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

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté de Génie Electrique et d'Informatique
Département d'Electrotechnique

MEMOIRE

de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de master en Electrotechnique Industrielle

Thème

Etude du surdimensionnement du moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil de 3 kW fabriqué par Electro-Industries

Promotrrice : Mme F. Bitam-Megherbi
Co-Prompotrice : M^{elle} N. Kichou

Réalisé par :
M^{r} BEROUA Djamal
M^{r} DORBANE Lounes

Promotion 2012-2013

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions le bon Dieu pour sa bienveillance.

Nous tenons à exprimer nos profonds respects et nos sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail. En particulier :

- *Notre co-promotrice, M^elle N.Kichou pour son suivi au sein de l'Entreprise Electro-Industries.*
- *Notre promotrice Mme F. Bitam-Megherbi, Maître de Conférences, classe A au Département d'Electrotechnique, pour avoir accepté de nous encadrer ainsi que pour son aide, ses conseils et son suivi durant la période de la réalisation de notre travail.*
- *Tous les enseignants du Département d'Electrotechnique pour tout le savoir qu'ils nous ont transmis.*

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

- *Mes très chers parents*
- *Mon frère Farid et sa femme Kahina*
- *Mon frère Saif et sa femme Lynda*
- *Mon frère Boualem et sa femme Nassima*
- *Mes adorables frères: Samir et Madjid*
- *Ma binôme Lounes et sa famille*
- *Toute ma famille et mes amis :Rafik, Soufiane, Yazid , Mourad, Redoune , Samir et Gayar,.*
- *Ma très chère amie : Chahrazad*

Djamal

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à:

Mes très chers parents.

Mes très chers frères « SAID et YAZID et SEDDIK »

Ma très chère sœur « KARIMA »

Mes oncles, mes tantes et leurs familles

La mémoire de mon grand père

Ma grand-mère

Mes cousines et mes cousins

Mon binôme « DJAMAL » et sa famille

Tous mes amis et tous ceux que j'aime

Toute la promotion ETH (2013).

LOUNES

SOMMAIRE

Introduction générale

Chapitre I : Généralité sur le moteur asynchrone

I.1. Introduction…….2

I.2. Historique…….2

I.3. Conception des parties active de la machine asynchrone…….3

I.3.1. Noyau statorique…….3

I.3.2. Noyau rotorique…….4

I.3.2.1. Rotor bobiné…….4

I.3.2.2. Rotor à cage d'écureuil…….5

I.3.3. Les paliers……6

I.4. Bobinage.……7

I.5. Classification des moteurs à cage d'écureuil…..……...……..7

I.6. Principe de fonctionnement……..10

I.6.2. Vitesse de synchronisme……10

I.6.3. Glissement……11

I.7. Choix du couplage……11

I.8. Démarrage des moteurs asynchrones……...12

I.8.1. Démarrage sous tension réduite…….12

I.8.1.a. Démarrage étoile-triangle……12

I.8.1.b. Démarrage par autotransformateur……..13

I.8.1.c. Démarrage statorique……...13

I.8.1.d. Démarrage résistif……13

I.8.2. Démarrage à tension nominale……..13

I.8.2.1 Démarrage rotorique…….13

I.9. Freinage des moteurs asynchrones……...13

I.9.1. Freinage hypersynchrone……...13

I.9.2. Freinage par injection de courant continu……14

I.9.3. Freinage à contre-courant……..14

I.10. Bilan des puissances et des pertes……..14

I.11. Couple moteur asynchrone 3~……15

I.11.1. Couple électromagnétique……...15

I.11.2. Couple utile Cμ……15

I.11.3. Le couple des pertes…….16

I.12. Caractéristique mécanique……..16

I.12.1. Réglage de la vitesse d'un moteur asynchrone……16

Chapitre II : Calcul des différents paramètres de la machine

Introduction…….…….18

II.1. Calcul électromagnétique……..18

II.1.1. Dimensionnement de la machine asynchrone……..18

II.1.1.1. Dimensionnement du stator……18

II.1.1.2. Dimensionnement de la feuille statorique……..21

II.1.1.3. Dimensionnement du rotor…….24

II.1.1.4. Dimensionnement de la feuille rotorique……..26

II.1.2. Calcul de circuit magnétique……...29

II.1.2.1. Circuit magnétique statorique……30

II.1.2.2. Circuit magnétique rotorique…….31

II.1.2.3. Force magnétomotrice dans l'entrefer……...31

II.1.2.4. Force magnétomotrice totale par paire de pôle…….32

II.1.2.5. Coefficient de saturation……...32

II.1.2.6. Courant magnétisant……..33

II.1.2.7. Réaction de magnétisation…….33

II.1.2.8. Coefficient de dispersion magnétique du stator……33

II.1.2.9. Force électromotrice à vide……....33

II.1.3. Calcul des paramètres électriques des enroulements……....33

II.1.3.1. Paramètres statoriques……....34

II.1.3.2. Paramètres rotorique……...36

II.1.3.2.1. Résistance rotorique……....36

II.1.3.2.2. Réactance de dispersion et perméance du rotor……..38

II.1.3.2.3. Réactance du rotor ramenée au stator……..40

II.1.3.3. Paramètres au démarrage……40

II.1.4. Calcul des pertes et du rendement……42

II.1.4.1. Pertes principales dans le fer……..42

II.1.4.2. Pertes électriques dans le cuivre et dans l'aluminium……43

II.1.4.3. Pertes mécanique……43

II.1.4.4. Pertes supplémentaires……...44

II.1.4.5. Pertes totales……..44

II.1.4.6. Rendement de la machine……..44

II.1.4.7. Calcul de la résistance de magnétisation……44

II.1.5. Calcul des performances du moteur……45

II.1.5.1. Schéma équivalent en L du moteur……45

II.1.5.2. Caractéristique de fonctionnement du moteur……46

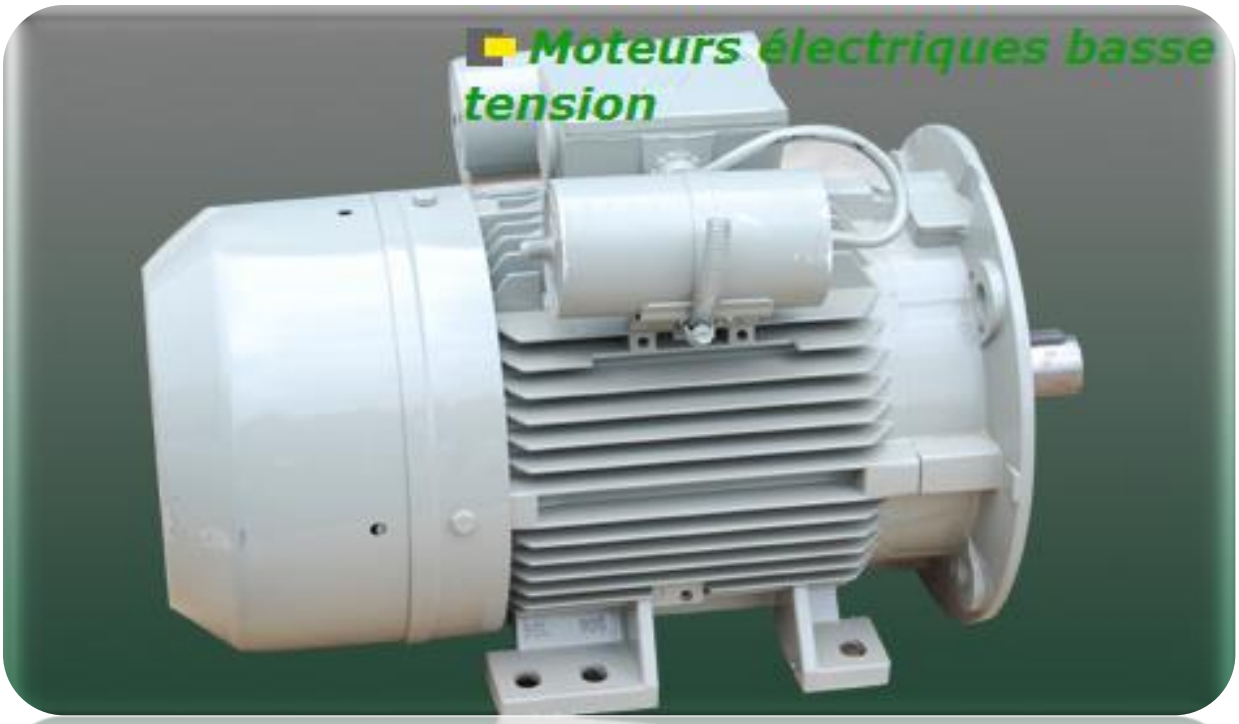
II.1.5.3. Caractéristiques de démarrage et capacité de surcharge……49

Chapitre III : Elaboration d'un programme de calcul……...53

Conclusion générale

Annexe

Bibliographie



Cahier De Charge

Puissance nominale : P_n = 3 kW.

Tension nominale : U_{n1} = 380 V.

Nombre de paires de pôles : P = 2.

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

Facteur de puissance : cos $\emptyset_n$ = 0,83.

Rendement : η_n= 79 %.

Hauteur d'axe : h= 100 mm.

Nombre de phase : m =3.

Classe d'isolation : F.

Degré de protection : IP 54.

Système de refroidissement : IC 0141.

Introduction générale

Introduction générale

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

Les moteurs asynchrones s'imposent en effet dans un grand nombre d'applications en raison des avantages qu'ils présentent : ils sont robustes mécaniquement, simples à construire, faciles à mettre en œuvre et de faible coût. Nous trouvons les moteurs asynchrones dans tous les domaines industriels, en particulier dans les secteurs de pointe comme l'aéronautique, le nucléaire, la chimie ou encore le transports ferroviaires. A titre d'exemple, aus Etats-Unis, 70 mollions de moteurs asynchrones sont fabriqués chaque année pour une population d'environ 300 millions de personnes.

C'est dans cette optique que nous nous sommes intéressés au sur-dimensionnement et calcul d'un moteur asynchrone dans le présent travail. Ce surdimentionnement a pour objectif d'optimiser les caractéristiques régissant le fonctionnement du moteur asynchrone objet de notre étude. Le moteur asynchrone objet de notre étude se fabrique par la firme Electro-Industries d'Azazga où nous avons effectué notre stage pratique.

Notre mémoire est structuré en trois chapitres :

- Dans le premier chapitre nous donnons les généralités sur la machine asynchrones.
- Le deuxième chapitre fera l'objet du calcul des dimensions du moteur, des forces magnétomotrices, des paramètres du schéma électrique équivalent, et des pertes de puissances.
- Le dernier chapitre est réservé aux résultats de calcul des différents paramètres de la machine en tenant compte des facteurs de surdimensionnement préconisés par le bureau d'études de la firme de fabrication de ces moteurs. Les calculs se sont effectués en utilisant un schéma équivalent en ″L″ largement utilisé jusque-là [1-3]. A la fin une évaluation critique des résultats de calcul.

Nous terminons notre mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I :

Généralités sur les moteurs asynchrones

I.1. Introduction

Le moteur asynchrone est une machine tournante aussi appelée moteur à induction qui fonctionne avec du courant alternatif. Sa particularité est de fonctionner avec un induit en court-circuit, sur lequel il n'y a pas de contacts électrique. Ceci permet de s'affranchir des problèmes liés aux collecteurs et aux balais, rencontrés dans le moteur à courant continu par exemple. Ce moteur peut, selon sa construction, être relié par son circuit inducteur à un réseau électrique alternatif monophasé ou polyphasé. Nous étudierons pour notre cas un moteur alimenté par un réseau triphasé. En effet, les moteurs triphasés présentent pour une masse donnée des performances jusqu'à 50 % supérieures à leurs homologues monophasés.

La machine asynchrone était à l'origine uniquement utilisée en moteur mais grâce à l'électronique de puissance elle est de plus en plus souvent utilisée en génératrice.

I.2. Historique

La paternité de la machine asynchrone est controversée. Elle pourrait être attribuée à trois inventeurs : en 1887, Nikola Tesla dépose un brevet sur la machine asynchrone, puis en mai de l'année suivante cinq autres brevets. Pendant la même période Galileo Ferraris publie des traités sur les machines tournantes, avec une expérimentation en 1885, puis une théorie sur le moteur asynchrone en avril 1888. En 1889, Michail Ossipowitsch Doliwo-Dobrowolski, électricien allemand d'origine russe, invente le premier moteur asynchrone à courant triphasé à cage d'écureuil qui sera construit industriellement à partir de 1891. Du fait de sa simplicité de construction, d'utilisation et d'entretien, de sa robustesse et son faible prix de revient, la machine asynchrone est aujourd'hui très couramment utilisée comme moteur dans une gamme de puissance allant de quelques centaines de watts à plusieurs milliers de kilowatts. Quand la machine asynchrone est alimentée par un réseau à fréquence fixe, il est difficile de faire varier sa vitesse. En outre, au démarrage, le couple est faible et le courant appelé est très élevé. Deux solutions historiques ont résolu ce dernier problème : le rotor à encoches profondes et le rotor à double cage découvert en 1912 par Paul Boucherot. Grâce aux progrès de l'électronique de puissance, l'alimentation par un gradateur à fréquence variable permet maintenant de démarrer la machine convenablement et de la faire fonctionner avec une vitesse réglable dans une large plage.

I .3.Conception des parties actives de la machines asynchrone

Deux composantes principales constituent le moteur asynchrone, souvent appelé moteur à induction. Elles sont faites de tôles d'acier au silicium et comportent des encoches dans lesquelles on place les enroulements.

L'une des composantes, appelée le stator, est fixe ; on y trouve les enroulements reliés à la source. L'autre composante, nommée le rotor est montée sur un axe libre de tourner à l'intérieur du stator.

I.3.1.Noyau statorique

Le stator consiste en un empilement de tôles d'acier au silicium dont l'épaisseur varie entre 0,35 et 0,50 mm On utilise les tôles minces dans les moteurs pour lesquels on doit minimiser les pertes dans le circuit magnétique. Dans le cas où le diamètre du moteur ne dépasse pas quelques centaines de millimètres, les tôles sont découpées en une seule pièce. Pour les moteurs de grand diamètre, les tôles du stator et du rotor sont découpées par sections, afin de limiter l'effet des courants de Foucault, on recouvre, habituellement, les tôles d'une mince couche de vernis ou de silicate de soude. Dans ces conditions, le rapport entre l'épaisseur véritable d'acier et l'épaisseur physique de l'empilement de tôles, nommé **coefficient de foisonnement**, se situe entre 0.92 et 0,94. **[3]**

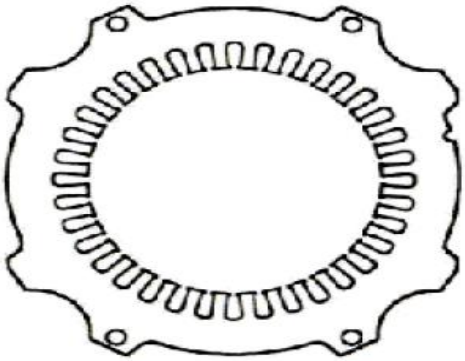


Fig. I.1. Tôle de stator

I.3.2. Noyau rotorique

Le rotor est fait, comme le stator, de tôles empilées et habituellement du même matériau. Il est séparé du stator par un entrefer très court de l'ordre de 0.4 et 2 mm seulement. Dans les petits moteurs, les tôles sont découpées en une seule pièce et assemblées sur un arbre.

Dans de plus gros moteurs, chaque lamination est constituée de plusieurs sections et montée sur un noyau. Il existe deux types du rotor :

- Rotor bobiné (à bagues).
- Rotor à cage d'écureuil.

