser les lignes de forces du champ magnétique tournant, le but de ce calcul est de déterminer les forces magnétomotrices (fmm) qui nous permettra de calculer le courant magnétique nécessaire pour créer dans l'entrefer un flux d'une valeur bien déterminée pour le calcul de la réactance magnétique.

Le principe de calcul est basé sur la loi générale de la circulation du champ magnétique (la figure III.1).

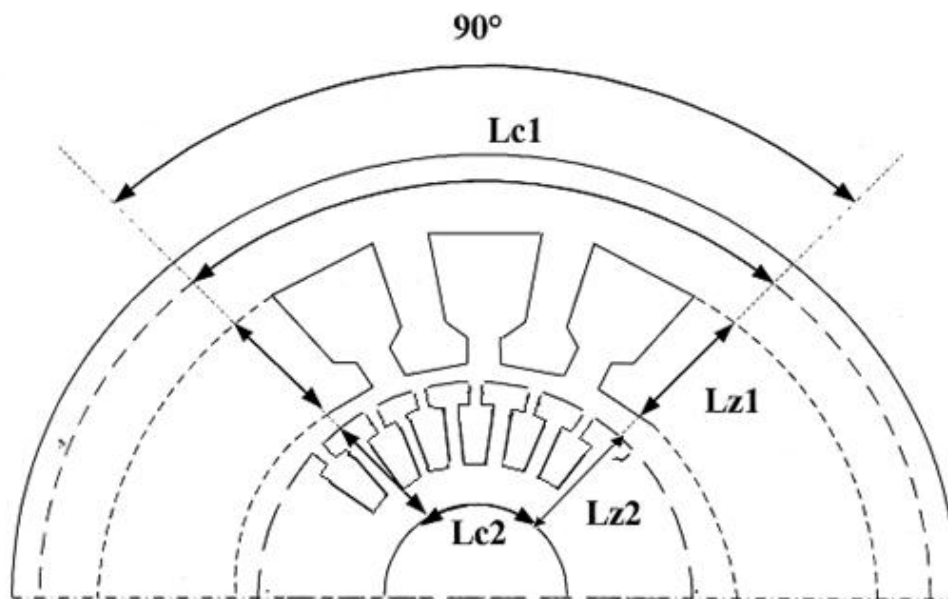


Figure III.1 Schéma du circuit magnétique

La force magnétomotrice est donnée par :

$$\oint H dl = \sum I = \sum F = (F_{\delta} + F_{Z1} + F_{Z2}) + F_{C1} + F_{C2}$$

$$= 2(F_{\delta} + F_{Z1} + F_{Z2}) + F_{C1} + F_{C2} \quad [A] \quad (III.1)$$

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

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

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

- ü Entrefer
- ü La culasse statorique
- ü La culasse rotorique
- ü Les dents statoriques
- ü Les dents rotoriques

III.2 Calcul du circuit magnétique

III.2.1 La force magnétomotrice dans l'entrefer :

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$F_{\delta} = 0,8 \cdot B_{\delta} \cdot K_{\delta} \cdot \delta \cdot 10^3 \quad [A] \quad (III.2)$$

Avec :

K_{δ} : coefficient de CARTER qui tient compte du non uniformité de l'entrefer, dû à l'ouverture des encoches statoriques et rotoriques il est donné par la relation suivante :

$$K_{\delta} = K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2}$$

$$k_{\delta 1} = 1 + \frac{b_{f1}}{t_1 - b_{f1} + (5 \cdot \delta \cdot t_1 / b_{f1})} \quad (III.3)$$

$$k_{\delta 2} = 1 + \frac{b_{f2}}{t_2 - b_{f2} + (5 \cdot \delta \cdot t_1 / b_{f2})} \quad (III.4)$$

b_{f1} : la largeur de la fente statorique, [mm]

b_{f2} : la largeur de la fente rotorique, [mm]

III.2.2 Circuit magnétique statorique

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

a) La force magnétomotrice dans la dent du stator

Elle est donnée par la formule suivante :

$$F_{Z1} = H_{Z1} \cdot h_{Z1} \cdot 10^{-3} \quad [A] \quad (III.5)$$

Avec :

H_{Z1} -l'intensité du champ magnétomotrice dans la dent qui correspond à B_{Z1} . Voir le tableau (III.1)

B(H)	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.4	124	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	324	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	495	504	514	524	533	563	574	585	585
1.4	586	595	610	622	634	646	658	670	683	696
1.5	706	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	1290	1330	1360	1400	1440	1480
1.8	1520	1570	1620	1670	1720	1770	1830	1890	1950	2010
1.9	2070	2160	2250	2320	2480	2520	2640	2760	2890	3020
2.0	3150	3320	3500	3500	3860	4040	4260	4480	4700	4920

2.1	5110	5440	5740	5740	6360	6670	7120	7570	8020	8470
2.2	8920	9430	9940	9940	10980	11500	12000	12600	13200	13800
2.3	14400	15100	15800	16500	17200	18000	18800	19600	20500	21400

Figure III.1 l'intensité du champ magnétomotrice dans la dent en fonction de B_{z1} .

b) Longueur moyenne des lignes du champ dans la culasse statorique

Elle est donnée par la formule suivante :

$$L_{C1} = \frac{\pi.(D_{ext1} - h_{C1})}{2.P} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III.6})$$

c) La force magnétomotrice dans la culasse du rotor

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$F_{C1} = L_{C1}.H_{C1}.10^{-3} \quad [\text{A}] \quad (\text{III.7})$$

Avec :

H_{C1} -l'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 (III.2)

B(H)	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.4	52	53	54	55	56	57	58	59	60	62
0.5	64	65	66	67	69	71	72	74	76	79
0.6	80	81	83	85	87	89	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	349	359	365	373	382	391
1.4	400	410	420	430	440	450	464	478	492	506
1.5	520	542	564	586	608	630	654	678	702	726
1.6	750	788	826	864	902	946	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	8409	9000	9700

Figure III.2 l'intensité du champ magnétique dans la culasse statorique en fonction de B_{C1} .

III.2.3 Circuit magnétique rotorique

Le calcul du circuit magnétique se fait comme suit :

a) Calcul de la force magnétomotrice dans les dents du rotor

$$F_{Z2} = H_{Z2} \cdot h_{Z2} \cdot 10^{-3} \quad [A] \quad (III.8)$$

H_{Z2} : Intensité du champ correspondant à l'induction dans les dents B_{Z2} . Voir le tableau (III.1).

b) Longueur moyenne des lignes du champ dans la culasse du rotor

Elle est donnée par la relation suivante :

$$L_{C2} = \frac{\pi}{2.P} (D_2 - 2 \cdot h_{Z1} - h_{C2}) + h_{C2} \quad [mm] \quad (III.9)$$

c) La force magnétomotrice dans la culasse du rotor :

Elle est donnée par la relation suivante :

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

H_{C2} : Intensité du champ correspondant à l'induction dans la culasse B_{C2} . Voir le tableau (III.2).

III.2.4 La force magnétomotrice totale par pair de pôle

$$\sum F = 2(F_{\delta} + F_{Z1} + F_{Z2}) + F_{C1} + F_{C2} \quad [A] \quad (III.11)$$

III.2.5 Coefficient de saturation

a) Coefficient de saturation des dents

Il est donné par :

$$k_{\mu} = \frac{F_{\delta} + F_{Z1} + F_{Z2}}{F_{\delta}} \quad (III.12)$$

b) Coefficient de saturation de la machine

Il est donné par :

$$k_{\mu} = \frac{\sum F}{2 \cdot F_{\delta}} \quad (III.13)$$

III.2.6 Courant magnétisant

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

$$I_{\mu} = \frac{P \cdot \sum F_i}{0,9 \cdot m1 \cdot W1 \cdot Ken1} \quad [A] \quad (III.14)$$

Pour avoir de bonnes performances il faut assurer un courant magnétisant ne dépassant pas 10% de courant nominal

III.2.7 Réactance de magnétisation

Elle est exprimée par :

$$X_m = \frac{k_e \cdot V_1}{I_m} \quad [\Omega] \quad (III.15)$$

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

a) Coefficient de dispersion magnétique du stator

Il est donné par :

$$\sigma_1 = \frac{X_1}{X_m} \quad (\text{III.16})$$

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

b) Force électromotrice à vide E_0

Elle est donnée par :

$$E_0 = \frac{U_{n1}}{1+\sigma_1} \quad (\text{III.17})$$

III.3 Calcul des paramètres de circuit équivalent :

III.3.1 Paramètres statoriques :

On calcul les paramètres statoriques comme suit :

a) **Resistance active d'une phase du stator :**

La résistance par phase est calculée par la formule suivante :

$$R_1 = \rho_{cu}(T) \frac{W_1 \cdot L_{w1} \cdot 10^3}{a_1 \cdot N_{el} \cdot S_{eff1}} \quad [\Omega] \quad (\text{III.18})$$

Avec :

$\rho_{cu}(T)$: résistivité de cuivre à la température (T)

$\rho_{cu}(75) = 21,3 \cdot 10^{-9} \quad [\Omega.m]$.

$\rho_{cu}(115) = 24,4 \cdot 10^{-9} \quad [\Omega.m]$.

$\rho_{cu}(20) = 17,2 \cdot 10^{-9} \quad [\Omega.m]$.

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

$$L_{w1} = 2 \cdot (L_i + L_{f1}) \quad [mm] \quad (\text{III.19})$$

L_i : la longueur virtuelle de l'induit.

