

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud MAMMARI de TIZI-OUZOU

Faculté de Génie Electrique et d'Informatique

Département d'Electrotechnique



MEMOIRE

De fin d'études

En vue de l'obtention du Diplôme d'ingénieur d'état en Electrotechnique

Option : Machines Electriques

Thème :

*Dimensionnement d'un moteur
asynchrone triphasé à cage d'écureuil*

Dirigé par :

M^r: C.BIROUCHE

M^{elle}: N.KICHOU

Réalisé par :

M^r: AMMAR Kamal

M^r: MELLAL Makhoulf

Promotion 2012/2013

Remerciements

Avant tout nous tenons à remercier dieu tout puissant qui nous a donné la force, la santé et qui nous a permis de persévérer tout au long de ces longues années.

Nous tenons à exprimer notre vive reconnaissance à tous ceux qui ont permis de prés ou de loin à l'aboutissement de ce modeste travail, et plus particulièrement à Monsieur Birouche. C notre promoteur.

Nous exprimons notre profonde gratitude à *M^{elle}* Kichou.N notre encadreur qui nous a accompagné tout au long de notre stage à Electro-Industries.

Toute notre respectueuse gratitude et nos remerciements les plus profonds vont à l'égard de tout le personnel de l'unité moteur d'Electro-Industries d'Azazga.

MELLAL Makhoulf et AMMAR Kamal

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A ma chère mère

A celle qui a souffert, sans me faire souffrir, qu'elle trouve dans ce mémoire le témoignage de ma reconnaissance et mon affection pour tous ses sacrifices.

A mon cher père

A l'homme que je dois tous, qu'il trouve ici toute ma reconnaissance et la récompense de tous ses sacrifices.

A mes chères sœurs

A qui je souhaite toutes les réussites et le bonheur le long de leurs vies.

A mon frère et sa femme

En témoignage de mon profond amour et respect. Sans oublié leurs fils Belkacem.

A mes amis

A tous mes amis, tous ce que j'aime, tous ce qui m'aiment et tous ceux qui me sont chers.

Makhlouf MELLAL

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents qui ont su me conseiller et me montrer la bonne voie à suivre, sans oublier mes vrais amis (En-M), avec qui j'ai partagé de très bons moments et qui ont été toujours là pour moi, parmi eux se distingue Belabas. S et Idir. D, que je tiens à remercier beaucoup.

AMMAR Kamal

Sommaire

SOMMAIRE

Introduction Générale 1

Chapitre I : Généralités sur les moteurs asynchrones

Triphasés

I.1. Introduction2

I.2. Parties principales du moteur asynchrone2

I.3. Bobinage de la machine asynchrone5

I.3.1. Les différents types d'enroulements5

I.4. Isolation du bobinage8

I.5. Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone9

I.6. Classification des machines à cage d'écureuil10

I.7. Démarrage des moteurs asynchrones12

I.7.1. Démarrage sous tension réduite12

 I.7.1.a. Démarrage étoile-triangle.....12

 I.7.1.b. Démarrage par autotransformateur.....13

 I.7.1.c. Démarrage résistif13

I.7.2. Démarrage à tension nominale13

I.8. Freinage des moteurs asynchrones13

I.8.1. Freinages électriques14

 I.8.1.1. Freinage par injection de courant continu14

 I.8.1.2. Freinage hyper synchrone.....14

 I.8.1.3. Freinage par contre courant15

I.8.2. Freinage mécanique.....15

I.9. Conclusion16

Chapitre II : Présentation de l'entreprise Electro-Industrie

II.1. Historique de l'entreprise	17
II.2.1. Présentation de l'entreprise	17
II.2.2. Entrée en production	18
II.2.3. Evolution à 1998	18
II.2.4. Présentation de l'unité moteur asynchrone et générateurs électrique (UMAGE)	18
II.3. Description du processus de fabrication, organisation des ateliers et leurs fonctions principales	18
II.3.1. Atelier de découpage	19
II.3.1.1. Fabrication des tôles statoriques et rotoriques	19
II.3.1.2. Fabrication des capots de ventilateurs	20
II.3.2. Moulage sous pression	20
II.3.3. Atelier d'usinage	20
II.3.3.1. Fabrication de l'arbre	20
II.3.3.2. Usinage du rotor	21
II.3.3.3. Usinage des différentes pièces	21
II.4. bobinage	22
II.4.1. Secteur préparation isolation	22
II.4.2. Secteur de préparation des bobines	22
II.4.3. Secteur préparation du stator bobiné	23
II.5. Atelier de montage	24
II.6.1. Gamme de fabrication	26

Sommaire

II.6.2. Moteurs triphasés à une seule vitesse.....	27
II.6.3. Moteurs triphasés à deux vitesses.....	27
II.6.4. Moteurs monophasés à condensateurs.....	27
II.6.5. Normes.....	28
Chapitre III : Calcul du moteur asynchrone	
III.1. Calcul électromagnétique.....	29
III.1.1. Dimensionnement de la machine asynchrone.....	29
III.1.1.1. Dimensionnement du stator.....	29
III.1.1.2. Dimensionnement de la feuille statorique.....	32
III.1.1.4. Dimensionnement de la feuille rotorique.....	36
III.1.1.5. Dimensionnement de l'anneau.....	37
III.1.2. Calcul du circuit magnétique.....	38
III.1.2.1. Circuit magnétique statorique.....	39
III.1.2.2. Circuit magnétique rotorique.....	40
III.1.2.3. Force magnétomotrice dans l'entrefer.....	40
III.1.2.4. Force magnétomotrice totale par paire de pole.....	41
III.1.2.5. Coefficient de saturation.....	41
III.1.2.6. Courant magnétisant.....	41
III.1.2.7. Réactance de magnétisation.....	41
III.1.2.8. Coefficient de dispersion magnétique du stator.....	42
III.1.2.9. Force électromotrice à vide E_0	42
III.1.3. Calcul des paramètres électriques des enroulements.....	42
III.1.3.1. Paramètres statoriques.....	42
III.1.3.2. Paramètres rotoriques.....	44

Sommaire

III.1.3.2.1. Résistance rotorique	44
III.1.3.2.2. Réactance de dispersion et perméance du rotor	46
III.1.3.2.3. Réactance du rotor ramenée au stator.....	47
III.1.3.3. Paramètres au démarrage.....	47
III.1.4. Calcul des pertes et du rendement	49
III.1.4.1. Pertes principales dans le fer	49
III.1.4.2. Pertes électriques dans le cuivre et dans l'aluminium	50
III.1.4.3. Pertes mécaniques	51
III.1.4.4. Pertes supplémentaires	51
III.1.4.5. Pertes totales.....	51
III.1.4.6. Rendement de la machine	52
III.1.4.7. Calcul de la résistance de magnétisation	52
III.1.5. Calcul des performances du moteur	52
III.1.5.1. Schéma équivalent en L du moteur	53
III.1.5.2. Caractéristiques de fonctionnement du moteur	53
III.1.5.3. Caractéristiques de démarrage et capacité de surcharge	56
Chapitre IV : Elaboration d'un programme de calcul et comparaison des résultats.....	60
Conclusion générale	
Annexes	
Bibliographie	

Sommaire

Sommaire

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale :

En raison de leurs innombrables applications, les moteurs électriques sont de plus en plus utilisés, surtout dans le domaine industriel, qui s'enrichi de jour en jour d'une grande variété de moteurs.

Parmi tous les types de moteurs existants, les moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil, se distinguent par leurs qualités et leurs avantages considérables. En effet un grand défi s'impose pour les chercheurs et fabricants afin d'améliorer les caractéristiques de ces moteurs, c'est-à-dire les surdimensionnés de façon à atteindre un rendement optimal exigé par le cahier de charges.

Le but de notre travail est d'utiliser une méthode de calcul d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil à partir d'un cahier de charges bien défini, ensuite comparer nos résultats de calcul à un moteur existant à l'Electro-Industrie.

La méthode de calcul utilisée repose essentiellement sur des formules développées en associant les connaissances théoriques et les expériences pratiques des constructeurs, toutes en utilisant le logiciel de calcul et de programmation MATHCAD13.

Notre travail est subdivisé en quatre chapitres :

- Le premier sera consacré aux généralités sur les moteurs asynchrones triphasés.
- Le deuxième sera consacré à la présentation de l'entreprise Electro-Industries et ses différents ateliers par lesquels le moteur à cage suit sa chaîne de fabrication.
- Le troisième sera dédié au calcul d'un moteur asynchrone à cage.
- Le quatrième sera réservé à l'élaboration d'un programme de calcul à l'aide du logiciel MATHCAD13 et à la comparaison et interprétation des différents résultats.

Nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur les moteurs asynchrones

I.1. Introduction

Les moteurs asynchrones triphasés sont les moteurs les plus employés dans l'industrie. Ils possèdent en effet plusieurs avantages : simplicité, robustesse, prix peu élevé, et entretien facile.

Le moteur asynchrone est utilisé aujourd'hui dans de nombreuses applications, notamment dans le transport (trains, métro, propulsion des navires...), dans l'industrie (machines-outils) et dans l'électroménager.

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.



Figure I.1 Moteur asynchrone à cage d'écureuil

I.2 parties principales du moteur asynchrone [1] :

Le moteur asynchrone triphasé (parfois appelé moteur d'induction triphasé) comprend deux parties ; le stator (fixe) et rotor (tournant)

-Le stator : Comporte une carcasse en acier renfermant un empilage de tôles identiques qui constituent un cylindre vide ; ces tôles sont percées de trous à leurs périphérie intérieure. L'alignement de ces trous forme des encoches dans lesquels on

logé un bobinage triphasé. Ces tôles sont isolées entre elles par oxydation pour les moteurs de petites et moyennes puissances ou par un verni pour les moteurs de grandes puissances.



Figure I.2 Paquet statorique et stator bobiné

- **Le rotor** : Se compose d'un cylindre de tôles poinçonnées à leurs périphéries extérieur pour former les encoches destinées à recevoir des conducteurs. Il est séparé du stator par un entrefer très court, de l'ordre de 0.4 à 2 mm seulement. Il existe deux types de rotor : rotor à cage d'écureuil et rotor bobiné.

- **Rotor à cage d'écureuil** : l'enroulement à cage d'écureuil est constitué de barres de cuivre nues introduites dans les encoches. Ces barres sont soudées à chaque extrémité à deux anneaux qui les court-circuitent, l'ensemble ressemble à une cage d'écureuil. Dans les moteurs de petites et moyennes puissances, les barres et les anneaux sont formés d'un seul bloc d'aluminium coulé.

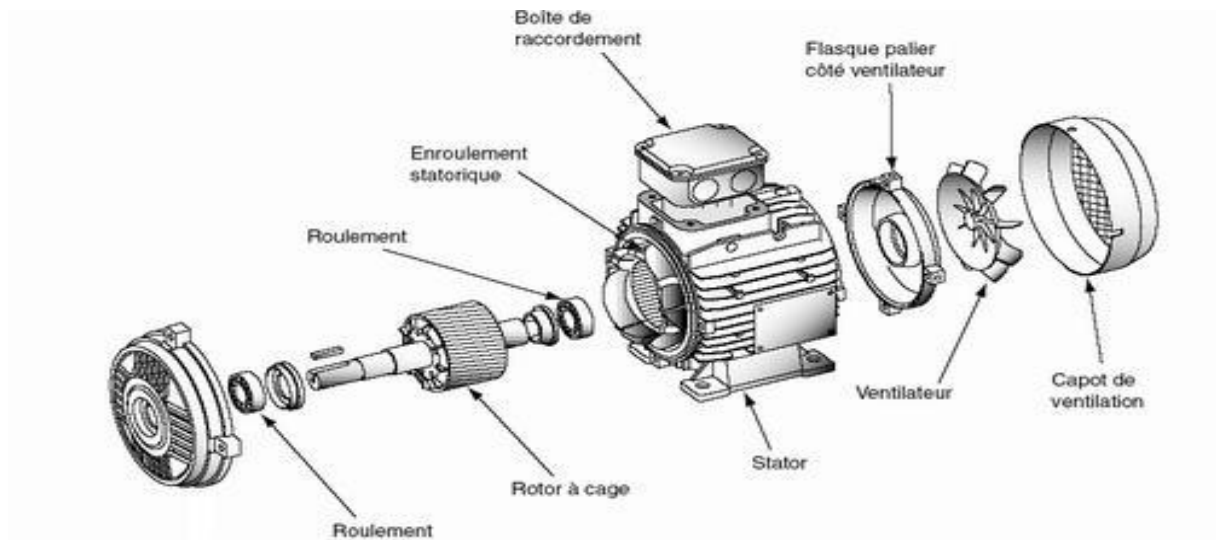


Figure I.3 Vue éclatée d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil

- **Rotor bobiné** : comprend un bobinage triphasé semblable à celui du stator placé dans les encoches. Il est composé de trois enroulements raccordés en étoile, l'extrémité libre de chaque enroulement est reliée à une bague tournant avec l'arbre. Ces bagues permettent, par l'intermédiaire de trois balais d'insérer une résistance extérieure en série avec chacun des trois enroulements lors du démarrage du moteur. En fonctionnement normal, les balais sont court-circuités.

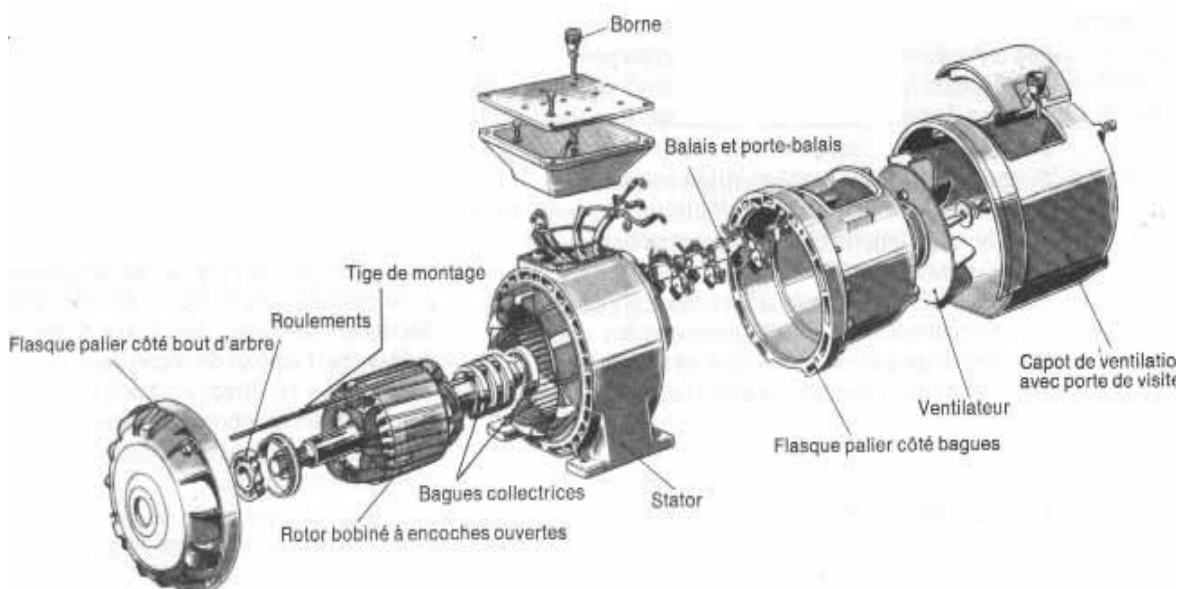


Figure I.4 Vue éclatée d'un moteur asynchrone à rotor bobiné

- Les organes mécaniques : [2]

Le stator autoporteur reçoit de chaque côté un flasque sur lequel le rotor sera positionné grâce à des roulements à billes ou à rouleaux suivant le type de charge (axiale ou radiale). Un ventilateur est placé au bout de l'arbre sur le rotor pour le refroidissement de la machine. Il peut être remplacé par une ventilation forcée motorisée pour le refroidissement aux vitesses lentes.

I.3 Bobinage de la machine asynchrone : [3]

On peut effectuer le bobinage d'une machine asynchrone de plusieurs façons, la disposition des bobines dans les encoches différencie ces types d'enroulements d'où on trouve habituellement trois types : l'enroulement imbriqué, concentrique et ondulé. Chaque type présente des avantages dans certaines applications. L'enroulement du stator peut être à une seule couche ou à deux couches, ce dernier nous permet de raccourcir le pas d'enroulement.

Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties, les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines. Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre ; l'objectif est d'obtenir à la surface de l'entrefer une distribution de courant la plus sinusoïdale possible, afin de limiter les ondulations du couple électromagnétique.

I.3.1 Les différents types d'enroulement :

a) Enroulements imbriqués à une seule couche :

Chaque bobine qui forme l'enroulement occupe deux encoches. Puisqu'il doit y avoir autant d'enroulements qu'il y a de phases.

b) Enroulements imbriqués à deux couches :

L'enroulement imbriqué est le type de bobinage le plus employé dans les stators des moteurs triphasés des moyennes et grandes puissances. 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 leurs largeurs et les placer dans une paire d'encoches normale. Les bobines sont habituellement de largeurs réduites 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.

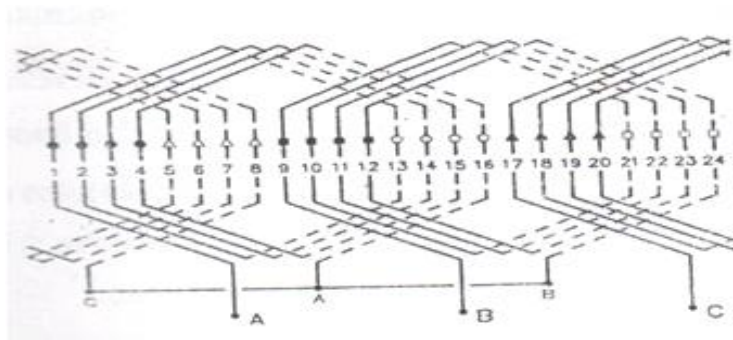


Figure I.5 Enroulement imbriqué triphasé pour les trois phases à 2 pôles, 24 encoches.

c) Enroulement concentrique :

D'une façon globale, le bobinage concentrique est destiné pour les applications de grandes puissances, ou un nombre important de paires de pôles est nécessaire. Ce type de bobinage permet d'éviter les courts-circuits entre les trois bobines, ce qui simplifie la construction du stator.

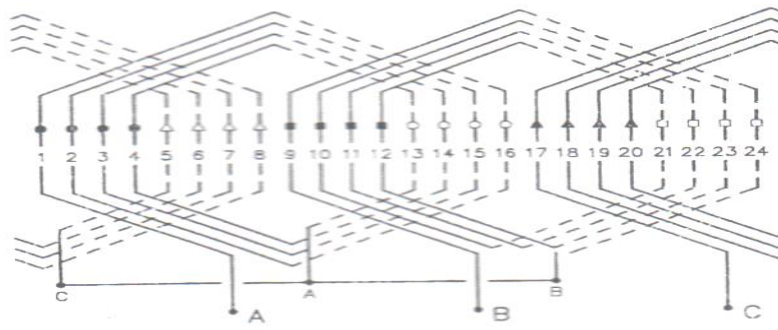


Figure I.6 Enroulement concentrique triphasé à 2 pôles, 24 encoches

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 du produit du nombre de pôles et du nombre de phases. Dans ce type d'enroulement, les conducteurs qui occupent des phases analogues sous deux pôles consécutifs sont connectés en série. Le circuit fait le tour du stator ou du rotor une ou plusieurs fois, allant d'un pôle à un autre sans revenir.

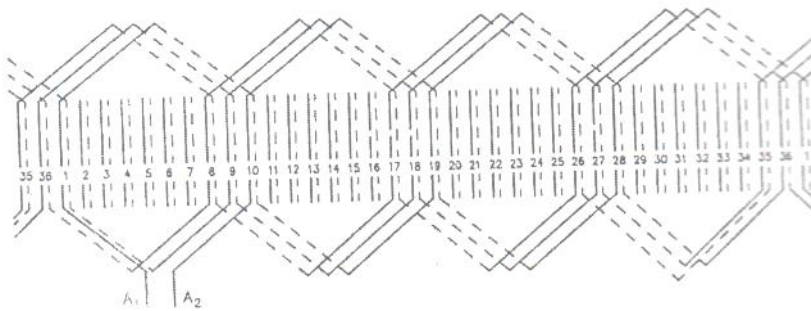


Figure I.7 Enroulement ondulé pour une phase d'un moteur à 4 pôles, 36 encoches.

I.4 Isolation du bobinage :

On doit isoler les bobines par rapport à la masse, c'est-à-dire l'empilage de tôles magnétiques, de même les bobines appartenant à des phases différentes.

Le matériau isolant utilisé est sélectionné en fonction de ses qualités diélectriques, mécaniques et thermiques.

L'isolation par rapport à la masse est réalisée en plaçant dans les encoches une feuille de matériau isolant en forme de U qui occupe tout le périmètre de l'encoche avant l'insertion des bobines.

L'isolation entre phases se présente en pratique, selon le bobinage réalisé (diamétral ou à pas raccourci).

Si le pas est diamétral, l'isolation entre phases n'a lieu d'être que dans la région des têtes de bobines, (entre bobines ou entre bobines et connexions de liaisons). Les isolations entre bobines sont réalisées par l'interposition en feuille, la forme de ces feuilles devra être bien optimisée pour assurer une séparation totale. Quand à l'isolation des connexions, elle est réalisée grâce à des gaines isolantes.

Dans le cas de bobinage à pas raccourci, la situation est plus délicate, car les encoches contiennent des conducteurs appartenant à des phases différentes. Il est alors indispensable d'isoler dans les encoches elle-même ces bobines. Cela est en général réalisé par l'interposition, entre les deux plans de bobinages, d'une feuille d'isolant en forme de U, réduite et renversé par rapport à la forme U d'encoche.

La dernière composante de l'isolation est le calage d'encoches qui a pour but la tenue en place des conducteurs dans les encoches.