I.3.2.1. Rotor bobiné

Le rotor comporte un enroulement bobiné à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôle empilés sur l'arbre de la machine. Cet enroulement est obligatoirement polyphasé, même si le moteur est monophasé et, en pratique, toujours triphasé à couplage en étoile. Les encoches, découpées dans les tôles sont légèrement inclinées par rapport à l'axe de la machine de façon à réduire les variations de réluctance liées à la position angulaire rotor/stator et certaines pertes dues aux harmoniques. Les extrémités des enroulements rotorique sont sorties et reliées à des bagues montées sur l'arbre, sur lesquelles frottent des balais en carbone. On peut ainsi mettre en série avec le circuit rotorique des éléments de circuit complémentaires (résistances, électronique de puissance…) qui permettent des réglages de la caractéristique couple/vitesse. Ce type de moteur est utilisé essentiellement dans des applications où les démarrages sont difficiles et/ou nombreux. **[3]**

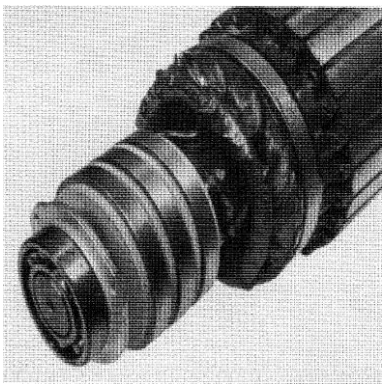


Fig. I.2 : Vue d'un rotor bobiné (à bagues) d'un moteur asynchrone triphasé.

b. Description de différentes pièces d'un moteur asynchrone triphasé

La figure ci-dessous montre les différents composants d'un moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné. **[3]**

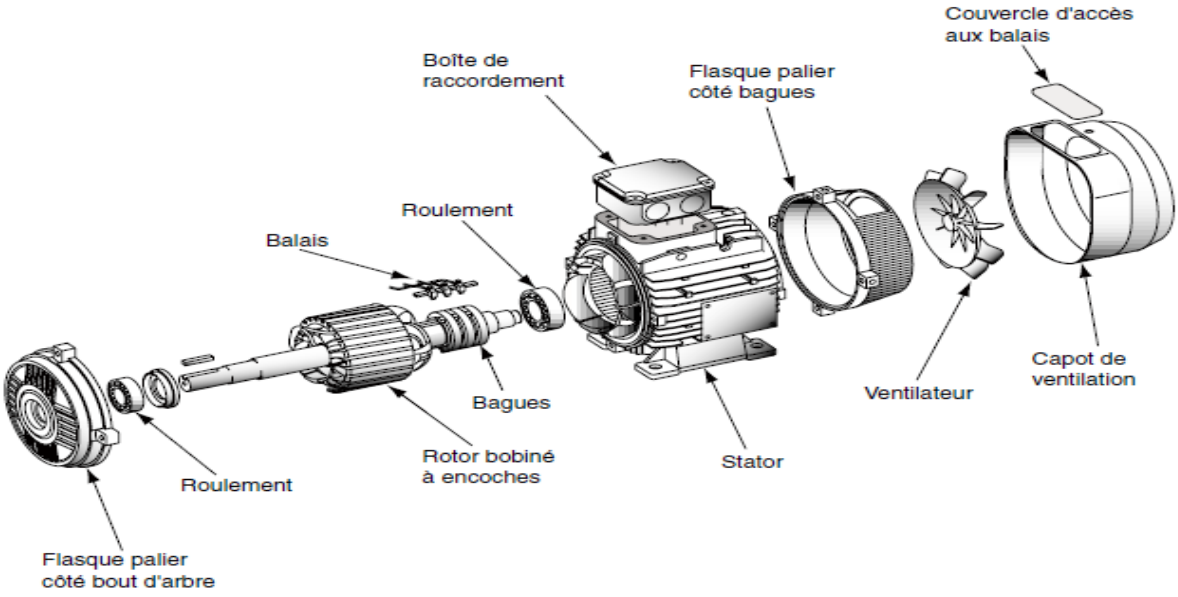


Fig.1.3: Description de différents pièces d'un moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné (à bague).

I.3.2.2. Rotor à cage d'écureuil

Le circuit du rotor est constitué de barres conductrices régulièrement réparties entre deux couronnes métalliques formant les extrémités, le tout rappelant la forme d'une cage d'écureuil. Bien entendu, cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique analogue à celui du moteur à rotor bobiné.

Les barres sont faites en cuivre, en bronze ou en aluminium, suivant les caractéristiques mécaniques et électriques recherchées par le constructeur. Dans certaines constructions, notamment pour des moteurs à basse tension (par exemple 230/400 V), la cage est réalisée par coulée et centrifugation d'aluminium.

On démontre que, si le nombre de barres est suffisamment grand (soit en pratique, Nb $\geq$ 8xp), la cage se transforme automatiquement en un circuit polyphasé de polarité adéquate.

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

n'est donc pas étonnant qu'il constitue la plus grande partie du parc des moteurs asynchrones actuellement en service.

Son inconvénient majeur est qu'il a, au démarrage, de mauvaises performances (courant élevé et faible couple). C'est pour remédier à cette situation qu'ont été développés deux autres types de cages (rotor à double cage et rotor à encoches profondes). **[3]**

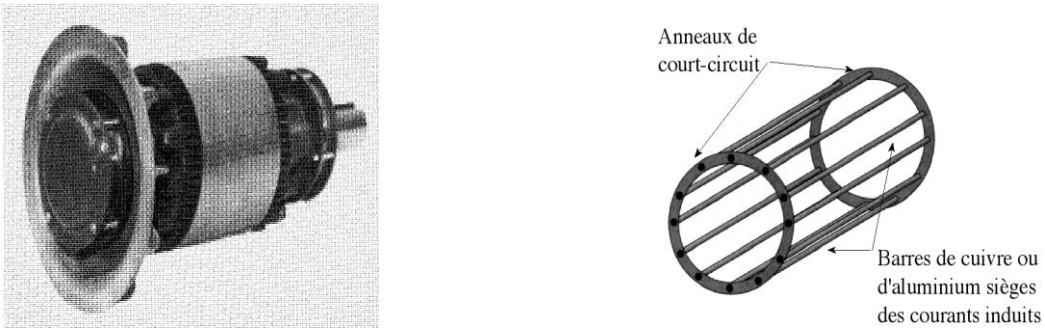


Fig .I.4 : Vue d'un rotor à cage d'écureuil d'un moteur asynchrone triphasé.

b. Description de différentes pièces d'un moteur asynchrone triphasé [8]

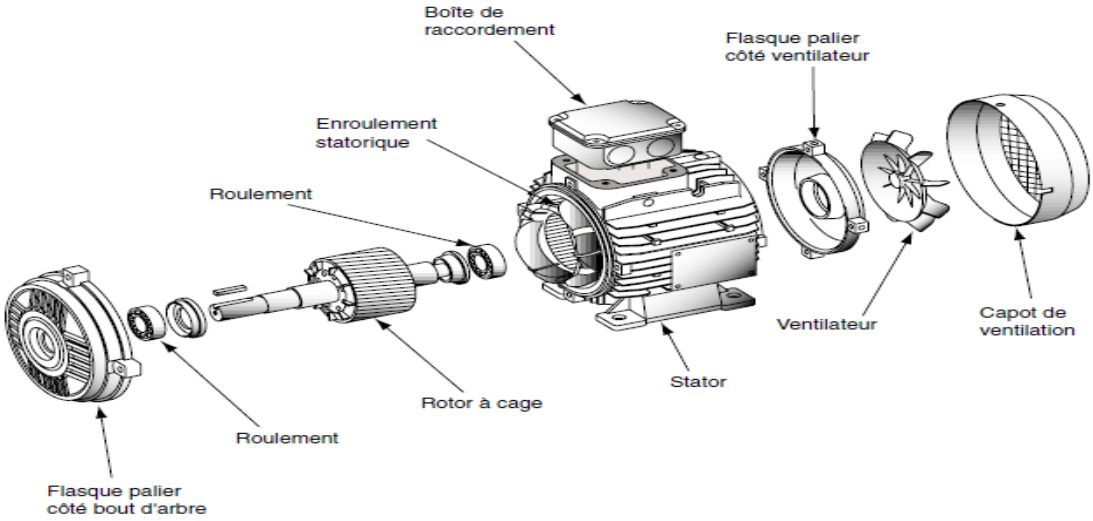


Fig.1.5.Description de différentes pièces d'un moteur asynchrone triphasé à rotor à cage.

I.3.3. Paliers

Les paliers, qui permettent de supporter et de mettre en rotation l'arbre rotorique, sont constitués de flasques et de roulements à billes insérés à chaud sur l'arbre. Les flasques, moulés en fonte, sont fixés sur le carter statorique grâce à des bobines ou des tiges de serrage.

I.4. BOBINAGE [6]

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

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

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

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

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

carrés, elles sont généralement formées sur des gabarits, mais introduites fil par filou quelques fils à la fois dans les encoches.

I.5.Classification des moteurs à cage d'écureuil [6]

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

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

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

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

Classe D : Moteurs à fort glissement

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

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

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

- L'encoche du rotor d'un moteur de classe (A) n'est pas tellement creuse et l'enroulement à une faible résistance. De même, la réactance est faible et presque uniforme pour tout le conducteur ; il en résulte que le courant circule dans tout le conducteur. Le couple est normal et le courant de démarrage est suffisamment élevé. (fig.I.6.a). Le couple au démarrage demeure toutefois normal.

- Le moteur de classe B est le plus utilisé de nos jours. ses caractéristiques découlent de l'emploi d'encoches profondes et étroites (fig.I.6.b). Lors du démarrage, la réactance est plus forte dans le bas du conducteur ; cela force le courant à passer surtout dans le haut du conducteur, ce qui en réduit la surface active et augmente sa résistance.

  Le courant se trouve ainsi limité et on peut, dans bien des cas, démarrer ce moteur à pleine tension ; c'est un avantage par rapport au moteur de classe A.

- Un moteur de classe C possède un rotor à double cage d'écureuil (fig.I.6.c).

  On peut construire cet enroulement de différentes façons. Le principe consiste à placer un enroulement de forte résistance près de l'entrefer et un enroulement de faible résistance loin de la surface. Durant le démarrage, le conducteur éloigné de l'entrefer a une grande réactance, ce qui force le courant à passer dans le conducteur extérieur. Le courant est donc faible mais le couple est fort.

- Lorsque le rotor a atteint sa pleine vitesse, la réactance du conducteur situé le plus loin de l'entrefer devient faible ; la répartition du courant est alors à peu près uniforme dans tout le conducteur.
- Un moteur de classe D, a un enroulement d'une grande résistance en raison de sa faible section (fig. I.6.d), 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%. **[3]**

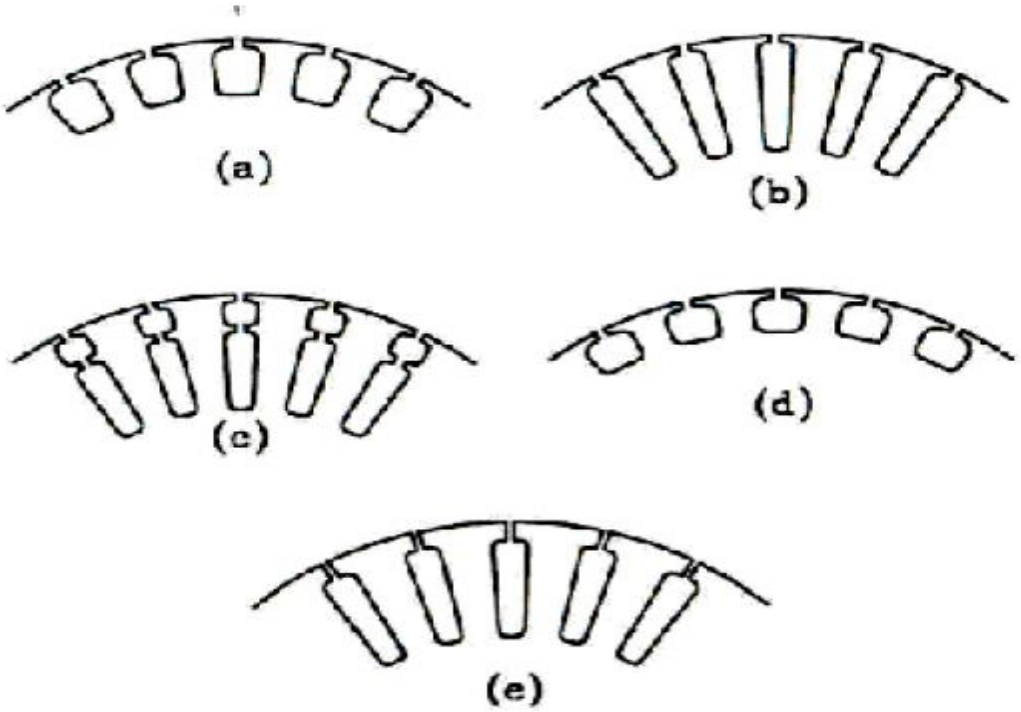


Fig.I.6. Les différents types d'encoches rotorique. Classement de le NEMA.

- Les conducteurs du rotor d'un moteur de classe F sont placés loin de l'entrefer.

Au démarrage, la réactance est grande et le courant est faible, mais le circuit est très inductif et le couple développé est faible.

On peut ainsi obtenir les caractéristiques recherchées par le choix d'une forme d'encoche appropriée, forme qui n'est pas nécessairement rectangulaire, surtout si les conducteurs sont en aluminium coulé. On retrouve des configurations d'encoches plus complexes (fig.I.7.) qui, même s'il s'agit d'une cage simple, donnent un comportement qui tend beaucoup vers celui d'une double cage.**[3]**

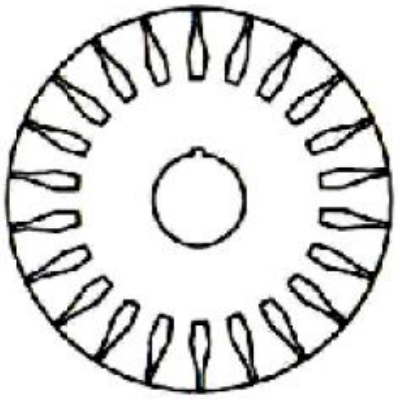


Fig.I.7. Rotor à encoches spéciales

I.6. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone repose sur la création d'un courant induit dans un conducteur lorsque celui-ci coupe les lignes de force d'un champ magnétique, d'où le nom de « moteur à induction ». L'action combinée de ce courant induit et du champ magnétique crée une force motrice sur le rotor du moteur.

I.6.2. Vitesse de synchronisme

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

$$Ns = \frac{60.f}{P} \qquad \textbf{(I.01)}$$

Avec :

Ns : Vitesse de synchronisme [tr/min].

f : Fréquence [Hz].

P : Nombre de paires de pôles.

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

I.6.3. Glissement

Le couple moteur ne peut exister que si un courant induit circule dans la spire. Ce couple est déterminé par le courant qui circule dans la spire et qui ne peut être que s'il existe une variation de flux dans cette spire. Il faut donc qu'il y ait une différence de vitesse entre la spire et le champ tournant. C'est la raison pour laquelle un moteur électrique fonctionnant suivant le principe que nous venons de décrire est appelé "moteur asynchrone". La différence entre la vitesse de synchronisme (Ns) et celle de la spire (N_r) est appelée "glissement" (g) et s'exprime en % de la vitesse de synchronisme.

$$g = \frac{Ns - Nr}{Ns}.100 \qquad \textbf{(I.02)}$$

Avec :

g : Le glissement [%].

Nr : La vitesse de l'arbre du moteur [tr/min].

En fonctionnement, la fréquence du courant rotorique s'obtient en multipliant la fréquence d'alimentation par le glissement. Au démarrage, la fréquence du courant rotorique est donc maximale et égale à celle du courant statorique. La fréquence du courant statorique diminue progressivement au cours de la mise en vitesse du moteur. Le glissement en régime établi est variable suivant la charge du moteur et selon le niveau de la tension d'alimentation qui lui est appliquée. Il est d'autant plus faible que le moteur est peu chargé et il augmente si le moteur est alimenté en dessous de la tension nominale correspondant à la fréquence d'alimentation.

I.7. Choix du couplage

Afin d'adapter électriquement un moteur asynchrone triphasé et éviter de le griller par rapport à l'alimentation électrique distribuée sur le réseau, il est impératif de coupler de manière correcte les enroulements du moteur. La tension du réseau doit correspondre à la tension que supporte un enroulement du moteur, la plus petite tension inscrite sur la plaque signalétique du moteur correspond à la tension que supporte un enroulement. En effet, dans le montage triangle, un enroulement est câblé entre deux fils de phases, alors que dans le montage étoile, deux enroulements sont câblés entre deux fils de phases. Si la tension est plus élevée, elle correspond à la tension du réseau, le couplage sera étoile, si c'est l'autre tension alors le couplage sera en triangle.

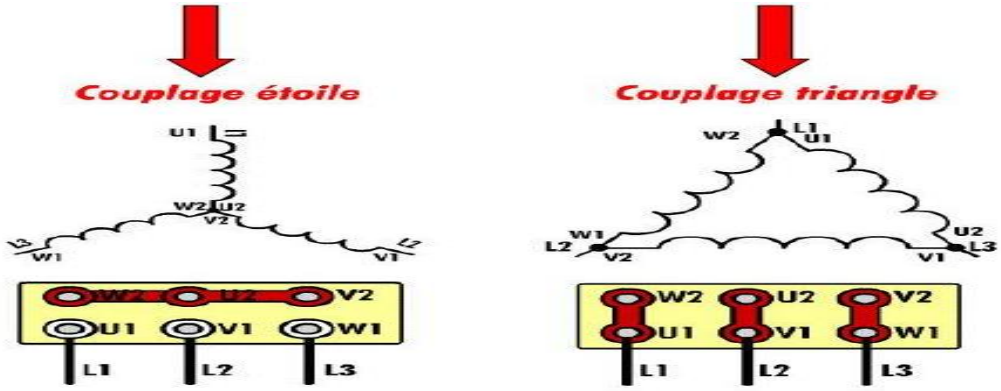


Fig. I.8 : Couplage d'un moteur asynchrone 3~(étoile ou triangle).

I.8. Démarrage des moteurs asynchrones

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

I.8.1.Démarrage sous tension réduite

Plusieurs dispositifs permettent de réduire la tension au bornes des enroulements du stator pendant la durée du démarrage du moteur ce qu'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.8.1.a.Démarrage étoile-triangle

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

Le fait de démarrer avec un couplage étoile permet de diviser par la racine carrée de trois la tension appliquée ; ainsi, le courant maximal absorbé est trois fois plus faible que lors d'un démarrage directement avec un couplage triangle. Le couple de démarrage est lui aussi trois fois plus faible que lors d'un démarrage en triangle..

I.8.1.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.

I.8.1.c. Démarrage statorique

Au moment de démarrage, lorsque l'on diminue la tension aux bornes des enroulements du moteur on diminue l'intensité et le couple au démarrage du moteur, pour cela, on place une (ou plusieurs) résistances en série dans la ligne du moteur.