L_{f1} : la longueur moyenne de la partie frontale d'une demi-spire : telle que

$$L_{f1} = (1,16 + 0,14.P) \cdot b_{1\text{moy}} + 15 \quad [\text{mm}] \quad (\text{III.20})$$

$b_{1\text{moy}}$: la longueur moyenne d'une section

$$b_{1\text{moy}} = \frac{\pi \cdot (D_1 + h_{Z1}) \cdot y_{1\text{moy}}}{Z_1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III.21})$$

$y_{1\text{moy}}$: pas moyen d'un groupe de section.

b) Réactances de fuite et Perméances de fuites du stator

- **La Perméance d'encoche**

Elle est donnée par

$$\lambda_{\text{enc1}} = \frac{h_{Z1}}{3 \cdot b_{\text{en12}}} \cdot k_{\beta 2} + \left(\frac{3 \cdot h_{k1}}{b_{\text{en12}} + 2 \cdot b_{f1}} + \frac{h_{f1}}{b_{f1}} + \frac{h_{k1}}{b_{\text{en12}}} \right) \cdot k_{\beta 11} \quad (\text{III.22})$$

$K_{\beta 1} = K_{\beta 11} = 1$, pour un enroulement concentrique.

- La réactance de fuite d'encoche :

Elle est due au flux de fuite qui se referment autour de conducteurs, elle est donnée par :

$$X_{\text{enc1}} = \frac{1,58 \cdot L_i \cdot f \cdot W_1^2}{p \cdot q_1 \cdot 10^{+8}} \cdot \lambda_{\text{enc1}} \quad [\Omega] \quad \text{enc1}$$

(III.23)

- Perméance de fuite différentielle

Elle présente la différence existante entre le champ réel contenue tout les harmoniques d'espace, et le champ dû à l'harmonique fondamental. Elle est donnée par l'expression suivante :

$$\lambda_{1d} = \frac{0,9.(t_1.k_{enr1})^2.k_{rr1}.k_{f1}.k_{de1}}{k_{\delta}.\delta_e} \quad (III.24)$$

Avec:

$$K_{f1} = 1 - [0,033b_{f1}^2/\delta.t_1]$$

K_{de1} : Coefficient dépendent de q_1 donné par le tableau III-3

K_{rr1} : Coefficient de fuite différentielle, il s'exprime en fonction du rapport Z_2/P donnée par le tableau III-4

q_1	1.5	2	2.5	3	4	5	6	8
K_{de1}	–	0.0285	–	0.0141	0.0089	0.0065	0.0052	–

Tableau III.3 : le coefficient K_{de1} en fonction de q_1

q_1	Z_2/p						
	10	15	20	25	30	35	40
2	0,99/0,94	0,94/0,87	–	–	–	–	–
3	0,98/0,92	0,93/0,87	0,88/0,84	0,85/0,78	–	–	–
4	–	0,90/0,81	0,84/0,77	0,80/0,75	0,77/0,72	–	–
5	–	–	–	0,75/0,69	0,72/0,67	0,70/0,65	–
6	–	–	–	0,70/0,62	0,66/0,60	0,62/0,58	–
8	–	–	–	–	–	0,53/0,47	0,51/0,46

Tableau III-4 : le coefficient K_{rr1} en fonction du rapport Z_2/P

- Réactance de fuite différentielle

La réactance de fuite différentielle est due au flux de fuite qui se forme d'une dent à une autre à travers l'entrefer, au flux différentielle de phase et au flux différentielle de l'encoche, elle est donnée par :

$$X_{1d} = \frac{1.58.f.L_1.W_1^2}{p.q_1.10^8} \cdot \lambda_{1d} \quad [\Omega] \quad (III.25)$$

- **Perméance de fuite frontale**

La Perméance frontal (partie non active du conducteur) est représentée par les lignes de dispersion autour des têtes de bobines. Le calcul de Perméance frontale ne peut être effectué que de façon approximative, car le parcours des lignes de dispersion autour des têtes des bobines se présente sous forme de courbes très compliquées.

$$\lambda_{1f} = 0,34. \frac{q_1.(L_{f1}-0,64.\beta.\tau_{p1})}{l_\delta} \quad (III.26)$$

Avec :

β : le rapport de raccourcissement, exprime en [rad]

L_{f1} : est la longueur moyenne de la partie frontale d'une demi spire telle-que :

$$L_{f1} = (2.y - 0,04).10^3 \text{ .Pour } 2p=2 \quad [\text{mm}] \quad (III.27)$$

$$L_{f1} = (2.y - 0,02).10^3 \text{ .Pour } 2p=4 \quad [\text{mm}] \quad (III.28)$$

$$L_{f1} = \left(\frac{\pi}{2}.y - 0,018\right).10^3 \text{ .Pour } 2p=6 \quad [\text{mm}] \quad (III.29)$$

$$L_{f1} = (2,2.y - 0,012).10^3 \text{ .Pour } 2p=8 \quad [\text{mm}] \quad (III.30)$$

- **Réactance de fuit frontal**

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

$$X_{1f} = \frac{1.58.f.L_i.W_1^2}{p.q_1.10^8} \cdot \lambda_{1f} \quad [\Omega] \quad (III.31)$$

- **La réactance totale**

La réactance totale est donnée par :

$$X_1 = \frac{1.58.f_1.L_i.W_1^2}{P.q_1.10^8} \lambda_1 \quad [\Omega] \quad (III.32)$$

- **La Perméance totale**

$$\lambda_1 = \lambda_{1d} + \lambda_{enc1} + \lambda_{1f} \quad (III.33)$$

III-3-2 Paramètres Rotoriques :

Les paramètres rotoriques sont donnés comme suit :

a) Résistance rotorique

- **Résistance active de la barre**

La résistance active de la barre est donnée comme suit :

$$R_b = \rho_{AL}(T) \frac{L_2.10^3}{S_b} \quad [\Omega] \quad (III.34)$$

$\rho_{al}(T)$: résistivité de l'aluminium à la température T, donnée comme suit :

$$T=20^\circ C \quad \rho_{al}(T)=36,6.10^{-9} \quad [\Omega.m]$$

$$S_b = S_{en2}$$

L_i : la longueur de l'induit.

- Coefficient de réduction du courant de l'anneau ramené au courant de la barre

$$k_{red2} = \frac{2.\pi.p}{Z_2} \quad (III.35)$$

- Résistance de l'anneau ramené au courant de la barre:

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

$$R_{an} = \rho_{AL}(T) \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot P \cdot D_{an} \cdot 10^3}{k_{red}^2 \cdot Z_2 \cdot S_{an}} \quad [\Omega] \quad (III.36)$$

Avec :

D_{an} : diamètre de l'anneau, en [mm]

S_{an} : section de l'anneau, en [mm²]

$$S_{an} = k_{an} \cdot \frac{Z_2 \cdot S_b}{2 \cdot P} \quad [mm^2] \quad (III.37)$$

$$K_{an} = (0,35 \div 0,45)$$

- **Le coefficient de réduction de la résistance de l'enroulement du rotor ramené à l'enroulement de stator**

$$k_{red1} = \frac{4 \cdot m1}{Z_2} \cdot \frac{(K_{enr1} \cdot W1)^2}{(K_{ob})^2} \quad (III.38)$$

- **Résistance active de l'enroulement du rotor ramenée à l'enroulement du stator**

$$R_{21} = K_{red1} \cdot (R_b + R_{an}) \quad [\Omega] \quad (III.39)$$

K_{ob} : coefficient oblique des encoches rotoriques donné par :

$$k_{ob} = \frac{\sin(\alpha_{ob}/2)}{\alpha_{ob}/2} \quad (III.40)$$

α_{ob} : angle d'inclinaison des encoches donné par

$$\alpha_{ob} = \frac{2 \cdot p \cdot \pi \cdot \beta_{ob}}{Z_1} \quad (III.41)$$

$$\beta_{ob} = k_{ob} \cdot \frac{t_1}{t_2} \quad (III.42)$$

b) Perméance et réactance de dispersion du rotor

- Perméance différentielle

Elle est donnée par :

$$\lambda_{2d} = \frac{0.9.t_2.\left(\frac{Z_2}{6.\pi}\right)^2.k_{d2}}{\delta.k_\delta} \quad (\text{III.43})$$

Avec:

K_{d2} : Coefficient de fuite différentielle, il est donné en fonction de q_2 .

L'équation régissant la courbe est :

- Perméance frontale

Elle est donnée par:

$$\lambda_{f2} = \frac{2.3.D_{an}}{Z_2.l_\delta.k_{red2}^2} \log \left[\frac{4.7.D_{an}}{2.(h_{an}+l_{an})} \right] \quad (\text{III.44})$$

- Perméance d'encoche

$$\lambda_{enc2} = \frac{2.h_{enc2}}{3.b_{enc12}+b_{enc22}} + \frac{h_{f2}}{b_{f2}} \quad (\text{III.45})$$

- Perméance de dispersion magnétique d'obliquité au rotor

Elle caractérise l'influence de l'obliquité de l'encoche sur la réactance du rotor. Elle est donnée comme suit :

$$\lambda_{ob} = \frac{t_2.\beta_{ob2}}{9.5.\delta_e.k_\delta.k_\mu} \quad (\text{III.46})$$

Avec:

- Perméance de dispersion du rotor

Elle est donnée comme suit :

$$\lambda_2 = \lambda_{2enc} + \lambda_{2d} + \lambda_{2f} + \lambda_{ob} \quad (III.47)$$

- **Réactance de fuite globale de rotor**

Elle est donnée comme suit:

$$X_2 = 7,9 \cdot f \cdot L_i \cdot \lambda_2 \cdot 10^{-9} \quad [\Omega] \quad (III.48)$$

- **Coefficient de dispersion statorique**

$$\sigma_1 = \frac{X_1}{X_m} \quad (III.49)$$

- **Coefficient des résistances statorique**

$$\rho_1 = \frac{R_1 \cdot m_T}{X_1 + X_m} \quad (III.50)$$

- **Les résistances transformées**

$$R_{11} = m_T \cdot R_1 \quad [\Omega] \quad (III.51)$$

$$R_{211} = m_T \cdot R_{22} \cdot (1 + \sigma_1^2) \cdot (1 + \rho_1^2) \quad [\Omega] \quad (III.52)$$

$$X_{211} = m_T \cdot R_{21} \cdot (1 + \sigma_1^2) \cdot (1 + \rho_1^2) \quad [\Omega] \quad (III.53)$$

$$X_{11} = X_1 \cdot (1 + \sigma_1) \cdot (1 + R_1) \cdot \frac{X_1}{\rho_1} \quad [\Omega] \quad (III.54)$$

IV.1 Introduction

Tout processus de conservation électromagnétique de l'énergie est accompagné inévitablement des pertes. La machine asynchrone, comme toute autre machines électriques, est sujette à ce type de transformation. Par ailleurs, les sources principales des pertes sont le champ magnétique et le courant électrique.