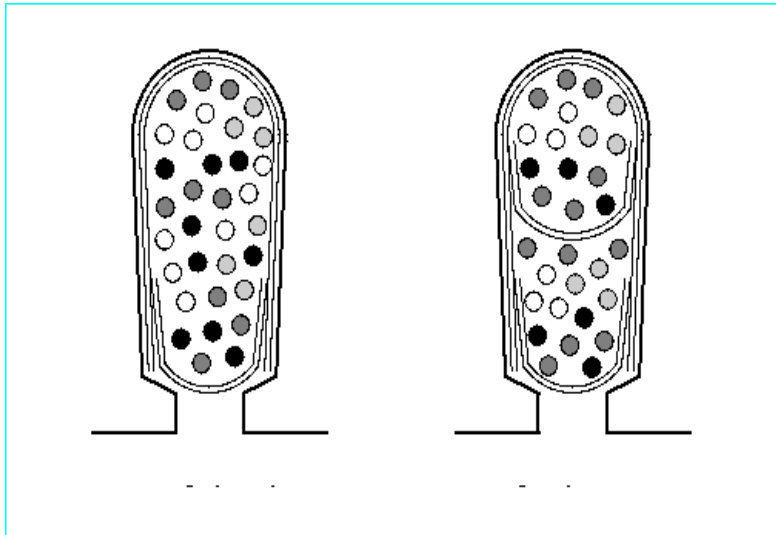


Figure I.8 Schéma de l'isolation d'encoches

I.5 Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone :

On dispose sur le stator trois bobines identiques réparties géométriquement à 120° l'une de l'autre. Ces trois bobines alimentées par trois tensions décalées de 120° électrique (période $=360^\circ$) issues donc d'un système triphasé, produisant un champ magnétique tournant (champ inducteur) le rotor se trouvant au centre de ce champ. Tant que le rotor a une fréquence de rotation différente que celle de champ inducteur, chaque point de rotor voit une variation de champ. Les conducteurs rotoriques produisent donc une F.E.M qui, dans le circuit fermé va donner naissance à des courants induits. Ces courants vont à leur tour produire un champ magnétique qui va s'opposer à la cause qui lui a donné naissance. Cela se traduit concrètement par un phénomène de poursuite du rotor vis-à-vis du champ tournant sans qu'il n'arrive jamais à l'atteindre. Le rotor ne peut jamais tourner à la même vitesse que le stator (sauf dans le cas d'un entraînement mécanique extérieur).

I.6 Classification des machines à cage d'écureuil :

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

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 : moteurs à faible couple et à faible courant de démarrage

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

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, ces caractéristiques découlent de l'emploi d'encoches profondes et étroites. 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 cages. 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 réactance, se qui force le courant à passer dans le conducteur extérieur. Le courant est donc faible mais le couple est fort. Lorsque le

rotor 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 qui lui confère au démarrage un fort couple ainsi qu'un faible courant. Par contre il a un glissement à pleine charge qui peut atteindre 15% et même 20%.

Les conducteurs du rotor d'un moteur de classe F sont placés loin de l'entrefer. Au démarrage, la réactance est grande et 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.

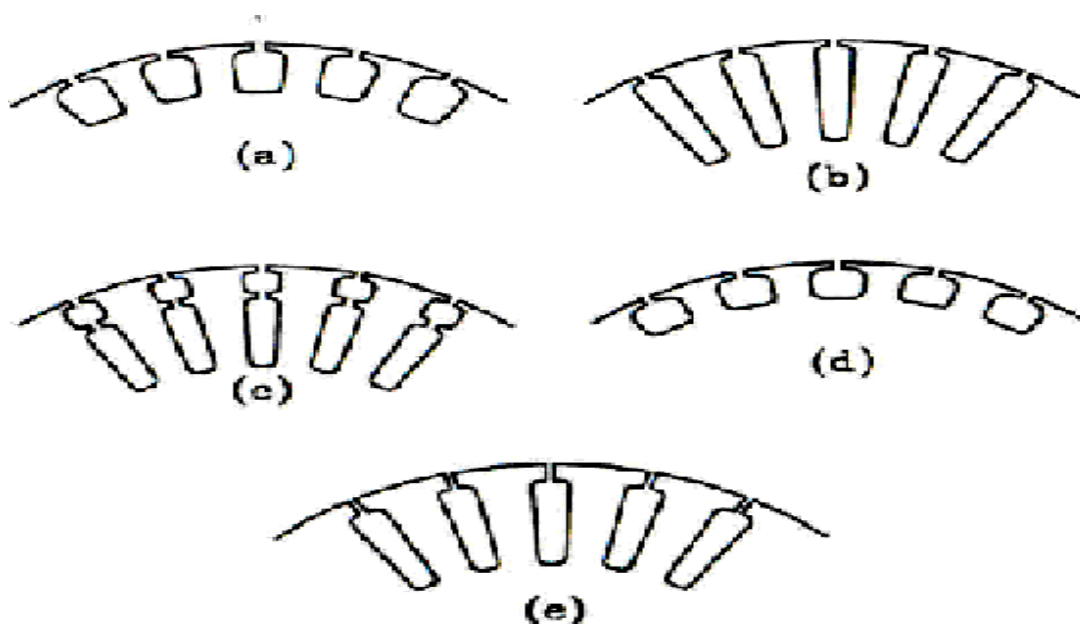


Figure I.9 Formes d'encoche a, b, c, d et e correspondants aux différentes classes A, B, C, D et F respectivement.

I.7 Démarrage des moteurs asynchrones : [4]

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

I.7.1 Démarrage sous tension réduite :

Plusieurs dispositifs permettent de réduire la tension aux bornes des enroulements du stator pendant la durée du démarrage du moteur ce qui est un moyen de limiter l'intensité des courants de démarrage. L'inconvénient est que le couple moteur est également diminué et que cela augmente la durée avant laquelle le moteur atteint le régime permanent.

I.7.1.a Démarrage étoile-triangle :

Lors d'un démarrage étoile-triangle, le moteur est d'abord connecté au réseau avec un couplage étoile, puis une fois démarré on passe sur le couplage triangle. Le fait de démarrer avec un couplage étoile permet de diviser par la racine carrée de trois la tension appliquée ; ainsi le courant maximal absorbé est de trois fois plus faible que lors d'un démarrage direct 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 des contacteurs, cette méthode de démarrage est très économique.

I.7.1.b Démarrage par autotransformateur :

Dans ce mode de démarrage, le stator du moteur est relié à un autotransformateur qui permet d'effectuer un démarrage sous tension variable. La tension est progressivement augmentée, l'intensité du courant ne dépasse pas la valeur maximale désirée.

I.7.1.c Démarrage résistif :

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

I.7.2 Démarrage à tension nominale :

➤ Démarrage rotorique :

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

I.8 Freinage des moteurs asynchrones : [5]

Dans certain cas, l'arrêt du moteur peut bien évidemment se faire en roue libre (arrêt naturel sans intervention extérieure).

Cependant de très nombreuses applications nécessitent une intervention appelée « freinage ».

I.8.1 Freinages électriques :

I.8.1.1 Freinage par injection de courant continu :

Après avoir isolé le moteur de son réseau d'alimentation alternative, on injecte entre deux phases du stator un courant continu, cette injection permet d'obtenir un champ fixe dans lequel tourne encore le rotor.

Chaque conducteur rotorique reçoit donc une variation de champ.

Selon la loi de LENZ ; $e = -\frac{\partial \phi}{\partial t}$ une force électromotrice nait aux bornes des conducteurs rotoriques.

La variation de champ étendu étant due à la fois au champ fixe et au mouvement, le champ induit va s'opposer au mouvement, il ya donc ralentissement.

On remarque que lorsque la vitesse diminue, la force électromotrice induite, $e = -\frac{\partial \phi}{\partial t}$ diminue également puisque ∂t augmente et par voie de conséquence, le ralentissement diminue également.

I.8.1.2 Freinage hyper synchrone :

Le procédé suppose l'alimentation du moteur par variateur de vitesse. On pilote alors le variateur de façon à diminuer la fréquence de la tension d'alimentation du moteur, ce qui revient à diminuer la fréquence de rotation du champ tournant. Entraîné par la charge, le rotor tourne alors plus vite que le champ tournant, le glissement est alors négatif.

Il est nécessaire que le variateur possède une structure permettant d'évacuer l'énergie qu'il reçoit du moteur (énergie cinétique convertie en énergie électrique). Selon le cas, il restituera cette énergie vers le réseau d'alimentation ou la dissipera dans une résistance dite « freinage »

I.8.1.3 Freinage par contre courant :

Le procédé consiste à inverser deux phases de l'alimentation du moteur. Ce croisement a pour effet d'inverser le sens de rotation du champ tournant. La difficulté consiste à arrêter cette alimentation croisée avant que le moteur ne se mette à tourner dans l'autre sens. On utilise généralement un capteur de vitesse de type centrifuge pour couper cette alimentation.

Pour limiter le courant dans le stator qui peut atteindre des valeurs très importantes, on insère souvent des résistances en série avec le stator.

I.8.2 Freinage mécanique :

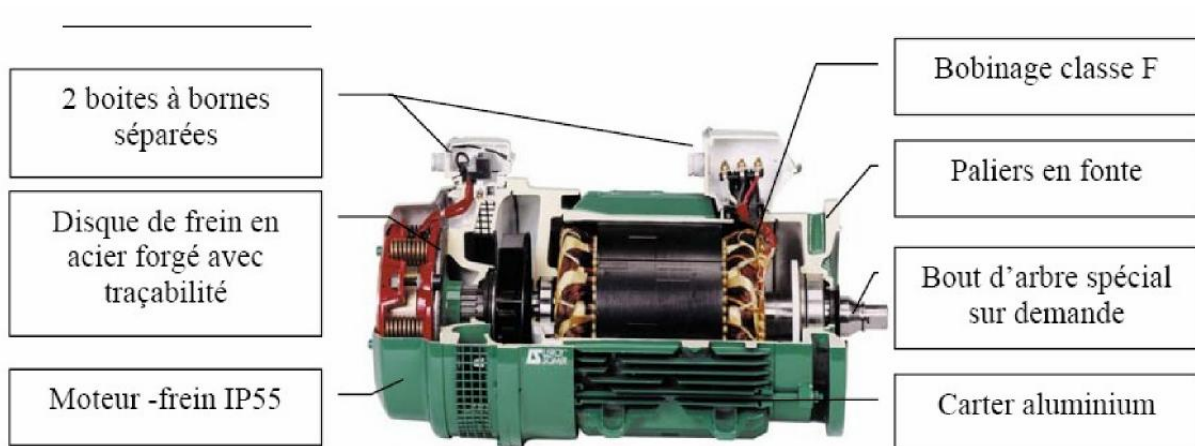


Figure I.10 moteur frein

On appelle freinage mécanique les procédés qui consistent à dissiper l'énergie cinétique sous forme d'énergie thermique en utilisant de friction. Dans le cas des moteurs électriques, il s'agit généralement d'un sabot qui vient frotter sur l'arbre du moteur ou sur un disque solidaire. On utilise parfois l'appellation « Ferrodo » qui provient d'une marque de fabricant de plaquettes de freinage. Dans certains cas, le moteur comporte une partie conique sur son rotor et son pendant sur le stator, c'est alors un déplacement axial qui permet au choix de libérer le frein ou le freinage.

Pour désigner un moteur comportant un dispositif de freinage mécanique, on utilise fréquemment l'appellation « moteur frein »

I.9. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons donné quelques généralités sur les moteurs asynchrones triphasés.

Le chapitre suivant sera consacré à la présentation de l'entreprise Electro-Industries où nous avons effectué notre stage.

Chapitre II

Présentation de l'entreprise Electro-industries

II.1. Historique de l'entreprise :

A l'origine, l'entreprise est issue de la réorganisation du secteur opérée en Algérie entre 1980 et 2000 qui a conduit en 1999 à la restructuration de l'ancienne ENEL (entreprise nationale des industries électrotechniques) en un certain nombre d'entreprises publiques économiques, sociétés par actions (EPE/SPA), parmi lesquelles figure « ELECTRO-INDUSTRIES » au capital social de 4 753 000 000 DA .

L'usine a été réalisée dans le cadre d'un contrat produit « clé en main » avec des partenaires Allemands, en l'occurrence, **SIEMENS** pour le produit et **FRITZ WERNER** pour l'engineering et la construction. L'infrastructure est réalisée par les entreprises Algériennes **ECOTEC**, **COCIDER** et **BATIMAL**.

II.2.1 Présentation de l'entreprise :

L'entreprise Electro-Industrie est d'une superficie de 45 Ha est située sur la route nationale N°12, distante de 30 Km du chef lieu de la wilaya de TIZI OUZOU, et à 8 Km de la commune d'AZAZGA.

Electro-Industries est spécialisée dans la fabrication et la commercialisation des moteurs électriques, alternateurs, transformateurs de distributions et groupes électrogènes.

En matière de qualité, Electro-Industrie dispose de ses propres laboratoires d'essais et de mesures, de ses produits ainsi pour le contrôle de principaux matériaux utilisés dans sa fabrication.

Les différentes valeurs d'essais et de mesures sont consignées sur des procès-verbaux et des cartes de contrôles.

Les produits Electro-Industries sont réalisés et contrôlés suivant les normes DIN (Degrés de protection des moteurs électriques), VDE (règlement relatif aux machines électriques) et sont conformes aux recommandations européennes CE et aux normes internes sévères préconisées par le donneur de licence SIEMENS. Le niveau de leur

qualité a été approuvée par la clientèle locale (SONELGAZ, ENMTP, ENIEM, KAHRIF) et étrangères (Russie, Pays Africains, Le Sénégal, Le Mali...).

La qualification professionnelle, maîtrise technologique et les matières de fabrication obéissent aux paramètres rigoureux de fiabilité technique et de compétitivité de leurs produits et services.

II.2.2 Entrée en production :

- Secteur transformateur : 1985
- Secteur moteur/alternateur : 1986
- Ces produits sont fabriqués sous licence SIEMENS jusqu'à 1992

II.2.3 Evolution à 1998 :

- Extension des capacités de production de transformateurs de 1500 à 5000 unités/an.
- Développement de la gamme de moteurs monophasés.
- Développement de l'activité de groupes électrogènes.
- Développement de moteurs destinés à la climatisation.
- Extension verticale de la gamme de transformateurs (2000 KVA)

II.2.4 Présentation de l'unité Moteurs Asynchrones et Générateurs Electrique (UMAGE) :

L'unité Moteurs Asynchrones et Générateurs Electrique (UMAGE) s'occupe de la fabrication des moteurs asynchrones à différentes puissances et à différentes hauteurs d'axes et les générateurs électriques.

II.3 Description du processus de fabrication, organisation des ateliers et leurs fonctions principales :

L'UMAGE se compose de différents ateliers.

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

II.3.1 Ateliers de découpage :

Dans cet atelier, on réalise tous les travaux de transformation de tôles utilisées pour la fabrication des pièces à savoir :

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

II.3.1.1 Fabrication des tôles statoriques et rotoriques :

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

- Isolées au vernis pour les moteurs à hauteurs d'axe 183 mm à 404 mm
- Non isolées : leur isolation se fait dans des fours par oxydation pour les moteurs à hauteurs d'axe 70 mm à 163 mm.

a. Procédé de découpage :

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

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

-procédé de découpage automatique.

-procédé de découpage semi-automatique.

Tous ces procédés aboutissent au même résultat

II.3.1.2 Fabrication des capots de ventilateurs :

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

II.3.2 Moulage sous pression :

Dans cet atelier, sont fabriquées toutes les pièces rentrant dans la fabrication des moteurs en version aluminium tel que :

-Injection du rotor en aluminium pur à 99.5 %

-Réalisation des pièces en alliage d'aluminium pur par (Silicium, Manganèse, Cuivre) comme carcasse, flasque (AS, BS), boites à bornes, couvercles de boite à bornes.

II.3.3 Atelier d'usinage :

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

II.3.3.1 Fabrication de l'arbre :

Une fois l'acier est contrôlé positivement, on découpe les arbres à l'aide d'une scie mécanique ou avec une scie automatique.

L'arbre à l'état brut passe au centre d'usinage pour être centré, cette opération consiste à percer deux trous qui servent de référence pour pouvoir tourner notre rotor dans un axe bien précis.

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

II.3.3.2 Usinage du rotor :

Les opérations effectuées sur le rotor sont :

a. Tournage du paquet : cette opération se fait avec un tour parallèle pour avoir un entrefer homogène et réduit.

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

c. Fraisage : fraisage de la rainure de clavette coté entraînement à l'aide d'une fraiseuse.

d. Equilibrage du rotor : cette opération ne se fait qu'après avoir reçu l'ordre de montage du rotor, deux méthodes d'équilibrage sont utilisées.

- Equilibrage positif avec l'ajout de rondelles acier.

- Equilibrage négatif avec enlèvement de matière.

II.3.3.3 Usinage des différentes pièces : (Carcasse, flasque, boîte à bornes...)

a. Carcasse :

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

b. Flasques (AS et BS) :

Tournage des bords de centrage et cage de roulements.

c. Boite à bornes :

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

II.4. Bobinage :

L'atelier de bobinage se divise en trois secteurs :

- Secteur de préparation de l'isolation.
- Secteur de préparation des bobines.
- Secteur bobinage.

II.4.1. Secteur préparation isolation :

C'est dans ce secteur que sont préparés tous les isolants pour toutes les machines soit :

- Caniveaux d'encoches
- Cale de fermeture
- Gaines isolantes
- Séparateur de phases.
- Lame intermédiaire.
- Câbles de raccordement.

Les isolants utilisés par l'Electro-industries garantissent une qualité conforme aux normes internationales.

II.4.2 Secteur de préparation des bobines :

La confection des bobines se fait à l'aide des gabarits montés sur les machines rotatives (bobineuses) qui sont réglées selon le nombre de spires par faisceaux.

II.4.3 Secteur de préparation du stator bobiné :

C'est le secteur où se déroule le processus de fabrication du stator bobiné allant de l'insertion des caniveaux d'encoches jusqu'à l'imprégnation.

a. Insertion des caniveaux d'encoches :

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

b. Insertion des bobines dans le stator :

L'insertion se fait soit :

-Automatiquement pour les moteurs à hauteurs d'axe 70 mm à 130 mm.

-Manuellement pour les moteurs à hauteurs d'axe 132 mm à 400 mm.

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

-une fois les bobines introduites, on place les séparateurs de phases pour éviter les courts-circuits entre phases, après cela, on procède au formage de têtes de bobines manuellement avec un mandrin et un maillet pour respecter l'homogénéité et les dimensions des têtes de bobines coté AS (coté entraînement) et BS (coté ventilation).

c. Connexion :**-Connexion entre les bobines :**

Les bobines de chaque phase sont liées entre elles de façon précise en conformité avec le schéma de bobinage afin d'obtenir trois grandes bobines, chacune

-Connexion des bobines et câbles de raccordement :

Les entrées et les sorties de chaque phase connectées et soudées à des câbles de raccordement qui assurent la liaison électrique avec la boîte à bornes.

L'entrée et la sortie de chaque phase, sont distinguées des autres avec des couleurs, Phase U : orange ; Phase V : noir et Phase W : rouge.

d. Frettage et pressage des têtes de bobines :

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

e. Contrôle :

- ✓ Contrôle visuel de séparateur de phases et des têtes de bobines par rapport au diamètre extérieur et intérieur du paquet statorique.
- ✓ Contrôle électrique

-La mesure de la résistance Ohmique entre phases.

-Vérification s'il n'y pas de court-circuit entre spires, court-circuit entre phase et de court-circuit à la masse à haute tension (2000 V).

- Contrôle de polarité des trois phases en cas d'anomalie en vue de localiser les trois entrées et les trois sorties (U1, V1, W1 et U2, V2, W2).

-Le contrôle de frettage des têtes de bobines.

- La vérification des caniveaux d'encoches, coupure de phase et les réglettes de fermeture.

f. Imprégnation :

Cette opération consiste à mettre de la résine au bobinage du stator pour le rendre plus compact, deux imprégnations sont utilisées

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

II.5. Atelier de montage :

On recense deux secteurs essentiels dans cet atelier.

a. Secteur prés montage :

Les opérations réalisées dans ce secteur sont :

- Huiler l'intérieur de la carcasse pour faciliter l'insertion du paquet statorique.
- Emmanchement du paquet avec une presse.
- Mise en longueur et tournage des bords de centrage de la carcasse coté AS et BS
- Fraisage des pattes pour retrouver la hauteur d'axe exact.
- Peinture du diamètre intérieur du stator avec une couche de peinture antirouille.

b. Secteur montage final :

Dans ce secteur sont effectuées les opérations suivantes :

- Mise en place du couvercle du palier intérieur coté BS pour assurer une bonne étanchéité du moteur.
- Emmanchement des roulements déjà graissés coté AS et BS avec une presse verticale et emplacement de la clavette coté AS.
- Visser les couvercles de palier sur flasque, cela permet de cerner le roulement entre ces deux pièces.
- Emplacement de la clavette coté BS et emmanchement du ventilateur avec la même presse puis insertion de la bague d'arrêt (serre clips) pour ventilateur.
- Intégration du rotor complet dans le stator et fixation du flasque coté BS avec des vices.
- Emplacement des rondelles (rondelles de compensation et rondelles élastiques) sur le flasque coté AS pour éviter le jeu axial du rotor.
- Fixation du flasque sur la carcasse avec des vices ainsi que le montage du capot du moteur
- Préparation de la boîte à bornes et fixation des cables de raccordement sur la plaque à bornes

c. Contrôle final :

Une fois le produit est fini, ce dernier subit un certain nombres de contrôles électriques. Dans le contrôle électrique, on lui applique trois principaux :

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

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

- Voilure flasque-bride.
- Concentricité flasque-bride
- Concentricité bout d'arbre
- bout d'arbre incliné
- longueur bout d'arbre
- Ecart trous de patte-arbre
- Ecart trous de patte (cotés AS, BS)
- Hauteur d'axe
- Jeu axial du rotor
- Bout d'arbre endommagé
- Bord de centrage endommagé
- Accessoires manquant
- Plaque signalétique endommagé
- Rainure de clavette endommagée

II.6.1 Gamme de fabrication :

Les moteurs électrique basses tensions, fabriqués par Electro-industries sont des types asynchrones triphasés à une ou deux vitesses, et monophasé à condensateurs. Ils sont de construction fermée, à carcasse ventilée, en alliage d'aluminium et en fonte. Les rotors sont en court-circuit, à cage d'écureuil, en aluminium pour (les moteurs de faible et moyenne puissances) et en barre de cuivre (moteurs de puissances élevées).

II.6.2 Moteurs triphasés à une seule vitesse :

Gamme	Aluminium	Fonte	
Hauteur d'axe (mm)	71 à 132	160 à 250	280 à 400
Puissance (kW)	0.25 à 9	11 à 55	75 à 400
Vitesses (tr/mn)	1000 - 1500 - 3000		

II.6.3. Moteurs triphasés à deux vitesses :

Vitesses (tr/mn)	750/1500	1000/1500	1500/3000
Puissances (kW)	0.35 / 0.65 à 3 / 4.5	0.48 / 0.68 à 5.70 / 7.80	0.48 / 0.60, à 3.7 / 4.4

II.6.4. Moteurs monophasés à condensateurs :

Hauteur d'axe (mm)	71 à 100
Puissances (kW)	0.25 à 2.2
Vitesses (tr/mn)	1500 - 3000

II.6.5 Normes :

Les moteurs sont conformes aux normes suivantes :

. CEI 34-1 : Machines électriques tournantes- Caractéristiques assignées et de fonctionnement.

. CEI 34-2 : Méthodes pour la détermination des pertes et du rendement.

. CEI 34-5 : Classification des degrés de protection (code IP).

. CEI 34-6 : Modes de refroidissement (code IC).

. CEI 34-7 : Classification des formes de construction et des dispositions de montage (code IM).

. CEI 34-8 : Marques d'extrémité et sens de rotation.

. CEI 34-9 : limites de bruit.

. CEI 34-11 : protection thermique incorporée.

. CEI 34-12 : Caractéristiques de démarrage des moteurs à induction à cage, à une seule vitesse, pour des tensions d'alimentation inférieures ou égales à 690 V – 50Hz.