I.8.1.d. Démarrage résistif

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

I.8.2.Démarrage à tension nominale

I.8.2.1.Démarrage rotorique

Lors d'un démarrage rotorique, des résistances de puissance sont insérées en série avec les enroulements du rotor. Il ne peut être mis en oeuvre qu'avec des machines à rotor bobiné muni de contacts glissants (connexions électriques des enroulements rotoriques.

I.9.Freinage des moteurs asynchrones

On distingue plusieurs types de freinage :

I.9.1.Freinage hypersynchrone

Lorsque la vitesse du rotor est supérieure à la vitesse du champ tournant, le moteur freine. Couplé à un variateur de vitesse qui diminue progressivement la vitesse du moteur, on peut arrêter le moteur. Le couple de freinage est faible, cette méthode n'est donc pas très efficace pour freiner rapidement le moteur asynchrone.

I.9.2.Freinage par injection de courant continu

L'alimentation en courant continu du stator crée un champ fixe dans la machine qui s'oppose au mouvement. C'est la méthode la plus efficace pour freiner la machine mais les contraintes en courant sont également très sévères. Le contrôle de l'intensité du courant continu permet de contrôler le freinage.

I.9.3. Freinage à contre-courant

Le principe consiste à inverser des phases pendant un court instant. Ceci est donc équivalent à un freinage hypersynchrone, mais à fréquence fixe. Le couple résistant est donc faible et le courant appelé est également très important (de l'ordre de 10 à 12 fois l'intensité nominale).

I.10. Bilan des puissances et des pertes

Le moteur asynchrone absorbe sur le réseau une puissance électrique active triphasée Pa. Une partie P_{JS} de cette puissance est dissipée par effet Joule dans les enroulements du stator. Par la suite, le champ magnétique inducteur entraîne des pertes dans le fer P_{fer} , par hystérésis et par courant de Foucault. Le reste de la puissance Ptr est transmis au rotor à

travers l'entrefer. La majeure partie de cette puissance est alors utilisée pour produire une puissance électromagnétique Pem, tandis que la présence d'un courant induit dans le rotor provoque des pertes par effet Joule P_{JR}. La puissance électromagnétique fournie par le stator est responsable de la mise en mouvement du rotor, qui produit la puissance mécanique utile Pu qui sera par la suite transmise à la charge par le biais d'un arbre de transmission ou d'une courroie de distribution. Toutefois, dans le mouvement du rotor, une partie de la puissance est perdue par divers mécanismes de frottements, c'est ce que l'on appelle les pertes rotationnelles Pc. Nous donnons par la suite les différentes relations permettant de calculer les pertes et les puissances impliquées dans le moteur asynchrone, lorsqu'elles sont calculables. La figure ci-dessous représente le Bilan des puissances et des pertes d'un moteur asynchrone triphasé. **[8]**

I.11. Couple moteur asynchrone triphasé

I.11.1. Couple électromagnétique

Les forces qui s'exercent sur les conducteurs du rotor tournent à la vitesse Ωs : elles glissent sur le rotor qui, lui, ne tourne qu'à la vitesse Ωr . L'action de l'ensemble des forces électromagnétiques se réduit à un couple électromagnétique résultant (Cem).

$$Cem = \frac{Pem}{\Omega s} \qquad \textbf{(I.03)}$$

Avec :

Cem : Couple électromagnétique [N.m].

Ωs : La vitesse synchrone, $\Omega s = \frac{2\pi Ns}{60}$ [rad/s]. **(I.04)**

Ωr : La vitesse du rotor, $\Omega r = \frac{2\pi Nr}{60}$ [rad/s]. **(I.05)**

I.11.2. Couple utile *Cu*

Le rotor déploie un couple utile (*Cu*) à la vitesse (Ωr). Il délivre alors la puissance utile (*Pu*) telle que :

$$Cu = \frac{Pu}{\Omega r} \qquad \textbf{(I.06)}$$

Avec :

Cu : Le Couple utile [N.m].

I.11.3. Le couple des pertes

Le couple des pertes c'est la différence entre le couple électromagnétique et le couple utile due aux pertes constantes.

$$Cp = Cem - Cu \qquad \textbf{(I.07)}$$

Ou bien :

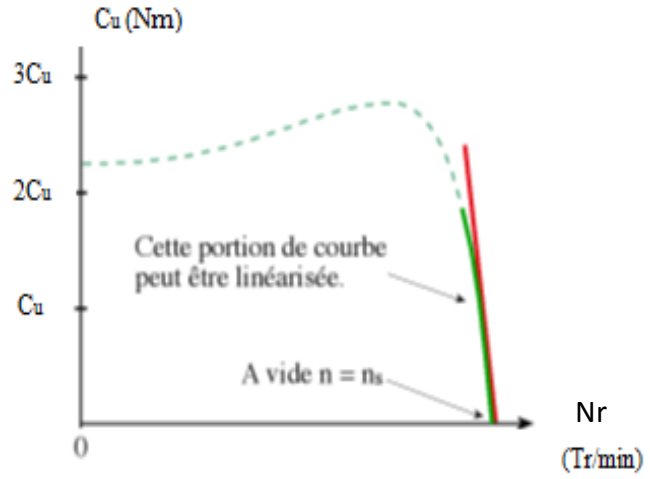
$$Cp = \frac{Pc}{\Omega r} \qquad \textbf{(I.08)}$$

Avec :

Cp : Le couple des pertes [N.m].

I.12. Caractéristique mécanique

La figure ci-dessous représente la caractéristique mécanique d'un moteur asynchrone triphasé, le couple en fonction de la vitesse de rotation. **[9]**



Légende :

Cu Couple nominale

---- Couple de démarrage du moteur. On constate que le couple est fort : La machine peut démarrer en charge.

Zone de fonctionnement de moteur. On constate qu'elle est presque linéaire. Cette partie de la courbe et très verticale.la vitesse varié peu avec la charge.

La zone de fonctionnement peut être modélisée par une droite.

Figure. I.9 : Courbe Caractéristique mécanique Cu = f(n) d'un moteur asynchrone triphasé.

I.12.1. Réglage de la vitesse d'un moteur asynchrone

La vitesse de synchronisme (n_s) dépend de la fréquence (f_s) des courants statoriques. Et comme la vitesse (n) reste très proche de la vitesse de synchronisme, pour varier la vitesse du moteur il faut faire varier la fréquence f_s.

En réalité pour faire varier la vitesse sans modifier le couple utile il faut garder le rapport $\frac{V_s}{f_s}$ constant ($V_s$est la tension d'alimentation d'un enroulement).

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

Chapitre II

Calcul des différents paramètres de la machine

Introduction

L'établissement du projet d'une machine asynchrone commence par le choix des dimensions et des matériaux de ses différentes parties. Notre étude porte sur un moteur asynchrone à cage d'écureuil d'une puissance de 3 kW. Les diamètres intérieur et extérieur de la machine sont respectivement de 108.5 mm et 170 mm.

Dans ce qui suit nous présentons la démarche suivie ainsi que les différentes relations qui nous permettront d'effectuer ce dimensionnement et en tenant compte des contraintes électromagnétiques.

II.1. Calcul électromagnétique

II.1.1. Dimensionnement de la machine asynchrone

II.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.

$$P = K_e * \frac{P_n}{\cos(\emptyset_n)*\eta_n} \quad \text{[KVA].} \qquad (1.1)$$

Avec :

$\cos(\phi_n)$: Facteur de puissance.

η_n : Rendement nominal de la machine.

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

$$K_e = 0,98 - 5.P.10^{-3}$$

b) Longueur de l'induit

Elle est donnée par :

$$L_i = \frac{6,1.P_e.10^{12}}{\alpha_i.K_f.N.D_1^2.A_1.B_\delta.K_{en1}} \quad \text{[mm]} \qquad (1.2)$$

Où :

α_i : Coefficient de recouvrement polaire.

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

N : Vitesse de synchronisme.

D_1 : Diamètre intérieur du stator.

A_1 : Charge linéaire.

B_δ : Induction dans l'entrefer.

$K_{en\,1}$: Facteur de bobinage de l'enroulement statorique, il est donné par

$$K_{en\,1} = K_{d1}.K_{r1} \qquad (1.3)$$

K_{d1} : Coefficient de distribution, donné par

$$K_{d1} = \frac{\sin(\frac{\pi}{2m_1})}{q_1.\sin(\frac{\pi}{2m.q_1})} \qquad (1.4)$$

K_{r1} : Coefficient de distribution, donné par

$$K_{r1} = sin\,(\frac{\beta.\pi}{2}) \qquad (1.5)$$

β : Rapport de raccourcissement.

- **Coefficient de longueur**

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

$$\lambda_i = \frac{L_i}{D_1} \qquad (1.6)$$

- **Pas polaire en mm**

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

$$\tau_{p1} = \frac{\pi.D_1}{2.p} \quad [mm]. \qquad (1.7)$$

Avec :

P : Nombre de paires de pôles.

- **Pas polaire en nombre d'encoches**

$$\tau_p = \frac{Z_1}{2.p} \quad [\text{mm}]. \quad (1.8)$$

Z_1 : Nombre d'encoches statorique.

- **Pas dentaire**

$$t_1 = \frac{\pi.D_1}{Z_1} \quad [\text{mm}]. \quad (1.9)$$

c) Courant nominal

Il est donné comme suit :

$$I_{n1} = \frac{P_n.10^3}{m_1.U_{n1}.\text{Cos}(\emptyset_n).\eta_n} \quad [\text{A}]. \quad (1.10)$$

m_1 : Nombre de phases statoriques.

U_{n1} : Tension nominale.

d) Nombre de conducteurs effectifs dans une encoche

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

$$U_{enc1} = \frac{a_1.t_1.A_1.10^{-3}}{I_{n1}} \quad (1.11)$$

a_1 : Nombre de voies parallèles.

e) Nombre de spires d'une voie parallèle

Il est donné par la formule suivante :

$$W_1 = \frac{P.q_1.U_{enc1}}{a_1} \quad (1.12)$$

- **Angle électrique**

$$\gamma = \frac{P.360}{Z_1} \quad (1.13)$$

- **Nombre d'encoches par pôle et par phase**

$$q_1 = \frac{Z_1}{2.P.m_1} \quad (1.14)$$

- **Pas d'enroulement**

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

$$Y_1 = \frac{Z_1}{2.P} - \varepsilon \qquad (1.15)$$

ε : Raccourcissement $\varepsilon = 0$

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

Elle est calculée par l'expression suivante :

$$S_{eff1} = \frac{I_{n1}}{a_1.J_1} \quad [mm^2]. \qquad (1.16)$$

J_1 : Densité du courant dans l'enroulement statorique elle varie entre (2÷ 14) [A/mm^2].

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

$$S_{elt1} = S_{eff1} / N_{el} \quad [mm^2]. \qquad (1.17)$$

N_{el} : Nombre de conducteurs élémentaires.

Les sections normalisées sont données par le tableau T.1 (voir l'annexe)

II.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 représenté dans figure 4.b, elle est donnée comme suit :

$$b_{z1} = \frac{t_1.B_\delta}{K_{fer}.B_{z1max}} \quad [mm]. \qquad (1.18)$$

Où :

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

K_{fer} = 0.95 pour l'isolation avec oxydation.

K_{fer} = 0.97 pour l'isolation en vernie.

B_{z1max} : Induction maximale dans le dent statorique en [T].

b) Hauteur du dos du stator

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

$$h_{c1} = \frac{0{,}5.\alpha_i.\tau_{p1}.B_\delta}{K_{fer}.B_{c1}} \quad \text{[mm].} \qquad (1.19)$$

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

c) Hauteur de la dent

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

$$h_{z1} = 0{,}5\ (D_{ext} - D_1) - h_{c1} \quad \text{[mm].} \qquad (1.20)$$

D_{ext} : Diamètre extérieur du stator.

d) Largeur minimale de l'encoche

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

$$b_{enc11} = \frac{\pi.(D_1 + 0.2.h_{z1})}{Z_1} - b_{z1} \quad \text{[mm].} \qquad (1.21)$$

e) Largeur maximale de l'encoche

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

$$b_{enc12} = \frac{\pi.(D_1 + 2.h_{z1})}{Z_1} - b_{z1} \quad \text{[mm].} \qquad (1.22)$$

f) Hauteur de l'encoche

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

$$h_{enc1} = h_{z1} - h_{f1} - h_{k1} - \frac{b_{enc12}}{2} \quad \text{[mm].} \qquad (1.23)$$

Avec:

h_{f1} : Hauteur de la fente d'encoche statorique, elle varie entre 1.2÷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 :

$$S_{enc1}= 0.5.(b_{enc11}+b_{enc12}).h_{enc1} + \frac{\pi.b_{enc12}^2}{8} - S_{iso} \quad [mm]. \quad (1.24)$$

S_{iso}: Section occupée par l'isolation

$$S_{iso} = \left(\pi.\frac{b_{enc12}}{2} + 2.h_{enc1} + b_{enc11}\right).e_1 \quad [mm]. \quad (1.25)$$

e_1 : Epaisseur d'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 :

$$K_{re1} = N_{el}.\frac{d_{iso}^2.U_{enc1}}{S_{enc1}} \quad (1.26)$$

Avec :

$$N_{elt}=N_{el}.U_{enc1}$$

d_{iso} : Diamètre de conducteurs avec isolation.

S_{enc1} : Section de l'encoche en (mm^2).

i) Vérification des charges électromagnétiques

Apres 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 10%.

- **Charge linéaire**

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

$$A_1 = \frac{I_{n1}.\ U_{enc1}.\ Z_1}{\pi.D_1.a_1.10^{-3}} \quad \text{[A/m].} \quad (1.27)$$

- **Induction magnétique dans l'entrefer**

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

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_i.\tau_{p1}.L_i.10^{-6}} \quad \text{[T].} \quad (1.28)$$

- **Flux sous un pôle**

$$\Phi = \frac{U_{n1}.K_e}{4.K_f.f_1.W_1.K_{en1}} \quad \text{[Weber].} \quad (1.29)$$

j) Choix de l'entrefer

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

II.1.1.3. Dimensionnement du rotor

Le rotor est à cage d'écureuil est constitué de barres logées dans les encoches ovales semi-ouvertes, court-circuitées à leurs extrémités.

a) Choix du nombre d'encoches rotoriques

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

b) Diamètre extérieur du rotor

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

$$D_2 = D_1 - 2\delta \quad \text{[mm].} \quad (1.30)$$

Où:

δ- L'épaisseur de l'entrefer.

- **Pas dentaire rotoriques**

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

$$t_2 = \frac{\pi . D_2}{Z_2} \quad \text{[mm].} \quad (1.31)$$

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 :

$$I_2 = 1{,}11 * \frac{I_{n1}.m_1.K_{en1}..cos\,(\phi_n)}{m_2.W_2.K_{en2}} \quad \text{[A].} \quad (1.32)$$

Le rotor de notre machine est à, cage d'écureuil, on considère que cette cage est un enroulement polyphasé avec un nombre de phase m_2 égal au nombre d'encoche Z_2. Donc $K_{en2}=1$

Et $W_2= 0{,}5$; dans ce cas on aura :

$$I_2 = 1{,}11.I_n.2.m_1.W_1.cos(\phi_n).\frac{K_{enc1}}{Z_2} \quad \text{[A].} \quad (1.33)$$

Avec :

I_{n1}– Courant nominal statorique.

W_1–Nombre de spires statoriques.

K_{en1}– Facteur de bobinage statorique.

II.1.1.4. Dimensionnement de la feuille rotorique

La feuille rotorique est représentée par la figure 5.a.

a) Hauteur de la culasse rotorique

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

$$b_{c2} = 0{,}5 * \frac{\alpha_i . \tau_{p2} . B_\delta}{K_{fer} . B_{c2}} \quad \text{[mm].} \quad (1.34)$$

B_{c2}– Induction dans la culasse rotorique.

$$\tau_{p2} = \pi . \frac{D_2}{2.p} \quad \text{[mm].} \quad (1.35)$$

b) Hauteur de la dent

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

$$h_{z2} = 0{,}5.(D_2 - D_{int2}) - h_{c2} \quad \text{[mm].} \quad (1.36)$$

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 **:** Z_2 -π

$$b_{z2} = \frac{t_2 . B_\delta}{K_{fer} . B_{z2max}} \quad \text{[mm].} \quad (1.37)$$

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 :

$$d_{21} = [\frac{\pi.(D_2 - 2.h_{f2}) - Z_2.b_{z2}}{(Z_2 - \pi)}] \quad [mm]. \quad (1.38)$$

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 inférieur de l'encoche est exprimé par l'expression suivante :

$$d_{22} = [\frac{\pi.(D_2 - 2.h_{z2}) - Z_2.b_{z2}}{(Z_2 + \pi)}] \quad [mm]. \quad (1.39)$$

f) Hauteur de l'encoche

La hauteur de l'encoche est donnée comme suit :

$$h_{enc2} = h_2 + 0{,}5.(d_{21} + d_{22}) \quad [mm]. \quad (1.40)$$

Avec :

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

$$h_2 = hz_2 - h_{f2} - 0{,}5.(d_{21} + d_{22}) \quad [mm]. \quad (1.41)$$

g) 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 barre**

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

$S_b = 0{,}125.(d_{21}^2 + d_{22}^2).\pi + 0{,}5.(d_{21} + d_{22}).h_2$. [mm^2]. (1.42)

- **Densité du courant**

Elle est donnée par la formule suivante :

$$J_b = \frac{I_2}{S_b} \quad [\text{A/mm}^2]. \quad (1.43)$$

h) Dimensionnement de l'anneau

- **Section de l'anneau**

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

$$S_{an} = (0{,}35 \div 0{,}45).\frac{Z_2.S_b}{2.p} \quad [\text{mm}^2]. \quad (1.44)$$

- **Hauteur de l'anneau**

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

$$h_{an} = (1{,}1 \div 1{,}25).h_{z2} \quad [\text{mm}]. \quad (1.45)$$

- **Largeur de l'anneau**

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

$$B_{an} = \frac{S_{an}}{h_{an}} \quad [\text{mm}]. \quad (1.46)$$

- **Diamètre moyen de l'anneau**

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

$$D_{an} = D_2 - h_{an} \quad [\text{mm}]. \quad (1.47)$$

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

Elle s'exprime comme suit :

$$J_{an} = \frac{I_b}{S_{an}} \qquad [A/mm^2]. \qquad (1.48)$$

Avec:

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

$$I_{an} = \frac{I_b}{K_{red}} \qquad [A]. \qquad (1.49)$$

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

$$K_{red} = 2.\sin\left(\frac{\pi.P}{Z_2}\right) \qquad (1.50)$$

II.1.2. Calcul du circuit magnétique

Le circuit magnétique des machines asynchrones doit canaliser les lignes de forces du champ magnétique tournant. L'objet de ce calcul consiste à déterminer les forces magnétomotrices (fmm) qui nous permettront 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 $\oint H.\,dl$ représente la somme $\sum H_x.\,l_x$

Où :

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

I_x - Représente la ligne moyenne du tronçon choisi.