L'étude quantitative des pertes nécessite la connaissance parfaite de la distribution du courant électrique et du champ magnétique dans les différents tronçons de la machine.

Une fraction de puissance absorbée par la machine électrique se dissipe dans les différentes parties qui constituent la machine, essentiellement dans :

Le circuit magnétique

Les enroulements statoriques et rotoriques

Les différentes parties mécaniques

IV.2 Les pertes principales dans le fer

Ce sont les pertes par hystérésis et par courant de Foucault dues au flux principal, la grande partie de ces pertes est localisées au niveau des dents et de la culasse statorique, car les pertes fers au rotor sont négligeables car ces dernières dépendent de la fréquence des courants qui induisent le champ magnétique dans le fer. Or la fréquence des courants dans le rotor (g.f), lors du fonctionnement normal de la machine alimentée en régime sinusoïdal de courant, est très faible. Néanmoins il faut parfois en tenir compte lorsque la machine est alimentée par un onduleur ou dans certains types de fonctionnement à fort glissement.

Les pertes sont généralement notées en minuscule.

IV.2.1 Les pertes dans les dents statorique

Elles sont données par la relation suivante :

$$p_{fz1} = 4,4. B_{z1}^2. m_{z1} \quad [W] \quad (VI.1)$$

$$m_{z1} = 7,8. Z_1. b_{z1}. h_{enc1}. l_{\delta}. k_{fer}. 10^{-6} \quad [Kg] \quad (VI.2)$$

m_{z1} : la masse des dents dans les dents statoriques.

IV.2.2 Les pertes dans la culasse statorique

Ces pertes sont proportionnelles au carré de l'induction dans la culasse, elle est donnée par :

$$p_{c1} = 4,4. B_{c1}. m_{c1} \quad [W] \quad (IV.3)$$

$$m_{c1} = 7,8. \pi. (D_{ext1} - h_{c1}). h_{c1}. l_{\delta}. k_{fer}. 10^{-6} \quad [Kg] \quad (IV.4)$$

m_{c1} : la masse de la culasse pour une encoche trapézoïdale.

B_{c1} : l'induction dans la culasse statorique

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

$$p_{c\Sigma} = p_{z1}. \left[1 + 2. (k_{\delta} - 1). \left(\frac{t_1}{10} \right)^{0,5} \right] + p_{c1} \quad [W] \quad (IV.5)$$

IV.3 Les 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 sur l'air (ou l'hydrogène). Elles sont exprimées par :

$$p_m = k_{m0}. \left(\frac{n}{1000} \right)^2. \left(\frac{D_{ext1}}{100} \right)^4 \quad [W] \quad (IV.6)$$

Avec:

K_{m0} — facteur de majoration, il est donné par :

$$2p = 2 \dots\dots\dots K_{m0} = 1,3.(1 - D_{ext1}.10^{-3})$$

$$2p > 2 \dots\dots\dots K_{m0} = 1$$

IV.4 Les Pertes supplémentaires en régime nominale

Elles sont données à 0,5% de la puissance absorbée par la machine.

Elles sont exprimées comme suit :

$$P_{sno} = 0.005 \frac{P_n}{\eta_n} \quad [W] \quad (IV.7)$$

IV.5 La composante réactive du courant statorique pour la vitesse synchrone

$$I_{or} = \frac{U_{n1}}{X_m.(1+\sigma_1).(1+\rho_1^2)} \quad [A] \quad (IV.8)$$

IV.6 Les pertes électriques dans l'enroulement statorique pour la vitesse synchrone

$$P_{el} = m_1.I_{or}^2.R_{11}.(1 + \rho_1^2) \quad [W] \quad (IV.9)$$

IV.7 La composante active du courant à vide

$$I_{0a} = \frac{P_{el} + P_{c\Sigma} + P_m}{m_1.U_{n1}} \quad [A] \quad (IV.10)$$

IV.8 Le courant à vide

$$I_0 = \sqrt{I_{or}^2 + I_{0a}^2} \quad [A] \quad (IV.11)$$

IV.9 Le facteur de puissance à vide

$$\cos \varphi_0 = \frac{I_{0a}}{I_0} \quad (IV.12)$$

IV.10 La résistance active en court-circuit

$$R_{cc} = R_1 + R_{211} \quad [\Omega] \quad (IV.13)$$

IV.11 La réactance active en court-circuit

$$X_{cc} = X_1 + X_{211} \quad [\Omega] \quad (IV.14)$$

IV.12 L'impédance en court-circuit

$$Z_{cc} = \sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2} \quad [\Omega] \quad (IV.15)$$

IV.13 La puissance mécanique

$$P_{méc} = P_n \cdot 10^3 + p_m + p_{sno} \quad [W] \quad (IV.16)$$

IV.14 La résistance équivalente du schéma équivalent

$$R_n = \frac{m_1 \cdot U_n^2}{2 \cdot p_{méc}} - R_{cc} + \sqrt{\left(\frac{m_1 \cdot U_n^2}{2 \cdot p_{méc}} - R_{cc}\right)^2 - Z_{cc}^2} \quad [W] \quad (IV.17)$$

IV.15 L'impédance totale

$$Z_n = \sqrt{(R_n + R_{cc})^2 + X_{cc}^2} \quad [\Omega] \quad (IV.18)$$

IV.16 Le glissement

$$g_n = \frac{1}{1 + \frac{R_n}{R_{211}}} \quad (IV.19)$$

IV.17 La composante active du courant statorique

$$I_{ca} = \frac{P_{el} + P_{m\Sigma}}{m_1 \cdot U_{n1}} \quad [A] \quad (IV.20)$$

IV.18 Le Courant du rotor

$$I_{211} = \frac{U_{n1}}{Z_n} \quad [A] \quad (IV.21)$$

IV.19 Le Courant du stator, Composante active et réactive

$$I_{a1} = I_{ca} + I_{211} \cdot \frac{R_n + R_{cc}}{Z_n} \cdot \left[\frac{(1 - \rho_1)^2}{(1 + \rho_1)^2} + \frac{X_{cc} \cdot 2 \cdot \rho_1}{Z_n \cdot (1 + \rho_1^2)} \right] \quad [A] \quad (IV.22)$$

$$I_{r1} = I_{0r} + I_{211} \cdot \frac{X_{cc}}{Z_n} \cdot \left[\frac{(1 - \rho_1)^2}{(1 + \rho_1)^2} - \frac{R_{cc} + R_n}{Z_n} \cdot \frac{2 \cdot \rho_1}{1 + \rho_1^2} \right] \quad [A] \quad (IV.23)$$

$$I_1 = \sqrt{I_{a1}^2 + I_{r1}^2} \quad [A] \quad (IV.24)$$

IV.20 Le facteur de puissance

$$\cos \phi = \frac{I_{a1}}{I_1} \quad (IV.25)$$

IV.21 La densité de courant nominal statorique

$$J_{1n} = \frac{I_1}{N_{elt1} \cdot S_{elt1}} \quad [A/mm^2] \quad (IV.26)$$

IV.22 Le courant de la barre rotorique

$$I_b = I_{211} \cdot \frac{2 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot k_{enr2} \cdot (1 + \sigma_1) \cdot \sqrt{1 + \rho_1^2}}{Z_2 \cdot k_{ob}} \quad [A] \quad (IV.27)$$

IV.23 La densité de courant de la barre

$$J_b = \frac{I_b}{S_{en2}} \quad [A/mm^2] \quad (IV.28)$$

IV.24 Le courant dans l'anneau

$$I_{an} = \frac{I_b}{k_{red2}} \quad [A] \quad (IV.29)$$

IV.25 Les Pertes électriques dans le stator et le rotor

Elles constituent les pertes par effet joule dissipées dans l'enroulement statorique et la cage rotorique. Elles sont proportionnelles au carré des courants qui circulent dans ces enroulements

$$p_{\text{él1}} = m_1 \cdot I_1^2 \cdot R_{11} \quad [\text{W}] \quad (\text{IV.30})$$

$$p_{\text{él2}} = m_2 \cdot I_{211}^2 \cdot R_{211} \quad [\text{W}] \quad (\text{IV.31})$$

m_1 : nombre de phase statorique

m_2 : nombre de phase rotorique

IV.26 La somme des pertes

$$p_{\Sigma} = p_{\text{él1}} + p_{\text{él2}} + p_{\text{c}\Sigma} + p_{\text{m}\Sigma} + p_{\text{sno}} \quad [\text{W}] \quad (\text{IV.32})$$

IV.27 La puissance absorbée

$$P_1 = P_n \cdot 10^3 + p_{\Sigma} \quad [\text{W}] \quad (\text{IV.33})$$

IV.28 Le rendement

$$\eta_n = 1 - \frac{p_{\Sigma}}{P_1} \quad (\text{IV.34})$$

IV.29 Le rapport du couple maximale sur le couple nominale :

$$C_{\text{maxno}} = \frac{m_1 \cdot U_{n1}^2 (1 - g_n)}{2 \cdot R_m \cdot P_n \cdot 10^3} \quad (\text{IV.35})$$