. CEI 72 : Dimensions et séries de puissance des machines électriques tournantes.

. VDE 0530 : Règlements relatifs aux machines électriques tournantes.

Chapitre III

Calcul du moteur asynchrone

III.1.Calcul électromagnétique :

Le calcul électromagnétique d'un moteur asynchrone à cage se présente comme suit :

III.1.1.Dimensionnement de la machine asynchrone :

Nous déterminons les dimensions géométriques des différentes parties du moteur tout en respectant les critères techniques exigés et en tenant compte des contraintes électromagnétiques.

III.1.1.1 Dimensionnement du stator :**a) Puissance électromagnétique :**

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

$$P_e = K_e \cdot \frac{P_n}{\cos(\Phi_n) \cdot \eta_n} \quad [\text{KW}] \quad (\text{III.1})$$

Avec:

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

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

η_n : Le rendement nominal de la machine.

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

$$K_e = 0,98 - 5 \cdot p \cdot 10^{-3}$$

b) longueur virtuelle de l'induit :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$L_i = \frac{6,1 \cdot P_e \cdot 10^{12}}{\alpha_i \cdot K_f \cdot N \cdot D_1^2 \cdot A_1 \cdot \beta_\delta \cdot K_{en1}} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III.2})$$

Avec :

α_i : Coefficient de recouvrement polaire.

K_f : Facteur de forme de la courbe d'induction.

N : Vitesse de rotation de synchronisme.

D_1 : Diamètre intérieur du stator.

A_1 : Charge linéaire.

B_δ : Induction dans l'entrefer

K_{en1} : Facteur de bobinage de l'enroulement statorique, il est donné par :

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

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

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

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

$$K_{r1} = \sin\left(\frac{\beta \cdot \pi}{2}\right) \quad (III.5)$$

B : rapport de raccourcissement.

- **Pas polaire en nombres d'encoches :**

$$\tau_p = \frac{Z_1}{2 \cdot p} \quad (III.6)$$

Z_1 ; Nombre d'encoches statorique.

- **Pas polaire en mm :**

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

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

Avec :

P : Nombre de pôles.

- **Pas Dentaire :**

$$t_{Z_1} = \frac{\pi \cdot D_1}{Z_1} \quad [\text{mm}] \quad (III.8)$$

- **Coefficient de longueur :**

C'est le rapport entre la longueur virtuelle et le diamètre intérieur de la tôle du stator

$$\lambda_i = \frac{L_i}{D_1} \quad (III.9)$$

c) courant nominal :

Il est donné par la formule suivante :

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

m_1 : Nombre de phases statorique.

U_{n1} : Tension nominale.

d) nombre de conducteurs effectifs dans une encoche :

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

$$N_{en1} = \frac{a_1 \cdot t_1 \cdot A_1 \cdot 10^{-3}}{I_{n1}} \quad (III.11)$$

a_1 : Nombre de voies parallèle.

e) nombre de spire d'une voie parallèle :

Donné par la formule suivante :

$$W_1 = \frac{p \cdot q_1 \cdot N_{en1}}{a_1} \quad (III.12)$$

- **Angle électrique :**

$$\gamma = \frac{p \cdot 360}{Z_1} \quad (III.13)$$

- **Nombre d'encoches par pole et par phase :**

$$q_1 = \frac{Z_1}{2 \cdot p \cdot m_1} \quad (III.14)$$

- **Pas d'enroulement :**

C'est la distance entre les cotés actifs de deux sections qui se suivent.

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

ε : Raccourcissement

$\varepsilon = 0$

- **La zone de phase :**

$$\alpha = q_1 \cdot \gamma \quad (III.16)$$

- **Rapport de raccourcissement :**

$$\beta = \frac{y_1}{t_p} \quad (\text{III.17})$$

f) Section effective transversale d'un conducteur de l'enroulement :

Elle est calculée par l'expression suivante :

$$S_{eff} = \frac{I_{n1}}{a_1 \cdot J_1} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{III.18})$$

J_1 : Densité du courant dans l'enroulement statorique, elle varie entre (2÷14) [A/mm²] représenté par la figure III-2 (voir annexes).

NB : si la section effective calculée est supérieure à 1,8 mm² on doit deviser celle-ci en section élémentaires, et comme la section des conducteurs est normalisée. On choisira la section standard la plus proche de celle calculée.

III.1.1.2. Dimensionnement de la feuille statorique :

a) Largeur de la dent :

La largeur de la dent est calculée à partir de la loi de conservation du flux à travers le pas dentaire, elle est représentée dans la figure III-6, elle est donnée comme suit :

$$b_{Z1} = \frac{t_1 \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot B_{Z1max}} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III.19})$$

Avec :

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

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

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

B_{Z1max} : Induction maximale dans la dent statorique en [T].

b) Hauteur du dos du stator :

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

$$h_{c1} = \frac{0,5 \cdot \alpha_i \cdot \tau_{p1} \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot B_{c1}} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III.20})$$

B_{c1} : Induction magnétique dans le dos du stator.

c) Hauteur de la dent :

$$h_{Z1} = 0,5 (D_{ext} - D_1) - h_{c1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III.21})$$

D_{ext} : Diamètre extérieur du stator.

d) largeur minimale de l'encoche :

La largeur minimale de l'encoche est donnée par l'expression suivante :

$$b_{enc11} = \frac{\pi \cdot (D_1 + 0,2 \cdot h_{Z1})}{Z_1} - b_{Z1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III.22})$$

e) Largeur maximale de l'encoche :

La longueur maximale de l'encoche est donnée par la formule suivante :

$$b_{enc12} = \frac{\pi \cdot (D_1 + 2 \cdot h_{Z1})}{Z_1} - b_{Z1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III.23})$$

f) Hauteur de l'encoche :

La hauteur de l'encoche est donnée par la formule suivante :

$$h_{enc1} = h_{Z1} - h_{f1} - h_{K1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III.24})$$

Avec :

h_{f1} : Hauteur de fente d'encoche statorique, elle varie entre 1,2 et 1,8 [mm].

h_{K1} : Hauteur de la clavette.

g) Section de l'encoche statorique :

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

$$S_{en1} = 0,5 \cdot (b_{enc11} + b_{enc12}) \cdot h_1 + \frac{\pi \cdot b_{enc12}^2}{8} - S_{iso} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III.25})$$

S_{iso} : Section occupée par l'isolation.

$$S_{iso} = 0,5 \cdot \left(\pi \cdot \frac{b_{enc12}}{2} + 2 \cdot h_1 + b_{enc11} \right) \cdot e_1 \quad [\text{mm}] \quad (\text{III.26})$$

e_1 : Epaisseur de l'isolant.

h) Coefficient de remplissage :

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

$$K_{r1} = N_{elt} \cdot \frac{d_{iso}^2}{S_{enc1}} \quad (III.27)$$

Avec :

$$N_{elt} = N_{el} \cdot U_{enc1}$$

d_{iso} : Diamètre de conducteurs avec isolation.

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

i) Vérification des charges électromagnétique :

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

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

- **Charge linéaire :**

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

$$A_1 = \frac{I_{n1} \cdot U_{enc1} \cdot Z_1}{\pi \cdot D_1 \cdot \alpha_i \cdot 10^{-3}} \quad [A/m] \quad (III.28)$$

- **Induction magnétique dans l'entrefer :**

L'induction magnétique dans l'entrefer caractérise l'utilisation magnétique.

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_i \cdot \tau_{p1} \cdot L_i \cdot 10^{-6}} \quad [T] \quad (III.29)$$

- **Flux sous un pôle :**

$$\Phi = \frac{U_{n1} \cdot K_e}{4 \cdot K_f \cdot f_1 \cdot W_1 K_{en1}} \quad [\text{Weber}] \quad (III.30)$$

- **Choix de l'entrefer :**

Pour des raisons mécanique, on choisit l'entrefer aussi grand que possible pour réduire les pertes supplémentaires dans le fer produites par les pulsations du champs et de la dispersion provoquée par les champs d'harmoniques supérieur. Comme il doit être aussi petit que possible afin d'avoir un facteur de puissance qui s'approche de l'unité, et un courant

magnétisant minimal. L'épaisseur de l'entrefer est liée à la puissance de la machine. Il est donné en fonction de la hauteur d'axe et le nombre de paires de pôles.

III.1.1.3. Dimensionnement du rotor :

a) Choix de nombre d'encoches rotorique :

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

b) Diamètre extérieur du rotor :

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

$$D_2 = D_1 - 2.\delta \quad [\text{mm}] \quad (\text{III.31})$$

Ou :

δ : L'épaisseur de l'entrefer.

• Pas dentaire rotorique :

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

$$t_2 = \frac{\pi.D_2}{Z_2} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III.32})$$

Avec :

Z_2 : Le nombre d'encoches rotorique.

D_2 : Le diamètre extérieur du rotor en [mm]

c) courant dans la barre :

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

$$I_2 = 1,11 \cdot \frac{I_{n1} \cdot m_1 \cdot K_{en1} \cdot W_1 \cdot \cos(\Phi_n)}{m_2 \cdot W_2 \cdot K_{en2}} \quad [\text{A}] \quad (\text{III.33})$$

Le rotor de notre machine est à cage d'écureuil, on considère que cette cage est un enroulement polyphasé a nombre de phase m_2 égal au nombres d'encoche Z_2 . Donc $K_{en2} = 1$ et $W_2 = 0,5$, dans ce cas on aura :

$$I_2 = 1, 11 \cdot I_{n1} \cdot 2 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot \cos(\Phi_n) \cdot \frac{K_{en1}}{Z_2} \quad [A] \quad (III.34)$$

Avec:

I_{n1} : Courant nominal statorique.

W_1 : Nombre de spires statorique.

K_{en1} : Facteur de bobinage statorique.

III.1.1.4. Dimensionnement de la feuille rotorique :

a) Hauteur de la culassa rotorique :

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

$$h_{c2} = 0,5 \cdot \frac{\alpha_i \cdot \tau_{p2} \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot B_{c2}} \quad [mm] \quad (III.35)$$

B_{c2} : Induction dans la culasse rotorique.

• Pas polaire rotorique en mm :

$$\tau_{p2} = \pi \cdot \frac{D_2}{2 \cdot p} \quad [mm] \quad (III.36)$$

b) Hauteur de la dent :

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

$$h_{Z2} = 0,5 \cdot (D_2 - D_{int2}) - h_{c2} \quad [mm] \quad (III.37)$$

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

D_{int2} : Diamètre intérieur du rotor en [mm].

c) Largeur de la dent :

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

$$b_{Z2} = \frac{t_2 \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot B_{Z2max}} \quad [mm] \quad (III.38)$$

B_{Z2max} : Induction admissible dans la dent rotorique en [T].

d) Diamètre supérieur de l'encoche :

Le diamètre supérieur de l'encoche est exprimé par l'expression suivante :

$$d_{21} = \left[\frac{\pi \cdot (D_2 - 2h_{f2}) - Z_2 \cdot b_{Z2}}{(Z_2 - \pi)} \right] \quad [\text{mm}] \quad (\text{III.39})$$

Avec:

h_{f2} : Hauteur de la fente de l'encoche rotorique , b_{Z2} : Largeur de la dent.

e) Diamètre inférieur de l'encoche :

Le diamètre intérieur de l'encoche est exprimé par la l'expression suivante :

$$d_{22} = \left[\frac{\pi \cdot (D_2 - 2h_{Z2}) - Z_2 \cdot b_{Z2}}{(Z_2 + \pi)} \right] \quad [\text{mm}] \quad (\text{III.40})$$

f) Hauteur de l'encoche :

La hauteur de l'encoche est donnée comme suit :

$$h_{enc2} = h_2 + 0,5 \cdot (d_{21} + d_{22}) \quad [\text{mm}] \quad (\text{III.41})$$

Avec :

h_2 : La hauteur entre les axes de l'encoche.

$$h_2 = h_{Z2} - h_{f2} - 0,5 \cdot (d_{21} + d_{22}) \quad [\text{mm}] \quad (\text{III.42})$$

g) La cage rotorique :

La cage rotorique est à barres d'aluminium logées dans des encoches ovales semi-ouvertes court-circuitées à leurs extrémités par deux anneaux.

- **Section de la barre :**

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

$$S_b = 0,125 \cdot (d_{21}^2 + d_{22}^2) \cdot \pi + 0,5 \cdot (d_{21} + d_{22}) \cdot h_2 \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{III.43})$$

- **Densité du courant :**

Elle est donnée par la formule suivante :

$$J_b = \frac{I_2}{S_b} \quad [\text{A/mm}^2] \quad (\text{III.44})$$

III.1.1.5. Dimensionnement de l'anneau :

- **Section de l'anneau :**

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

$$S_{an} = (0,35 + 0,45) \cdot \frac{Z_2 \cdot S_b}{2 \cdot p} \quad [mm^2] \quad (III.45)$$

- **Hauteur de l'anneau :**

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

$$h_{an} = (1,1 + 1,25) \cdot h_{z2} \quad [mm] \quad (III.46)$$

- **Largeur de l'anneau :**

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

$$b_{an} = \frac{S_{an}}{h_{an}} \quad [mm] \quad (III.47)$$

- **Diamètre moyen de l'anneau :**

Le diamètre moyen de l'anneau s'exprime comme suit :

$$D_{an} = D_2 - h_{an} \quad [mm] \quad (III.48)$$

- **Densité de courant dans l'anneau :**

Elle s'exprime comme suit :

$$J_{an} = \frac{I_{an}}{S_{an}} \quad [A/mm^2] \quad (III.49)$$

Avec :

I_{an} : Courant dans l'anneau, il est donné par l'expression suivante :

$$I_{an} = \frac{I_b}{K_{red}} \quad [A] \quad (III.50)$$

Avec :

K_{red} : Coefficient de réduction, il est donné par l'expression suivante :

$$K_{red} = 2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot p}{Z_2}\right) \quad (III.51)$$

III.1.2. Calcul du circuit magnétique :

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

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

$\oint H \cdot dl$ Représente la somme $\sum H_x \cdot l_x$

Où :

H_x : Représente l'intensité du champ magnétique correspondant à l'induction dans le tronçon x.

l_x : représente la ligne moyenne du tronçon choisi.

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

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

- Entrefer.
- La culasse statorique.
- La culasse rotorique.
- Les dents statorique.
- Les dents rotorique.

III.1.2.1.Circuit magnétique statorique :

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

a) Longueur moyenne des lignes de champs dans la culasse statorique :

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$L_{c1} = \frac{\pi}{2 \cdot p} (D_{ext} - h_{c1}) \quad [\text{mm}] \quad (2.1)$$

b) Force magnétomotrice de la culasse statorique :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$F_{c1} = H_{c1} \cdot L_{c1} \cdot 10^{-3} \quad [\text{A}] \quad (2.2)$$

Avec :

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

H_{c1} : est déterminé de la courbe $H_{c1} = f(B_{c1})$. Représenté dans le tableau (voir annexe 2)

c) Force magnétomotrice dans la dent du stator :

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$F_{Z1} = H_{Z1} \cdot h_{Z1} \cdot 10^{-3} \quad [\text{A}] \quad (2.3)$$

Avec :

H_{Z1} : Intensité du champ magnétique qui correspond à l'induction B_{Z1} .

h_{Z1} : Hauteur de la dent statorique en [mm].

III.1.2.2. Circuit magnétique rotorique :

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

Elle est donnée par la formule suivante :

$$L_{C2} = (D_2 - 2 \cdot h_{Z2} - h_{C2}) \cdot \frac{\pi}{2 \cdot p} + h_{C2} \quad [\text{mm}] \quad (2.4)$$

Avec :

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

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

b) Force magnétomotrice dans la culasse du rotor :

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$F_{C2} = H_{C2} \cdot L_{C2} \cdot 10^{-3} \quad [\text{A}] \quad (2.5)$$

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

c) Force magnétomotrice dans la dent du rotor :

Pour le type d'encoche représenté dans la figure III-7, on a :

$$F_{Z2} = H_{Z2} \cdot (h_{Z2} - 0,4 \cdot d_{21}) \quad [\text{A}] \quad (2.6)$$

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

III.1.2.3. Force magnétomotrice dans l'entrefer :

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

$$F_{\delta} = 0,8 \cdot B_{\delta} \cdot K_{\delta} \cdot \delta \cdot 10^{-3} \quad [A] \quad (2.7)$$

Avec :

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

$$K_{\delta} = K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2} \quad (2.8)$$

Avec :

$$K_{\delta 1} = 1 + \frac{b_{f1}}{t_1 - b_{f1} + (5 \cdot \delta \cdot \frac{t_2}{b_{f2}})} \quad (2.9)$$

$$K_{\delta 2} = 1 + \frac{b_{f2}}{t_2 - b_{f2} + (5 \cdot \delta \cdot \frac{t_1}{b_{f1}})} \quad (2.10)$$

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

III.1.2.4. Force magnétomotrice totale par paire de pôles :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$F = \sum F_i = 2 \cdot (F_{\delta} + F_{Z1} + F_{Z2}) + F_{c1} + F_{c2} \quad [A] \quad (2.11)$$

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

III.1.2.5. Coefficient de saturation :**a) Coefficient de saturation des dents :**

Il est donné par :

$$K_{\mu Z} = \frac{F_{\delta} + F_{Z1} + F_{Z2}}{F_{\delta}} \quad (2.12)$$

b) Coefficient de saturation de la machine :

Il est donné par :

$$K_{\mu} = \frac{\sum F_i}{2.F_{\delta}} \quad (2.13)$$

III.1.2.6. Courant magnétisant :

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

$$I_{\mu} = \frac{p \cdot \sum F_i}{0,9 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot K_{en1}} \quad [A] \quad (2.14)$$

III.1.2.7. Réactance de magnétisation :

Elle est exprimée par :

$$X_m = \frac{K_e \cdot U_{n1}}{I_{\mu}} \quad [A] \quad (2.15)$$

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

III.1.2.8. Coefficient de dispersion magnétique du stator :

Il est donné par :

$$\sigma_{\mu} = \frac{X_1}{X_m} \quad (2.16)$$

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

III.1.2.9. Force électromotrice à vide E_0 :

Elle est donnée par :

$$E_0 = \frac{U_{n1}}{(1 + \sigma_{\mu})} \quad [V] \quad (2.17)$$

III.1.3. Calcul des paramètres électriques des enroulements :

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

III.1.3.1. Paramètres statoriques :

a) Résistance active d'une phase du stator :

$$R_1 = \rho_{cu}(T) \frac{W_1 \cdot L_{W1} \cdot 10^{+3}}{a_1 \cdot N_{el} \cdot q_{eff}} \quad [\Omega] \quad (3.1)$$

Avec :

$\rho_{cu}(T)$: Résistivité du cuivre à la température (T).

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

Elle est donnée pour :

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

$$T = 115\text{ °C} \quad \rho_{cu} = 24,4 \cdot 10^{-9} \quad [\Omega \cdot m]$$

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

$$L_{W1} = 2 \cdot (L_i + L_{f1}) \quad [mm] \quad (3.2)$$

Avec :

L_i : Longueur virtuelle de l'induit.

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

$$L_{f1} = (1,16 + 0,14 \cdot P) \cdot b_{1moy} + 15 \quad [mm] \quad (3.3)$$

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

$$b_{1moy} = \frac{\pi \cdot (D_1 + h_{Z1}) \cdot Y_{1moy}}{Z_1} \quad [mm] \quad (3.4)$$

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

b) Réactances de fuites et perméances de fuites du stator :

La réactance de fuite globale du stator comprend :

- **Réactance de fuite d'encoche :**

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

$$X_{enc1} = \frac{1,58 \cdot f_1 \cdot L_I \cdot W_1^2}{q_1 \cdot p \cdot 10^8} \cdot \lambda_{enc1} \quad [\Omega] \quad (3.5)$$

- **Réactance de fuite différentielle :**

C'est le résultat des flux suivants :

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

Elle est donnée par :

$$X_{1d} = \frac{1,58 \cdot f_1 W_1^2}{q_1 \cdot P 10^8} \cdot \lambda_{1d} \quad [\Omega] \quad (3.6)$$

- **Réactance de fuite frontale :**

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

Elle est donnée par :

$$X_{1f} = \frac{1,58 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot W_1^2}{q_1 \cdot p \cdot 10^8} \cdot \lambda_{1f} \quad [\Omega] \quad (3.7)$$

La réactance totale est donnée par :

$$X_1 = 1,58 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot W_1^2 \cdot \frac{\lambda_1}{q_1 \cdot p \cdot 10^3} \quad [\Omega] \quad (3.8)$$

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

$$\lambda_1 = \lambda_{enc1} + \lambda_{1d} + \lambda_{1f} \quad (3.9)$$

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

$$\lambda_{enc1} = \frac{h_1}{3 \cdot b_{enc12}} \cdot K_{b1} + \left(\frac{h_{11}}{b_{enc1}} + \frac{3 \cdot h_{K1}}{b_{enc12} + 2 \cdot b_{f1}} + \frac{h_{f1}}{b_{f1}} \right) \cdot K_{b2} \quad (3.10)$$

K_{b1} , K_{b2} : Coefficients données suivant la figure III-3 (voir annexe).

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

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

Elle est donnée par la formule suivante :

$$\lambda_{1d} = \frac{0,9 \cdot t_1 \cdot (q_1 \cdot K_{en1})^2}{K_\delta \cdot \delta} \cdot K_{rr1} \cdot K_{dd1} \cdot K_{r1} \quad (3.11)$$

$$K_{r1} = 1 - \frac{0,033 \cdot b_{f1}^2}{\delta \cdot t_1} \quad (3.12)$$

Ou :

K_{rr1} : Coefficient qui dépend de Q_1 donnée par le tableau (voir annexe 6)

K_{dd1} : Coefficient de fuite différentielle donnée par tableau (voir annexe 4) en fonction de $\frac{Z_2}{p}$ et q_1 .

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

$$\lambda_{1f} = 0,34 \cdot \frac{q_1 \cdot (L_{f1} - 0,64 \cdot \beta \cdot \tau_{p1})}{L_i} \quad (3.13)$$

III.1.3.2. Paramètres rotoriques :

III.1.3.2.1. Resistance rotorique :

a) Resistance active de la barre :

Pour le type d'encoches présentées dans la figure III-7, on a :

$$R_b = \rho_{al}(T) \cdot \frac{L_i}{S_b} \cdot 10^3 \quad [\Omega] \quad (3.14)$$

Pour :

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

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

Dans le calcul, on assimile la longueur de la barre à celle de l'induit $L_b = L_i$.

b) Resistance de l'anneau :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$R_{an} = \frac{\rho_{al}(T) \cdot 2\pi \cdot D_{an} \cdot 10^{+3}}{Z_2 \cdot S_{an}} \quad [\Omega] \quad (3.15)$$

Avec :

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

D_{an} : Diamètre moyen de l'anneau en $[\text{mm}]$

c) Resistance de l'anneau ramenée à la barre :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$R_{anram-b} = \frac{R_{an}}{(K_{red})^2} \quad [\Omega] \quad (3.16)$$

d) Resistance de l'anneau ramenée au stator :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$R_{anram-s} = M \cdot R_{anram-b} \quad [\Omega] \quad (3.17)$$

$$M = \frac{4 \cdot m_1}{Z_2} \cdot \left(\frac{W_1 \cdot K_{en1}}{K_{ob}} \right)^2 \quad (3.18)$$

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

$$K_{0b} = \frac{\sin(\alpha_{0b}/2)}{(\alpha_{0b}/2)} \quad (3.19)$$

α_{0b} : Angle d'inclinaison des encoches.

$$\alpha_{0b} = \frac{2.\pi.p.\beta_{0b}}{Z_2} \quad [\text{rad}] \quad (3.20)$$

M : Coefficient de réduction de la cage rotorique vers le stator.

$$\beta_{0b} = \frac{t_1}{t_2} \quad (3.21)$$

β_{0b} : Rapport des pas dentaires statorique et rotorique.

e) Résistance active d'une phase rotorique :

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

$$R_2 = R_b + R_{anram-b} \quad [\Omega] \quad (3.22)$$

f) Résistance d'une phase rotorique ramenée au stator :

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

$$R_{2ram} = M.R_2 \quad [\Omega] \quad (3.23)$$

III.1.3.2.2. Réactance de dispersion et perméance du rotor :

Dans cette partie, on calcul :

-La réactance de fuite d'encoche, due au flux de fuite qui se renferme autour des conducteurs.