Le calcul du champ magnétique sera fait à deux paires de pôles.

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

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

- Les dents rotorique.

II.1.2.1. Circuit magnétique statorique

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

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

Elle est donnée par l'expression suivante :

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

b) Force magnétomotrice de la culasse statorique

Elle est donnée par :

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

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 T.3 (voir l'annexe).

c) Force magnétomotrice dans la dent du stator

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$F_{z1} = H_{z1}.h_{z1}.10^{-3} \qquad \text{[A].} \qquad (2.3)$$

Où :

H_{z1} - Hauteur de la dent statorique en (mm).

H_{z1} - Intensité du champ magnétique qui correspond à l'induction B_{z1} déterminer du tableau T.2 (voire l'annexe).

II.1.2.2. Circuit magnétique rotorique

a) La longueur moyenne des lignes du champ magnétique dans la culasse du rotor

Elle est donnée par la formule suivante :

$$L_{c2} = (D_2 - 2.h_{z2} - h_{c2}).{}^{\pi}/_{2.P} + h_{c2} \quad \text{[mm].} \quad (2.4)$$

Avec :

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

h_{e2} - Hauteur de la culasse rotorique en [mm].

b) Force magnétomotrice dans la culasse du rotor

Elle est exprimée par la relation suivante

$$F_{c2} = H_{c2}.L_{c2}.10^{-3} \quad \text{[A].} \quad (2.5)$$

H_{c2} –Intensité du champ magnétique dans la culasse rotorique qui correspond à l'induction B_{c2}, (voir le tableau T.3 en annexe)

c) Force magnétomotrice dans les dents du rotor

Pour le type d'encoche représente dans la figure 5-b (voir l'annexe) on a :

$$F_{z2} = H_{z2}.(h_{z2} - 0{,}4.d_{21}) \quad \text{[A].} \quad (2.6)$$

H_{z2}-Intensité du champ magnétique dans la dent rotorique qui correspond à l'induction B_{z2}(voir le tableau T-2 en annexe).

II.1.2.3.Force magnétomotrice dans l'entrefer

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

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

Avec :

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

$$K_{\delta} = K_{\delta 1}.K_{\delta 2} \qquad (2.8)$$

Avec :

$$K_{\delta 1} = 1 + \frac{b_{f1}}{t_1 - b_{f1} + (^{5.\delta.t_2}/_{b_{f2}})} \qquad (2.9)$$

$$K_{\delta 2} = 1 + \frac{b_{f2}}{t_2 - b_{f2} + (^{5.\delta.t_2}/_{b_{f2}})} \qquad (2.10)$$

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

II.1.2.4. Force magnétomotrice totale par paire de pôle

Elle est donnée par la formule suivante :

$$F = \sum F_i = 2.(F_{\boldsymbol{\delta}} + F_{z1} + F_{z2}) + F_{c1} + F_{c2} \qquad [A] \qquad (2.11)$$

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

II.1.2.5. Coefficient de saturation

a) Coefficient de saturation des dents

Il est donné par :

$$K_{\mu z} = \frac{F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2}}{F_{\delta}} \qquad (2.12)$$

b) Coefficient de saturation de la machine

Il est donné par :

$$K_{\mu} = \frac{\sum F}{2F_{\delta}} \qquad (2.13)$$

II.1.2.6. Courant magnétisant

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

$$I_{\mu} = \frac{p.F}{0{,}9.m_1.W_1.K_{en1}} \qquad [A]. \qquad (2.14)$$

II.1.2.7. Réaction de magnétisation

Elle est exprimée par :

$$X_m = \frac{K_e.U_{n1}}{I_\mu} \quad [\Omega]. \qquad (2.15)$$

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

II.1.2.8. Coefficient de dispersion magnétique du stator

Il est donnée par :

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

X_1 - Réaction inductive de dispersion de l'enroulement statorique.

II.1.2.9. Force électromotrice à vide E_0

Elle est donnée par :

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

II.1.3. Calcul des paramètres électriques des enroulements

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

II.1.3.1. Paramètres statoriques

a) Résistance active d'une phase du stator

$$R_1 = \rho_{cu}\,(T).\frac{W_1.L_{w1}.10^{+3}}{a_1.N_{el}.S_{eff1}} \quad [\Omega]. \qquad (3.1)$$

Avec :

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

ρ_{cu} (T) - Résistivité du cuivre à la température (T).

Elle donnée pour :

T= 20 ℃ ρ_{cu} = 17,2.10^{-9} [Ω.m].

T= 115℃ ρ_{cu} = 24,4.10^{-9} [Ω.m].

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

$$L_{w1} = 2.(L_i + L_{f1}). \quad \text{[mm]}. \quad (3.2)$$

Où :

L_i – Longueur virtuelle de l'induit.

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

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

B_{1moy} - Largeur moyenne d'une section.

$$B_{1moy} = \frac{\pi.(D_1 + h_{z1}).y_{1moy}}{Z_1} \quad \text{[mm]}. \quad (3.4)$$

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

b) Réactances de fuites et perméance 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.

$$X_{enc1} = \frac{1,58.f_1.L_i.W_1^2}{q_1.\mathrm{P}.10^8}.\lambda_{enc1} \quad [\Omega]. \quad (3.5)$$

- **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 phases.

- Flux différentielle de l'encoche.

Elle est donnée par :

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

- **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 :

$$\mathrm{X_{1d}} = \frac{1{,}58.f_1.L_i.W_1^2}{q_1.\mathrm{P}.10^8}.\lambda_{1f} \quad [\Omega]. \qquad (3.7)$$

La réactance totale est donnée par :

$$\mathrm{X_1} = 1{,}58.f_1.L_iW_1^2 * \frac{\lambda_1}{q_1.\mathrm{P}.10^8} \quad [\Omega]. \qquad (3.8)$$

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

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

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

$$\lambda_{enc1} = \frac{h_1}{3b_{enc11}}.K_{b1} + \left(\frac{h_{11}}{b_{enc11}} + \frac{3h_{k1}}{b_{enc11}+2.b_{f1}} + \frac{h_{f1}}{b_{f1}}\right).K_{B2}. \qquad (3.10)$$

K_{b1}, K_{b2} – Coefficients donnée suivant la figure 6.6 (voir l'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 :

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

$$\lambda_{r1} = 1 - \frac{0{,}033.\ b_{f1}^2}{\delta.t_1} \qquad (3.12)$$

Où:

K_{rr1} - Coefficient qui dépend de Q_1 donnée par le tableau T.5 (voir l'annexe).

K_{dd1} – Coefficient de fuite différentielle donnée par le tableau T.6 en fonction de $\frac{Z_2}{p}$ et q_1 (voir l'annexe).

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

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

II.1.3.2. Paramètres rotorique

II.1.3.2.1. Résistance rotorique

a) Résistance active de la barre

Pour le type d'encoche présenté dans la figure 5.b on a :

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

Pour : T = 20℃ ρ_{al} (T) = 28.10^{-9} [Ω.m].

T = 115℃ ρ_{al} (T) = $48{,}8.10^{-9}$ [Ω.m].

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

b) Résistance de l'anneau

Elle est donnée par la formule suivante :

$$R_{an} = \frac{\rho AL\ (T).2\lambda.D_{an}.10^{+3}}{Z_2.S_{an}} \qquad [\Omega]. \qquad (3.15)$$

Avec :

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

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

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

Elle est donnée par la formule suivante :

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

d) Résistance de l'anneau ramenée au stator

Elle est donnée par la formule suivante :

$$R_{an\text{-}ram\text{-}s} = M.\ R_{an\text{-}ram\text{-}b} \quad [\Omega]. \qquad (3.17)$$

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

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

$$K_{ob} = \frac{\sin(\alpha_{ob}/2)}{(\alpha_{ob}/2)} \qquad (3.19)$$

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

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

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

$$\beta_{ob} = \frac{t_1}{t_2} \qquad (3.21)$$

β_{ob} - 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 donnée comme suit :

$$R_{2ram} = R_b + R_{anram-b} \quad [\Omega]. \quad (3.22)$$

f) Résistance d'une phase rotorique ramenée au stator

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

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

II.1.3.2.2. Réactance de dispersion et perméance du rotor

Dans cette partie, on à calculer :

- La réactance de fuite d'encoche, due au flux de fuite qui se referme 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 et très élevée dans un entrefer faible.

Dans le type d'encoche représenté dans la figure 5.b on distingue aussi :

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

- La réactance de dispersion globale 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 :

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

λ_{2enc} , λ_{2d} , λ_{2f} , λ_{ob} – Sont respectivement les pérmeances : d'encoches, 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 :

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

Ψ – Représenté dans la figure 6.8

Pour le régime nominal on a Ψ =1.

- **Perméance différentielle**

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

K_{dd2} – Coefficient de fuite différentielle donné en fonction de q_2 voir figure 7.1

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

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

- **Perméance frontale**

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

- **Perméance d'inclinaison d'encoches rotorique**

$$K_{ob} = \frac{t_2.\ \beta_{ob}}{9{,}5.\delta.K_\delta.\ K_\mu} \qquad (3.31)$$

Avec :

K_μ – Coefficient de saturation de la machine.

II.1.3.2.3. Réactance du rotor ramenée au stator

Pour le type d'encoche présenté ans la figure 4.b on a :

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

II.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 alors faible ; seule la partie supérieure des barres est le siège des courants induits d'où une forte résistance de la cage au démarrage.

a) Profondeur de pénétration

Elle est donnée par :

$$h_{pp} = \frac{h_b}{1+\varphi_1} \quad \text{[mm].} \qquad (3.33)$$

Où :

h_b - Hauteur de la barre.

φ – Coefficient qui dépend de la valeur de ξ , il est donné par la courbe de la figure 6.7

$$\xi = 0{,}064.h_b\sqrt{g} \quad \text{Pour T= 115°} \qquad (3.34)$$

b) Largeur à la limite de pénétration

Elle est donnée par :

$$b_{pp} = d_{21} - [((d_{21} - d_{22})/h_2)(h_{pp} - d_{12})/2)] \quad \text{[mm].} \qquad (3.35)$$

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

Elle est donnée par :

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

d) Résistance de la barre au démarrage

Pour le type d'encoche donnée en figure 5.b (voir l'annexe) on a :

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

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

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

e) Résistance de la cage au démarrage

Elle est donnée comme suit :

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

f) Résistance de la cage au démarrage ramenée au stator

Elle est donnée par :

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

g) Réactance de fuite au démarrage

Pour le type d'encoche donnée en figure 5.b on a :

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

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

$$\lambda_{2dem} = \lambda_{2encdem} + \lambda_{2d} + \lambda_{2f} + \lambda_{ob}. \qquad (3.42)$$

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

Seule la perméance d'encoche qu'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 :

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

II.1.4. Calcul des pertes et du rendement

Cette partie est consacré à l'évaluation des pertes dans le moteur asynchrone afin d'estimer le rendement pour l'avoir aussi proche que possible de celui qui figure dans le cahier des charges.

On peut distinguer quatre groupes de pertes :

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

II.1.4.1. Pertes principales dans le fer

Les pertes principales sont les pertes par hystérésis, dues au déphasage entre le courant magnétique 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 pertes magnétiques dans le rotor sont négligeables à cause de la faible fréquence du flux.

a) Pertes dans les dents

$$P_{fz1}= 1,7.P_{1/50}.B^2_{z1max}.G_{z1} \quad [W]. \quad (4.1)$$

$P_{1/50}=2,5$ $[W.Kg^{-1}]$ pour l'acier

$$G_{z1}=7,8.10^{-6}.L_i.K_{fer}.[\ h_{z1}.\pi.(D_1+h_{z1}) - S_{enc1}.Z_1]. \quad [Kg]. \quad (4.2)$$

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 :

$$P_{c1}= 1,7.\ P_{1/50}.G_{c1}.B^2_{c1} \quad [W]. \quad (4.3)$$

$$G_{c1}= 7,8.10^{-6}.\ L_i.K_{fer}.h_{c1}.\pi.(D_{ext} - h_{c1}) \quad [Kg]. \quad (4.4)$$

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 :

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

II.1.4.2. Pertes électriques dans le cuivre et dans l'aluminium

Ce sont les pertes par effet Joule dans les enroulements statorique et rotorique.

Elles sont proportionnelles au carré des courants qui circulent dans ces enroulements.

a) Pertes Joule statorique

Les pertes Joule statoriques sont les pertes électriques dans le cuivre. Elles sont données par la formule suivante :

$$P_{j1} = m_1.R_1.I^2_{n1} \quad [W]. \quad (4.6)$$

Avec :

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

I_{n1} – Courant dans une phase statorique.

b) Pertes Joule rotoriques

Ce sont les pertes dans l'aluminium. Elles sont données par la formule suivante :

$$P_{j2} = m_2.R_2.I^2_2 \quad [W]. \quad (4.7)$$

Avec :

m_2 – Nombre de phases rotoriques ($m_2 = Z_2$)

I_2 - Courant dans la barre.

R_2 – Résistance d'une phase rotorique.

II.1.4.3. Pertes mécanique

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

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

Avec :

K_t – Facteur de majoration.

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

II.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 :

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

II.1.4.5. Pertes totales

Elles sont données par la relation suivante :

$$P_{tot} = P_{fer} + P_{j1} + P_{j2} + P_{mec} + P_{sup} \quad [W]. \qquad (4.10)$$

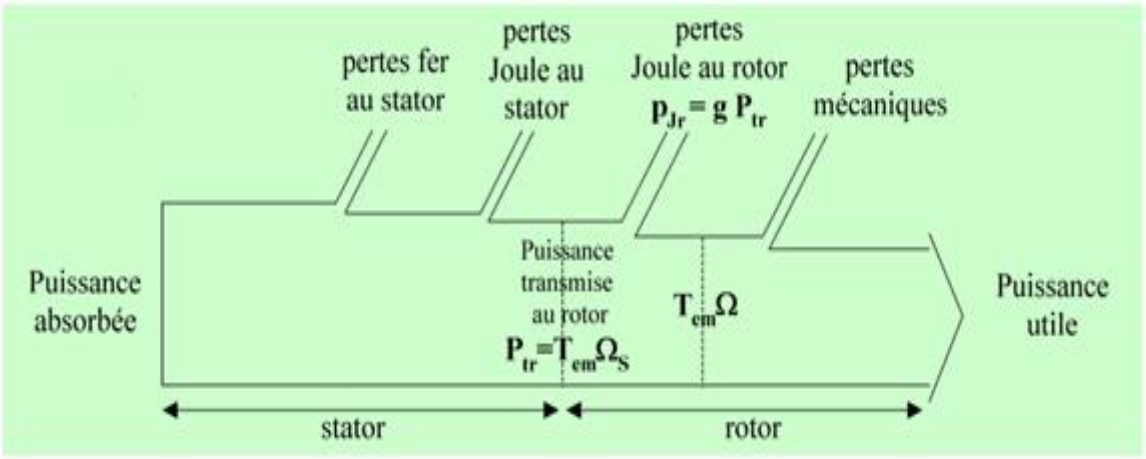


Fig. II.2 : Bilan des puissances et des pertes d'un moteur asynchrone 3~.

II.1.4.6. Rendement de la machine

Le rendement est donné par la relation suivante :

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

II.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 :

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

D'où :

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

Avec:

I_μ – Courant magnétisant.

X_m – Réactance magnétisante.

II.1.5. Calcul des performances du moteur

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

Il existe plusieurs schémas équivalents de 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 considéré 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.

Ceci pour déterminer les caractéristiques de fonctionnement du moteur.