Dimensionnement du stator

K_e	Facteur de majoration	$K_e := 0.97$
P_n	Puissance nominale	$P_n := 7.5 \quad (\text{Kw})$
$m1$	Nombre de phase	$m1 := 3$
p	Nombre de pole	$p := 2$
f	la fréquence de réseau d'alimentation	$f := 50 \quad (\text{Hz})$
U_n	la tension simple de la machine	$U_n := 220 \quad (\text{v})$
	Le rendement nominal	$\eta_n := 0.9$
$\cos(\Phi_n)$	Le facteur de puissance	$\cos(\Phi_n) := 0.87$
		$\Phi_n := \arccos(0.87)$
		$\Phi_n = 0.516$

La puissance électromagnétique :

$$P_e := K_e \cdot \frac{P_n \cdot 10^3}{\eta_n \cdot \cos(\Phi_n)} = 9.291 \times 10^3$$

$$P_e = 9.291 \times 10^3 \quad (\text{w})$$

La longueur virtuelle de l'induit :

α_i	Le coefficient de recouvrement polaire	$\alpha_i := 0.64$
K_f	Le coefficient de la forme:	$K_f := 1.11$
n	La vitesse de synchronisme	$n := 1500 \quad \left(\frac{\text{tr}}{\text{mn}} \right)$
A_1	La charge linéaire	$A_1 := 220 \quad \left(\frac{\text{A}}{\text{m}} \right)$
B_δ	Induction dans l'entrefer	$B_\delta := 0.79 \quad (\text{T})$
$Z1$	Nombre d'encoche statorique	$Z1 := 36$
$D_{\text{ext}1}$	Diamètre extérieur	$D_{\text{ext}1} := 233 \quad (\text{mm})$

Le diamètre intérieur de stator :

$$KD := 0.6781$$

$$D1 := KD \cdot D_{\text{ext}1} - 5 = 153 \quad (\text{mm})$$

Nombre d'encoche par pole et par phase :

$$q1 := \frac{Z1}{2 \cdot p \cdot m1}$$

$$q1 = 3$$

$$K_{d1} := \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m1}\right)}{q1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot q1 \cdot m1}\right)}$$

$$K_{d1} = 0.96$$

$$\epsilon r1 := \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}$$

$$\epsilon r := \epsilon r1_0$$

$$y1 := \frac{Z1}{2p} - \epsilon r$$

$$y1 = 9$$

$$\tau := \frac{Z1}{2p}$$

$$\tau = 9$$

$$\beta := \frac{y1}{\tau}$$

$$\beta = 1$$

$$K_{R1} := \sin\left(\frac{\beta \pi}{2}\right)$$

$$K_{R1} = 1$$

$$K_{\text{enr}1} := K_{R1} \cdot K_{d1}$$

$$K_{\text{enr}11} := 0.94$$

$$L_i := \frac{8.2 \cdot 10^7 \cdot P_e}{K_{\text{enr}11} \cdot A_1 \cdot B_{\delta l} \cdot D1^2 \cdot n}$$

$$L_i = 132.811$$

$$(\text{mm})$$

Le coefficient de longueur :

$$\lambda := \frac{L_i}{D1}$$

$$\lambda = 0.868$$

Le pas polaire en nombre d'encoches:

$$\tau_p := \frac{Z_1}{2 \cdot p}$$

$$\tau_p = 9$$

Le pas polaire en mm :

$$\tau_{p1} := \frac{\pi \cdot D_1}{2 \cdot p}$$

$$\tau_{p1} = 120.166 \quad (\text{mm})$$

Le pas dentaire:

$$t_1 := \frac{\pi \cdot D_1}{Z_1}$$

$$t_1 = 13.352 \quad (\text{mm})$$

Le courant nominal:

$$Un1 := \begin{pmatrix} 220 \\ 380 \\ 660 \end{pmatrix}$$

$$Un1 := Un1_0$$

$$Un1 := 220$$

$$I_{n1} := \frac{P_n \cdot 10^3}{m_1 \cdot \eta_n \cdot Un1 \cdot \cos(\Phi_n)}$$

$$I_{n1} = 14.513 \quad (\text{A})$$

Le flux utile :

$$\Phi_1 := \frac{B_{\delta l} \cdot D_1 \cdot L_i \cdot 10^{-6}}{p}$$

$$\Phi_1 = 8.026 \times 10^{-3} \quad (\text{web})$$

Le nombre de spires d'une voie parallèle :

$$W_{11} := \frac{K_e \cdot U_n \cdot 50}{222 K_{enr1} \cdot \Phi_1 \cdot f}$$

$$W_{11} = 124.779$$

Nombres de conducteurs effectifs dans une encoche :

$$a_1 : \text{Nombre de voies parallèles}$$

$$a_1 := 1$$

$$N_{\text{eff}} := \frac{a_1 \cdot W_{11}}{p \cdot q_1}$$

$$N_{\text{eff}} = 20.796$$

$$\text{round}(N_{\text{eff}}) = 21$$

$$W_1 := \frac{\text{round}(N_{\text{eff}}) \cdot p \cdot q_1}{a_1}$$

$$W_1 = 126$$

$$\Phi := \Phi_1 \cdot \frac{W_{11}}{W_1}$$

$$\Phi = 7.949 \times 10^{-3} \quad (\text{web})$$

$$B_{\delta} := B_{\delta 1} \cdot \frac{W_{11}}{W_1}$$

$$B_{\delta} = 0.782 \quad (\text{T})$$

$$A_1 := \frac{10 \cdot \text{round}(N_{\text{eff}}) \cdot Z_1 \cdot I_{n1}}{\pi \cdot D_1 \cdot a_1}$$

$$A_1 = 228.264$$

Angle électrique :

$$\gamma := \frac{p \cdot 360}{Z_1}$$

$$\gamma = 20$$

Section effective de conducteur :

$$J_1 \quad \text{Densité de courant} \quad J_1 := 4 \left(\frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \right)$$

$$S_{\text{eff}1} := \frac{I_{n1}}{a_1 \cdot J_1}$$

$$S_{\text{eff}1} = 3.628 \quad (\text{mm}^2)$$

$$d_{\text{iso}1} := 1.3 \bar{z}$$

$$d_{\text{nu}} := 1.3 \bar{z} \quad (\text{mm})$$

La section élémentaire :

$$N_{\text{elt}1} \quad \text{Nombre de conducteurs élémentaire :} \quad N_{\text{elt}1} := 3$$

$$S_{\text{elt}1} := \frac{S_{\text{eff}1}}{N_{\text{elt}1}}$$

$$S_{\text{elt}1} = 1.209 \quad (\text{mm}^2)^{74}$$

Largeur de la dent :

$$B_{z1} := 1.75 \div 1.95$$

$$B_{z1} := 1.85 \quad (T)$$

Coefficient de forme :

$$K_{fer} := 0.97$$

$$b_{z1} := \frac{t_1 \cdot B_{\delta}}{K_{fer} \cdot B_{z1}}$$

$$b_{z1} = 5.821 \quad (mm)$$

Hauteur du dos du stator :

$$B_{c1} := 1.5 \div 1.65$$

$$B_{c1} := 1.65 \quad (T)$$

$$h_{c1} := \frac{\Phi \cdot 10^6}{2 \cdot L_i \cdot K_{fer} \cdot B_{c1}}$$

$$h_{c1} = 18.697 \quad (mm)$$

Le coefficient de recouvrement polaire :

$$\alpha_i := 0.64$$

Hauteur de la dent :

$$h_{z1} := 0.5(D_{ext1} - D1) - h_{c1}$$

$$h_{z1} = 21.303 \quad (mm)$$

La largeur minimale de l'encoche:

$$b_{en11} := \frac{\pi \cdot (D1 + 0.2 \cdot h_{z1})}{Z1} - b_{z1}$$

$$b_{en11} = 7.903 \quad (mm)$$

La largeur maximale de l'encoche :

$$b_{en12} := \frac{\pi \cdot (D1 + 2 \cdot h_{z1})}{Z1} - b_{z1}$$

$$b_{en12} = 11.249 \quad (mm)$$

La hauteur de la clavette :

$$h_{k1} := 0.6 \quad (mm)$$

$$b_{f1} := 3.5 \quad (mm)$$

La hauteur de l'encoche :

$$h_{f1} := 0.5 \quad (\text{mm})$$

$$h_{enc1} := h_{z1} - (h_{k1} + h_{f1}) \quad h_{enc1} = 20.203 \quad (\text{mm})$$

La section de l'encoche :

$$b_{is} := 0.25 \quad (\text{mm})$$

$$S_{enc1} := 0.5(b_{en11} + b_{en12}) \cdot (h_{enc1} - h_{f1}) - \frac{b_{en12} - b_{f1}}{2} \quad S_{enc1} = 184.799 \quad (\text{mm}^2)$$

$$S_{is} := b_{is} \cdot (b_{en11} + b_{en12} + 2 \cdot h_{enc1}) + 0.5b_{en11} + 0.75b_{en12} \quad S_{is} = 27.278 \quad (\text{mm}^2)$$

La section occupée par les conducteurs:

$$S_{ee1} := S_{enc1} - S_{is} \quad S_{ee1} = 157.522 \quad (\text{mm}^2)$$

Le coefficient de remplissage de l'encoche :

$$K_{rem} := \frac{N_{elt1} \cdot \text{round}(N_{eff}) \cdot d_{iso1}^2}{S_{ee1}} \quad K_{rem} = 0.707$$