-La réactance frontale, (la partie de l'enroulement située dans l'air à chaque extrémité du paquet de tôles).

-La réactance due au flux différentiel dont la valeur est très élevée dans un entrefer faible.

Et dans le type d'encoche représenté dans la figure III-7, on distingue aussi :

-La réactance de fuite due à l'induction dans les encoches.

-La réactance de dispersion globale, elle est donnée par la formule suivante :

$$X_2 = 7,9.f_1.L_2.\lambda_2.10^{-9} \quad [\Omega] \quad (3.24)$$

λ_2 : Perméance de dispersion du rotor, elle est donnée par :

$$\lambda_2 = \lambda_{2enc} + \lambda_{2d} + \lambda_{2f} + \lambda_{0b} \quad (3.25)$$

λ_{2enc} , λ_{2d} , λ_{2f} , λ_{0b} : Sont respectivement les perméances : d'encoche, différentielle, frontale et oblique.

On procède au calcul des différentes perméances.

➤ **Perméance d'encoche :**

$$\lambda_{2enc} = C_\lambda + \left(\frac{h_{f2}}{b_{f2}}\right) \quad (3.26)$$

Avec :

$$C_\lambda = \Psi \left[\left(\frac{h_2 + 0,4 \cdot d_{22}}{3 \cdot d_{21}}\right) \cdot \left(\frac{(1 - \pi \cdot d_{21})}{8 \cdot S_b}\right)^2 + 0,66 - \left(\frac{b_{f2}}{2 \cdot d_{21}}\right) \right] \quad (3.27)$$

Ψ : Représenté dans la figure III-5. Pour le nominal on a $\Psi = 1$.

➤ **Perméance différentielle :**

$$\lambda_{2d} = \frac{0,9 \cdot t_2 \cdot (Z_2/6 \cdot p)^2}{\delta \cdot K_\delta} \cdot K_{dd2} \quad (3.28)$$

K_{dd2} : Coefficient de fuite différentielle donnée en fonction de q_2 voir figure III-4.1

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

$$K_{dd2} = \frac{9,15}{100 \cdot (Z_2/6 \cdot p)^2} \quad (3.29)$$

➤ **Perméance frontale :**

$$\lambda_{2f} = \frac{2,3 \cdot D_{anmoy}}{Z_2 \cdot L_i \cdot (K_{dd2})^2} \cdot \log \left(\frac{4,7 \cdot D_{anmoy}}{2 \cdot (h_{an} + L_{an})} \right) \quad (3.30)$$

➤ **Perméance d'inclinaison d'encoches rotorique**

$$\lambda_{0b} = \frac{t_2 \cdot \beta_{0b}}{9,5 \cdot \delta \cdot K_\delta \cdot K_\mu} \quad (3.31)$$

Avec :

K_μ : Coefficient de saturation de la machine.

III.1.3.2.3. Réactance du rotor ramenée au stator :

Pour le type d'encoche présentée dans la figure III-6 on a :

$$X_{2ram} = M \cdot X_2 \quad [\Omega] \quad (3.32)$$

III.1.3.3. Paramètres au démarrage :

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

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

a) Profondeur de pénétration :

Elle est donnée par :

$$h_{pp} = \frac{h_p}{1+\varphi} \quad [\text{mm}] \quad (3.33)$$

h_p : Hauteur de la barre.

φ : Coefficient qui dépend de la valeur de ξ , il est donné par la courbe de la figure III-3-4

$$\xi = 0,064 \cdot h_b \cdot \sqrt{g} \quad \text{Pour } T = 115^\circ\text{C} \quad (3.34)$$

b) Largeur à la limite de pénétration :

Elle est donnée par :

$$b_{pp} = d_{21} - \left[\left(\frac{d_{21} - d_{22}}{h_2} \right) \cdot \left(\frac{h_{pp} - d_{12}}{2} \right) \right] \quad [\text{mm}] \quad (3.35)$$

c) Section de la barre pénétrée par le courant de démarrage :

Elle est donnée par :

$$S_{bdem} = \left(\pi \cdot \frac{d_{21}^2}{8} \right) + \left[0,5(d_{21} + b_{pp}) \cdot (h_{pp} - 0,5 \cdot d_{21}) \right] \quad [\text{mm}^2] \quad (3.36)$$

d) Résistance de la barre au démarrage :

Pour le type d'encoche donnée en figure III-7, on a :

$$R_{bdem} = R_b \cdot K_{dep} \quad [\Omega] \quad (3.37)$$

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

$$K_{dep} = \frac{S_b}{S_{bdem}} \quad (3.38)$$

e) Résistance de la cage au démarrage :

Elle est donnée comme suit :

$$R_{2dem} = R_{anram-b} + R_{bdem} \quad [\Omega] \quad (3.39)$$

f) Résistance de la cage au démarrage ramenée au stator :

Elle est donnée par :

$$R_{2dem-ram} = M.(R_{anram-b} + R_{bdem}) \quad [\Omega] \quad (3.40)$$

g) Résistance de fuite au démarrage :

Pour le type d'encoche donnée en figure III-7, on a :

$$X_{2dem} = 7,9.f_1.L_i.\lambda_{2dem}10^{-9} \quad [\Omega] \quad (3.41)$$

X_{2dem} : Réactance de dispersion du rotor au démarrage.

$$\lambda_{2dem} = \lambda_{2encdem} + \lambda_{2d} + \lambda_{2f} + \lambda_{0b} \quad (3.42)$$

λ_{2dem} : Perméance de dispersion du rotor au démarrage.

Seule la perméance d'encoche qui est affectée par l'effet de refoulement du courant.

h) Réactance de fuite au démarrage ramenée au stator :

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

Pour notre type d'encoche :

$$X_{2demram-s} = M.X_{2dem} \quad [\Omega] \quad (3.43)$$

III.1.4. Calcul des pertes et du rendement :

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

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

On peut distinguer quatre groupes de pertes :

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

III.1.4.1. Pertes principales dans le fer :

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

a) Pertes dans les dents :

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

$$P_{fZ1} = 1,7 \cdot P_{1/50} \cdot B_{Z1max}^2 \cdot G_{Z1} \quad [\text{W}] \quad (4.1)$$

$$P_{1/50} = 2,5 \quad [\text{W} \cdot \text{Kg}^{-1}] \quad \text{Pour l'acier 2013}$$

$$G_{Z1} = 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot L_i \cdot K_{fer} \cdot [h_{Z1} \cdot \pi \cdot (D_1 + h_{Z1}) - S_{enc1} \cdot Z_1] \quad [\text{Kg}] \quad (4.2)$$

G_{Z1} : Poids des dents statorique.

b) Pertes dans la culasse statorique :

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

$$P_{c1} = 1,7 \cdot P_{1/50} \cdot G_{c1} \cdot B_{c1}^2 \quad [\text{W}] \quad (4.3)$$

$$G_{c1} = 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot L_i \cdot K_{fer} \cdot h_{c1} \cdot \pi \cdot (D_{ext} - h_{c1}) \quad [\text{Kg}] \quad (4.4)$$

G_{c1} : Poids de la culasse statorique.

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

$$P_{fer} = P_{c1} + P_{fz1} \quad [W] \quad (4.5)$$

III.1.4.2. Pertes électriques dans le cuivre et l'aluminium :

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

a) Pertes joules statorique :

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

$$P_{j1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_{n1}^2 \quad [W] \quad (4.6)$$

Avec :

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

I_{n1} : Courant dans une phase statorique.

b) Pertes joules rotorique :

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

$$P_{j2} = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 \quad [W] \quad (4.7)$$

Avec :

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

I_2 : Courant dans la barre.

R_2 : Résistance d'une phase rotorique.

III.1.4.3. Pertes mécaniques :

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

$$P_{mec} = K_t (N \cdot 10^{-3})^2 \cdot (D_{ext} \cdot 10^{-2})^4 \quad [W] \quad (4.8)$$

Avec:

K_t : Facteur de majoration.

$$K_t = 1,3. (1 - D_{ext}. 10^{-3}) \quad \text{Pour } 2P = 2.$$

$$K_t = 1 \quad \text{Pour } 2P > 2.$$

III.1.4.4. Pertes supplémentaires :

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

$$P_{sup} = 0,005. \frac{P_n.10^3}{\eta_n} \quad [\text{W}] \quad (4.9)$$

III.1.4.5. Pertes totales :

Elles sont données par la relation suivante :

$$P_{tot} = P_{fer} + P_{j1} + P_{j2} + P_{mec} + P_{sup} \quad [\text{w}] \quad (4.10)$$

III.1.4.6. Le rendement de la machine :

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

$$\eta = \frac{P_n.10^3}{P_n.10^3 + P_{tot}} \quad (4.11)$$

III.1.4.7. Calcul de la résistance de magnétisation :

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

$$I_{0a} = \frac{P_{fer} + P_{mec} + P_{a10}}{m_1. U_{n1}} = \frac{P_{fer} + P_{mec} + R_1. m_1. (I_\mu)^2}{m_1. U_{n1}} \quad [\text{A}] \quad (4.12)$$

D'où:

$$R_m = \frac{X_m. I_\mu}{I_{0a}} \quad [\Omega] \quad (4.13)$$

Avec :

I_μ : Courant magnétisant.

X_m : Résistance magnétisante exprimée.

III.1.5. Calcul des performances du moteur :

Dans cette partie de calcul, nous allons étudier les performances des moteurs, en utilisant une méthode analytique se basant sur les schémas équivalents de la

machine asynchrone. IL existe plusieurs schémas équivalents des machines asynchrones qui sont analogues à celui d'un transformateur :

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

- Schéma équivalent d'une machine asynchrone avec circuit magnétisant rapporté aux bornes du réseau (schéma équivalent en L).

Dans notre étude on utilise le schéma équivalent en L car il est le plus commode. Ceci pour déterminer les caractéristiques de fonctionnement du moteur.

III.1.5.1.Schéma équivalent en L du moteur :

C'est un schéma conventionnel monophasé ramené au stator :

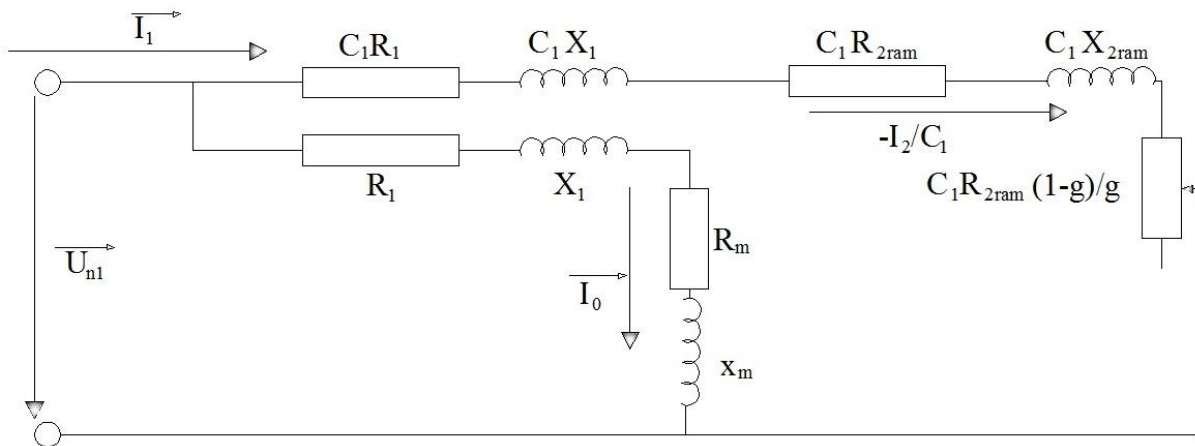


Figure III-5 : Schéma équivalent en L du moteur

Avec :

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

Elle est donnée par :

$$C_1 = 1 + \frac{X_1}{X_m} \quad (5.1)$$

III.1.5.2. Caractéristiques de fonctionnement du moteur :

En se référant à la **figure III-5**, on détermine :

a) Le glissement :

$$g = \frac{A - \sqrt{A^2 - C_1^2 \cdot R_{2ram} \cdot B}}{B} \quad (5.2)$$

Avec :

$$B = 2A + R' \quad (5.3)$$

$$A = \frac{m_1 \cdot U_{n1}^2}{2P_2'} - R_1 \quad (5.4)$$

$$R' = R_{2ram} \left[\left(\frac{R_1}{R_{2ram}} \left(1 + \frac{X_{2ram}}{X_m} \right) \right)^2 + \left(\frac{X_1}{X_{2ram}} \left(1 + \frac{X_{2ram}}{X_m} \right) + \frac{X_{2ram}}{R_{2ram}} \right)^2 \right] \quad [\Omega] \quad (5.5)$$

b) Puissance rapportée du circuit primaire au circuit secondaire :

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

$$P_2' = P_2 + P_{sup} + P_{mec} \quad [W] \quad (5.6)$$

c) Inductance équivalente :

Elle est exprimée comme suit :

$$Z_{2eq} = \sqrt{R_{2eq}^2 + X_{2eq}^2} \quad [\Omega] \quad (5.7)$$

Avec :

$$R_{2eq} = C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot R_{2ram} / g \quad [\Omega] \quad (5.8)$$

$$X_{2eq} = C_1 \cdot X_1 + C_1^2 \cdot X_{2ram} \quad [\Omega] \quad (5.9)$$

d) Calcul du courant secondaire :

Le courant dans le circuit secondaire est donné par :

$$I_2'' = \frac{U_{n1}}{Z_{2eq}} \quad [A] \quad (5.10)$$

$$I_2' = C_1 \cdot I_2'' \quad [A] \quad (5.11)$$

Avec :

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

I_2' : Le courant dans le circuit secondaire ramené au primaire.

e) Facteur de puissance rotorique :

Le facteur de puissance rotorique est donné par :

$$\cos(\Phi_2) = \frac{R_{2eq}}{Z_{2eq}} \quad (5.12)$$

D'où :

- **Courant actif :**

$$I_{2a}'' = I_2'' \cdot \cos(\Phi_2) \quad [A] \quad (5.13)$$

- **Courant réactif :**

$$I_{2r}'' = I_2'' \cdot \sin(\Phi_2) \quad [A] \quad (5.14)$$

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

$$I_{0a} = \frac{P_{a10} + P_{f1}}{m_1 \cdot U_{n1}} \quad [A] \quad (5.15)$$

- **Courant magnétisant :**

$$I_{0a} = \frac{P \cdot \sqrt{F_1}}{0,9 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot K_{en1}} \quad [A] \quad (5.16)$$

- **Courant total à vide :**

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2} \quad [A] \quad (5.17)$$

- **Courant absorbé :**

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1r}^2} \quad [A] \quad (5.18)$$

Avec:

$$I_{1a} = I_{0a} + I_{2a}'' \quad [A] \quad (5.19)$$

$$I_{1r} = I_{0r} + I_{2r}'' \quad [A] \quad (5.20)$$

Le facteur de puissance e la machine est donné par :

$$\cos(\Phi_1) = \frac{I_{1a}}{I_1} \quad (5.21)$$

f) Puissance absorbée par le moteur :

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$P_1 = m_1 \cdot U_{n1} \cdot I_{1a} \quad [\text{W}] \quad (5.22)$$

g) Vitesse de rotation du moteur :

Elle est donnée par la relation suivante :

$$N_2 = N \cdot (1 - g) \quad [\text{tr/min}] \quad (5.23)$$

Avec :

N : Vitesse du synchronisme.

G : Glissement.

$\frac{N_2}{N} = 1 - g$: C'est la vitesse relative du rotor par rapport au stator.

h) Couple utile sur l'arbre du moteur :

Il est donné par :

$$C_u = 9,55 \frac{P_2 \cdot 10^3}{P_n} \quad [\text{N.m}] \quad (5.24)$$

Remarque :

Afin de pouvoir tracer les caractéristiques de la machine ; on a procédé dans le programme informatique comme suit :

On calcul la puissance en unité relative :

$$P_2^* = \frac{P_2}{P_n} \quad (5.25)$$

Ensuite, on fait varier la puissance P_2^* et on aura toutes les valeurs de tous les paramètres nécessaires pour tracer les caractéristiques de la machine, à savoir : $(g, N_2, I_2, \cos(\Phi_2), C_u)$

III.1.5.3. Caractéristiques de démarrage et capacité de surcharge :

a) Résistance équivalente au démarrage :

Elle est exprimée comme suit :

$$R_{eqdem} = C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot R_{2dem-ram} \quad [\Omega] \quad (5.26)$$

$R_{2dem-ram}$: Résistance de démarrage rotorique ramenée.

b) Réactance équivalente au démarrage :

Elle est donnée par la relation suivante :

$$X_{eqdem} = X_{const} + K_x \cdot K_{var} \quad [\Omega] \quad (5.27)$$

Avec :

K_x : Coefficient qui est donné suivant la forme de l'encoche.

Pour les encoches semi ouvertes $K_x = 0,0825$

X_{const} : Réactance de dispersion du moteur qui ne dépend pas de la saturation.

X_{var} : Réactance variable de dispersion du moteur qui dépend de la saturation.

Les réactances X_{const} et X_{var} sont respectivement données par les relations suivantes :

$$X_{const} = C_1 \cdot X_1 \frac{\lambda_1 - \lambda_{1dem}}{\lambda_1} + C_1^2 \cdot X_{2dem-ram} \cdot \frac{\lambda_{2d} - \lambda_{2var}}{\lambda_{2var}} \quad [\Omega] \quad (5.28)$$

$$X_{var} = C_1 \cdot X_1 \frac{\lambda_{1dem}}{\lambda_1} + \frac{C_1^2 \cdot X_{2ram} \cdot \lambda_{2var}}{\lambda_2} \quad [\Omega] \quad (5.29)$$

Avec :

λ_{2var} : Composante variable de la perméance d'encoche rotorique, elle est donnée par :

$$\lambda_{2var} = \lambda_{2encvar} + \lambda_{2d} \quad (5.30)$$

Où :

$\lambda_{2encvar}$: Composante variable de perméance d'encoche rotorique. Pour le type d'encoche ovale semi ouverte, on a :

$$\lambda_{2encvar} = \frac{h_{f2}}{b_{f2}} \quad (5.31)$$

Avec :

λ_1 : Perméance statorique.

λ_{1dem} : Perméance statorique au démarrage.

λ_{enc1d} : Perméance d'encoche statorique qui dépend de la saturation.

Elle est donnée par :

$$\lambda_{enc1d} = \left(\frac{3 \cdot h_{K1}}{b_{enc1} + 2 \cdot b_{f1}} + \frac{h_{f1}}{b_{f1}} \right) \cdot K_{\beta 2} \quad (5.32)$$

h_{f1} : Hauteur de la fente d'encoche statorique

c) Capacité de surcharge :

La capacité de surcharge du moteur, c'est le rapport entre le couple maximal et le couple nominal. Elle est donnée comme suit :

$$K = \frac{C_{max}}{C_{nom}} = \frac{\frac{g_{nom} + g_{cr}}{g_{cr}} + R_{cr}}{2 + R_{cr}} \quad (5.33)$$

Avec :

R_{cr} : Résistance critique.

$$R_{cr} = 2 \cdot R_1 \frac{g_{cr}}{(R_{2ram} \cdot C_1)} \quad (5.34)$$

g_{nom} : Glissement nominal.

g_{cr} : Glissement critique qui est donné par :

$$g_{cr} = \frac{C_1 \cdot R_{2ram}}{(X_1 + C_1 \cdot X_{2ram})} \quad (5.35)$$

Avec :

R_{2ram} : Résistance rotorique ramenée.