II.1.5.1. Schéma équivalent en L du moteur

C'est un schéma conventionnel monophasé ramené au stator

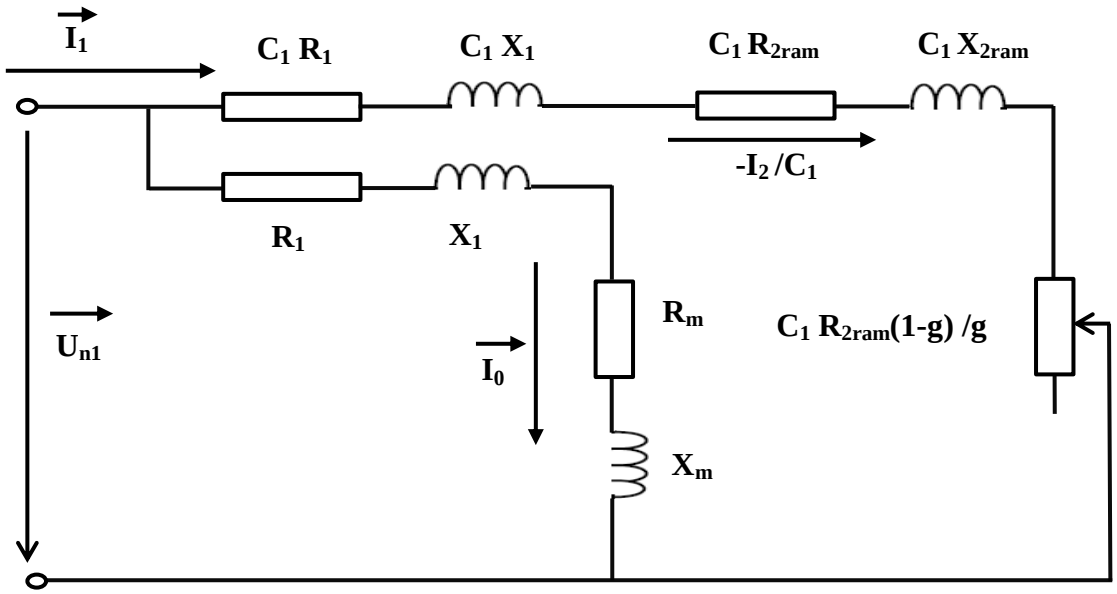


Fig.II.2 : Schéma équivalent en L du moteur.

Avec :

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

  Elle est donné par :

$$C_1 \approx 1 + \frac{X_1}{X_m} \qquad (5.1)$$

II.1.5.2. Caractéristique de fonctionnement du moteur

En se référant à la figure 3 (voir l'annexe), on détermine :

a) Glissement

$$g = \frac{A - \sqrt{A^2 + C_1^2 . R_{2ram} . B}}{B} \qquad (5.2)$$

Avec :

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

$$A = \frac{m_1 . U_{n1}^2}{2p_2'} - R_1 \quad (5.4)$$

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

b) Puissance rapportée du circuit primaire au circuit secondaire

La puissance rapportée du circuit secondaire au circuit primaire est :

$$P_2' = p_2 + p_{sup} + p_{mec} \quad [W]. \quad (5.6)$$

c) Inductance équivalente

Elle est exprimée par :

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

Avec :

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

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

d) Calcul du courant secondaire

Le courant dans le circuit secondaire est donné par :

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

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

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 donnée par :

$$\text{Cos } \emptyset_2 = \frac{R_{2eq}}{Z_{2eq}} \quad (5.12)$$

D'où :

- **Courant actif**

$$I''_{2a}=I''_2.Cos(\emptyset_2) \quad \text{[A].} \quad (5.13)$$

- **Courant réactif**

$$I''_{2r} = I''_2.Sin(\emptyset_2) \quad \text{[A].} \quad (5.14)$$

- **Courant actif qui correspond aux pertes fer et aux pertes Joules statoriques à vide**

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

- **Courant magnétisant**

$$I_{or} = \frac{P.\sum F_i}{0{,}9.m_1.W_1.K_{en1}} \quad \text{[A].} \quad (5.16)$$

- **Courant total à vide**

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

- **Courant absorbé**

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

Avec :

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

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

Le facteur de puissance de la machine donné par :

$$\text{Cos } \emptyset_1 = \frac{I_{1a}}{I_1} \quad (5.21)$$

f) Puissance absorbée par le moteur

Elle est exprimée par la relation suivante :

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

g) Vitesse de rotation du moteur

Elle est donnée par la relation :

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

Avec :

N – Vitesse de synchronisme.

g – Glissement.

$N_2/N = 1-g$ – C'est la vitesse relative du rotor par rapport au stator.

h) Couple utile sur l'arbre du moteur

Il est donné par :

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

Remarque :

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

On calcule 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 $\emptyset_n$, Cu)

II.1.5.3. Caractéristiques de démarrage et capacité de surcharge

a) Résistance équivalente au démarrage

Elle est exprimée comme suit :

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

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

b) Réactance équivalente au démarrage

Elle est donnée par la relation suivante :

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

Avec:

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

* les encoches semi ouvertes $K_x = 0{,}0825$

X_{const} – Réactance de despersion 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 $X_{v\,ar}$ sont respectivement données par les relations suivantes :

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

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

Avec :

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

$$\lambda_{2var} = \lambda_{enc2var} + \lambda_{2d} \quad (5.30)$$

0ù :

$\lambda_{enc2var}$ – Composante variable de la perméance d'encoche rotorique

Pour le type d'encoche représenté dans la figure 5.b (voir l'annexe), on a :

$$\lambda_{enc2var} = \frac{h_{f2}}{b_{f2}} \quad (5.31)$$

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 :

$$\lambda_{enc1d} = \left(\frac{3h_{k1}}{b_{enc}+2b_{f1}} + \frac{h_{f1}}{b_{f1}}\right).K_{\beta 2} \qquad (5.32)$$

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 :

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

Avec :

R_{cr} – Résistance critique.

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

g_{nom} – Glissement nominal.

g_{cr} – Glissement critique qui donné par :

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

Avec :

R_{2ram} – Résistance rotorique ramenée.

X_{2ram} – Résistance 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 :

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

U_{n1} - Tension d'alimentation.

e) Le couple de démarrage

Il est donné par l'expression suivante :

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

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

- Pour *h = 50 ÷ 132* [mm] on a :

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

- Pour *h =160÷ 355* [mm] on a :

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

Chapitre III

Résultats du calcul

DIMENSIONNEMENT DU STATOR

La puissance électromagnétique

K_e : Facteur de majoration — $K_e := 0.97$

P_n : puissance nominale — $P_n := 3$ (kW)

$\cos(\phi_n)$: Facteur de puissance — $\cos(\phi_n) := 0.8$

η_n : Rendement nominale — $\eta_n := 0.7$

$\text{acos}(0.83) = 0.592$

$\phi_n := 0.54$

$$P_e := K_e \cdot \frac{P_n}{\eta_n \cdot \cos(\phi_n)} \qquad P_e = 4.461 \text{ (kW)}$$

La longueur virtuelle de l'induit L_i

$m_1 := 3$

α_i : Coefficient de recouvrement polaire — $\alpha_i := 0.64$

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

N : Vitesse de synchronisme — $N := 150$ $\left(\frac{tr}{mn}\right)$

D_1 : Diamètre intérieur du stator — $D_1 := 108.5$ (mm)

A.1 : Charge linéaire — $A_1 := 2200$ $\left(\frac{A}{m}\right)$

B_δ : Induction dans l'entrefer — $B_\delta := 0.7$ (T)

K_{enc1} : Facteur de bobinage de l'enroulement statorique

$q_1 := 3$

$$K_{d1} := \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2m_1}\right)}{q_1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2m_1 \cdot q_1}\right)} = 0.96$$

$y_1 := 9$ $\qquad \tau_p := 9$

$$\beta := \frac{y_1}{\tau_p} \qquad \beta = 1$$

$$K_{r1} := \sin\left(\frac{\beta \cdot \pi}{2}\right) = 1 \qquad K_{r1} = 1$$

$$K_{enc1} := K_{d1} \cdot K_{r1} \qquad K_{enc1} = 0.96$$

$$L_i := \frac{6.1 \cdot P_e \cdot 10^{12}}{\alpha_i \cdot K_f \cdot N \cdot D_1^{\,2} \cdot A_1 \cdot B_\delta \cdot K_{enc1}} \qquad L_i = 140.725 \text{ (mm)}$$

Le coefficient de la longueur

$$\lambda := \frac{L_i}{D_1} \qquad \lambda = 1.297$$

Le pas polaire en nombre d'encoches

P : Le nombre de paire de pôle $P := 2$

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

$$\tau_p := \frac{Z_1}{2.P} \qquad \tau_p = 9$$

Le pas polaire

$$\tau_{p1} := \frac{\pi\, D_1}{2.P} \qquad \tau_{p1} = 85.216 \quad (mm)$$

Le pas dentaire

$Z_1 = 36$ $\qquad t_1 := \frac{\pi \cdot D_1}{Z_1}$ $\qquad t_1 = 9.468$ (mm)

Le courant nominal dans une phase

m_1 : Nombre de phases statoriques $m_1 = 3$

U_{n1} : Tension simple $U_{n1} := 380$ (V)

$$I_{n1} := \frac{P_n (10)^3}{m_1 \cdot U_{n1} \cdot \cos(\phi_n) \cdot \eta_n} \qquad I_{n1} = 4.013 \quad (A)$$

Nombres de conducteurs effectifs dans une encoche

a_1 : Nombre de voies parallèles $a_1 := 1$

$$U_{enc1} := \frac{a_1 \cdot t_1 \cdot A_1 \cdot 10^{-3}}{I_{n1}} \qquad U_{enc1} = 51.903 \quad (V)$$

Nombre de spires d'une voie parallèle

$$W_1 := \frac{P \cdot q_1 \cdot U_{enc1}}{a_1} = 297.26 \qquad W_1 = 311.415$$

La fréquence

$$f_1 := \frac{N \cdot P}{60} \qquad f_1 = 50 \quad (Hz)$$

Angle électrique

$$Y := \frac{P \cdot 360}{Z_1} \qquad Y = 20 \ ^\circ C$$

La zone de phase

$$\chi := q_1 \cdot Y \qquad \chi = 60$$

Nombre d'encoche par pôle et par phase

$$q_1 := \frac{Z_1}{2 \cdot P \cdot m_1} \qquad q_1 = 3$$

Le pas d'enroulement

$$\xi := 0$$

$$Y_1 := \frac{Z_1}{2 \cdot P} - \xi \qquad Y_1 = 9$$

La section effective

$$J_1 := 7.1$$

$$S_{eff1} := \frac{I_{n1}}{a_1 \cdot J_1} \qquad S_{eff1} = 0.565 \quad (mm^2)$$

La section élémentaire

$$N_{el} := 2$$

$$S_{nor1} := (0.6362)$$

$$d_{iso} := 0.973$$

$$d_{nu} := 0.9$$

$$S_{elt1} := \frac{S_{eff1}}{N_{el}} \qquad S_{elt1} = 0.283 \quad (mm^2)$$

La largeur de la dent

$$B_{z1max} := 1.9 \qquad K_{fer} := 0.97$$

$$b_{z1} := \frac{t_1 \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot B_{z1max}} \qquad b_{z1} = 3.75 \quad (mm)$$

La hauteur du dos statorique

$$B_{c1} := 1.65$$

$$h_{c1} := \frac{0.5\alpha_i \cdot \tau_{p1} \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot B_{c1}} \qquad h_{c1} = 12.438 \quad (mm)$$

La hauteur de la dent h_{z1}

$D_{ext} := 170$

$$h_{z1} := 0.5\left(D_{ext} - D_1\right) - h_{c1} \qquad h_{z1} = 18.312 \quad (mm)$$

La largeur minimale de l'encoche

$$b_{enc11} := -b_{z1} + \frac{\pi\left(D_1 + 0.2h_{z1}\right)}{Z_1} \qquad b_{enc11} = 6.038 \quad (mm)$$

La largeur maximale de l'encoche

$$b_{enc12} := -b_{z1} + \frac{\pi\left(D_1 + 2 \cdot h_{z1}\right)}{Z_1} \qquad b_{enc12} = 8.914 \quad (mm)$$

La hauteur de la clavette

$h_{k1} := 0.6$

La hauteur de l'encoche

$h_{f1} := 1.2 \div 1.8$ $\quad h_{f1} := 1.2$

$$h_{enc1} := h_{z1} - \left(h_{k1} + h_{f1} + \frac{b_{enc12}}{2}\right) \qquad h_{enc1} = 12.055 \quad (mm)$$

La section de l'encoche statorique

$$S_{enc1} := 0.5\left(b_{enc11} + b_{enc12}\right) \cdot h_{enc1} + \pi \cdot \frac{b_{enc12}^2}{8} \qquad S_{enc1} = 121.329 \quad \left(mm^2\right)$$

La section occupée par les conducteurs

$e_1 := 0.37 \div 0.4$ $\quad e_1 := 0.37$

$$S_{iso} := \left(b_{enc11} + 2 \cdot h_{enc1} + \pi \cdot \frac{b_{enc12}}{2}\right) \cdot e_1 \qquad S_{iso} = 16.336 \quad \left(mm^2\right)$$

Coefficient de remplissage de l'encoche $N_{e1} := 2$

$$K_{re1} := \frac{N_{e1} \cdot U_{enc1} \cdot d_{iso}^2}{S_{enc1}} \qquad K_{re1} = 0.81$$

Flux sous un pôle

$$\phi := \frac{K_e \cdot U_{n1}}{4 \cdot K_f \cdot W_1 \cdot f_1 \cdot K_{enc1}} \qquad \phi = 5.584 \times 10^{-3} \quad \text{(web)}$$

Dimensionnement du rotor

Nombre d'encoches rotorique

$Z_2 := 28$

Diamètre extérieur du rotor

$\delta := 0.4$

$D_2 := D_1 - 2 \cdot \delta$ $\qquad D_2 = 107.7$ (mm)

Pas dentaire

$$t_2 := \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} \qquad t_2 = 12.084 \quad \text{(mm)}$$

Le courant de la barre

$$I_2 := 1.11 \cdot I_{n1} \cdot \frac{6 \cdot W_1 \cdot \cos(\phi_n) \cdot K_{enc1}}{Z_2} \qquad I_2 = 236.823 \quad \text{(A)}$$

La hauteur de la culasse rotorique

$B_{c2} := 1.2$ (T)

$$\tau_{p2} := \frac{\pi \cdot D_2}{2 \cdot P} \qquad \tau_{p2} = 84.587 \quad \text{(mm)}$$

$$h_{c2} := 0.5 \frac{\alpha_i \cdot \tau_{p2} \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot B_{c2}} \qquad h_{c2} = 16.976 \quad \text{(mm)}$$

La hauteur de la dent

$D_{int2} := 37$ (mm) $\qquad D_2 = 107.7$

$h_{z2} := 0.5 \cdot (D_2 - D_{int2}) - h_{c2}$ $\qquad h_{z2} = 18.374$ (mm)

Calcul de l'encoche rotorique

La largeur de l'encoche

$B_{z2max} := 1.95$ (T)

$$b_{z2} := \frac{t_2 \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot B_{z2max}} \qquad b_{z2} = 4.664 \quad \text{(mm)}$$

Diamètre maximal de l'encoche

$h_{f2} := 0.7$

$$d_{21} := \frac{\pi \cdot \left(D_2 - 2 \cdot h_{f2}\right) - Z_2 \cdot b_{z2}}{Z_2 - \pi} \qquad d_{21} = 8.181 \quad (mm)$$

Diamètre minimale de l'encoche

$$d_{22} := \frac{\pi \cdot \left(D_2 - 2 \cdot h_{z2}\right) - Z_2 \cdot b_{z2}}{Z_2 + \pi} \qquad d_{22} = 2.964 \quad (mm)$$

Hauteur de l'encoche

$h_2 := h_{z2} - h_{f2} - 0.5 \cdot \left(d_{21} + d_{22}\right)$ $\qquad h_2 = 12.102$ (mm)

$h_{enc2} := h_2 + 0.5 \cdot \left(d_{21} + d_{22}\right)$ $\qquad h_{enc2} = 17.674$ (mm)

La cage rotorique

Section de la barre

$$S_b := 0.13\left(d_{21}^{\,2} + d_{22}^{\,2}\right) \cdot \pi + 0.5\left(d_{21} + d_{22}\right) \cdot h_2 \qquad S_b = 98.364 \quad \left(mm^2\right)$$

Densité du courant

$$J_b := \frac{I_2}{S_b} \qquad J_b = 2.408 \quad \left(\frac{A}{mm^2}\right)$$

Dimensionnement de l'anneau de court-circuit

La hauteur de l'anneau

$h_{an} := (1.1 \div 1.25) \cdot h_{z2}$

$h_{an} := 1.1 h_{z2}$ $\qquad h_{an} = 20.212$ (mm)

La section de l'anneau

$$S_{an} := (0.35 \div 0.45) \cdot \frac{Z_2 \cdot S_b}{2 \cdot P}$$

$$S_{an} := 0.35 \frac{Z_2 \cdot S_b}{2 \cdot P} \qquad S_{an} = 240.991 \quad \left(mm^2\right)$$

La largeur de l'anneau

$$b_{an} := \frac{S_{an}}{h_{an}} \qquad b_{an} = 11.923 \quad (mm)$$

Diamètre moyen intérieur de l'anneau

$D_{an} := D_2 - h_{an}$ $D_{an} = 87.488$ (mm)

CALCUL DU CIRCUIT MAGNETIQUE

A-Calcul du circuit magnétique statorique

Induction dans la dent du stator

$Bz1 := \frac{B_\delta \cdot t_1}{K_{fer} \cdot b_{z1}}$ $B_{z1} := 1.9$ (T) $H_{z1} := 207($ $\left(\frac{A}{m}\right)$

Fmm dans la dent du stator

$F_{z1} := H_{z1} \cdot h_{z1} \cdot 10^{-3}$ $F_{z1} = 37.907$ (A)