Dimensionnement du rotor

Épaisseur de l'entrefer $\delta_e := 0.35$

Le diamètre extérieur du rotor :

$$D2 := D1 - 2 \cdot \delta_e \quad D2 = 152.3 \quad (\text{mm})$$

Coefficient oblique :

$$\beta_{ob} := 1$$

Nombre d'encoche rotorique :

$$Z2 := 34$$

Pas dentaire :

$$t_2 := \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} \quad t_2 = 14.072 \quad (\text{mm})$$

Le pas polaire en nombre d'encoche:

$$\tau_p := \frac{Z_2}{2 \cdot p} \quad \tau_p = 8.5$$

Le pas polaire en mm:

$$\tau_{p2} := \frac{\pi \cdot D_2}{2 \cdot p} \quad \tau_{p2} = 119.616 \quad (\text{mm})$$

La hauteur de la culasse rotorique :

B_{c2} Induction de la culasse rotorique

$$B_{c2} := 1.20 \quad (\text{T})$$

$$h_{c2} := 0.5 \frac{\alpha_i \cdot \tau_{p2} \cdot B_\delta}{K_{\text{fer}} \cdot B_{c2}} \quad h_{c2} = 25.727 \quad (\text{mm})$$

La hauteur de la dent rotorique :**Le diamètre intérieur du rotor :**

$$D_{\text{int}2} := 0.25 \cdot D_2 \quad D_{\text{int}2} = 38.075 \quad (\text{mm})$$

$$h_{z2} := 0.5 (D_2 - D_{\text{int}2}) - h_{c2} \quad h_{z2} = 31.386 \quad (\text{mm})$$

Calcul de l'encoche rotorique:**La largeur moyenne de la dent :**

$$B_{z2} := 1.85 \quad (\text{T})$$

$$b_{z2} := \frac{t_2 \cdot B_\delta}{K_{\text{fer}} \cdot B_{z2}} \quad b_{z2} = 6.135 \quad (\text{mm})$$

La hauteur de la fente de l'encoche rotorique :

$$h_{f2} := 0.5 \div 0.7 \quad h_{f2} := 0.5 \quad (\text{mm})$$

La largeur minimale de l'encoche rotorique :

$$b_{enc22} := \frac{\pi \cdot (D_{int2} + 2 \cdot h_{c2})}{Z2} - b_{z2}$$

$$b_{enc11} = 2.137 \quad (\text{mm})$$

La largeur maximale de l'encoche rotorique :

$$b_{enc21} := \frac{\pi \cdot (D_{int2} + 2 \cdot h_{z2})}{Z2} - b_{z2}$$

$$b_{enc12} = 3.183 \quad (\text{mm})$$

La cage rotorique :

$$h_{enc2} := h_{z2} - (h_{f2})$$

$$h_{enc2} = 30.671 \quad (\text{mm})$$

Section de la barre :

$$S_{en2} := \frac{b_{enc22} + b_{enc21}}{2} \cdot h_{enc2}$$

$$S_{en2} = 81.591 \quad (\text{mm}^2)$$

Dimensionnement de l'anneau de court-circuit:**La hauteur de l'anneau :**

$$h_{an} := (1.1 \div 1.25) \cdot h_{z2}$$

$$h_{an} := 1.2 \cdot h_{z2}$$

$$h_{an} = 37.663 \quad (\text{mm})$$

Section de l'anneau :

$$S_{an} := (0.35 \div 0.45) \cdot \frac{Z2 \cdot S_{en2}}{2 \cdot p}$$

$$S_{an} := 0.4 \cdot \frac{Z2 \cdot S_{en2}}{2 \cdot p}$$

$$S_{an} = 277.41 \quad (\text{mm}^2)$$

La largeur de l'anneau :

$$L_{an} := \frac{S_{an}}{h_{an}} \quad L_{an} = 7.366 \quad (\text{mm})$$

Le diamètre moyen intérieur de l'anneau :

$$D_{an} := D_2 - h_{an} \quad D_{an} = 114.637 \quad (\text{mm})$$

CALCUL DU CIRCUIT MAGNETIQUE**L'entrefer :**

$$K\delta_1 := 1 + \frac{b_{f1}}{t_1 - b_{f1} + \frac{5 \cdot \delta_e \cdot t_1}{b_{f1}}} \quad K\delta_1 = 1.212$$

$$b_{f2} := 1.5 \quad (\text{mm})$$

$$K\delta_2 := 1 + \frac{b_{f2}}{t_2 - b_{f2} + \frac{5 \cdot \delta_e \cdot t_2}{b_{f2}}} \quad K\delta_2 = 1.052$$

$$K\delta := K\delta_1 \cdot K\delta_2 \quad K\delta = 1.274$$

$$B_{\delta} := 0.912$$

$$F_{\delta} := 0.8 K\delta \cdot B_{\delta} \cdot \delta_e \cdot 10^3 \quad F_{\delta} = 325.448 \quad (\text{A})$$

Calcul du circuit magnétique statorique :**Fmm dans la dent du stator :**

$$B_{z1} = 1.85 \quad (\text{T}) \quad \text{donc} \quad H_{z1} := 1770$$

La longueur moyenne des lignes dans la culasse statorique :

$$L_{c1} := \frac{\pi \cdot (D_{ext1} - h_{c1})}{2 \cdot p} \quad L_{c1} = 168.313 \quad (\text{mm})$$

Fmm dans la culasse statorique :

$$t_{13} := \left(D1 + \frac{2}{3} \cdot h_{z1} \right) \cdot \frac{\pi}{Z1} \quad t_{13} = 14.591$$

$$K_{z13} := \frac{t_{13}}{b_{z1} \cdot K_{fer}} \quad K_{z13} = 2.584$$

$$B_{c1} = 1.65 \quad (\text{T}) \quad \text{donc} \quad H_{c1} := 946 \quad \left(\frac{\text{A}}{\text{m}} \right)$$

H_{c1} : Intensité du champ dans la culasse

$$F_{c1} := H_{c1} \cdot L_{c1} \cdot 10^{-3} \quad F_{c1} = 159.224 \quad (\text{A})$$

Circuit magnétique rotorique :**Induction dans la dent :**

$$B_{z2} = 1.85 \quad (\text{T})$$

Fmm dans la dent :**Intensité du champ dans la dent rotorique :**

$$H_{z2} := 1150 \quad \left(\frac{\text{A}}{\text{m}} \right)$$

$$F_{z2} := H_{z2} \cdot h_{z2} \cdot 10^{-3} \quad F_{z2} = 36.094 \quad (\text{A})$$

La largeur moyenne des lignes dans la culasse rotorique :

$$L_{c2} := \frac{\pi \cdot (D_{int2} + h_{c2})}{4 \cdot p} \quad L_{c2} = 25.055 \quad (\text{mm}) \quad 80$$

Induction dans la culasse du rotor :

$$B_{c2} := \frac{0.5 \alpha_i \tau_{p2} B_{\delta}}{K_{fer} \cdot h_{c2}} \quad B_{c2} = 1.399 \quad (T)$$

Fmm dans la culasse rotorique :

$$H_{c2} := 262 \left(\frac{A}{m} \right)$$

$$F_{c2} := H_{c2} \cdot L_{c2} \cdot 10^{-3} \quad F_{c2} = 6.564 \quad (A)$$

Fmm total par paire de pole :

$$F := (F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2}) \cdot 2 + F_{c2} + F_{c2} \quad F = 811.624 \quad (A)$$

Coefficient de saturation des dents :

$$K_{\mu z} := \frac{F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2}}{F_{\delta}} \quad K_{\mu z} = 1.227$$

Coefficient de saturation :

$$K_{\mu} := \frac{F}{2 \cdot F_{\delta}} \quad K_{\mu} = 1.247$$

Le courant magnétisant :

$$I_{\mu} := \frac{p \cdot F}{0.9 m_1 W_1 \cdot K_{enr1}} \quad I_{\mu} = 4.971 \quad (A)$$

Le courant en U.R :

$$I_{ur} := \frac{I_{\mu}}{I_{n1}} \quad I_{ur} = 0.343 \quad (A)$$

La force électromagnétique à vide:

$$E := K_e \cdot U_{n1}$$

$$E = 213.4 \quad (v)$$

La réactance de magnétisation :

$$X_m := \frac{K_e \cdot U_{n1}}{I_\mu} \quad X_m = 42.926 \quad (\Omega)$$

La réactance de magnétisation U R :

$$X_{mur} := \frac{X_m \cdot I_{n1}}{U_{n1}} \quad X_{mur} = 2.832 \quad (\Omega)$$

Paramètres du stator**Résistance active :**

$$y1_{moy} := 9$$

$$T := 20^{\circ}\text{C} \quad \rho_{cu} := 0.017210^{-6} \quad \left(\frac{\Omega}{m} \right)$$

$$b1_{moy} := \frac{\pi \cdot (D1 + h_{z1}) y1_{moy}}{Z1} \quad b1_{moy} = 136.897 \quad (\text{mm})$$

$$L_{f1} := (1.16 + 0.14p) \cdot b1_{moy} + 15 \quad L_{f1} = 212.132 \quad (\text{mm})$$

$$Lw1 := 2 \cdot (L_i + L_{f1}) \quad Lw1 = 689.887 \quad (\text{mm})$$

$$R1 := \rho_{cu} \cdot \frac{W_1 \cdot Lw1 \cdot 10^3}{a_1 \cdot N_{elt1} \cdot S_{elt1}} \quad R1 = 0.412 \quad (\Omega)$$

Réactance active U R :

$$R1_{ur} := R1 \cdot \frac{I_{n1}}{U_{n1}} \quad R1_{ur} = 0.027 \quad (\Omega)$$