X_{2ram} : Réactance rotorique ramenée.

d) Courant de démarrage :

Au démarrage le moteur asynchrone est assimilable à un transformateur dont le secondaire alimente une résistance faible dans ces conditions, le courant de démarrage est considérable ; il peut atteindre 6 à 7 fois le courant nominal. Sa valeur est donnée par l'expression suivante :

$$I_{1dem} = \frac{U_{n1}}{\sqrt{R_{eqdem}^2 + X_{eqdem}^2}} \quad [A] \quad (5.36)$$

U_{n1} : Tension d'alimentation.

e) Le couple de démarrage :

Il est donné par l'expression suivante :

$$C_d = \frac{P \cdot m_1 \cdot U_{n1}^2 \cdot R_{2dem}}{2\pi f_1 (R_{eqdem}^2 + X_{eqdem}^2)} = P \cdot m_1 \cdot I_{1dem}^2 \cdot \frac{R_{2dem}}{2\pi \cdot f_1} \quad [\text{N.m}] \quad (5.37)$$

N.B : Le rapport entre le couple de démarrage et le couple nominal est estimé à :

- Pour $h = 50 \div 132$ [mm] on a :

$$\frac{C_d}{C_{nom}} = 2 \div 2,2 \quad (5.38)$$

- Pour $h = 160 \div 355$ [mm] on a :

$$\frac{C_d}{C_{nom}} = 1,2 \div 1,4 \quad (5.39)$$

Chapitre IV

Elaboration d'un programme de calcul

DONNEES INITIALES

Puissance nominale	$P_n := 4$	(kW)
Nombre de phases	$m_l := 3$	
La fréquence	$f_1 := 50$	Hz
Tension nominale par phase	$U_n := 380$	V
Vitesse de synchronisme	$n := 1500$	$\left(\frac{\text{tr}}{\text{mn}} \right)$

DIMENSIONS PRINCIPALES

La puissance électromagnétique P_e

Facteur de majoration de la tension $K_e := 0.97$

Facteur de puissance

$$\phi_n := \arccos(0.83) \quad \phi_n = 0.592$$

$$\cos(\phi_n) = 0.83$$

Rendement nominale $\eta_n := 0.83$

Nombres de paires de pôles $p := 2$

$$P_e := K_e \cdot \frac{P_n \cdot 10^3}{\eta_n \cdot \cos(\phi_n)} \quad P_e = 5632.167 \quad (\text{W})$$

La longueur virtuelle de l'induit

Coefficient de recouvrement polaire $\alpha_i := 0.64$

Facteur de la forme de la courbe d'induction $K_f := 1.11$

Le nombre d'encoches

Le nombre d'encoches statorique $Z_1 := 36$

Le nombre d'encoches rotorique $Z_2 := 28$

Le nombre d'encoches par pole et par phase

$$q1 := \frac{Z1}{2 \cdot p \cdot m1} \qquad q1 = 3 \qquad \left(\frac{\text{encoches}}{\text{pole} \cdot \text{phase}} \right)$$

Les diamètres du stator

Le diamètre extérieur du stator $D_{ext} := 170$ (mm)

Le diamètre intérieur du stator $D1 := 108.5$ (mm)

Le pas dentaire statorique en mm

$$tz1 := \frac{\pi \cdot D1}{Z1} \qquad tz1 = 9.468 \qquad (\text{mm})$$

Angle électrique entres deux encoches

$$\gamma := p \cdot \frac{360}{Z1} \qquad \gamma = 20$$

La zone de phase

$$\alpha := q1 \cdot \gamma \qquad \alpha = 60$$

Coefficient de distribution K_{d1}

$$K_{d1} := \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m1}\right)}{q1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot q1 \cdot m1}\right)} \qquad K_{d1} = 0.96$$

Le pas polaire en nombre d'encoches

$$\tau_p := \frac{Z1}{2 \cdot p} \qquad \tau_p = 9 \qquad \text{encoches}$$

Le pas polaire en mm

$$\tau_{p1} := \frac{\pi \cdot D1}{2 \cdot p} \qquad \tau_{p1} = 85.216 \qquad (\text{mm})$$

Le pas d'enroulement

$$\varepsilon r1 := \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix} \qquad \varepsilon r := \varepsilon r1_0$$

$$y1 := \left(\frac{Z1}{2 \cdot p} \right) - \varepsilon r \qquad y1 = 9 \qquad \text{encoches}$$

Le rapport de raccourcissement β

$$\beta := \frac{y1}{\tau p} \qquad \beta = 1$$

Coefficient de raccourcissement polaire $Kr1$

$$Kr1 := \sin\left(\frac{\beta \cdot \pi}{2}\right) \qquad Kr1 = 1$$

Le facteur de bobinage de l'enroulement statorique $Ken1$

$$Ken1 := Kd1 \cdot Kr1 \qquad Ken1 = 0.96$$

La charge linéaire $A1$

$$A11 := \boxed{241}$$

$$A11 = 241 \qquad \left(\frac{A}{cm} \right)$$

Induction dans l'entrefer $B\delta$

$$B := \boxed{85}$$

$$B\delta 1 := B \cdot 10^{-2} \qquad B\delta 1 = 0.85 \quad (\text{T})$$

La longueur virtuelle de l'induit

$$L\delta 1 := \frac{8.62 \cdot 10^7 \cdot Pe}{n \cdot D1^2 \cdot A11 \cdot B\delta 1 \cdot Ken1} \qquad L\delta 1 = 139.836 \quad (\text{mm})$$

$$L\delta 1 := 140 \quad (\text{mm})$$

LA tension simple

$$Un1 := \begin{pmatrix} 220 \\ 380 \\ 660 \end{pmatrix} \qquad Un1_1 = 380 \quad (\text{V})$$

Nombre de voix parallèles

$$a1 := 1$$

Courant nominale dans une phase

$$In1 := \frac{Pn \cdot 10^3}{m1 \cdot Un1_1 \cdot \cos(\phi n) \cdot \eta n} \qquad In1 = 5.093 \quad (\text{A})$$

Le flux utile

$$\phi_1 := \frac{B\delta_1 \cdot D_1 \cdot L\delta_1 \cdot 10^{-6}}{p} \quad \phi_1 = 0.006 \quad (\text{Wb})$$

Nombre de conducteurs effectifs dans une encoche

$$K_e = 0.97 \quad K_{en1} = 0.96$$

$$W_{11} := \frac{K_e \cdot U_{n1} \cdot 50}{222 \cdot K_{en1} \cdot \phi_1 \cdot f_1} \quad W_{11} = 267.964 \quad (\text{spires})$$

$$N_{en1} := \frac{W_{11} \cdot a_1}{p \cdot q_1} \quad N_{en1} = 44.661 \quad (\text{conducteurs})$$

$$\text{round}(N_{en1}) := 45 \quad (\text{conducteurs})$$

Nombre de spires d'une voix parallèle

$$W_1 := \frac{\text{round}(N_{en1}) \cdot p \cdot q_1}{a_1} \quad W_1 = 270 \quad (\text{spires})$$

Le flux utile

$$\phi := \phi_1 \cdot \frac{W_{11}}{W_1} \quad \phi = 0.006 \quad (\text{Wb})$$

Induction dans l'entrefer

$$B\delta := B\delta_1 \cdot \frac{W_{11}}{W_1} \quad B\delta = 0.844 \quad (\text{T})$$

La charge linéaire

$$A1 := \frac{10 \cdot \text{round}(\text{Nen1}) \cdot Z1 \cdot \text{In1}}{\pi \cdot D1 \cdot a1} \quad A1 = 242.066 \quad \left(\frac{\text{A}}{\text{cm}} \right)$$

Enroulement statorique

Densité de courant statorique

651

$$j1 := j11 \cdot 10^{-2} \quad j1 = 6.51 \quad \left(\frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \right)$$

La section effective

$$\text{Seff1} := \frac{\text{In1}}{a1 \cdot j1} \quad \text{Seff1} = 0.782$$

La section élémentaire

$$\text{Nel1} := 2 \quad \text{Sel11} := \frac{\text{Seff1}}{\text{Nel1}} \quad \text{Sel11} = 0.391 \quad (\text{mm}^2)$$

$$\text{dnu} := 0.71 \quad (\text{mm}) \quad \text{Dis} := 0.776 \quad (\text{mm})$$

Calcul de la tôle magnétique statorique

Le pas dentaire en mm

$$t1 := \frac{\pi \cdot D1}{Z1} \quad t1 = 9.468 \quad (\text{mm})$$

Induction dans la dent statorique

$$bz1 := 5.47 \quad (\text{mm})$$

$$K_{fer} := 0.97$$

$$Bz1 := \frac{t1 \cdot B\delta}{K_{fer} \cdot bz1} \quad Bz1 = 1.505 \quad (\text{T})$$

La hauteur du dos du stator

$$Hc1 := 15.7 \quad (\text{mm})$$

Induction dans le dos statorique

$$Bc1 := \frac{0.5 \cdot \alpha_i \cdot \tau p1 \cdot B\delta}{K_{fer} \cdot hc1} \quad Bc1 = 1.511 \quad (\text{T})$$

La hauteur de la dent du stator

$$Hz1 := 15.0495 \quad (\text{mm})$$

La hauteur de la clavette

$$hk1 := c \quad (\text{mm})$$

$$hf1 := 0.8 \quad (\text{mm})$$

La hauteur de l'encoche statorique

$$henc1 := 15 \quad (\text{mm})$$

La largeur maximale de l'encoche

$$r := 3.067 \quad (\text{mm})$$

$$b1 := 2r \quad b1 = 6.134 \quad (\text{mm})$$

La largeur minimale de l'encoche

$$b2 := 4.05 \quad (\text{mm})$$

La section de l'encoche

$$h1 := henc1 - \frac{b1}{2} \qquad h1 = 11.933 \quad (\text{mm})$$

$$Senc1 := \frac{b1 + b2}{2} \cdot (h1) + \frac{\pi \cdot b1^2}{8} \qquad Senc1 = 75.539 \quad (\text{mm}^2)$$

$$bis := 0.1 \quad (\text{mm})$$

$$Sis := bis \cdot \left[\left(\frac{\pi \cdot b1}{2} \right) + 2 \cdot h1 + (b2) \right] \qquad Sis = 3.755 \quad (\text{mm}^2)$$

La section de l'encoche occupée par l'enroulement

$$See := Senc1 - Sis \qquad See = 71.783 \quad (\text{mm}^2)$$

Coefficient de remplissage de l'encoche

$$KR_a := \frac{Nen1 \cdot \text{round}(Nen1) \cdot \text{dis}^2}{See} \qquad KR_a = 0.755$$

Calcul du noyau rotorique

Entrefe

$$\delta e := 0.28 \quad (\text{mm})$$

Diamètre extérieur du rotor

$$D2 := D1 - 2 \cdot \delta e \qquad D2 = 107.94 \quad (\text{mm})$$

La longueur virtuelle de l'induit

$$L2 := L\delta 1 \qquad L2 = 140 \quad (\text{mm})$$

Le diamètre de l'arbre

$$D2ar := 37 \quad (\text{mm})$$

Le pas polaire en mm

$$\tau_{p2} := \frac{\pi \cdot D2}{2 \cdot p} \qquad \tau_{p2} = 84.776 \qquad (\text{mm})$$

Le pas dentaire en mm

$$t2 := \frac{\pi \cdot D2}{Z2} \qquad t2 = 12.111 \qquad (\text{mm})$$

La hauteur de la culasse rotorique

$$hc2 := 18.573 \qquad (\text{mm})$$

$$Bc2 := \frac{\phi \cdot 10^6}{2 \cdot K_{fer} \cdot L2 \cdot hc2} \qquad Bc2 = 1.274 \qquad (\text{T})$$

La hauteur de la dent rotorique

$$hz2 := 16.55$$

Calcul de l'encoche rotorique

La largeur de l'encoche

$$bz2 := 6.5 \qquad (\text{mm})$$

$$Bz2 := \frac{t2 \cdot B\delta}{K_{fer} \cdot bz2} \qquad Bz2 = 1.62 \qquad (\text{T})$$

Rayon maximal de l'encoche

$$r1 := 2.386 \qquad (\text{mm})$$

Rayon minimal de l'encoche

$$r2 := 0.9 \qquad (\text{mm})$$

Diamètre supérieur de l'encoche

$$d21 := 4.772 \quad (\text{mm})$$

Diamètre inférieur de l'encoche

$$d22 := 1.8 \quad (\text{mm})$$

La cage rotorique

Section de la barre

$$h2 := 13.27 \quad (\text{mm})$$

$$henc2 := h2 + (r1 + r2) \quad henc2 = 16.557 \quad (\text{mm})$$

$$Sen2 := 2 \cdot (r1 + r2) \cdot h2 \cdot 0.5 + (r1^2 + r2^2) \cdot \frac{\pi}{2} \quad Sen2 = 53.823 \quad (\text{mm}^2)$$

Dimensionnement de l'anneau de court-circuit

La hauteur de l'anneau

$$han := (1.1 \div 1.25) \cdot hz2$$

$$\underline{han} := 1.15 \cdot hz2 \quad han = 19.041 \quad (\text{mm})$$

La section de l'anneau

$$San := (0.35 \div 0.45) \cdot \frac{Z2 \cdot Sen2}{2 \cdot p}$$

$$\underline{San} := 0.40 \cdot \frac{Z2 \cdot Sen2}{2 \cdot p} \quad San = 150.705 \quad (\text{mm}^2)$$

La largeur de l'anneau

$$lan := \frac{San}{han} \quad lan = 7.915 \quad (\text{mm})$$

Diamètre moyen intérieur de l'anneau

$$D_{an} := D_2 - h_{an} \qquad D_{an} = 88.899 \qquad (\text{mm})$$

Calcul du circuit magnétique

Entrefer

$$K_{\delta 1} := 1 + \frac{b_1}{t_1 - b_1 + \frac{5 \cdot \delta_e \cdot t_1}{b_1}} \qquad K_{\delta 1} = 2.116$$

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

$$K_{\delta} := K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2} \qquad K_{\delta} = 2.116$$

Force magnétomotrice dans l'entrefer

$$F_{\delta} := 0.8 B_{\delta} \cdot K_{\delta} \cdot \delta_e \cdot 10^3 \qquad F_{\delta} = 399.886 \qquad (\text{A})$$

Champ magnétique dans la dent du stator

$$B_{z1} = 1.505$$

$$H_{z1} := 72 \left(\frac{\text{A}}{\text{m}} \right)$$

Fmm dans la dent du stator

$$F_{z1} := H_{z1} \cdot h_{z1} \cdot 10^{-3} \qquad F_{z1} = 10.866 \qquad (\text{A})$$

Fmm dans la culasse

La longueur moyenne des lignes dans la culasse statorique

$$L_{c1} := \frac{\pi \cdot (D_{ext} - h_{c1})}{2 \cdot p} \qquad L_{c1} = 121.187 \qquad (\text{mm})$$

Induction B_{c1}

$$B_{c1} = 1.511 \quad (\text{T})$$

Champ magnétique dans la culasse statorique

$$H_{c1} := 542 \quad \left(\frac{\text{A}}{\text{m}} \right)$$

$$F_{c1} := H_{c1} \cdot L_{c1} \cdot 10^{-3} \quad F_{c1} = 65.683 \quad (\text{A})$$

Induction B_{z2}

$$B_{z2} = 1.62 \quad (\text{T})$$

Champ magnétique dans la dent du rotor

$$H_{z2} := 906 \quad \left(\frac{\text{A}}{\text{m}} \right)$$

Fmm dans la dent du rotor

$$F_{z2} := H_{z2} \cdot h_{z2} \cdot 10^{-3} \quad F_{z2} = 15.001 \quad (\text{A})$$

Fmm dans la culasse rotorique

$$B_{c2} = 1.274 \quad (\text{T})$$

Champ magnétique dans la culasse du rotor

$$H_{c2} := 301 \quad \left(\frac{\text{A}}{\text{m}} \right) \quad dk_2 := 0$$

$$L_{c2} := \frac{\pi}{4 \cdot p} \cdot \left(D_{2ar} + hc_2 + \frac{4}{3} \cdot dk_2 \right) \quad L_{c2} = 21.8 \quad (\text{mm})$$

$$F_{c2} := H_{c2} \cdot L_{c2} \cdot 10^{-3} \quad F_{c2} = 6.562 \quad (\text{A})$$

Fmm totale par paire de pole

$$\Sigma F := 2 \cdot (F\delta + Fz1 + Fz2) + Fc1 + Fc2 \quad \Sigma F = 923.75 \quad (\text{A})$$

Coefficient de saturation de la machine

$$k\mu := \frac{\Sigma F}{2 \cdot F\delta} \quad k\mu = 1.155$$

Le courant magnétisant

$$I\mu := \frac{1.11 \cdot p \cdot \Sigma F}{m1 \cdot W1 \cdot Ke n1} \quad I\mu = 2.638 \quad (\text{A})$$

Le courant en U.R

$$Iur := \frac{I\mu}{In1} \quad Iur = 0.518$$

La fmm

$$E := Ke \cdot Un1_1 \quad E = 368.6 \quad (\text{V})$$

La réactance de magnétisation

$$Xm := \frac{Ke \cdot Un1_1}{I\mu} \quad Xm = 139.737 \quad (\text{ohm})$$

La réactance de magnétisation

UR

$$Xmur := \frac{Xm \cdot In1}{Un1_1} \quad Xmur = 1.873 \quad (\text{ohm})$$

Paramètres du stator

Résistance active

$$\underline{T} := 20 \quad c^0 \quad \rho_{cu} := 17.2 \cdot 10^{-9} \quad (\text{ohm}\cdot\text{m})$$

$$y_{lmoy} := 9$$

$$b_{lmoy} := \frac{\pi \cdot (D1 + hz1) \cdot y_{lmoy}}{Z1} \quad b_{lmoy} = 97.036 \quad (\text{mm})$$

$$Lf1 := (1.16 + 0.14p) \cdot b_{lmoy} + 15 \quad Lf1 = 154.731 \quad (\text{mm})$$

$$Lw1 := 2 \cdot (L\delta 1 + Lf1) \quad Lw1 = 589.462 \quad (\text{mm})$$

$$R1 := \rho_{cu} \cdot \frac{W1 \cdot Lw1 \cdot 10^3}{a1 \cdot Nel1 \cdot Sel1} \quad R1 = 3.499 \quad (\text{ohm})$$

Résistance active ur

$$R_{1ur} := R1 \cdot \frac{In1}{Un1_1} \quad R_{1ur} = 0.047$$

Réactance de fuite d'encoche

$$K\beta 1 := 1 \quad K\beta 11 := 1$$

$$hf1 = 0.8 \quad (\text{mm}) \quad hz1 = 15.05 \quad (\text{mm})$$

$$\lambda_{enc1} := \frac{h1}{3 \cdot b2} \cdot K\beta 1 + \left(0.785 \frac{b1}{2 \cdot b2} + \frac{bis}{b2} + \frac{hf1}{b1} \right) \cdot K\beta 11 \quad \lambda_{enc1} = 1.732$$

$$X_{enc1} := 1.58 \cdot f1 \cdot L\delta 1 \cdot W1^2 \cdot \frac{\lambda_{enc1}}{p \cdot q1 \cdot 10^8} \quad X_{enc1} = 2.327 \quad (\text{ohm})$$

La réactance de fuite différentielle

$$k_{rr1} := 0.014$$

$$k_{f1} := 1 - \left(\frac{0.033b1^2}{\delta e \cdot t1} \right) \quad k_{f1} = 0.532$$

$$k_{dd1} := 0.9$$

$$\lambda_{d1} := \frac{0.9t1 \cdot (q1 \cdot Ken1)^2 \cdot k_{rr1} \cdot k_{f1} \cdot k_{dd1}}{K\delta \cdot \delta e} \quad \lambda_{d1} = 0.813$$

$$X_{d1} := 1.58f1 \cdot L\delta 1 \cdot W1^2 \cdot \frac{\lambda_{d1}}{p \cdot q1 \cdot 10^8} \quad X_{d1} = 1.093 \quad (\text{ohm})$$

La réactance de fuite frontale

$$\tau 1 := \frac{\pi \cdot D1}{2 \cdot p} \quad \tau 1 = 85.216 \quad (\text{mm})$$

$$Q1 := \frac{Z2}{p} \quad Q1 = 14$$

$$\lambda_{f1} := 0.34 \cdot \frac{q1 \cdot (Lf1 - 0.64\beta \cdot \tau 1)}{L\delta 1} \quad \lambda_{f1} = 0.73$$

$$X_{f1} := \frac{1.58f1 \cdot L\delta 1 \cdot W1^2}{p \cdot q1 \cdot 10^8} \cdot \lambda_{f1} \quad X_{f1} = 0.981 \quad (\text{ohm})$$

Réactance inductive du dispersion de l'enroulement statorique

$$\lambda 1 := \lambda_{enc1} + \lambda_{d1} + \lambda_{f1} \quad \lambda 1 = 3.275$$

$$X1 := 1.58f1 \cdot L\delta 1 \cdot W1^2 \cdot \frac{\lambda 1}{p \cdot q1 \cdot 10^8} \quad X1 = 4.401 \quad (\text{ohm})$$

La réactance totale en UR

$$X_{1ur} := X_1 \cdot \frac{I_{n1}}{U_{n1_1}} \quad X_{1ur} = 0.059$$

Coefficient de dispersion magnétique du stator

$$\sigma\mu := \frac{X_1}{X_m} \quad \sigma\mu = 0.031$$

Force électromagnétique à vide Eo

$$E_o := \frac{U_{n1_1}}{1 + \sigma\mu} \quad E_o = 368.397 \quad (v)$$

Paramètres du rotor

Résistance de la barre

$$T := 20 \quad C^0 \quad \rho_{AL}(T) := 28 \cdot 10^{-9} \quad (ohm \cdot m)$$

$$S_b := 53.82 \quad (mm^2)$$

$$R_b := \rho_{AL}(T) \cdot \frac{L_2 \cdot 10^3}{S_b} \quad R_b = 7.283 \times 10^{-5} \quad (ohm)$$

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

$$K_{red} := 2 \cdot \sin\left(\frac{p \cdot \pi}{Z_2}\right) \quad K_{red} = 0.445$$

Résistance de l'anneau

$$R_{an} := \frac{\rho_{AL}(T) \cdot 2 \cdot \pi \cdot D_{an} \cdot 10^3}{Z_2 \cdot S_{an}} \quad R_{an} = 3.706 \times 10^{-6} \quad (ohm)$$

Résistance de l'anneau ramenée à la barre

$$R_{anram} := \frac{R_{an}}{K_{red}^2} \qquad R_{anram} = 1.871 \times 10^{-5} \quad (\text{ohm})$$

Rapport des pas dentaires statorique et rotorique

$$\beta_{ob} := \frac{t_1}{t_2} \qquad \beta_{ob} = 0.782$$

Angle d'inclinaison des encoches

$$\alpha_{ob} := 2 \cdot p \cdot \pi \cdot \frac{\beta_{ob}}{Z_2} \qquad \alpha_{ob} = 0.351 \quad (\text{rad})$$

Coefficient d'obliquité des encoches rotoriques et statoriques

$$K_{ob} := \frac{\sin\left(\frac{\alpha_{ob}}{2}\right)}{\frac{\alpha_{ob}}{2}} \qquad K_{ob} = 0.995$$

Coefficient de réduction de la résistance de l'enroulement du rotor à l'enroulement du stator

$$K_{red1} := \frac{4 \cdot m_1}{Z_2} \cdot \left(\frac{W_1 \cdot K_{en1}}{K_{ob}} \right)^2 \qquad K_{red1} = 29078.234$$

Résistance active de l'enroulement du rotor

$$R_2 := R_b + R_{anram} \qquad R_2 = 9.154 \times 10^{-5} \quad (\text{ohm})$$

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

$$R_{21} := K_{red1} \cdot R_2 \qquad R_{21} = 2.662 \qquad (\text{ohm})$$

Résistance active de l'enroulement du rotor ramenée à l'enroulement du stator en UR

$$R_{21ur} := R_{21} \cdot \frac{I_{n1}}{U_{n1_1}} \qquad R_{21ur} = 0.036 \qquad (\text{ohm})$$

Le courant dans la barre

$$I_{n2} := \frac{2 \cdot W_1 \cdot K_{en1} \cdot P_n \cdot (0.2 + 0.8 \cdot \cos(\phi_n)) \cdot 10^3}{U_{n1_1} \cdot Z_2 \cdot \eta_n \cdot \cos(\phi_n)} \qquad I_{n2} = 244.37 \qquad (\text{A})$$

Le courant dans l'anneau

$$I_{an} := \frac{I_{n2}}{K_{red}} \qquad I_{an} = 549.095 \qquad (\text{A})$$

La densité de courant dans l'anneau

$$J_{an} := \frac{I_{an}}{S_{an}} \qquad J_{an} = 3.643 \qquad \left(\frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \right)$$