La longueur moyenne des lignes dans la culasse statorique

$L_{c1} := \left(D_{ext} - h_{c1}\right) \cdot \frac{\pi}{2 \cdot P}$ $L_{c1} = 123.749$ (mm)

Fmm de la culasse

$B_{c1} := 1.65$ $H_{c1} := 946$ $\left(\frac{A}{m}\right)$

$F_{c1} := H_{c1} \cdot L_{c1} \cdot 10^{-3}$ $F_{c1} = 117.067$ (A)

B -L'entrefer

Fmm dans l'entrefer

$b_{f1} := 2.8$ (mm)

$K_{\delta 1} := 1 + \frac{b_{f1}}{t_1 - b_{f1} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_1}{b_{f1}}}$ $K_{\delta 1} = 1.208$

$b_{f2} := 2 \cdot d_{iso}$ $b_{f2} = 1.946$ (mm)

$K_{\delta 2} := 1 + \frac{b_{f2}}{t_2 - b_{f2} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_2}{b_{f2}}}$ $K_{\delta 2} = 1.086$

$K_\delta := K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2}$ $K_\delta = 1.313$

$F_\delta := 0.8 B_\delta \cdot K_\delta \cdot \delta \cdot \left(10^3\right)$ $F_\delta = 306.651$ (A)

C- Circuit magnétique rotorique

Induction dans la dent

$$B_{z2} := \frac{B_\delta \cdot t_2}{K_{fer} \cdot b_{z2}} \qquad B_{z2} = 1.95 \quad (T)$$

$$H_{z2} := 252 \quad \left(\frac{A}{m}\right)$$

$$F_{z2} := H_{z2} \cdot \left(h_{z2} - 0.4 d_{22}\right) \cdot 10^{-3} \qquad F_{z2} = 43.315 \quad (A)$$

La longueur moyenne des lignes dans la culasse rotorique

$$L_{c2} := \left(D_2 - 2 \cdot h_{z2} - h_{c2}\right) \cdot \left(\frac{\pi}{2 \cdot P}\right) + h_{c2} \qquad L_{c2} = 59.368 \quad (mm)$$

Fmm dans la culasse rotorique

$B_{c2} := 1.2$ $\qquad H_{c2} := 262$

$$F_{c2} := H_{c2} \cdot L_{c2} \cdot 10^{-3} \qquad F_{c2} = 15.554 \quad (A)$$

Fmm totale par paire de pôle

$$F := 2 \cdot \left(F_\delta + F_{z1} + F_{z2}\right) + F_{c1} + F_{c2} \qquad F = 908.367 \quad (A)$$

Coefficient de saturation des dents

$$K_{\mu Z} := \frac{F_\delta + F_{z1} + F_{z2}}{F_\delta} \qquad K_{\mu Z} = 1.265$$

Coefficient de saturation de la machine

$$K_\mu := \frac{F}{2 \cdot F_\delta} \qquad K_\mu = 1.481$$

Le courant magnétisant

$$I_\mu := \frac{P \cdot F}{0.9 m_1 \cdot W_1 \cdot K_{enc1}} \qquad I_\mu = 2.251 \quad (A)$$

La réactance de magnétisation

$$X_m := \frac{K_e \cdot U_{n1}}{I_\mu} \qquad X_m = 164.581 \quad (ohm)$$

Coefficient de dispersion magnétique du stator

$$\lambda_1 := 3.35$$

$$X_1 := \frac{1.58 f_1 \cdot L_i \cdot W_1^{\,2} \cdot \lambda_1}{P \cdot q_1 \cdot 10^8} \qquad X_1 = 6.02 \quad (ohm)$$

$$\sigma_\mu := \frac{X_1}{X_m} \qquad \sigma_\mu = 0.037$$

Force électromagnétique à vide

$$E_0 := \frac{U_{n1}}{1 + \sigma_\mu} \qquad E_0 = 366.592 \quad (V)$$

PARAMETRES DU STATOR

Résistance active d'une phase du stator

$T := 20$ $\qquad \rho_{cu} := 0.017210^{-6}$ (ohm·m) $\qquad y_{1moy} := 9$

$$b_{1moy} := \frac{\pi \cdot (D_1 + h_{z1}) \cdot y_{1moy}}{Z_1} \qquad b_{1moy} = 99.598 \quad (mm)$$

$$L_{f1} := (1.16 + 0.14P) \cdot b_{1moy} + 15 \qquad L_{f1} = 158.421 \quad (mm)$$

$$L_{w1} := 2(L_i + L_{f1}) \qquad L_{w1} = 598.294 \quad (mm)$$

$$R_1 := \rho_{cu} \cdot \frac{W_1 \cdot L_{w1} \cdot 10^3}{a_1 \cdot N_{el} \cdot S_{elt1}} \qquad R_1 = 5.669 \quad (ohm)$$

$T := 115$ $\qquad \rho_{cu} := 24.410^{-9}$ (ohm·m)

$$R_1 := \rho_{cu} \cdot \frac{W_1 \cdot L_{w1} \cdot 10^3}{a_1 \cdot N_{el} \cdot S_{elt1}} \qquad R_1 = 8.043 \quad (ohm)$$

La réactance de fuite frontale

$K_{B1} := 1$ $\qquad K_{B2} := 1$ $\qquad Q_1 := \frac{Z_2}{P}$ $\qquad Q_1 = 14$

$K_{dd1} := 0.93$ $\qquad K_{rr} := 0.0141$

$$\lambda_{1f} := 0.34 \frac{q_1 \cdot (L_{f1} - 0.64\beta \cdot \tau_{p1})}{L_i} \qquad \lambda_{1f} = 0.753$$

$$X_{f1} := 1.58 f_1 \cdot L_i \cdot W_1^2 \cdot \frac{\lambda_{1f}}{P \cdot q_1 \cdot 10^8} \qquad X_{f1} = 1.353 \quad (ohm)$$

Réactance de fuite différentielle

$$K_{r1} := 1 - \left(\frac{0.033 b_{f1}^{2}}{\delta \cdot t_1} \right) \qquad K_{r1} = 0.932$$

$$K_{rr1} := 0.014$$

$$\lambda_{1d} := \frac{0.9 t_1 \cdot (q_1 \cdot K_{enc1})^2 \cdot K_{rr1} \cdot K_{dd1}^{2} \cdot K_{r1}}{K_\delta \cdot \delta} \qquad \lambda_{1d} = 1.529$$

$$X_{d1} := 1.58 f_1 \cdot L_i \cdot W_1^{2} \cdot \frac{\lambda_{1d}}{P \cdot q_1 \cdot 10^{8}} \qquad X_{d1} = 2.747 \quad \text{(ohm)}$$

Réactance de fuite d'encoche

$$h_1 := h_{enc1} \qquad h_{11} := 1 \qquad h_1 = 12.055$$

$$\lambda_{enc1} := \frac{h_1 \cdot K_{B1}}{3 \cdot b_{enc11}} + \left(\frac{h_{11}}{b_{enc11}} + \frac{3 \cdot h_{k1}}{b_{enc11} + 2 \cdot b_{f1}} + \frac{h_{f1}}{b_{f1}} \right) \cdot K_{B2}$$

$$\lambda_{enc1} = 1.414$$

$$X_{enc1} := 1.58 f_1 \cdot L_i \cdot W_1^{2} \cdot \frac{\lambda_{enc1}}{P \cdot q_1 \cdot 10^{8}} \qquad X_{enc1} = 2.542 \quad \text{(ohm)}$$

Réactance total

$$\lambda_1 := (\lambda_{enc1} + \lambda_{1f} + \lambda_{1d}) \qquad \lambda_1 = 3.696$$

$$X_1 := 1.58 f_1 \cdot L_i \cdot W_1^{2} \cdot \frac{\lambda_1}{P \cdot q_1 \cdot 10^{8}} \qquad X_1 = 6.642 \quad \text{(ohm)}$$

PARAMETRES DU ROTOR

Résistance active de la barre

$$T := 20 \qquad \rho_{AL} := 2.8 10^{-8} \qquad K_{dep} := 0.91 \qquad L_2 := L_i$$

$$R_b := \rho_{AL} \cdot \frac{K_{dep} \cdot L_2 \cdot 10^{3}}{S_b} \qquad R_b = 3.665 \times 10^{-5} \quad \text{(ohm)}$$

Résistance de l'anneau

$$R_{an} := \frac{\rho_{AL} \cdot 2 \cdot \lambda \cdot D_{an} \cdot 10^3}{Z_2 \cdot S_{an}} \qquad R_{an} = 9.417 \times 10^{-7} \quad (\text{ohm})$$

Résistance de l'anneau ramenée à la barre

$$K_{red} := 2 \cdot \pi \cdot \frac{P}{Z_2} \qquad K_{red} = 0.449$$

$$R_{anramb} := \frac{R_{an}}{K_{red}^2} \qquad R_{anramb} = 4.675 \times 10^{-6} \quad (\text{ohm})$$

Résistance de l'anneau ramenée au stator

$$\beta_{ob} := \frac{t_1}{t_2} \qquad \beta_{ob} = 0.784$$

$$\alpha_{ob} := \frac{2 \cdot \pi \cdot P \cdot \beta_{ob}}{Z_2} \qquad \alpha_{ob} = 0.352$$

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

$$M := \left(\frac{4 \cdot m_1}{Z_2}\right) \cdot \left(\frac{W_1 \cdot K_{enc1}}{K_{ob}}\right)^2 \qquad M = 3.868 \times 10^4$$

$$R_{anrams} := M \cdot R_{anramb} \qquad R_{anrams} = 0.181 \quad (\text{ohm})$$

Résistance active d'une phase rotorique

$$R_2 := R_b + R_{anramb} \qquad R_2 = 4.133 \times 10^{-5} \quad (\text{ohm})$$

Résistance d'une phase rotorique ramenée au stator

$$R_{2ram} := M \cdot R_2 \qquad R_{2ram} = 1.599 \quad (\text{ohm})$$

Réactances de dispersion et perméance du rotor

$$\lambda_{ob} := \frac{t_2 \cdot \beta_{ob}}{9.5 \delta \cdot K_\delta \cdot K_\mu} \qquad \lambda_{ob} = 1.282$$

$$I_{an} := \frac{I_2}{K_{red}} \qquad I_{an} = 527.682 \quad (A)$$

$$J_{an} := \frac{I_{an}}{S_{an}} \qquad J_{an} = 2.19 \quad \left(\frac{A}{mm^2}\right)$$

$$K_{dd2} := \frac{9.15}{100\left(\frac{Z_2}{6 \cdot P}\right)^2} \qquad K_{dd2} = 0.017$$

$$\lambda_{2f} := \frac{2.3 D_{an}}{Z_2 \cdot L_i \cdot K_{red}^{\ 2}} \cdot \log\left[\frac{4.7 D_{an}}{2 \cdot (h_{an} + b_{an})}\right] \qquad \lambda_{2f} = 0.204$$

$$\psi := 1$$

$$C_\lambda := \psi \cdot \left[0.66 - \left(\frac{b_{f2}}{2 \cdot d_{21}}\right) + \left(\frac{1 - \pi \cdot d_{21}}{8 \cdot S_b}\right)^2 \cdot \left(\frac{h_2 + 0.4 d_{22}}{3 \cdot d_{21}}\right)\right]$$

$$C_\lambda = 0.542$$

$$\lambda_{2enc} := C_\lambda + \frac{h_{f2}}{b_{f2}} \qquad \lambda_{2enc} = 0.901$$

$$\lambda_{2d} := \frac{0.9 t_2 \cdot \left(\frac{Z_2}{6 \cdot P}\right)^2 \cdot K_{dd2}}{\delta \cdot K_\delta} \qquad \lambda_{2d} = 1.895$$

$$\lambda_2 := \lambda_{2enc} + \lambda_{2d} + \lambda_{2f} + \lambda_{ob} \qquad \lambda_2 = 4.282$$

$$X_2 := 7.9 f_1 \cdot L_2 \cdot \lambda_2 \cdot 10^{-9} \qquad X_2 = 2.38 \times 10^{-4} \quad (ohm)$$

Réactance du rotor ramenée au stator

$$X_{2ram} := M \cdot X_2 \qquad X_{2ram} = 9.209 \quad (ohm)$$

Paramètre au démarrage

$\varphi_1 := 0.5$ $\quad g_d := 1$ $\quad h_b := h_{enc2}$

$h_{pp} := \frac{h_b}{1 + \varphi_1}$ $h_{pp} = 11.783$

$\xi_1 := 0.064 h_b \cdot \sqrt{g_d}$ $\xi_1 = 1.131$

La largeur à la limite de pénétration

$b_{pp} := d_{21} - \left(\frac{d_{21} - d_{22}}{1 h_2}\right) \cdot \left(h_{pp} - \frac{d_{21}}{2}\right) = 3.453$ $b_{pp} = 4.865$

Section de la barre pénétrée par le courant de démarrage

$S_{bdem} := \left(\frac{\pi \cdot d_{21}^2}{8}\right) + \left[0.5\left(d_{21} + b_{pp}\right) \cdot h_{pp} - 0.5 d_{21}\right]$ $S_{bdem} = 99.055$ $\left(mm^2\right)$

Résistance de la barre au démarrage

$K_{dep} := \frac{S_b}{S_{bdem}}$ $K_{dep} = 0.993$

$R_{bdem} := R_b \cdot K_{dep}$ $R_{bdem} = 3.64 \times 10^{-5}$ (ohm)

Résistance de la cage au démarrage

$R_{2dem} := R_{anramb} + R_{bdem}$ $R_{2dem} = 4.107 \times 10^{-5}$ (ohm)

Résistance de la cage au démarrage ramenée au stator

$R_{2demram} := M \cdot \left(R_{anramb} + R_{bdem}\right)$ $R_{2demram} = 1.589$ (ohm)

Réactance de fuite au démarrage

$\psi_1 := 1$

$C_{\lambda 1} := C_\lambda \cdot \psi_1$ $C_{\lambda 1} = 0.542$

$\lambda_{2encdem} := C_{\lambda 1} + \frac{h_{f2}}{b_{f2}}$ $\lambda_{2encdem} = 0.901$

$\lambda_{2dem} := \lambda_{2encdem} + \lambda_{2d} + \lambda_{2f} + \lambda_{ob}$ $\lambda_{2dem} = 4.282$

$X_{2dem} := 7.9 f_1 \cdot L_2 \cdot \lambda_{2dem} \cdot 10^{-9}$ $X_{2dem} = 2.38 \times 10^{-4}$ (ohm)

Réactance de fuite au démarrage ramenée au stator

$X_{2demram} := M \cdot X_{2dem}$ $X_{2demram} = 9.209$ (ohm)

CALCUL DES PERTES ET DU RENDEMENT

Pertes principales dans le fer

Pertes dans les dents

$P_1 := 2.5$

$G_{z1} := 7.810^{-6} \cdot L_i \cdot K_{fer} \cdot \left[h_{z1} \cdot \pi \cdot \left(D_1 + h_{z1}\right) - S_{enc1} \cdot Z_1\right]$ $G_{z1} = 3.117$ (Kg)

$P_{fz1} := 1.7 \cdot P_1 \cdot G_{z1} \cdot B_{z1}^{2}$ $P_{fz1} = 47.825$ (W)

Pertes dans la culasse statorique

$G_{c1} := 7.810^{-6} \cdot L_i \cdot K_{fer} \cdot h_{c1} \cdot \pi \cdot \left(D_{ext} - h_{c1}\right)$ $G_{c1} = 6.555$ (Kg)

$P_{fc1} := 1.7 \cdot P_1 \cdot G_{c1} \cdot B_{c1}^{2}$ $P_{fc1} = 75.846$ (W)

$P_{fer} := P_{fc1} + P_{fz1}$ $P_{fer} = 123.672$ (W)

Pertes électriques dans le cuivre et l'aluminium

Peres joules statorique

$P_{j1} := m_1 \cdot R_1 \cdot I_{n1}^{2}$ $P_{j1} = 388.629$ (W)

Pertes joules rotorique

$m_2 := 28$

$P_{j2} := m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^{2}$ $P_{j2} = 64.902$ (W)

Perte mécanique

Pour 2p=2 $K_t := 1.3\left(1 - D_{ext} \cdot 10^{-3}\right)$

Pour 2p>2 $K_t := 1$

$P_{mec} := K_t \cdot \left(N \cdot 10^{-3}\right)^2 \cdot \left(D_{ext} \cdot 10^{-2}\right)^4$ $P_{mec} = 18.792$ (W)

Pertes supplémentaires

$P_{sup} := 0.005 \frac{P_n \cdot 10^3}{\eta_n}$ $P_{sup} = 18.987$ (W)

Pertes totales

$P_t := P_{fer} + P_{j1} + P_{j2} + P_{mec} + P_{sup}$ $P_t = 614.983$ (W)

Rendement de la machine

$$\eta := \frac{P_n \cdot 10^3}{P_n \cdot 10^3 + P_t}$$ $\eta = 0.83$

Calcule de la résistance de magnétisation

$U_n := 380$ (V)

$P_{a10} := R_1 \cdot m_1 \cdot I_\mu^{\,2}$ $P_{a10} = 122.273$ (V)

$$I_{0a} := \frac{P_{fer} + P_{mec} + P_{a10}}{m_1 \cdot U_n}$$ $I_{0a} = 0.232$ (A)

$$R_m := \frac{X_m \cdot I_\mu}{I_{0a}}$$ $R_m = 1.595 \times 10^3$ (ohm)

CALCUL DES PERFORMANCES DU MOTEUR:

Caractéristiques de fonctionnement du moteur

La puissance rapportée du circuit secondaire au circuit primaire

$P_n := 3000$ (W)