Réactance de fuite d'encoche :

$$h_{f1} = 0.5$$

$$K_{\beta 1} := 1 \quad \text{pour un enroulement concentrique}$$

$$K_{\beta 11} := 1$$

$$\lambda_{enc1} := \frac{h_{z1}}{3 \cdot b_{enc12}} \cdot K_{\beta 1} + \left(\frac{h_{f1}}{b_{f1}} + \frac{3 \cdot h_{k1}}{b_{enc12} + 2 \cdot b_{f1}} + \frac{h_{k1}}{b_{enc12}} \right) \cdot K_{\beta 11}$$

$$\lambda_{enc1} = 2.739$$

$$X_{enc1} := \frac{1.58 L_i \cdot f \cdot W_1^2}{p \cdot q_1 \cdot 10^8} \cdot \lambda_{enc1}$$

$$X_{enc1} = 0.76 \quad (\Omega)$$

La réactance de fuite différentielle :

$$K_{f1} := 1 - \left(\frac{0.033 b_{f1}^2}{\delta_e \cdot t_1} \right)$$

$$K_{f1} = 0.913$$

$$K_{de1} := 0.0141$$

$$K_{rr1} := 0.91$$

$$\lambda_{1d} := \frac{0.9 (t_1 \cdot K_{enr1})^2 \cdot K_{f1} \cdot K_{rr1} \cdot K_{de1}}{K \delta \cdot \delta_e}$$

$$\lambda_{1d} = 3.884$$

$$X_{d1} := \frac{1.58 L_i \cdot f \cdot W_1^2}{p \cdot q_1 \cdot 10^8} \cdot \lambda_{1d}$$

$$X_{d1} = 1.078 \quad (\Omega)$$

La réactance de fuite frontale :

$$q_1 := \frac{Z_2}{p} = 17$$

$$q_1 = 17$$

$$\lambda_{1f} := 0.34 \frac{q_1 \cdot (L_{f1} - 0.64 \beta \cdot \tau_{p1})}{L_i}$$

$$\lambda_{1f} = 1.039$$

$$X_{1f} := \frac{1.58 L_i \cdot f \cdot W_1^2}{p \cdot q_1 \cdot 10^8} \cdot \lambda_{1f}$$

$$X_{1f} = 0.288 \quad (\Omega)$$

La réactance totale :

$$\lambda_1 := \lambda_{enc1} + \lambda_{1d} + \lambda_{1f}$$

$$\lambda_1 = 7.661$$

$$X_1 := \frac{1.58 f \cdot L_i \cdot W_1^2}{p \cdot q_1 \cdot 10^8} \cdot \lambda_1$$

$$X_1 = 0.375 \quad (\Omega)$$

$$X_{1ur} := X_1 \cdot \frac{I_{n1}}{U_{n1}} \quad X_{1ur} = 0.025 \quad (\Omega)$$

Paramètre du rotor

Résistance active de la barre:

$$T := 20^\circ\text{C} \quad \rho_{AL}(T) := 36.6 \cdot 10^{-9} \quad (\text{ohm} \cdot \text{m})$$

$$K_{dep} := 0.915$$

$$S_b := S_{en2} = 81.591 \quad (\text{mm}^2)$$

$$R_b := \rho_{AL}(T) \cdot \frac{L_i \cdot 10^3}{S_b} \quad R_b = 5.958 \times 10^{-5} \quad (\Omega)$$

Coefficient de réduction du courant de l'anneau au courant de la barre :

$$K_{red2} := 2 \cdot \pi \cdot \frac{p}{Z_2} \quad K_{red2} = 0.37$$

Résistance de l'anneau ramenée au courant de la barre :

$$R_{an} := \frac{\rho_{AL}(T) \cdot 2 \cdot \pi \cdot D_{an} \cdot 10^3}{Z_2 \cdot S_{an} \cdot K_{red2}^2} \quad R_{an} = 2.046 \times 10^{-5} \quad (\Omega)$$

$$\alpha_{ob} := 2 \cdot p \cdot t_1 \cdot \frac{\beta_{ob}}{D_1} \quad \alpha_{ob} = 0.349$$

Coefficient de réduction de la résistance de l'enroulement du rotor à l'enroulement du stator :

$$K_{red1} := \frac{4 \cdot m_1}{Z_1} \cdot \left[\left(\frac{W_1 \cdot K_{enr1}}{K_{ob}} \right)^2 \right] \quad K_{red1} = 4.914 \times 10^3$$

Résistance active de l'enroulement du rotor ramenée à l'enroulement du stator :

$$R_{21} := K_{red1} \cdot (R_b + R_{an}) \quad R_{21} = 0.393 \quad (\Omega)$$

Résistance active de l'enroulement du rotor ramenée à l'enroulement du stator en ur:

$$R_{21ur} := R_{21} \cdot \frac{I_{n1}}{U_{n1}} \quad R_{21ur} = 0.026 \quad (\Omega)$$

Le courant dans la barre :

$$I_{n2} := \frac{2 \cdot W_1 \cdot K_{enr1} \cdot P_n}{U_{n1} \cdot Z_1} \cdot \frac{(0.2 + 0.8 \cos(\Phi_n)) \cdot 10^3}{\eta_n \cdot \cos(\Phi_n)} \quad I_{n2} = 262.097 \quad (A)$$

$$q_2 := \frac{Z_2}{2 \cdot p \cdot m_1} \quad q_2 = 2.833$$

$$K_{d2} := 0.012$$

$$\lambda_{2d} := \frac{0.9 t_2 \cdot \left(\frac{Z_2}{6 \cdot p} \right)^2 \cdot K_{d2}}{\delta_e \cdot K_\delta} \quad \lambda_{2d} = 2.735$$

$$\lambda_{f2} := \frac{2.3 D_{an}}{Z_2 \cdot L_f \cdot K_{red2}^2} \cdot \log \left[\frac{4.7 D_{an}}{2 \cdot (h_{an} + L_{an})} \right]$$

$$\lambda_{f2} = 0.332$$

$$\beta_{ob2} := \beta_{ob} \cdot \frac{t_1}{t_2} \quad \beta_{ob2} = 0.949$$

$$\lambda_{ob} := \frac{t_2 \cdot \beta_{ob2}}{9.5 \delta_e \cdot K_\delta \cdot K_\mu} \quad \lambda_{ob} = 2.527$$

$$\lambda_{enc2} := \frac{h_{enc2}}{3 \cdot (b_{enc11} + b_{enc12})} + \left(\frac{h_{f2}}{b_{f2}} \right) \quad \lambda_{enc2} = 2.398$$

$$K_{red1} = 4.914 \times 10^3$$

La réactance totale rotorique :

$$\lambda_2 := \lambda_{enc2} + \lambda_{2d} + \lambda_{f2} + \lambda_{ob}$$

$$\lambda_2 = 7.992$$

$$X_2 := 7.9 \cdot f \cdot \lambda_2 \cdot L_f \cdot 10^{-9}$$

$$X_2 = 4.193 \times 10^{-4} \quad (\Omega)$$

$$X_{21} := K_{red1} \cdot X_2$$

$$X_{21} = 2.06 \quad (\Omega)$$

$$X_{21ur} := X_{21} \cdot \frac{I_{n1}}{U_{n1}}$$

$$X_{21ur} = 0.136 \quad (\Omega)$$

Coefficient de dispersion statorique :

$$\sigma_1 := \frac{X_1}{X_m}$$

$$\sigma_1 = 8.744 \times 10^{-3}$$

Coefficient des résistances statoriques :

$$m_T := 1.22$$

$$\rho_1 := \frac{R_1 \cdot m_T}{X_1 + X_m}$$

$$\rho_1 = 0.012$$

Les résistances transformées :

$$R_{11} := m_T \cdot R_1$$

$$R_{11} = 0.503 \quad (\Omega)$$

$$R_{211} := m_T \cdot R_{21} \cdot (1 + \sigma_1)^2 \cdot (1 + \rho_1^2)$$

$$R_{211} = 0.488 \quad (\Omega)$$

$$X_{211} := m_T \cdot X_{21} \cdot (1 + \sigma_1)^2 \cdot (1 + \rho_1^2)$$

$$X_{211} = 2.558 \quad (\Omega)$$

$$X_{11} := X_1 \cdot (1 + \sigma_1) \cdot \left(1 + R_1 \cdot \frac{\rho_1}{X_1} \right)$$

$$X_{11} = 0.383 \quad (\Omega)$$

Régime à vide et nominal, Calcul des pertes**La composante réactive du courant statorique pour une vitesse synchrone :**

$$I_{0r} := \frac{U_{n1}}{X_m \cdot (1 + \sigma_1) \cdot (1 + \rho_1^2)}$$

$$I_{0r} = 5.08 \quad (A)$$

Pertes électriques dans l'enroulement statorique pour la vitesse synchrone :

$$P_{e1} := m1 \cdot I_0 r^2 \cdot R11 \cdot (1 + \rho1^2) \quad P_{e1} = 38.926 \quad (w)$$

La masse des dents pour une encoche trapézoïdale :

$$mz1 := 7.8 \cdot Z1 \cdot b_{z1} \cdot h_{enc1} \cdot L_I \cdot K_{fer} \cdot 10^{-6} \quad mz1 = 4.254 \quad (kg)$$

Pertes magnétiques dans les dents statoriques :

$$P_{fz1} := 4.4 B_{z1}^2 \cdot mz1 \quad P_{fz1} = 64.064 \quad (w)$$

La masse du dos du stator pour une encoche :

$$mc1 := 7.8 \pi \cdot (D_{ext1} - h_{c1}) \cdot h_{c1} \cdot L_I \cdot K_{fer} \cdot 10^{-6} \quad mc1 = 12.649 \quad (kg)$$