Réactance de dispersion et perméance du rotor

$$\lambda_{enc2} := \frac{h_2 + 0.8r_2}{6 \cdot r_1} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot r_1^2}{2 \cdot S_b} \right)^2 + 0.6\epsilon \qquad \lambda_{enc2} = 1.34$$

$$q_2 := \frac{Z_2}{2 \cdot p \cdot 3} \qquad q_2 = 2.333$$

$$kd2 := \frac{9.15}{100 \cdot \left(\frac{Z2}{6 \cdot p}\right)^2} \quad kd2 = 0.017$$

$$\lambda2d := \frac{0.9 \cdot t2 \cdot \left(\frac{Z2}{6 \cdot p}\right)^2 \cdot kd2}{\delta e \cdot K\delta} \quad \lambda2d = 1.683$$

$$\lambda f2 := \frac{2.3 \cdot Dan}{Z2 \cdot L\delta 1 \cdot Kred^2} \cdot \log \left[\frac{4.7 \cdot Dan}{2 \cdot (han + lan)} \right] \quad \lambda f2 = 0.234$$

$$\lambda ob := \frac{t2 \cdot \beta ob}{9.5 \cdot \delta e \cdot K\delta \cdot k\mu} \quad \lambda ob = 1.456$$

$$\lambda 2 := \lambda enc2 + \lambda 2d + \lambda f2 + \lambda ob \quad \lambda 2 = 4.713$$

$$X2 := 7.9 f1 \cdot L2 \cdot \lambda 2 \cdot 10^{-9} \quad X2 = 2.606 \times 10^{-4} \quad (\text{ohm})$$

Réactance de dispersion du rotor ramené au stator

$$X21 := Kred1 \cdot X2 \quad X21 = 7.579 \quad (\text{ohm})$$

Réactance de dispersion du rotor ramené au stator en UR

$$X21ur := X21 \cdot \frac{In1}{Un1_1} \quad X21ur = 0.102 \quad (\text{ohm})$$

Coefficient de dispersion statorique

$$\sigma 1 := \frac{X1}{Xm} \quad \sigma 1 = 0.031$$

Coefficient des résistances statorique

$$mT := 1.2$$

$$\rho1 := \frac{R1 \cdot mT}{X1 + Xm} \quad \rho1 = 0.03$$

Les résistances transformées

$$R11 := mT \cdot R1 \quad R11 = 4.269 \quad (\text{ohm})$$

$$R211 := mT \cdot R21 \cdot (1 + \sigma1)^2 \cdot (1 + \rho1^2) \quad R211 = 3.458 \quad (\text{ohm})$$

$$X11 := X1 \cdot (1 + \sigma1) \cdot \left(1 + R1 \cdot \frac{\rho1}{X1}\right) \quad X11 = 4.647 \quad (\text{ohm})$$

$$X211 := mT \cdot X21 \cdot (1 + \sigma1)^2 \cdot (1 + \rho1^2) \quad X211 = 9.847 \quad (\text{ohm})$$

Régime à vide et nominal, calcul des pertes

La composante réactive du courant statorique pour une vitesse synchrone

$$I0r := \frac{Un1_1}{Xm \cdot (1 + \sigma1) \cdot (1 + \rho1^2)} \quad I0r = 2.634 \quad (\text{A})$$

Pertes électriques dans l'enroulement statorique pour la vitesse synchronisme

$$Pe1 := m1 \cdot I0r^2 \cdot R11 \cdot (1 + \rho1^2) \quad Pe1 = 88.929 \quad (\text{W})$$

La masse des dents pour notre type d'encoche

$$m_{z1} := \left[(Z1 \cdot b_{z1} \cdot h_{z1}) + \left(r^2 - r^2 \cdot \frac{\pi}{4} \right) \cdot 2 \cdot Z1 \right] \cdot 7.8 \cdot K_{fer} \cdot 10^{-6} \cdot L \delta 1$$

$$m_{z1} = 3.293 \quad (\text{kg})$$

Pertes magnétiques dans les dents statorique

$$P_{z1} := 4.4 \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1} \qquad P_{z1} = 32.836 \quad (\text{W})$$

La masse du dos du stator pour une encoche

$$m_{c1} := 7.8 \cdot \pi \cdot \left[\frac{D_{ext}^2}{4} - \frac{(D1 + 2 \cdot h_{z1})^2}{4} \right] \cdot L \delta 1 \cdot K_{fer} \cdot 10^{-6}$$

$$m_{c1} = 8.062 \quad (\text{kg})$$

Pertes magnétiques dans le dos du stator

$$P_{c1} := 4.4 \cdot B_{c1}^2 \cdot m_{c1} \qquad P_{c1} = 80.935 \quad (\text{W})$$

La somme des pertes dans le noyau du stator y compris les pertes supplémentaires

$$P_{c\Sigma} := P_{z1} \cdot \left[1 + 2 \cdot (K\delta - 1) \cdot \left(\frac{t1}{10} \right)^{0.5} \right] + P_{c1} \qquad P_{c\Sigma} = 185.1 \quad (\text{W})$$

Pertes mécaniques

$$k_t := 1$$

$$p_{m\Sigma} := k_t \cdot \left(\frac{n}{1000} \right)^2 \cdot \left(\frac{D_{ext}}{100} \right)^4 \qquad p_{m\Sigma} = 18.792 \quad (\text{W})$$

Pertes supplémentaires en régime nominale

$$P_{sno} := 0.005 P_n \cdot \frac{10^3}{\eta_n} \quad P_{sno} = 24.096 \quad (\text{W})$$

Composante active du courant à vide

$$P_{a10} := R_1 \cdot m_1 \cdot I_{\mu}^2$$

$$I_{0a} := \frac{P_{a10} + P_{c\Sigma} + p_{m\Sigma} + P_{sno}}{m_1 \cdot U_{n1}} \quad I_{0a} = 0.264 \quad (\text{A})$$

Le courant à vide

$$I_0 := \sqrt{I_{0r}^2 + I_{0a}^2} \quad I_0 = 2.647 \quad (\text{A})$$

facteur de puissance à vide

$$\phi_0 := \arccos\left(\frac{I_{0a}}{I_0}\right) \quad \phi_0 = 1.471$$

$$\cos(\phi_0) = 0.1$$

Paramètres en régime nominale

Résistance active en cc

$$R_{cc} := R_1 + R_{211} \quad R_{cc} = 6.957 \quad (\text{ohm})$$

Réactance en cc

$$X_{cc} := X_1 + X_{211} \quad X_{cc} = 14.248 \quad (\text{ohm})$$

Impédance Zcc

$$Z_{cc} := \sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2} \qquad Z_{cc} = 15.855 \qquad (\text{ohm})$$

Puissance mécanique du moteur

$$P_{mec} := P_n \cdot 10^3 + p_m \Sigma + P_{snc} \qquad P_{mec} = 4042.889 \qquad (\text{W})$$

Résistance équivalente du schéma équivalent

$$R_n := \frac{m_1 \cdot (U_{n1_1})^2}{2 \cdot P_{mec}} - R_{cc} + \sqrt{\left[\frac{m_1 \cdot (U_{n1_1})^2}{2 \cdot P_{mec}} - R_{cc} \right]^2 - Z_{cc}^2}$$

$$R_n = 90.457 \qquad (\text{ohm})$$

Impédance totale

$$Z_n := \sqrt{(R_n + R_{cc})^2 + X_{cc}^2} \qquad Z_n = 98.451 \qquad (\text{ohm})$$

Vérification de calcul de Rn

$$\frac{R_n}{Z_n^2} = 0.009 \qquad \frac{P_{mec}}{m_1 \cdot (U_{n1_1})^2} = 0.009$$

Glissement

$$g_n := \frac{1}{1 + \frac{R_n}{R_{211}}} \qquad g_n = 0.037$$

Vitesse de rotation du moteur

$$n2 := n \cdot (1 - gn) \qquad n2 = 1444.763 \qquad \left(\frac{\text{tr}}{\text{mn}} \right)$$

Composante active du courant statorique pour une rotation synchrone

$$I_{ca} := \frac{Pe1 + Pc\Sigma + Psno + pm\Sigma}{m1 \cdot Un1_1} \qquad I_{ca} = 0.278 \qquad (\text{A})$$

Courant du rotor

$$I_{211} := \frac{Un1_1}{Z_n} \qquad I_{211} = 3.86 \qquad (\text{A})$$

Courant du stator, composante active et réactive

$$I_{a1} := I_{ca} + I_{211} \cdot \left[\frac{R_n + R_{cc}}{Z_n} \cdot \frac{(1 - \rho1)^2}{(1 + \rho1)^2} + \frac{X_{cc} \cdot 2 \cdot \rho1}{Z_n \cdot (1 + \rho1^2)} \right]$$

$$I_{a1} = 3.703 \qquad (\text{A})$$

$$I_{r1} := I_{0r} + I_{211} \cdot \frac{X_{cc}}{Z_n} \cdot \left[\frac{(1 - \rho1)^2}{(1 + \rho1)^2} - \frac{R_n + R_{cc}}{Z_n} \cdot \frac{2\rho1}{1 + \rho1^2} \right]$$

$$I_{r1} = 3.098 \qquad (\text{A})$$

$$I_{11} := \sqrt{I_{a1}^2 + I_{r1}^2} \qquad I_{11} = 4.828 \qquad (\text{A})$$

$$\cos(\phi) := \frac{I_{a1}}{I_{11}} \qquad \cos(\phi) = 0.767$$

Charge linéaire nominale

$$A_n := \frac{10 \cdot I_1 \cdot \text{round}(N_{en1})}{a_1 \cdot t_1} \quad A_n = 229.46 \quad \left(\frac{A}{cm} \right)$$

Densité du courant nominale statorique

$$j_{1n} := \frac{I_1}{N_{e1} \cdot S_{e11}} \quad j_{1n} = 6.171 \quad \left(\frac{A}{mm^2} \right)$$

Charge linéaire nominale rotorique

$$A_2 := \frac{A_n \cdot I_{211} \cdot (1 + \sigma_1) \cdot \sqrt{1 + \rho_1^2} \cdot K_{en1}}{I_1 \cdot K_{en1} \cdot K_{ob}} \quad A_2 = 190.277 \quad \left(\frac{A}{cm} \right)$$

Courant de la barre rotorique

$$I_b := I_{211} \cdot \frac{2 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot K_{en1} \cdot (1 + \sigma_1) \cdot \sqrt{1 + \rho_1^2}}{Z_2 \cdot K_{ob}} \quad I_b = 222.324 \quad (A)$$

Densité du courant de la barre

$$j_b := \frac{I_b}{S_{en2}} \quad j_b = 4.131 \quad \left(\frac{A}{mm^2} \right)$$

Courant dans la bague

$$I_{bag} := \frac{I_b}{K_{red}} \quad I_{bag} = 499.558 \quad (A)$$

Pertes électriques dans le stator

$$P_{el1} := m_1 \cdot I_1^2 \cdot R_{11} \quad P_{el1} = 298.507 \quad (W)$$

$$P_{el2} := m_1 \cdot I_{211}^2 \cdot R_{211} \quad P_{el2} = 154.569 \quad (W)$$

La somme des pertes

$$P_{\Sigma} := P_{el1} + P_{el2} + P_{c\Sigma} + p_{m\Sigma} + P_{snc} \quad P_{\Sigma} = 681.064 \quad (\text{W})$$

puissance absorbé

$$P_1 := P_n \cdot 10^3 + P_{\Sigma} \quad P_1 = 4681.064 \quad (\text{W})$$

Rendement

$$\eta := 1 - \frac{P_{\Sigma}}{P_1} \quad \eta = 0.855$$

Verification

$$P_1 := m_1 \cdot I_{a1} \cdot U_{n1} \quad P_1 = 4221.924 \quad (\text{W})$$

$$P_2 := m_1 \cdot I_1 \cdot U_{n1} \cdot \eta \cdot \cos(\phi) \quad P_2 = 3607.662 \quad (\text{W})$$

Paramètres de démarrage

Profondeur de pénétration

$$gd := 1 \quad hb := h_{enc2} \quad hb = 16.557$$

Coefficient qui dépend de la valeur de ξ

$$\xi := 0.064hb \cdot \sqrt{gd} \quad \xi = 1.06$$

$$\Phi := 0.65\xi$$

$$h_{pp} := \frac{hb}{1 + \Phi} \quad h_{pp} = 10.016$$

La largeur à limite de pénétration

$$d21 = 4.772 \quad (\text{mm}) \qquad d22 = 1.8 \quad (\text{mm})$$

$$b_{pp} := d21 - \left[\left(\frac{d21 - d22}{h2} \right) \cdot \left(h_{pp} - \frac{d21}{2} \right) \right] \qquad b_{pp} = 3.063 \quad (\text{mm})$$

La section de la barre pénétrée par le courant de démarrage

$$S_{bdem} := \left(\frac{\pi \cdot d21^2}{8} \right) + (0.5) \cdot (d21 + b_{pp}) \cdot h_{pp} - 0.5 \cdot d21$$

$$S_{bdem} = 45.797 \quad (\text{mm})$$

La résistance de la barre au démarrage

$$C1 := 1 + \frac{X1}{Xm} \qquad C1 = 1.031$$

$$k_{dep} := \frac{S_b}{S_{bdem}} \qquad k_{dep} = 1.175$$

$$R_{bdem} := k_{dep} \cdot R_b \qquad R_{bdem} = 8.56 \times 10^{-5}$$

$$R_{anramb} := \frac{R_{an}}{K_{red}^2} \qquad R_{anramb} = 1.871 \times 10^{-5}$$

$$R_{2demram} := K_{red1} \cdot (R_{anramb} + R_{bdem}) \qquad R_{2demram} = 3.033$$

$$R_{eqdem} := C1 \cdot R1 + C1^2 \cdot R_{2demram} \qquad R_{eqdem} = 6.836$$

Réactance équivalente au démarrage

$$K_v := 0.0825$$

$$k_{1b} := 1$$

$$\lambda_{en1var} := \left[\left(\frac{3 \cdot h k_1}{b_2 + b_1} \right) + \frac{h f_1}{b_1} \right] \cdot k_{1b}$$

$$\lambda_{en1var} = 0.13$$

$$\lambda_{1var} := \lambda_{en1var} + \lambda_{d1}$$

$$\lambda_{1var} = 0.944$$

$$\lambda_{2var} := \lambda_{2d}$$

$$X_{var} := X_{11} \cdot \frac{\lambda_{1var}}{\lambda_1} + X_{211} \cdot \frac{\lambda_{2var}}{\lambda_2}$$

$$X_{var} = 4.855$$

$$X_{con} := X_{11} \cdot \frac{\lambda_1 - \lambda_{1var}}{\lambda_1} + X_{211} \cdot \frac{\lambda_2 - \lambda_{2var}}{\lambda_2}$$

$$X_{con} = 9.638$$

$$X_{eqdem} := X_{con} + K_v \cdot X_{var}$$

$$X_{eqdem} = 10.038$$

Courant rotorique correspondant au couple maximum

$$\Delta := \frac{1.24 \cdot 10^3 \cdot \delta e \cdot [R_{11} + 2 \cdot (X_{con} + 0.0825 X_{var}) \cdot X_{var}]}{2 \cdot \text{round}(N_{en1}) \cdot \left[R_{11}^2 + (X_{con} + 0.0825 X_{var})^2 + R_{11} \cdot (X_{con} + 0.0825 X_{var}) \right]}$$

$$\Delta = 2.425$$

$$I_{11m2} := \frac{U_{n1}}{\sqrt{2 \cdot \left[R_{11}^2 + (X_{con} + 0.0825 X_{var})^2 + R_{11} \cdot (X_{con} + 0.0825 X_{var}) \right]}} - \Delta$$

$$I_{11m2} = 18.696 \quad (\text{A})$$

$$Z_m := \frac{U_{n1_1}}{I_{11m2}} \quad Z_m = 20.325 \quad (\text{ohm})$$

$$Z_{infi} := 0.5 \cdot \left(\sqrt{R_{11}^2 + 2 \cdot Z_m^2} - R_{11} \right) \quad Z_{infi} = 5.419 \quad (\text{ohm})$$

$$R_m := Z_{infi} + R_{11} \quad R_m = 9.687 \quad (\text{ohm})$$

Le couple utile sur l'arbre du moteur

$$C_u := \frac{9.55 \cdot P_n \cdot 10^3}{n^2} \quad C_u = 26.44 \quad (\text{Nm})$$

Rapport du couple maximal sur le couple nominal

$$C_{maxno} := \frac{m_1 \cdot (U_{n1_1})^2 \cdot (1 - g_n)}{2 \cdot R_m \cdot P_n \cdot 10^3} \quad C_{maxno} = 5.384$$

Le couple maximal

$$C_{max} := C_u \cdot C_{maxnc} \quad C_{max} = 142.352 \quad (\text{Nm})$$

Le courant au démarrage

$$I_{1d} := \frac{U_{n1_1}}{\sqrt{X_{eqdem}^2 + R_{eqdem}^2}} \quad I_{1d} = 31.289 \quad (\text{A})$$

$$\frac{I_{1d}}{I_1} = 6.481$$

Le couple de démarrage

$$C_d := \frac{p \cdot m_1 \cdot (U_{n1})^2 \cdot R_{2demram}}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot (R_{eqdem}^2 + X_{eqdem}^2)} \quad C_d = 56.711$$

$$\frac{C_d}{C_u} = 2.145$$

Calcul des caractéristiques de fonctionnement

$$P_2 := 0, 0.05 P_n \dots 1.25 P_n$$

$$P_{sno1}(P_2) := 0.005 P_2 \cdot \frac{10^3}{\eta}$$

$$P_{mec1}(P_2) := P_2 \cdot 10^3 + p_m \Sigma + P_{sno1}(P_2)$$

$$R_{n1}(P_2) := \frac{m_1 \cdot (U_{n1})^2}{2 \cdot P_{mec1}(P_2)} - R_{cc} + \sqrt{\left[\frac{m_1 \cdot (U_{n1})^2}{2 \cdot P_{mec1}(P_2)} - R_{cc} \right]^2 - Z_{cc}^2}$$

Impédance totale

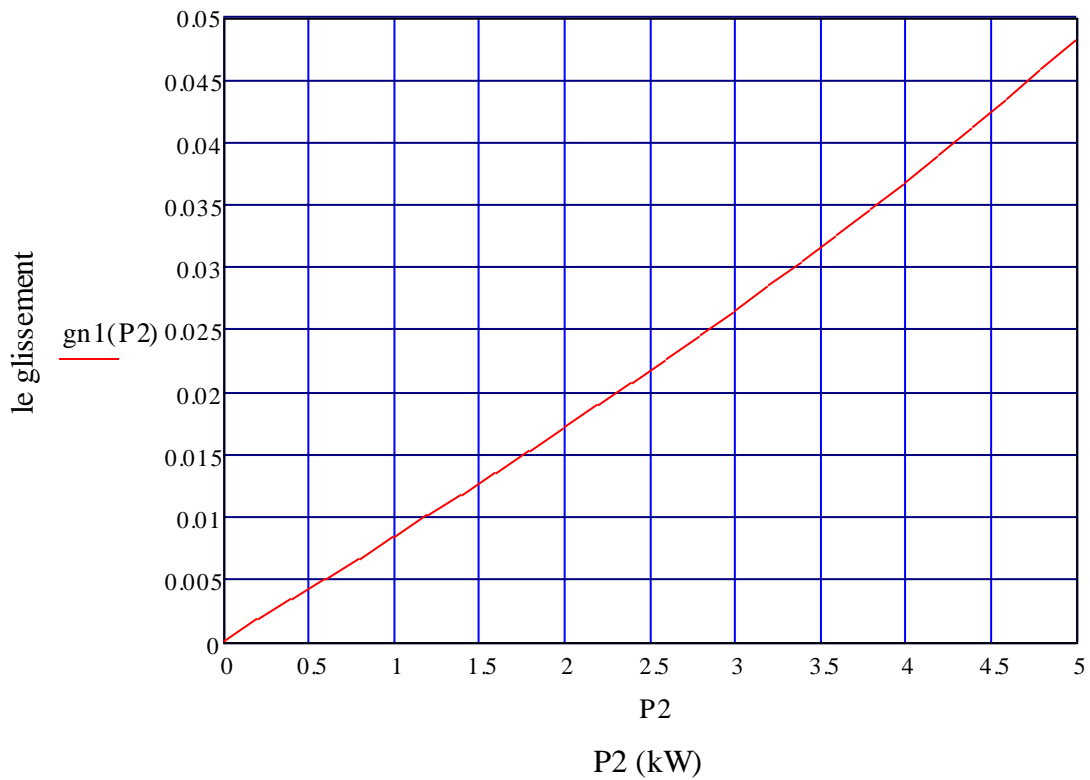
$$Z_{n1}(P_2) := \sqrt{(R_{n1}(P_2) + R_{cc})^2 + X_{cc}^2}$$

Vérification de calcul de Rn

Glissement

$$gn1(P2) := \frac{1}{1 + \frac{Rn1(P2)}{R211}}$$

FIG4: Le glissement en fonction de la puissance P2



Courant du rotor

$$I_{2111}(P2) := \frac{Un_{11}}{Z_{n1}(P2)}$$

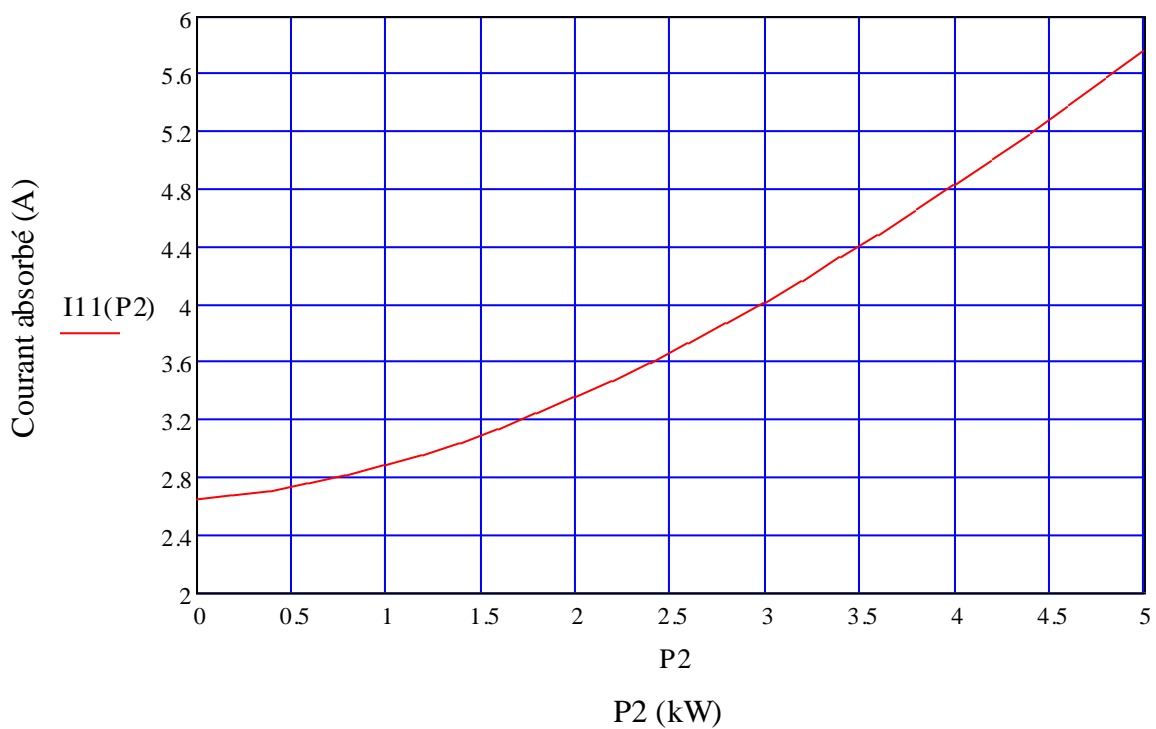
Courant du stator, composante active et réactive

$$I_{a11}(P2) := I_{ca} + I_{2111}(P2) \cdot \left[\frac{R_{n1}(P2) + R_{cc}}{Z_{n1}(P2)} \cdot \frac{(1 - \rho_1)^2}{(1 + \rho_1)^2} + \frac{X_{cc} \cdot 2 \cdot \rho_1}{Z_{n1}(P2) \cdot (1 + \rho_1^2)} \right]$$

$$I_{r11}(P2) := I_{0r} + I_{2111}(P2) \cdot \frac{X_{cc}}{Z_{n1}(P2)} \cdot \left[\frac{(1 - \rho_1)^2}{(1 + \rho_1)^2} - \frac{R_{n1}(P2) + R_{cc}}{Z_{n1}(P2)} \cdot \frac{2 \cdot \rho_1}{1 + \rho_1^2} \right]$$