$P'_2 := P_n + P_{sup} + P_{mec}$ $P'_2 = 3.038 \times 10^3$ (ohm)

Le glissement

$$A := \frac{\sqrt{3} \cdot U_n^{\,2}}{2 \cdot P'_2} - R_1$$ $A = 33.124$

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

$R' = 209.703$ (ohm)

$B := 2A + R$ $B = 275.95$

$C_1 := 1 + \frac{X_1}{X_m}$ $C_1 = 1.04$

$g := \frac{A - \sqrt{A^2 - C_1^2 \cdot R_{2ram} \cdot B}}{B}$ $g = 0.03$

L'inductance équivalente

$R_{2eq} := C_1 \cdot R_1 + \frac{C_1^2 \cdot R_{2ram}}{g}$ $R_{2eq} = 66.384$ (ohm)

$X_{2eq} := C_1 \cdot X_1 + C_1^2 \cdot X_{2ram}$ $X_{2eq} = 16.877$ (ohm)

$Z_{2eq} := \sqrt{R_{2eq}^2 + X_{2eq}^2}$ $Z_{2eq} = 68.496$ (ohm)

Calcul du courant secondaire

$I_2 := \frac{U_n}{Z_{2eq}}$ $I_2 = 5.548$ (A)

Le facteur de puissance rotorique

$\cos\phi'_2 := \frac{R_{2eq}}{Z_{2eq}}$ $\cos\phi'_2 = 0.969$

$I''_2 := \frac{U_n}{Z_{2eq}}$ $I''_2 = 5.548$ (A)

$I'_2 := C_1 \cdot I''_2$ $I'_2 = 5.772$ (A)

$I_{0a} := \frac{P_{a10} + P_{fer}}{m_1 \cdot U_n}$ $I_{0a} = 0.216$ (A)

Le courant magnétisant

$I_{0r} := \frac{P \cdot F}{0.9 m_1 \cdot W_1 \cdot K_{enc1}}$ $I_{0r} = 2.251$ (A)

Le courant total à vide

$I_0 := \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2}$ $I_0 = 2.261$ (A)

Le courant absorbé

$$\sin\phi'_2 := \frac{X_{2eq}}{Z_{2eq}} \qquad \sin\phi'_2 = 0.246$$

$$I''_{2r} := I''_2 \cdot \sin\phi'_2 \qquad I''_{2r} = 1.367 \quad (A)$$

$$I''_{2a} := I''_2 \cdot \cos\phi'_2 \qquad I''_{2a} = 5.377 \quad (A)$$

$$I_{1r} := I_{0r} + I''_{2r} \qquad I_{1r} = 3.618 \quad (A)$$

$$I_{1a} := I_{0a} + I''_2 \qquad I_{1a} = 5.764 \quad (A)$$

$$I_1 := \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1r}^2} \qquad I_1 = 6.805 \quad (A)$$

Le facteur de puissance de la machine

$$\cos\phi'_1 := \frac{I_{1a}}{I_1} \qquad \cos\phi'_1 = 0.847$$

Puissance absorbée par le moteur

$$P_{a1} := m_1 \cdot U_n \cdot I_{1a} \qquad P_{a1} = 6.57 \times 10^3 \quad (W)$$

Vitesse de rotation du moteur

$$N_2 := N \cdot (1 - g) \qquad N_2 = 1.455 \times 10^3 \quad \left(\frac{tr}{mn}\right)$$

Le couple utile sur l'arbre du moteur

$$C_\mu := 9.55 \frac{P_n}{N_2} \qquad C_\mu = 20.10 \quad (N \cdot m)$$

Le rendement

$$P_a := \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{1a} \qquad P_a = 3720 \quad (W)$$

$$\eta_1 := \frac{P_n}{P_a} \qquad \eta_1 = 0.806$$

Résistance équivalente au démarrage

$$R_{eqdem} := C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot R_{2demran} \qquad R_{eqdem} = 10.087 \quad (ohm)$$

Réactance équivalente au démarrage

$$K_X := 0.082$$

$$\lambda_{enc1var} := \left(\frac{h_{f1}}{b_{f1}} + \frac{3.h_{k1}}{b_{enc11} + 2.b_{f1}}\right)\cdot K_{B2} \qquad \lambda_{enc1var} = 0.583$$

$$\lambda_{1var} := \lambda_{enc1var} + \lambda_{1d} \qquad \lambda_{1var} = 2.112$$

$$\lambda_{enc2var} := \frac{h_{f2}}{b_{f2}} \qquad \lambda_{enc2var} = 0.36$$

$$\lambda_{2var} := \lambda_{enc2var} + \lambda_{2d} \qquad \lambda_{2var} = 2.255$$

$$X_{var} := C_1\cdot X_1\cdot\frac{\lambda_{1var}}{\lambda_1} + \frac{C_1^{\,2}\cdot X_{2ram}\cdot\lambda_{2var}}{\lambda_2} \qquad X_{var} = 9.196$$

$$X_{const} := C_1\cdot X_1\cdot\frac{\lambda_1 - \lambda_{1var}}{\lambda_1} + C_1^{\,2}\cdot X_{2demram}\cdot\frac{\lambda_{2d} - \lambda_{2var}}{\lambda_{2d}} \qquad X_{const} = 1.07 \quad (ohm)$$

$$X_{eqdem} := X_{const} + K_x\cdot X_{var} \qquad X_{eqdem} = 1.828 \quad (ohm)$$

Capacité de surcharge

$$g_{nom} := g \qquad g_{cr} := C_1\cdot\frac{R_{2ram}}{X_1 + C_1\cdot X_{2ram}} \qquad g_{cr} = 0.203$$

$$R_{cr} := 2.R_1\cdot\frac{g_{cr}}{R_{2ram}\cdot C_1} \qquad R_{cr} = 1.963 \quad (ohm)$$

$$C_s := \frac{\frac{g_{nom}}{g_{cr}} + \frac{g_{cr}}{g_{nom}} + R_{cr}}{2 + R_{cr}} \qquad C_s = 2.25 \quad (Nm)$$

$$C_{max} := C_\mu\cdot C_s \qquad C_{max} = 44.292 \quad (Nm)$$

Le courant au démarrage

$$I_{1d} := \frac{U_n}{\sqrt{R_{eqdem}^{\,2} + X_{eqdem}^{\,2}}} \qquad I_{1d} = 37.069 \quad (A)$$

$$\frac{I_{1d}}{I_1} = 5.447$$

Le couple de démarrage

$$C_d := \frac{P\cdot m_1\cdot U_n^{\,2}\cdot R_{2demram}}{2\cdot\pi\cdot f_1\cdot\left(R_{eqdem}^{\,2} + X_{eqdem}^{\,2}\right)} \qquad C_d = 41.699 \quad (N\cdot m)$$

V. Comparaison des résultats :

Les principaux résultats obtenus sont regroupés dans le tableau suivant :

	Résultats Calculés	Moteur Standard
$I\mu$ [A]	2,25	4,59
J_1 [A/mm^2]	7,1	8,2
Cos ∅	0,84	0,83
η %	83	79
Pa [KW]	3,72	3,82
Ia[A]	5,76	7,04
R_1 [Ω]	8,04	4,59
K_{r1} %	93,2	78
S_{eff} [mm^2]	0,565	0,489
d_{iso}[mm]	0,973	0,619
N [tr /min]	1455	1410
C_u [N.m]	20,10	20

Observation :

Après avoir calculé les paramètres et les dimensions principales du moteur on a abouti aux conclusions suivantes :

- La section des conducteurs a augmenté ce qui permet la diminution de la densité du courant.
- La vitesse de rotation du rotor a augmenté ce qui permet la diminution du glissement.
- Le nombre de conducteurs effectifs dans une encoche et le courant nominal a diminué ce qui conduit à la diminution de la charge linéaire et le nombre de spires d'une voie parallèle a diminué. Ceci permet d'avoir une économie de cuivre ainsi qu'une minimisation des pertes Joule statoriques.
- Une diminution de la puissance absorbée.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire nous avons voulu voir l'effet d'une augmentation des diamètres du stator et du rotor sur les performances du moteur asynchrone à cage de 3 kW fabriqués par la firme Electro-Industries.

Lorsqu'on veut construire une machine électrique, on ne doit pas seulement tenir compte de ses propriétés électromagnétiques, mais faire en sorte qu'elle soit la plus performante possible. Le surdimensionnement doit satisfaire avant tout les lois de la physique en particulier les lois magnétiques, électriques et mécaniques, Il doit également répondre aux exigences du cahier des charges tel que la capacité de surcharge, le facteur de puissance et les conditions de démarrage.

Les résultats de nos calculs montrent une amélioration des performances de la machine. En effet, la section des conducteurs a augmenté ce qui aura pour effet de diminuer la densité du courant. La vitesse de rotation a augmenté, ce qui permet la diminution du glissement. Le nombre de conducteurs effectifs dans une encoche et le courant nominal a diminué ce qui conduit à la diminution de la charge linéaire. La diminution de la puissance absorbée permet une économie d'énergie.

Le stage mené au sein de l'entreprise Electro-Industries nous a permis d'être en contact direct avec le monde de l'industrie. Ce stage nous permis de consolider nos connaissances théoriques.

Annexes

Tableau T 1 : SECTION NORMALISE :

Section nominale (Snom) en mm	*Diamètre nu (dnu) en mm*	*Diamètre avec isolation (diso) en mm*
0.00785	**0.1**	**0.125**
0.00882	**0.106**	**0.131**
0.00985	**0.112**	**0.139**
0.01094	**0.118**	**0.145**
0.01227	**0.125**	**0.153**
0.01368	**0.132**	**0.161**
0.01539	**0.14**	**0.170**
0.01767	**0.15**	**0.181**
0.02011	**0.16**	**0.192**
0.02270	**0.17**	**0.203**
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**	**0.34**
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**
0.2643	**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**	**1.024**
0.7854	**0.00**	**1.076**
0.8825	**0.06**	**1.137**
0.9852	**0.12**	**1.199**
1.095	**1.18**	**1.260**
1.227	**1.25**	**1.332**
1.368	**1.32**	**1.404**

TABLEAU T.2 : 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

TABLEAU T.3 : Intensité du champ magnétique dans la culasse 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	259	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

TABLEAU T4 : 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

TABLEAU T.5 : K_{rr1} en fonction de Q_1.

Q_1	1,5	2	2,5	3	4	5	6	8
K_{rr1}	-	0,0285	-	0,0141	0,0065	0,0052	-	-

TABLEAU T.6 : K_{dd1} en fonction de Z2/P.

Q_1	10	15	20	25	30	35	40
2	0,99	0,94	-	-	-	-	-
3	098	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

TABLEAU T.7 : K en fonction de 2P.

	2P=2	2P=4	2P=6
IP44	0,22	0,20	0,19
IP23	0,84	0,80	0,78

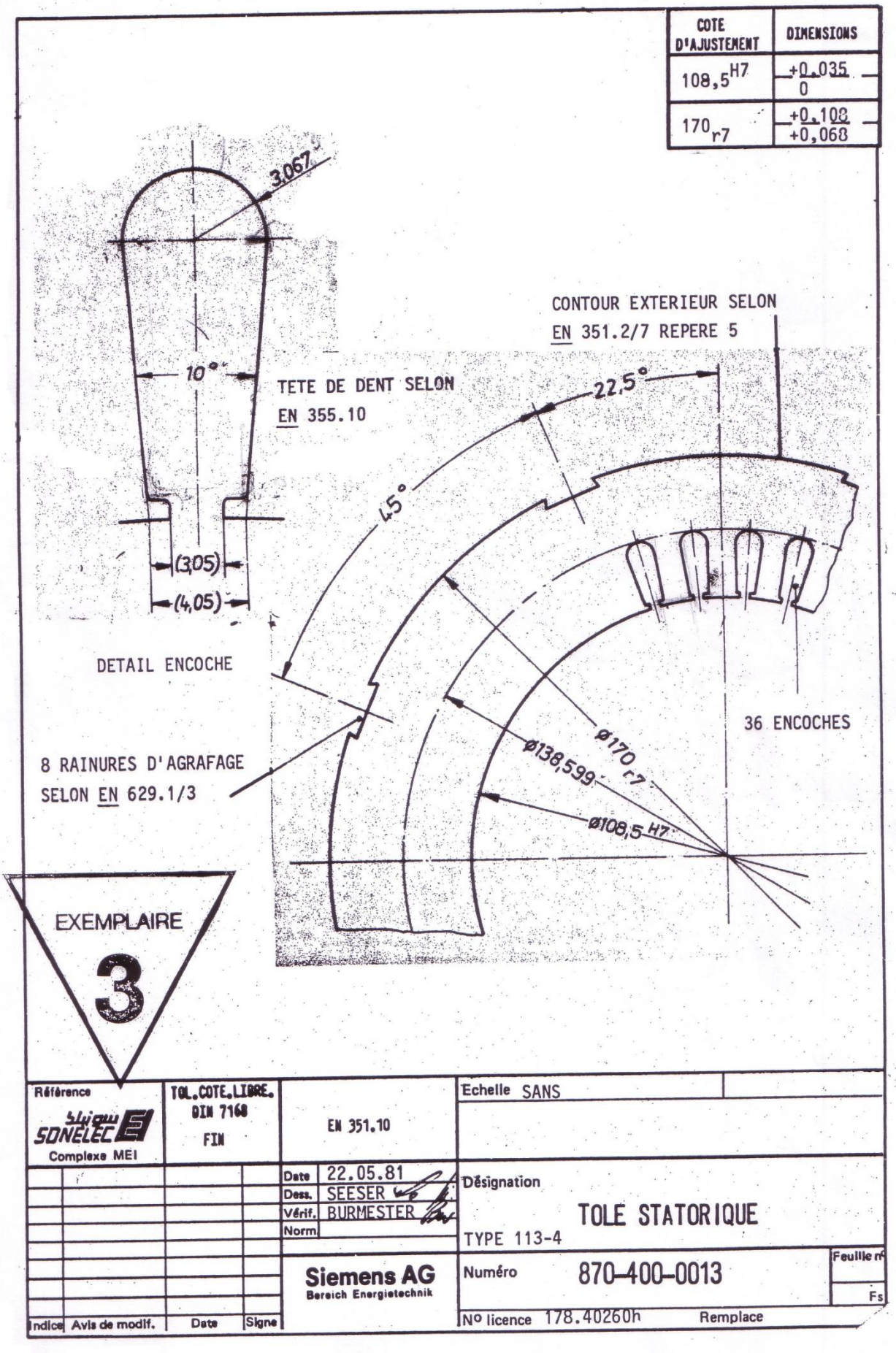

COTE D'AJUSTEMENT
DIMENSIONS
108,5 H7
+0,035 0
170 r7
+0,108 +0,068
3,067
10°
(3,05)
(4,05)
DETAIL ENCOCHE
TETE DE DENT SELON EN 355.10
CONTOUR EXTERIEUR SELON EN 351.2/7 REPERE 5
22,5°
45°
36 ENCOCHES
8 RAINURES D'AGRAFAGE SELON EN 629.1/3
ø170 r7
ø138,599
ø108,5 H7
EXEMPLAIRE
3
Référence
SONELEC
Complexe MEI
TOL.COTE.LIBRE. DIN 7168 FIN
EN 351.10
Echelle SANS
Date 22.05.81
Dess. SEESER
Vérif. BURMESTER
Norm.
Désignation
TOLE STATORIQUE
TYPE 113-4
Siemens AG
Bereich Energietechnik
Numéro 870-400-0013
Feuille n°
Fs
Indice Avis de modif. Date Signe
N° licence 178.40260h Remplace