Pertes magnétiques dans le dos du stator :

$$P_{fc1} := 4.4 B_{c1}^2 \cdot mc1 \quad P_{fc1} = 151.521 \quad (w)$$

La somme des pertes dans le noyau du stator y compris les pertes :

$$P_{c\Sigma} := P_{fz1} \cdot \left[1 + 2 \cdot (K\delta - 1) \cdot \left(\frac{t_1}{10} \right)^{0.5} \right] + P_{fc1} \quad P_{c\Sigma} = 256.219 \quad (w)$$

Pertes mécaniques pour IP44 et IC0151, pour 2P=4 :

$$km0 := 1$$

$$P_{m\Sigma} := km0 \cdot \left(\frac{n}{1000} \right)^2 \cdot \left(\frac{D_{ext1}}{100} \right)^4 \quad P_{m\Sigma} = 66.314 \quad (w)$$

Composante active du courant à vide :

$$I_{0a} := \frac{P_{e1} + P_{c\Sigma} + P_{m\Sigma}}{m1 \cdot U_{n1}} \quad I_{0a} = 0.548 \quad (A)$$

Le courant à vide :

$$I_0 := \sqrt{I_0 r^2 + I_{0a}^2} \quad I_0 = 5.109 \quad (A)$$

Facteur de puissance à vide :

$$\cos\phi_0 := \frac{I_{0a}}{I_0}$$

$$\cos\phi_0 = 0.107$$

Paramètres en régime nominal**Résistance active en CC :**

$$R_{cc} := R_1 + R_{211}$$

$$R_{cc} = 0.9 \quad (\Omega)$$

Réactance en CC :

$$X_{cc} := X_1 + X_{211}$$

$$X_{cc} = 2.933 \quad (\Omega)$$

Impédance Zcc :

$$Z_{cc} := \sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2}$$

$$Z_{cc} = 3.069 \quad (\Omega)$$

Pertes supplémentaires en régime nominale :

$$P_{sno} := 0.005 P_n \cdot \frac{10^3}{\eta_n}$$

$$P_{sno} = 41.667 \quad (w)$$

Puissance mécanique du moteur :

$$P_{mec} := P_n \cdot 10^3 + P_{m\Sigma} + P_{sno}$$

$$P_{mec} = 7.608 \times 10^3 \quad (w)$$

Résistance équivalente du schéma équivalent :

$$R_n := \frac{m_1 \cdot U_{n1}^2}{2 \cdot P_{mec}} - R_{cc} + \sqrt{\left(\frac{m_1 \cdot U_{n1}^2}{2 \cdot P_{mec}} - R_{cc} \right)^2 - Z_{cc}^2}$$

$$R_n = 16.721 \quad (\Omega)$$

Impédance totale :

$$Z_n := \sqrt{(R_n + R_{cc})^2 + X_{cc}^2}$$

$$Z_n = 17.864 \quad (\Omega)$$

Vérification de calcul de Rn :

$$\frac{R_n}{Z_n^2} = 0.052$$

$$\frac{P_{mec}}{m_1 \cdot U_{n1}^2} = 0.052$$

Glissement :

$$g_n := \frac{1}{1 + \frac{R_n}{R_{211}}}$$

$$g_n = 0.028$$

Composante active du courant statorique pour une rotation synchrone :

$$I_{ca} := \frac{P_{e1} + P_{m\Sigma}}{m_1 \cdot U_{n1}}$$

$$I_{ca} = 0.159 \quad (A)$$

Courant du rotor :

$$I_{211} := \frac{U_{n1}}{Z_n}$$

$$I_{211} = 12.315 \quad (A)$$

Courant du stator, composante active et réactive :

$$I_{a1} := I_{ca} + I_{211} \cdot \left[\frac{R_n + R_{cc}}{Z_n} \cdot \frac{(1 - \rho_1)^2}{(1 + \rho_1)^2} + \frac{X_{cc} \cdot 2\rho_1}{Z_n \cdot (1 + \rho_1^2)} \right]$$

$$I_{a1} = 11.803 \quad (A)$$

$$I_{r1} := I_{0r} + I_{211} \cdot \frac{X_{cc}}{Z_n} \cdot \left[\frac{(1 - \rho_1)^2}{(1 + \rho_1)^2} - \frac{R_n + R_{cc}}{Z_n} \cdot \frac{2 \cdot \rho_1}{1 + \rho_1^2} \right]$$

$$I_{r1} = 6.964 \quad (A)$$

$$I_1 := \sqrt{I_{a1}^2 + I_{r1}^2}$$

$$I_1 = 13.704 \quad (A)$$

$$\cos \phi := \frac{I_{a1}}{I_1}$$

$$\cos \phi = 0.861$$

Charge linéaire nominale :

$$A_n := \frac{10 \cdot I_1 \cdot \text{round}(N_{\text{eff}})}{a_1 \cdot t_1}$$

$$A_n = 215.548 \quad \left(\frac{A}{m} \right)$$

Densité nominale statorique :

$$j_{1n} := \frac{I_1}{N_{\text{elt1}} \cdot S_{\text{elt1}}}$$

$$j_{1n} = 3.777 \quad \left(\frac{A}{\text{mm}^2} \right)$$

Charge linéaire nominale rotorique :

$$K_{\text{enr2}} := 1$$

$$A2 := \frac{A_n \cdot I_{211} \cdot (1 + \sigma_1) \cdot \sqrt{1 + \rho_1^2} \cdot K_{\text{enr1}}}{I_1 \cdot K_{\text{enr2}} \cdot K_{\text{ob}}} \quad A2 = 188.3 \quad \left(\frac{\text{A}}{\text{m}} \right)$$

Courant de la barre rotorique :

$$I_b := I_{211} \cdot \frac{2 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot K_{\text{enr1}} \cdot (1 + \sigma_1) \cdot \sqrt{1 + \rho_1^2}}{Z_2 \cdot K_{\text{ob}}} \quad I_b = 266.202 \quad (\text{A})$$

Densité du courant de la barre :

$$j_b := \frac{I_b}{S_{\text{en2}}} \quad j_b = 3.263 \quad \left(\frac{\text{A}}{\text{mm}} \right)$$

Courant dans l'anneau :

$$I_{\text{an}} := \frac{I_b}{K_{\text{red2}}} \quad K_{\text{red2}} = 0.37 \quad I_{\text{an}} = 720.246 \quad (\text{A})$$

Pertes électriques dans le stator :

$$P_{\text{él1}} := m_1 \cdot I_1^2 \cdot R_{11} \quad P_{\text{él1}} = 283.261 \quad (\text{w})$$

$$P_{\text{él2}} := m_1 \cdot I_{211}^2 \cdot R_{211} \quad P_{\text{él2}} = 222.193 \quad (\text{w})$$

La somme des pertes :

$$P_{\Sigma} := P_{\text{él1}} + P_{\text{él2}} + P_{\text{c}\Sigma} + P_{\text{m}\Sigma} + P_{\text{sn0}} \quad P_{\Sigma} = 869.654 \quad (\text{w})$$

Puissance absorbée :

$$P_1 := P_n \cdot 10^3 + P_{\Sigma} \quad P_1 = 8.37 \times 10^3 \quad (\text{w})$$

Rendement :

$$\eta_n := 1 - \frac{P_{\Sigma}}{P_1}$$

$$\eta_n = 0.896$$

Vérification :

$$P_1 := m_1 \cdot I_{a1} \cdot U_n$$

$$P_1 = 7.79 \times 10^3 \quad (w)$$

$$P_2 := m_1 \cdot I_1 \cdot U_n \cdot \eta_n \cdot \cos(\Phi_n)$$

$$P_2 = 7.051 \times 10^3 \quad (w)$$

Calcul des caractéristiques de fonctionnement

$$P_2 := 0, 0.05 \cdot P_n \dots 1.25 \cdot P_n$$

$$P_{sno1}(P_2) := 0.005 \cdot P_2 \cdot \frac{10^3}{\eta_n}$$

$$P_{mec1}(P_2) := P_2 \cdot 10^3 + P_{m\Sigma} + P_{sno1}(P_2)$$

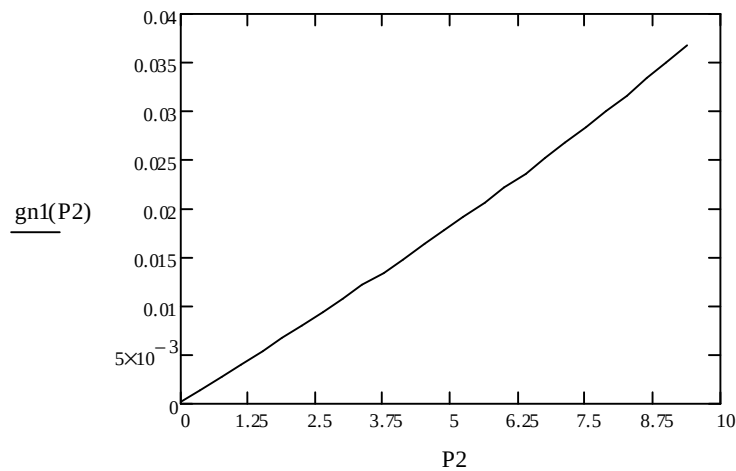
$$R_{n1}(P_2) := \frac{m_1 \cdot U_{n1}^2}{2 \cdot P_{mec1}(P_2)} - R_{cc} + \sqrt{\left(\frac{m_1 \cdot U_{n1}^2}{2 \cdot P_{mec1}(P_2)} - R_{cc} \right)^2 - Z_{cc}^2}$$