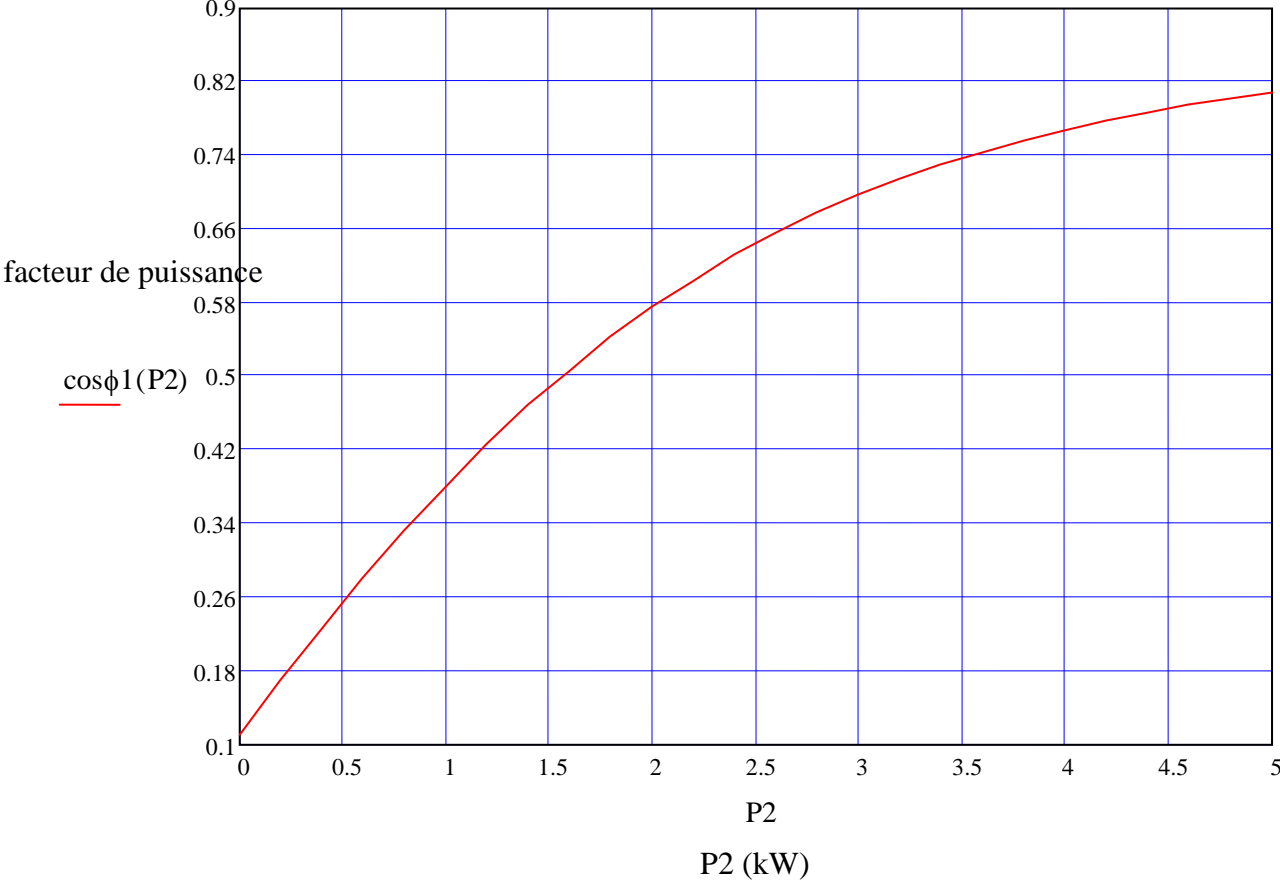
$$I_{11}(P2) := \sqrt{I_{a11}(P2)^2 + I_{r11}(P2)^2}$$

FIG3: Courant absorbé en fonction de la puissance P2



$$\cos\phi_1(P_2) := \frac{I_{a11}(P_2)}{I_{11}(P_2)}$$

FIG2: facteur de puissance en fonction de la puissance P2



Pertes électriques dans le stator

$$Pel11(P2) := m1 \cdot I11(P2)^2 \cdot R11$$

$$Pel21(P2) := m1 \cdot Ia11(P2)^2 \cdot R211$$

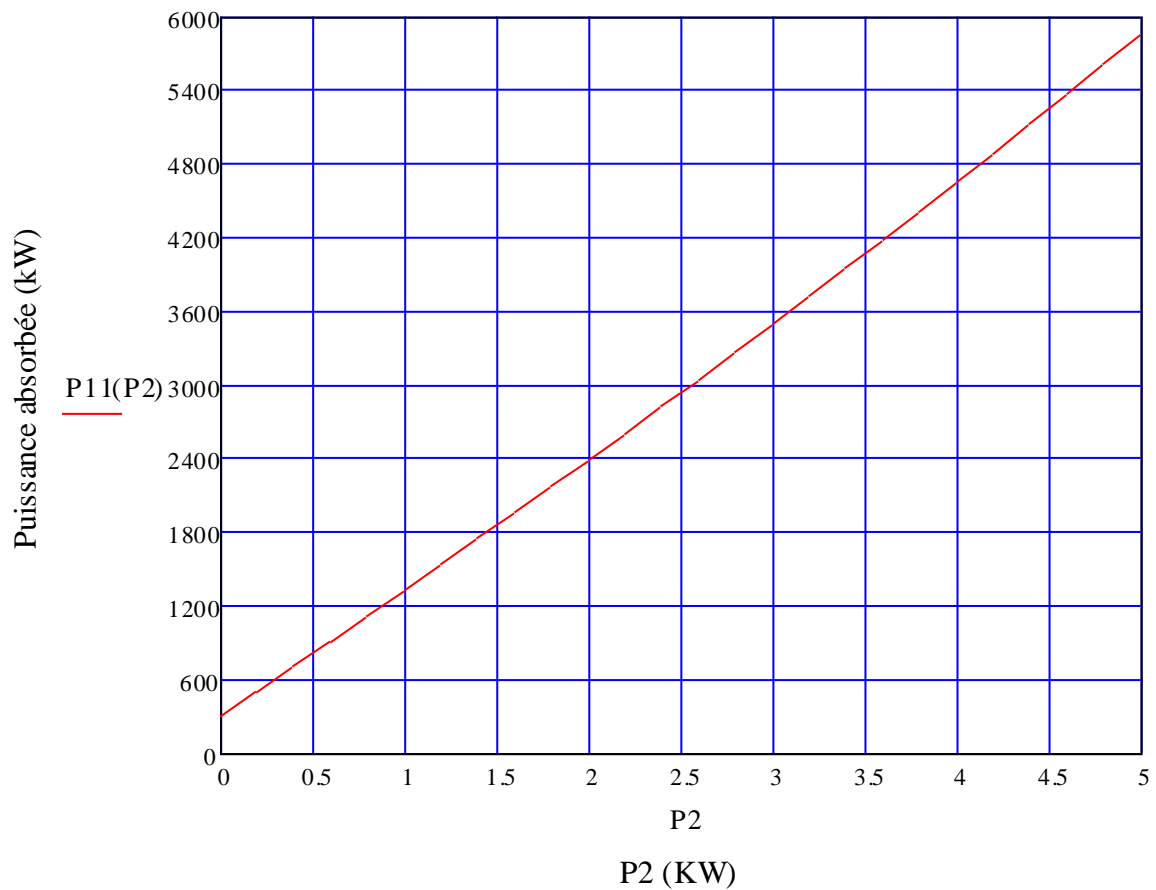
La somme des pertes

$$P\Sigma1(P2) := Pel11(P2) + Pel21(P2) + Pc\Sigma + PsnC$$

Puissance absorbée

$$P11(P2) := P2 \cdot 10^3 + P\Sigma1(P2)$$

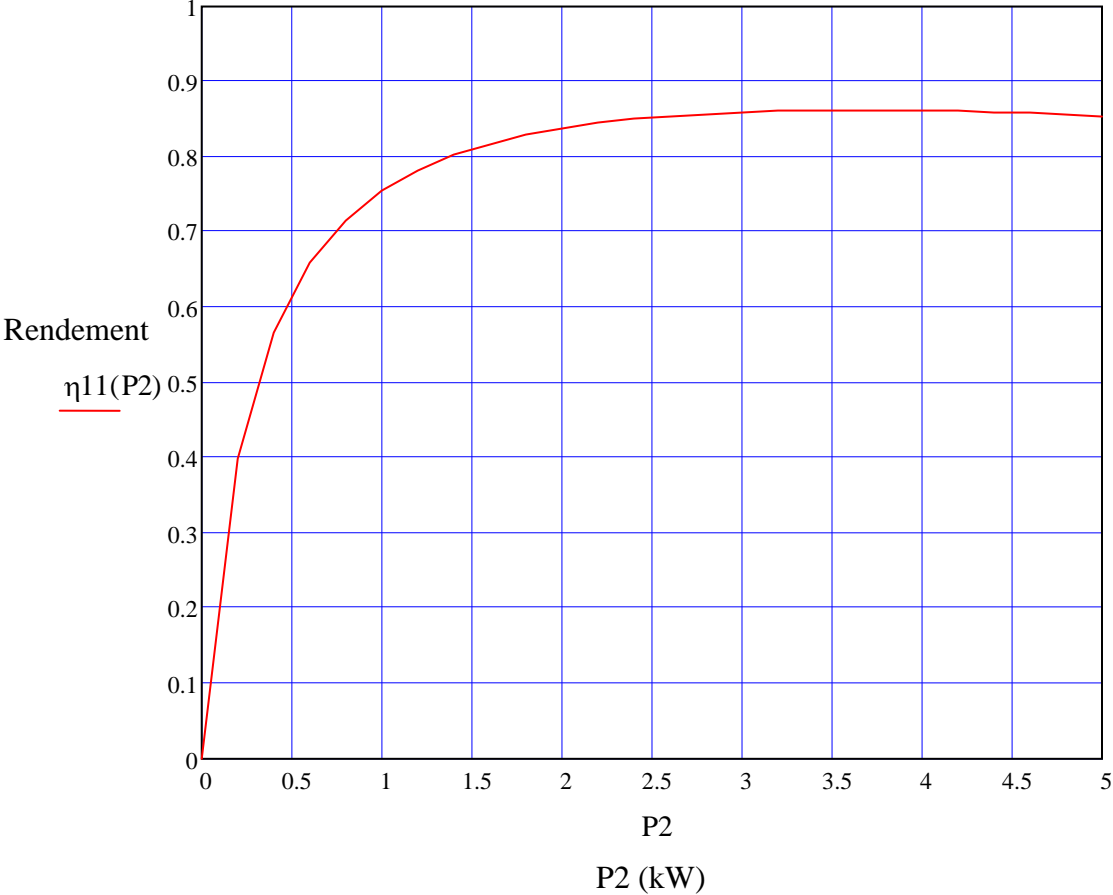
FIG5: La puissance absorbée en fonction de la puissance P2



Rendement en fonction de la puissance P2

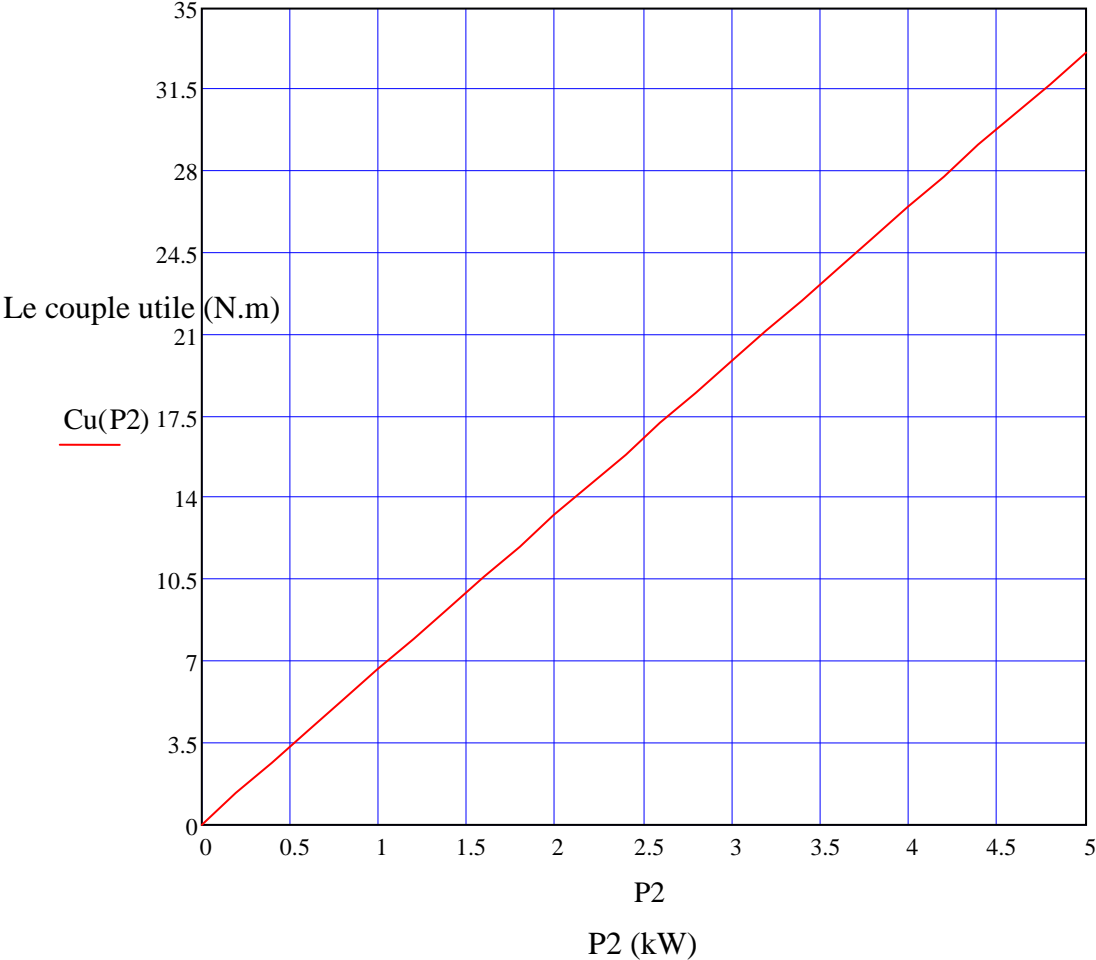
$$\eta_{11}(P2) := 1 - \frac{P\Sigma1(P2)}{P11(P2)}$$

FIG1: Rendement en fonction de la puissance P2



Couple nominal en fonction de la puissance P2

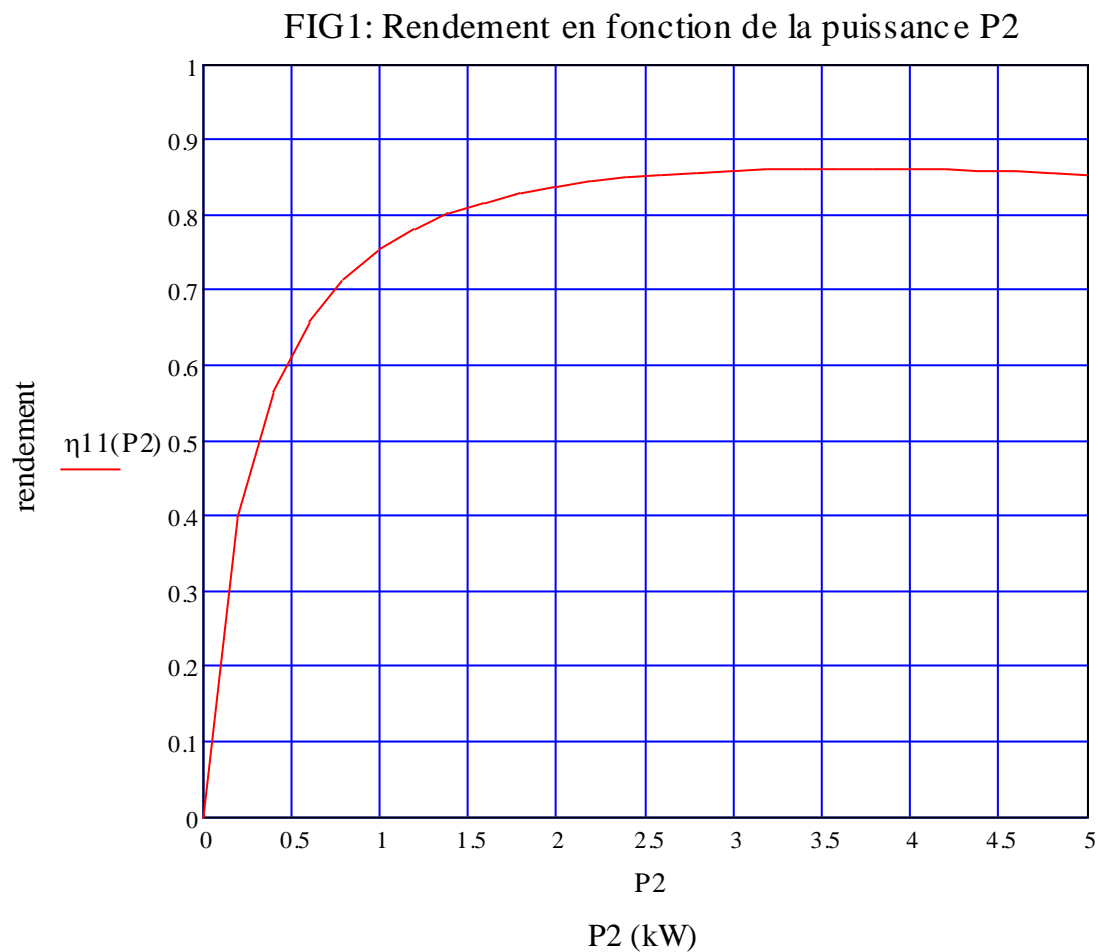
$$Cu(P2) := \frac{9.55 \cdot P2 \cdot 10^3}{n2}$$



Interprétation et comparaison des résultats

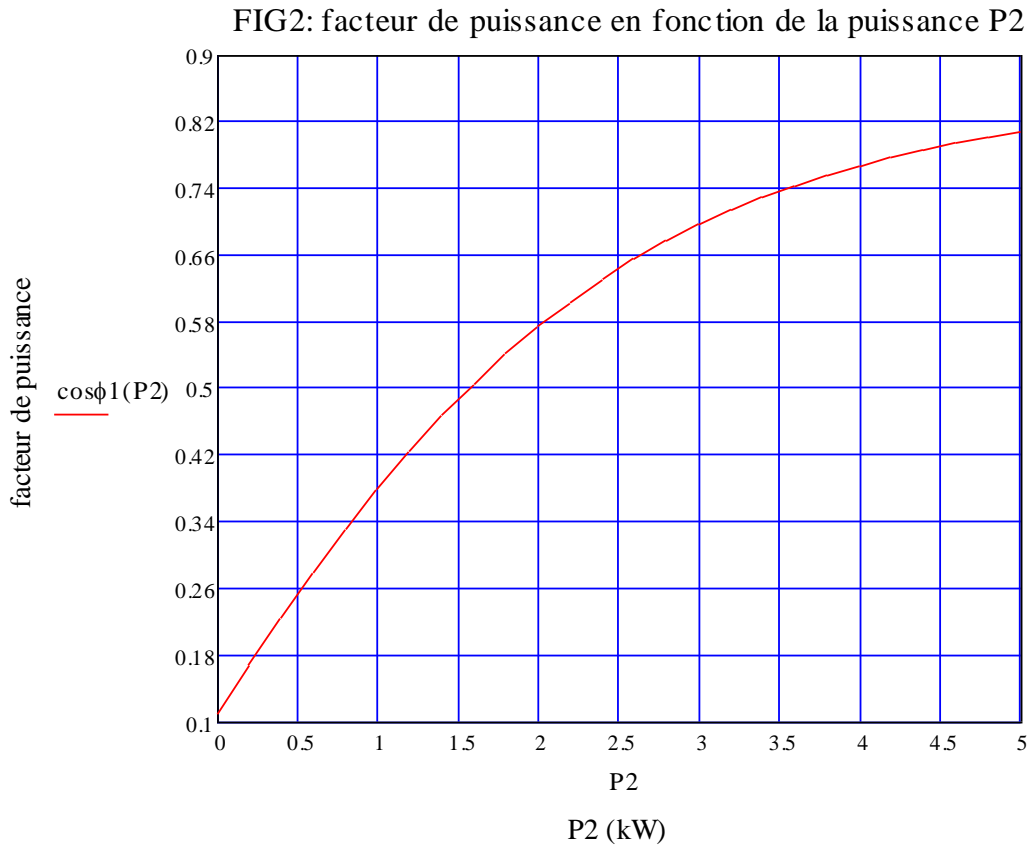
Afin de valider nos résultats, on interprétera les différentes figures des caractéristiques des paramètres de la machine obtenus dans le programme de calcul, et on fera la comparaison avec la machine standard.

Interprétation des caractéristiques :



On remarque que la courbe du rendement en fonction de la puissance P2 commence par l'origine, elle évolue linéairement jusqu'à 250 Watts, ce qui nous permet de dire que le rendement est proportionnel à la puissance P2 dans cette zone. De 250 Watts jusqu'à 4 kilowatt elle forme un coude donc le rendement n'est pas proportionnel à la puissance P2 dans cette zone, dès qu'elle dépasse sa valeur

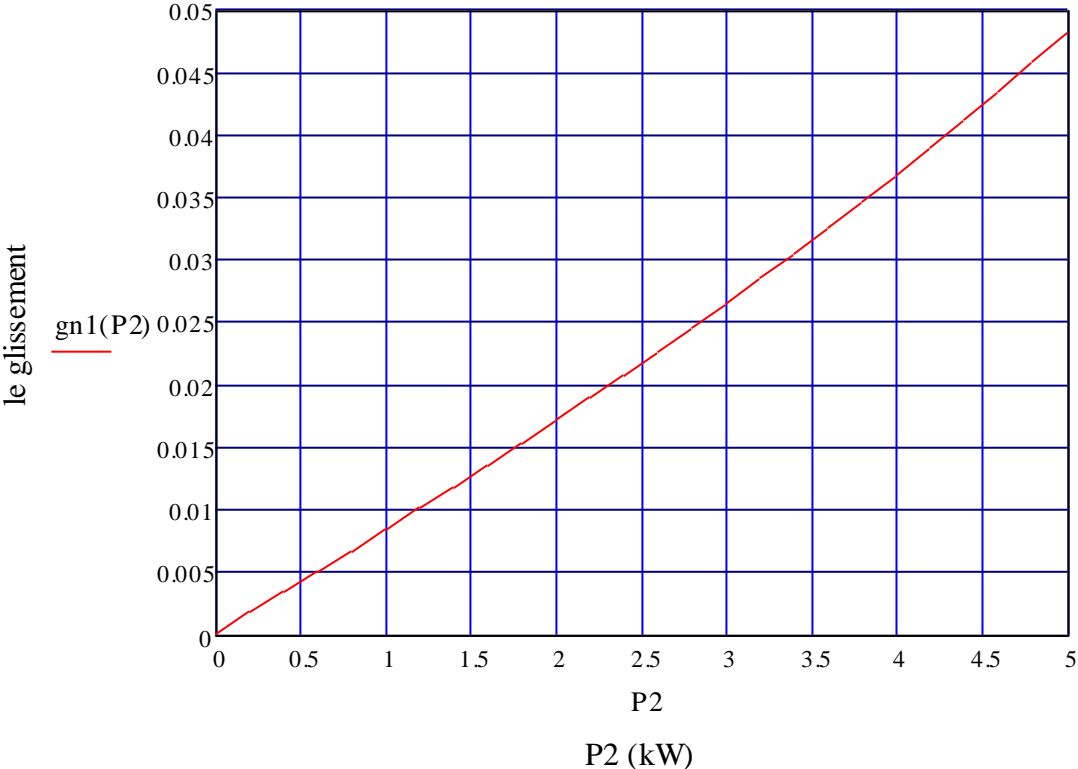
crête de 4 kilowatt, on ne voit pas une variation du rendement, il y a même une légère diminution de ce dernier.



La courbe du facteur de puissance en fonction de la puissance P2 ne commence pas par l'origine et elle représente un exponentiel croissant.

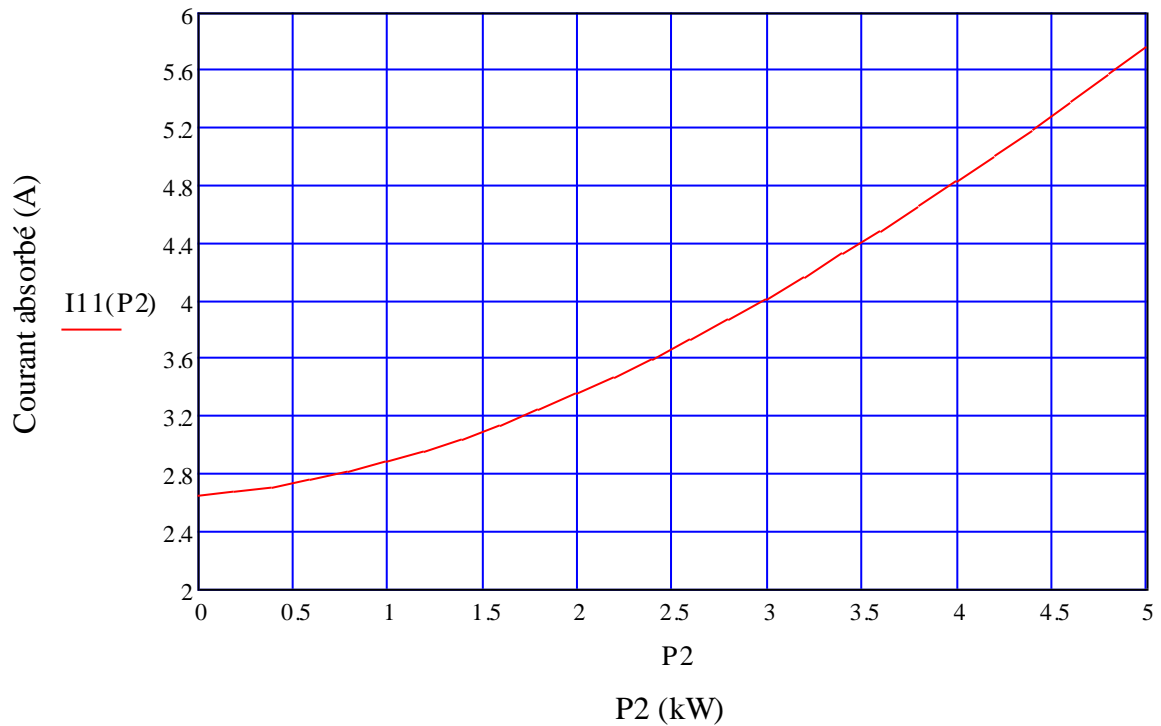
Le facteur de puissance dépend en grande partie de la charge et atteint la valeur crête pendant la surcharge. Ce facteur est relativement défavorable dans la plage de faible charge à cause d'une magnétisation pratiquement constante.

FIG4: Le glissement en fonction de la puissance P2



On remarque que la courbe du glissement est presque une droite, chaque fois que la puissance P2 augmente, le glissement augmente.

FIG3:Courant absorbé en fonction de la puissance P2



On remarque que la courbe de l'intensité de courant commence par le courant à vide I_0 , elle augmente lentement jusqu'à la valeur de 50% de la puissance P_2 . Au-delà de cette valeur, l'intensité de courant commence à augmenter proportionnellement par rapport à la puissance P_2 .

Comparaison :

Pour l'acier, le cuivre, l'aluminium, les tôles magnétiques et l'isolation on a gardé les mêmes matières que celles du moteur existant.

Pour le moteur calculé, nous avons changé la longueur virtuelle de l'induit du moteur existant de 120mm à 140mm en agissant sur l'induction et la charge linéaire.

Les principaux résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau suivant :

	Moteur existant	Moteur calculé
La longueur virtuelle (mm)	120	140
Rendement (%)	83	85,5
Facteur de puissance $\cos(\varphi)$	0,83	0,77
Courant nominal I_n (A)	5,08	4,828
Vitesse de rotation (tr/mn)	1435	1445
Couple nominal c_n (N.m)	27	26,44
Le rapport du courant de démarrage sur le courant nominal (I_d/I_n)	7	6,481
Rapport du couple maximal sur le couple nominal (C_{max}/C_n)	3	5,384
Rapport du couple de démarrage sur le couple nominal (C_d/C_n)	2,8	2,145
Nombre de conducteurs	45	45
Diamètre du conducteur avec isolation (mm)	0,712	0,776

Interprétation des résultats :

Après avoir calculé le moteur de notre étude, on constate que :

- Le volume du moteur a augmenté par rapport au volume initial à cause de l'augmentation de la longueur virtuelle de l'induit.
- La section des conducteurs a augmenté ce qui permet la diminution de la densité de courant.
- La vitesse de rotation a augmenté, ce qui permet la diminution du glissement. Ce dernier est proportionnel au couple utile donc le couple utile a diminué.

- Diminution du rapport de courant de démarrage et le courant nominal.
- Diminution du rapport de couple de démarrage et le couple nominal.
- Augmentation du rapport de couple maximal et le couple nominal.
- toutes ces modifications ont contribué à l'augmentation du rendement de 83% à 85,5%.

Les résultats trouvés au calcul sont de marge admissibles, et confirment les caractéristiques pratiques, donc la méthode de calcul et le programme sont de bonne précision.

Conclusion générale

Conclusion générale

Pour concevoir une machine électrique, il est nécessaire de faire une étude approfondie et des recherches intenses, cela nécessite des moyens mis en œuvre.

Dans ce mémoire, on a voulu mettre en évidence l'intérêt de dimensionnement d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil, on utilisant un logiciel de programmation. Le dimensionnement doit satisfaire avant tout les lois de la physique en particulier magnétiques, électrique et mécaniques, d'autres parts il doit en même temps répondre aux exigences du cahier de charges tel que la capacité de surcharge, le rendement et les conditions de démarrage.

Les résultats obtenus de dimensionnement du circuit magnétique statorique et rotorique (induction magnétique, densité de courant et densité de flux) sont de marges admissibles. Vu les pertes, le rendement de la machine calculé est satisfaisant.

Notre stage pratique effectué au niveau de l'entreprise Electro-Industries d'AZAZGA, a été une occasion pour nous de mettre en pratique et en valeur nos connaissances théoriques, comme il nous a donné l'opportunité de nous intégrer dans le milieu industriel et de côtoyer de près le monde de travail.

Enfin nous espérons que ce modeste travail servira de références pour les promotions futures.

Annexes

Annexe1 : Section Normalisée

<i>Section nominale (Snom) en mm</i>	<i>Diamètre nu (dnu) en mm</i>	<i>Diamètre avec isolation (diso) en mm</i>
0.00785	0.1	0.125
0.00882	0.106	0.131
0.00985	0.112	0.139
0.01094	0.118	0.145
0.01227	0.125	0.153
0.01368	0.132	0.161
0.01539	0.14	0.170
0.01767	0.15	0.181
0.02011	0.16	0.192
0.02270	0.17	0.203
0.02545	0.18	0.215
0.02835	0.19	0.225
0.03142	0.2	0.236
0.03530	0.217	0.250
0.03941	0.224	0.262
0.04374	0.236	0.276
0.04909	0.25	0.290
0.05515	0.265	0.307
0.06158	0.28	0.322
0.07069	0.30	0.344
0.07793	0.315	0.360
0.08814	0.335	0.381
0.09898	0.355	0.403
0.1104	0.375	0.424
0.1257	0.4	0.450
0.1419	0.425	0.478
0.1590	0.45	0.503
0.1772	0.475	0.531
0.1964	0.5	0.556
0.2124	0.52	0.576
0.2206	0.53	0.587
0.2463	0.56	0.619
0.2642	0.58	0.640
0.2827	0.6	0.661
0.3117	0.63	0.692
0.3318	0.65	0.713
0.3526	0.67	0.735
0.3959	0.71	0.776
0.4418	0.75	0.817
0.4778	0.78	0.848
0.5027	0.8	0.869
0.5281	0.82	0.890
0.5674	0.85	0.921
0.6082	0.88	0.952
0.6362	0.9	0.973
0.7088	0.95	1.0.24
0.7854	1.00	1.076
0.8825	1.06	1.137
0.9852	1.12	1.199
1.095	1.18	1.260
1.227	1.25	1.332
1.368	1.32	1.404

Annexe 2: représente l'intensité du champ magnétique dans la culasse statorique et rotorique qui correspond à Bc1 et Bc2.

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

Annexe 3: représente l'intensité du champ magnétique dans la dent statorique et rotorique qui correspond à Bz1 et Bz2

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

Annexe 4: représente Kdd1 en fonction de Z2/p.

Q1	10	15	20	25	30	35	40
2	0,99	0,94	-	-	-	-	-
3	0,98	0,93	0,88	0,85	-	-	-
4	-	0,90	0,84	0,80	0,77	-	-
5	-	-	-	0,75	0,72	0,70	-
6	-	-	-	0,70	0,60	0,62	-
8	-	-	-	-	-	0,53	0,51

Annexe 5: représente Q en fonction de 2p

hauteur d'axe [mm]	2P=2	2P=4	2P=6
63	4	2	2
71	4	2	2
80-100	4	3	2
112-132	4	3	3
160	6	4	3
180-225	6	4	4
250	8	5	4
280-355	8	5	4

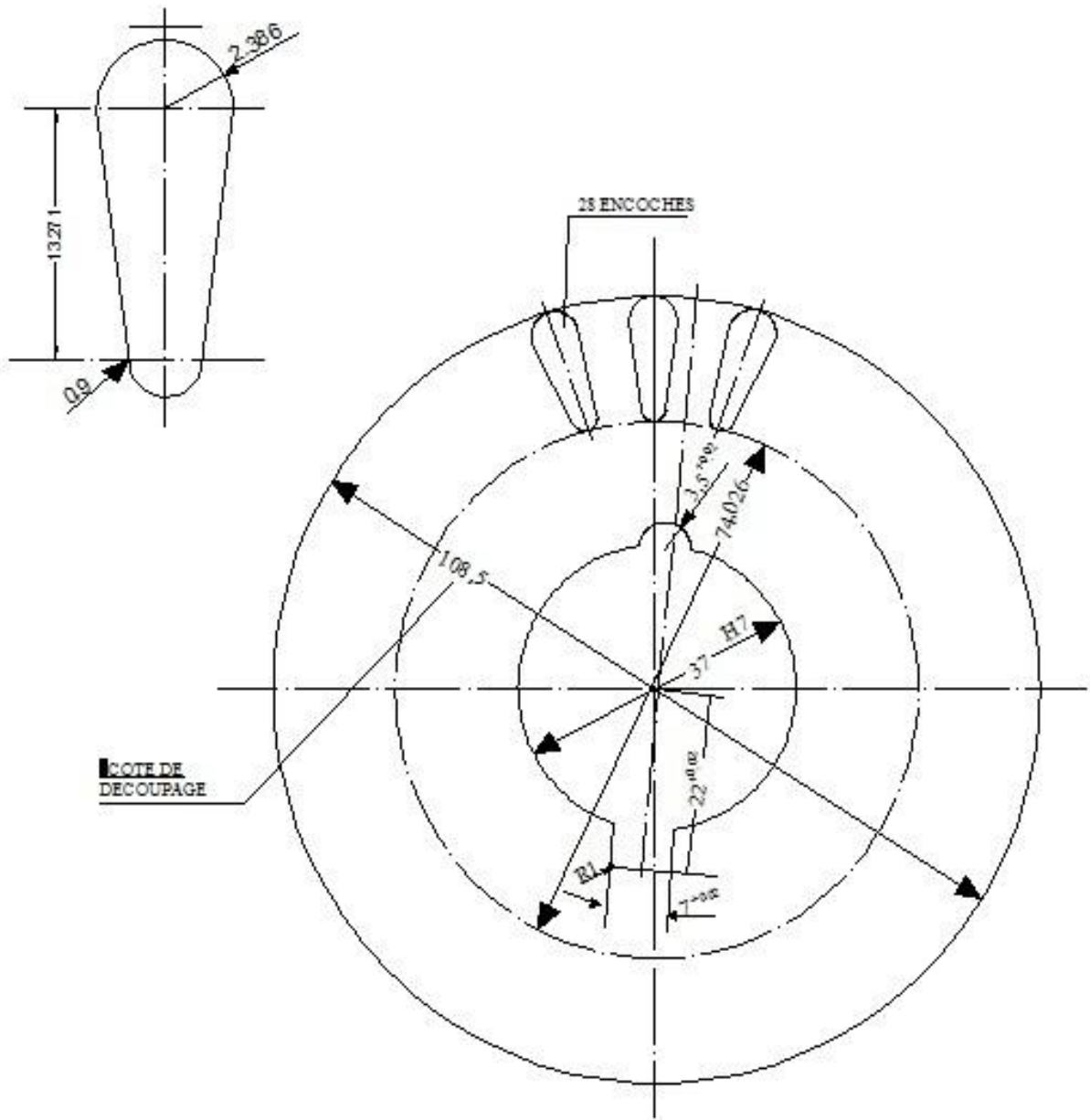
Annexe 6: représente Krr1 en fonction de Q1

Q1	1.5	2	2.5	3	4	5	6	8
Krr1	-	0,0285	-	0,0141	0,0065	0,0052	-	-

Annexes

Annexes

Figure III-7 Feuille rotorique et détail d'encoche rotorique



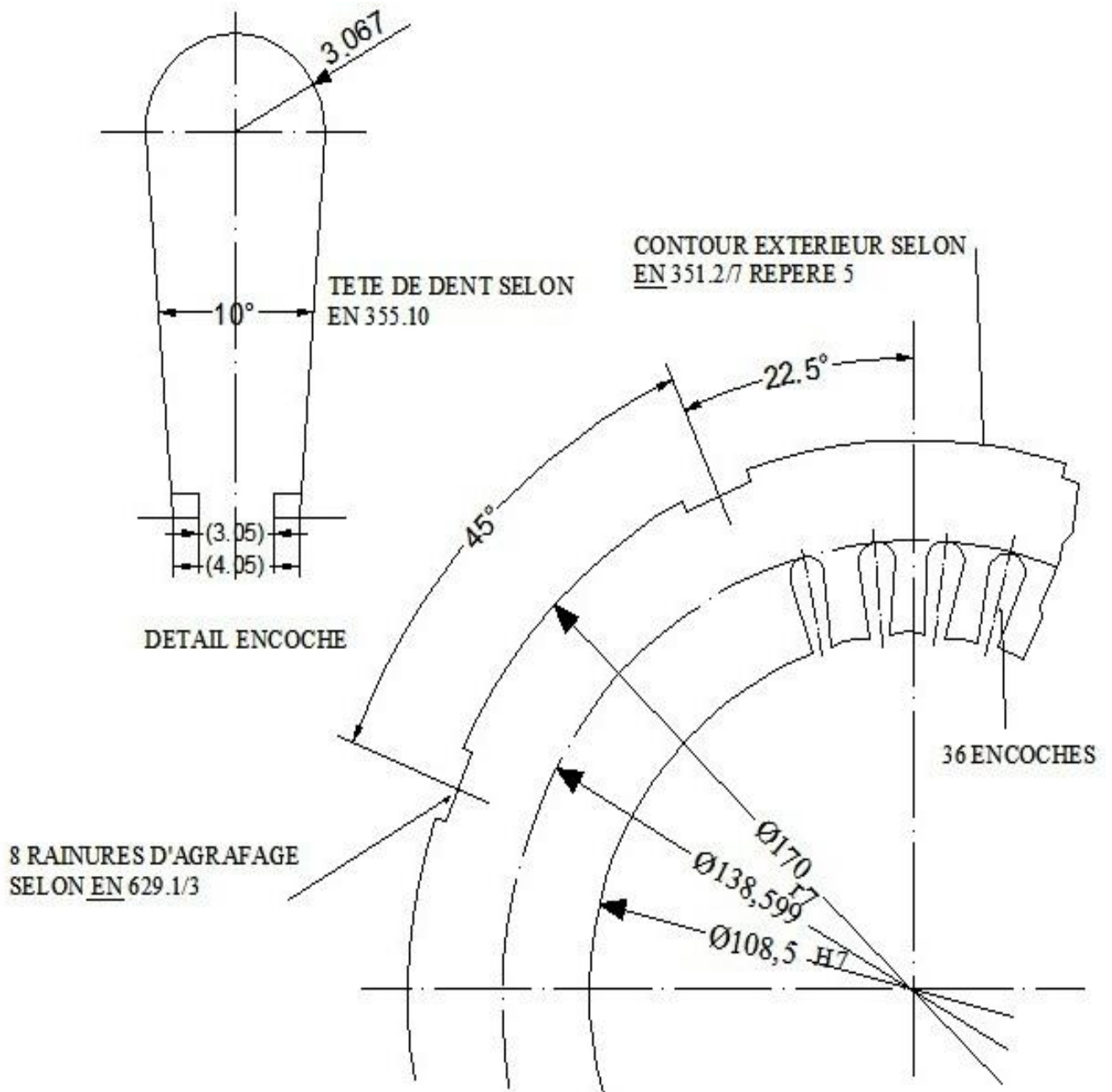
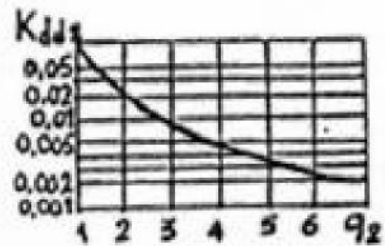
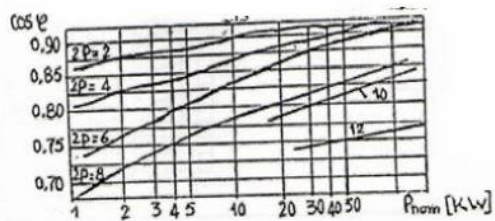
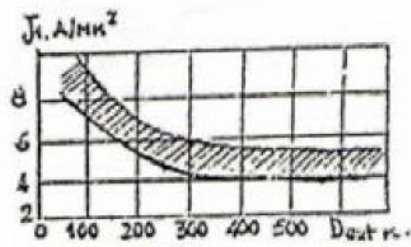
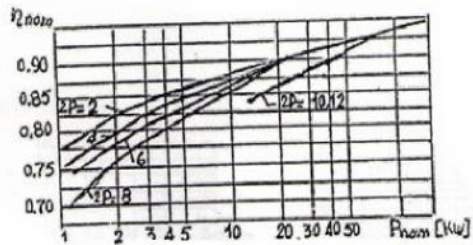
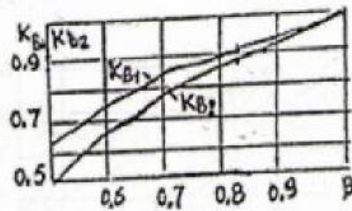
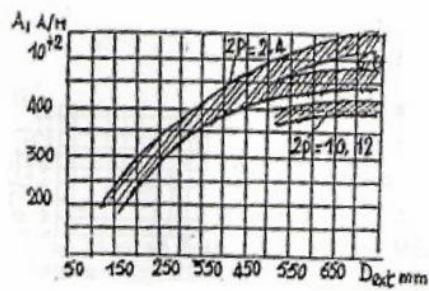
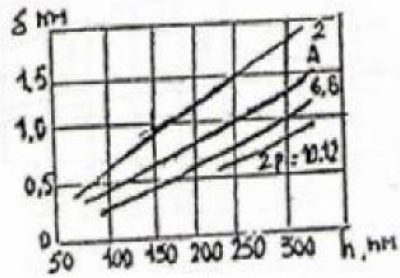
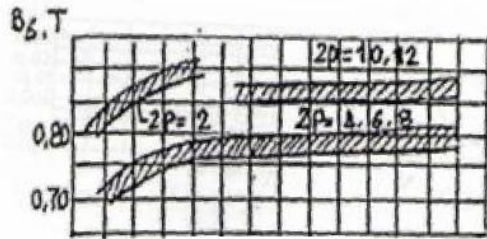


Figure III-6 feuille statorique et détail de l'encoche statorique

Annexes



Bibliographie

Bibliographie

Bibliographie

[1]. Théodore WILDI et Gilbert SYBILLE (Ingénieur, Institut de recherche d'Hydro-Québec) troisième édition.

[2]. Philippe le Brun, lycée Louis Armand Strasbourg.

[3]. SALAH Djamila-AHCENE Fazia «Calcul d'un moteur asynchrone à double cages» thèse ingénieur. UMMTO 2011/2012.

[4]. CHAIB Mokrane-RAHAB Tarik «Conception d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil à haut rendement (IE2)» thèse Master université TIZI-OUZOU 2010/2011.

[5]. Jacques Saint Michel (directeur scientifique moteurs Léroy Somer)

(Bobinage des machines tournantes à courant alternatif)