Impédance totale:

$$Z_{n1}(P_2) := \sqrt{(R_{n1}(P_2) + R_{cc})^2 + X_{cc}^2}$$

Vérification de calcul de Rn:**Glissement:**

$$gn1(P2) := \frac{1}{1 + \frac{Rn1(P2)}{R211}}$$

**Courbe A: le glissement en fonction de la puissance nominale****Courant du rotor :**

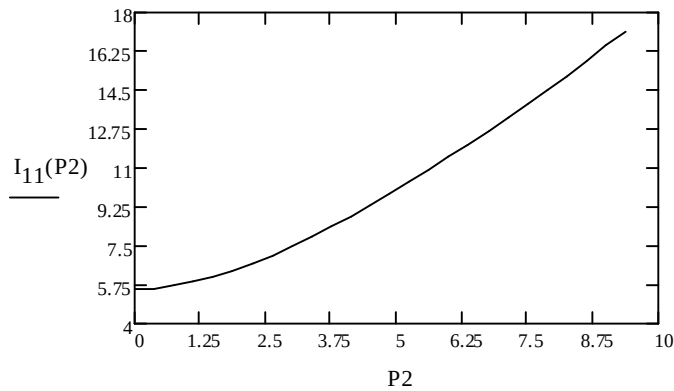
$$I_{211}(P2) := \frac{Un1}{Zn1(P2)}$$

Courant du stator, composante active et réactive:

$$I_{a11}(P2) := I_{ca} + I_{211}(P2) \cdot \left[\frac{Rn1(P2) + Rcc}{Zn1(P2)} \cdot \frac{(1 - \rho1)^2}{(1 + \rho1)^2} + \frac{Xcc \cdot 2\rho1}{Zn1(P2) \cdot (1 + \rho1^2)} \right]$$

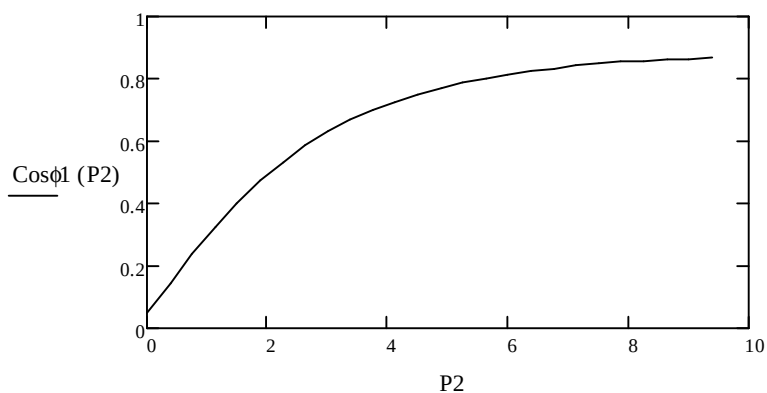
$$I_{r1}(P2) := I_{0r} + I_{211}(P2) \cdot \frac{Xcc}{Zn1(P2)} \cdot \left[\frac{(1 - \rho1)^2}{(1 + \rho1)^2} - \frac{Rn1(P2) + Rcc}{Zn1(P2)} \cdot \frac{2 \cdot \rho1}{1 + \rho1^2} \right]$$

$$I_{11}(P_2) := \sqrt{I_{a11}(P_2)^2 + I_{r11}(P_2)^2}$$



courbe B : le courant nominale en fonction de la puissance nominale

$$\cos\phi_1(P_2) := \frac{I_{a11}(P_2)}{I_{11}(P_2)}$$



Courbe C : le facteur de puissance en fonction de la puissance nominale

Pertes électriques dans le stator:

$$P_{\text{él}11}(P_2) := m_1 \cdot I_{11}(P_2)^2 \cdot R_{11}$$

$$P_{\text{él}21}(P_2) := m_1 \cdot I_{a11}(P_2)^2 \cdot R_{211}$$

La somme des pertes:

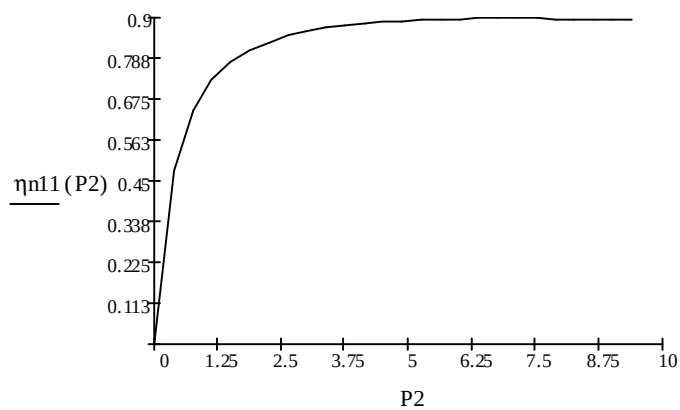
$$P_{\Sigma 1}(P_2) := P_{\text{él}11}(P_2) + P_{\text{él}21}(P_2) + P_{c\Sigma} + P_{m\Sigma} + P_{sno}$$

Puissance absorbée:

$$P_{11}(P_2) := P_2 \cdot 10^3 + P_{\Sigma 1}(P_2)$$

Rendement:

$$\eta_{n11}(P_2) := 1 - \frac{P_{\Sigma 1}(P_2)}{P_{11}(P_2)}$$

**Courbe D: le rendement en fonction de la puissance nominale**

Couple maximum :

$$k1\beta := 1$$

$$\lambda_{en1var} := \left[\left(\frac{3 \cdot h_{k1}}{b_{enc12} + b_{f1}} \right) + \frac{h_{f1}}{b_{f1}} \right] \cdot k1\beta \quad \lambda_{en1var} = 0.412$$

$$\lambda_{1var} := \lambda_{en1var} + \lambda_{1d} \quad \lambda_{1var} = 4.296$$

$$\lambda_{en2var} := \frac{h_{f2}}{b_{f2}} \quad \lambda_{en2var} = 0.476$$

$$\lambda_{2var} := \lambda_{en2var} + \lambda_{2d} \quad \lambda_{2var} = 3.211$$

$$X_{var} := X_{11} \cdot \frac{\lambda_{1var}}{\lambda_1} + X_{211} \cdot \frac{\lambda_{2var}}{\lambda_2} \quad X_{var} = 1.245 \quad (\Omega)$$

$$X_{con} := X_{11} \cdot \frac{\lambda_1 - \lambda_{1var}}{\lambda_1} + X_{211} \cdot \frac{\lambda_2 - \lambda_{2var}}{\lambda_2} \quad X_{con} = 1.634 \quad (\Omega)$$

Courant rotorique correspondant au couple maximum :

$$I_{11m1} := \frac{U_{n1}}{\sqrt{2 \cdot [R_{11}^2 + (X_{con} + 0.0825 \cdot X_{var})^2 + R_{11} \cdot (X_{con} + 0.0825 \cdot X_{var})]}}$$

$$I_{11m1} = 76.423 \quad (A)$$

$$I_{11m2} := I_{11m1} - \frac{1.24 \cdot 10^3 \cdot \delta e \cdot a_1 \cdot [R_{11} + 2 \cdot (X_{con} + 0.0825 \cdot X_{var}) \cdot X_{var}]}{2 \cdot \text{round}(N_{eff}) \cdot [R_{11}^2 + (X_{con} + 0.0825 \cdot X_{var})^2 + R_{11} \cdot (X_{con} + 0.0825 \cdot X_{var})]}$$

$$I_{11m2} = 64.382 \quad (A)$$

$$Z_m := \frac{U_{n1}}{I_{11} m_2}$$

$$Z_m = 3.417 \quad (\Omega)$$

$$Z_{infi} := 0.5 \cdot \left(\sqrt{R_{11}^2 + 2 \cdot Z_m^2} - R_{11} \right)$$

$$Z_{infi} = 2.303 \quad (\Omega)$$

$$R_m := Z_{infi} + R_{11}$$

$$R_m = 2.806 \quad (\Omega)$$

Rapport du couple max sur le couple nominal : $\frac{C_{max}}{C_n}$

$$C_{maxno} := \frac{m_1 \cdot U_{n1}^2 (1 - g_n)}{2 \cdot R_m P_n \cdot 10^3}$$

$$C_{maxno} = 3.352$$

Conclusion générale

La conception d'une machine électrique a besoin d'une longue et profonde étude, ainsi que des moyens et une certaine expérimentation.

Dans notre conception nous avons changé la forme de l'encoche rotorique, tout en gardant les dimensions de la machine standard

On a été ainsi conduit au rendement recherché dit optimal, on a bien minimisé les pertes électriques totales, et nous avons obtenu un meilleur couple de décrochage par rapport à la valeur du catalogue donné par l'ELECTRO-INDUSTRIES.

On dira enfin que le domaine de conception optimale des machines électrique est très vaste, et que l'amélioration du rendement des machines est un sujet d'actualité, nous estimons apporter un appui pour d'autre étude seront faite afin d'optimiser les machines asynchrones triphasées à cage en prenant en considération d'autre facteurs.

Bibliographie

[1].BOUCHARD.R.P.et OLIVIER.G. «Conception des moteurs asynchrones triphasés».Edition Ecole Polytechnique du CANADA.

[2].J.L .DALMASSO «Cours d'électrotechniques 1».Nouvelle Edition, augmentée de problème corrigés.

[3].Philippe Le BRUN Lycée Louis ARMAND.173 Bd de Strasbourg 94736 NOGENT Sur Marne «Technologie, choix et alimentation des machines asynchrones».

[4].BELASSEL.M.T«Cours Construction des machines asynchrones».

[5].BELASSEL.M.T«Etude des processus ondulatoire et des surtensions dans des moteurs asynchrones alimentent par des convertisseurs à semi-conducteur »Thèse de doctorat. Université de Tizi-Ouzou.2006.

[6].YELLES.K et BOUGHIAS.F. Optimisation du rendement d'une série de machines asynchrones triphasées à cage d'écureuil. Mémoire d'ingénieur. Université de Tizi-Ouzou .2005.