Figure.A

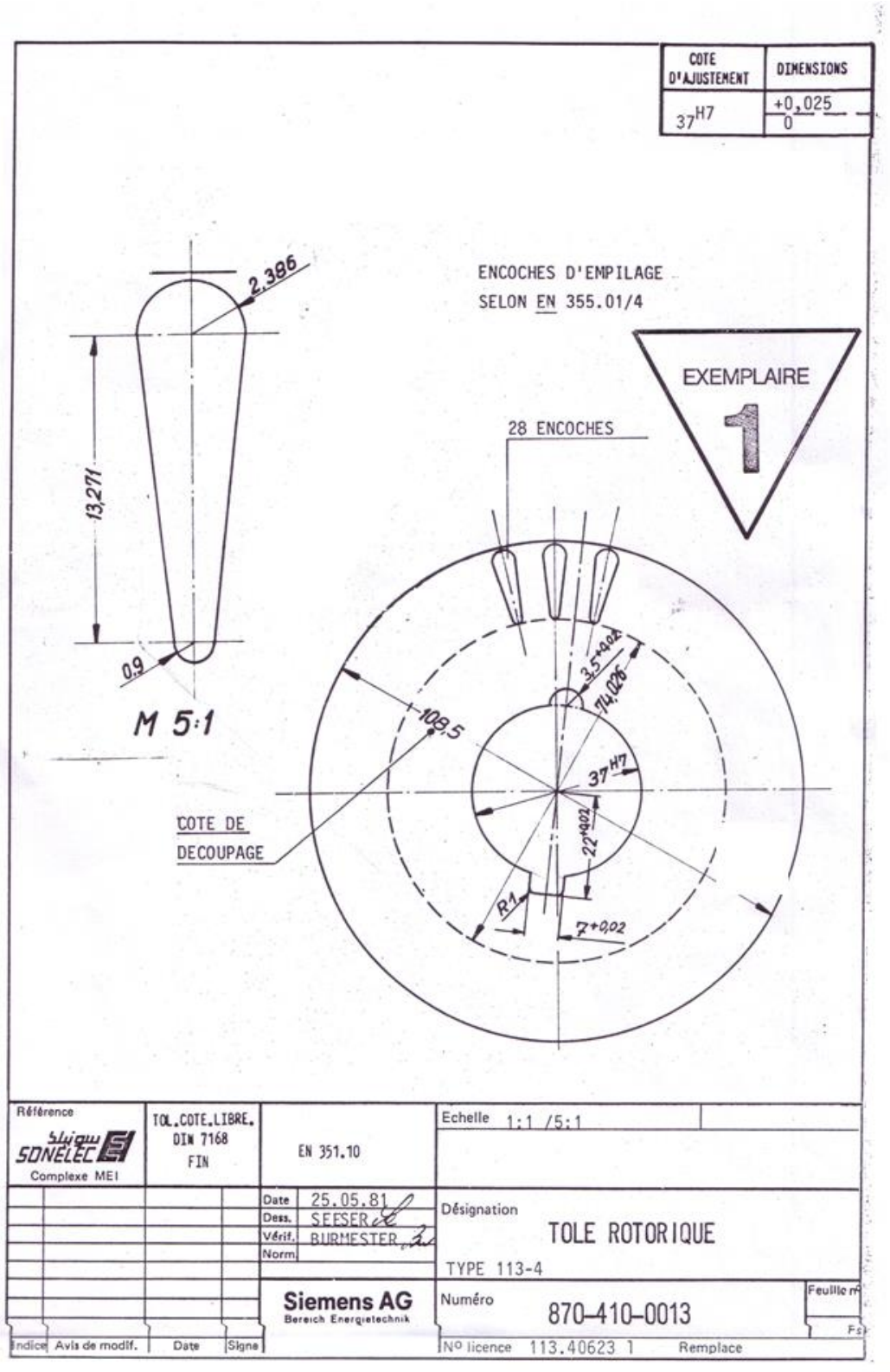

COTE D'AJUSTEMENT
DIMENSIONS
37 H7
+0,025
0
ENCOCHES D'EMPILAGE
SELON EN 355.01/4
EXEMPLAIRE
1
28 ENCOCHES
2,386
13,271
0,9
M 5:1
108,5
3,5+0,02
74,026
37 H7
22+0,02
R1
7+0,02
COTE DE
DECOUPAGE
Référence
SONELEC
Complexe MEI
TOL.COTE.LIBRE.
DIN 7168
FIN
EN 351.10
Echelle 1:1 /5:1
Date 25.05.81
Dess. SEESER
Vérif. BURMESTER
Norm
Désignation
TOLE ROTORIQUE
TYPE 113-4
Siemens AG
Bereich Energietechnik
Numéro
870-410-0013
Feuille n°
Indice
Avis de modif.
Date
Signe
N° licence 113.40623 1
Remplace

Figure.B

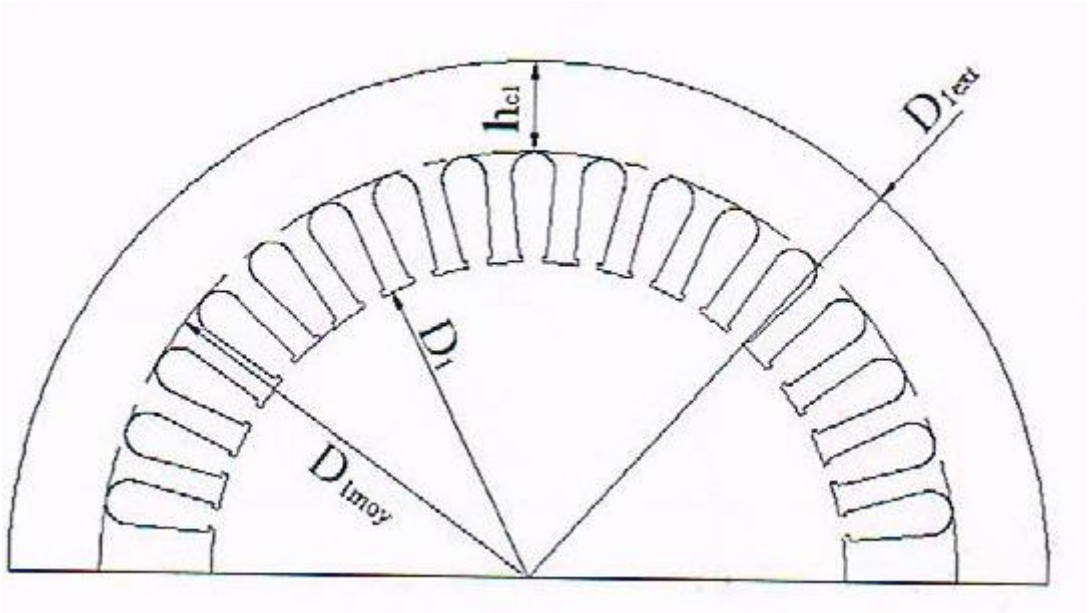


Figure 4-a Feuille statorique

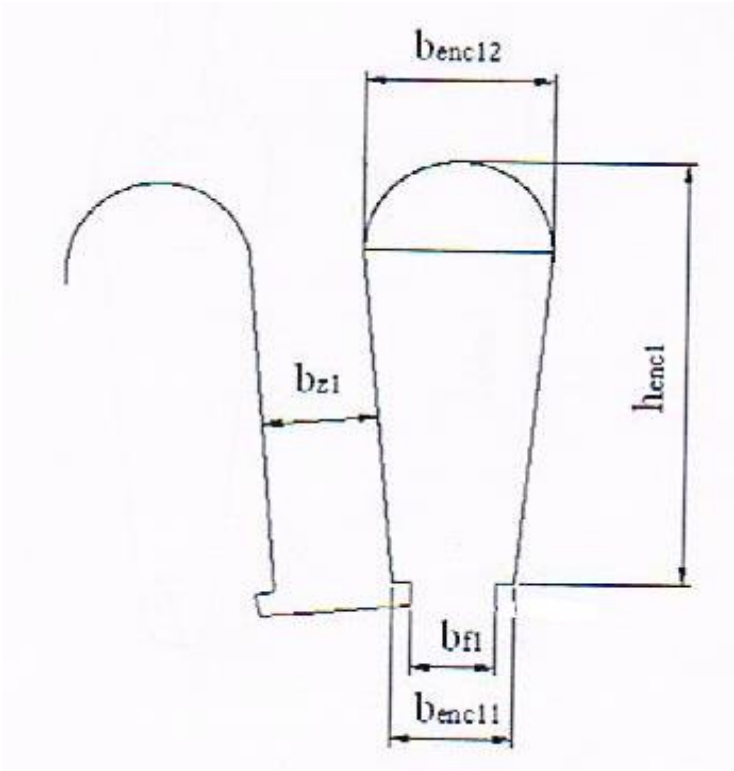


Figure 4-b Encoche statorique ovale semi- ouverte

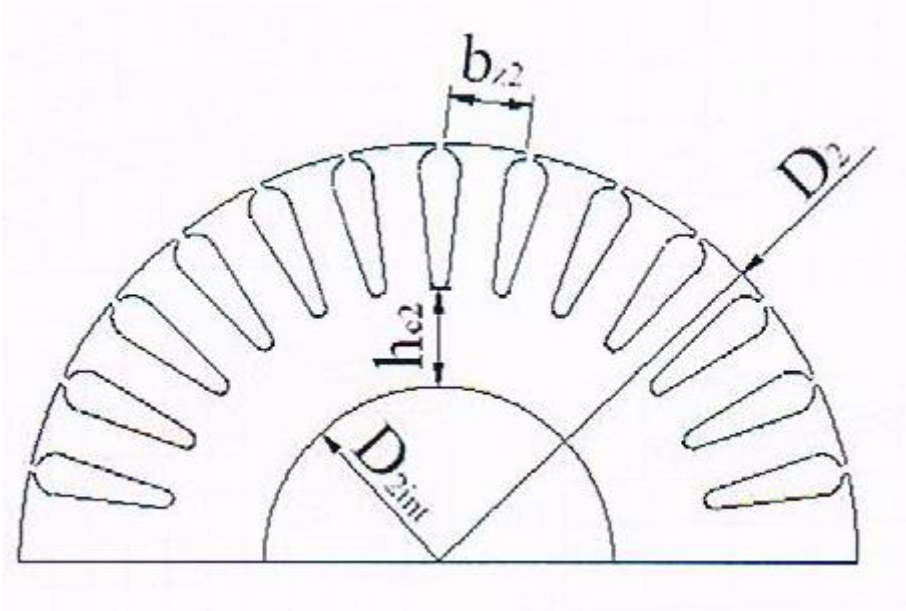


Figure 5-a Feuille rotorique

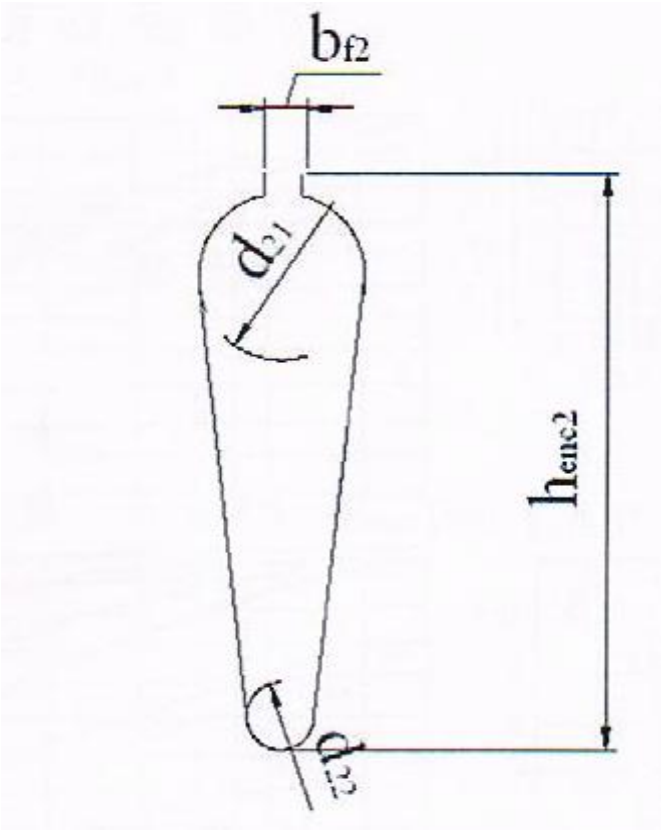
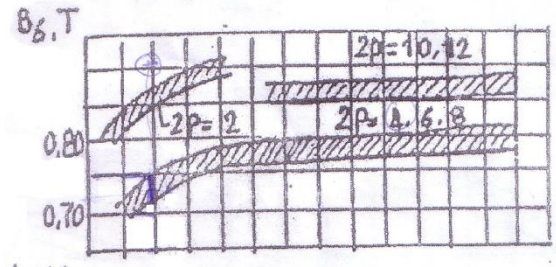


Figure 5-b Encoche rotorique

Fig 6 .1



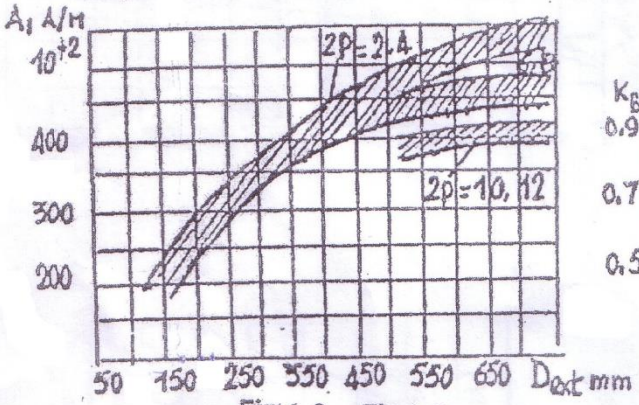


Fig 6 .2 Fig 6 .3

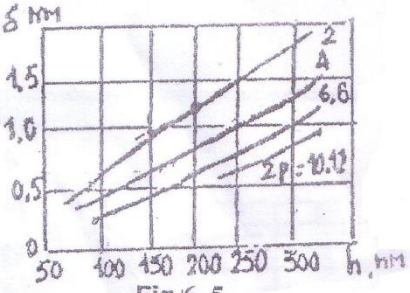


Fig 6 .5

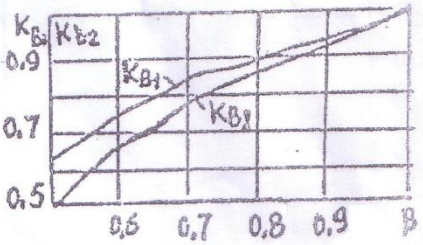
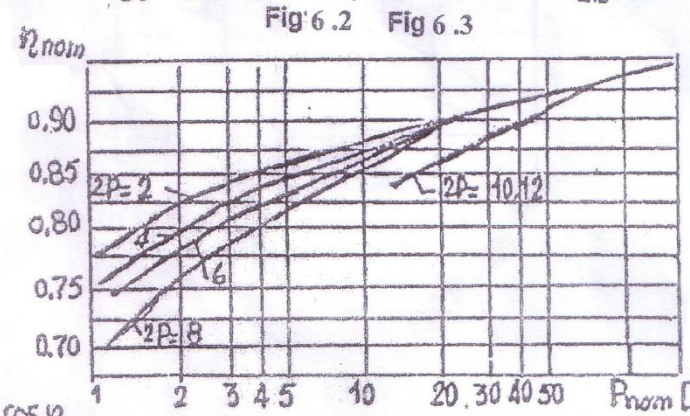


Fig 6 .6



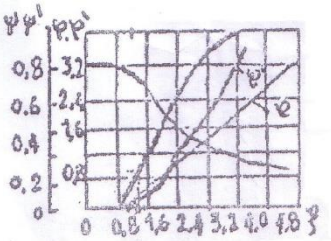
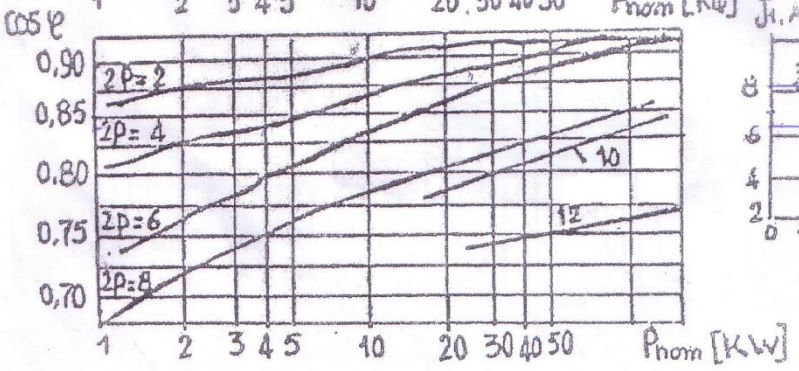


Fig 6 .7



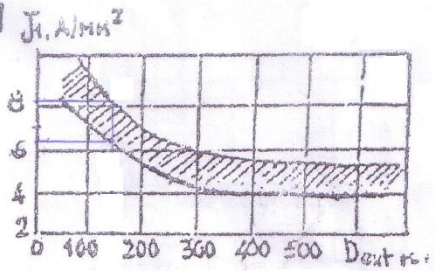


Fig 6 .8

Fig 6 .4

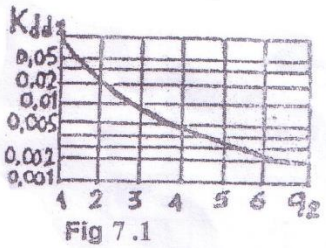


Fig 7.1

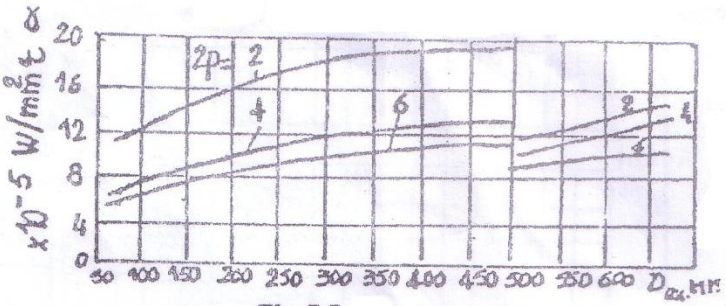


Fig 7.5

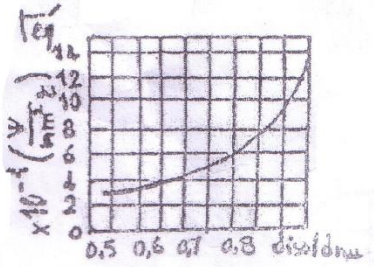


Fig 7.2

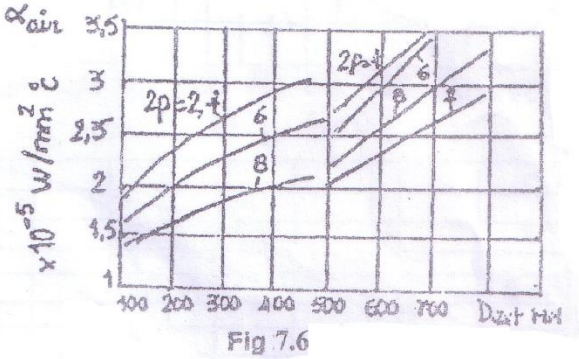


Fig 7.6

Fig 7.3

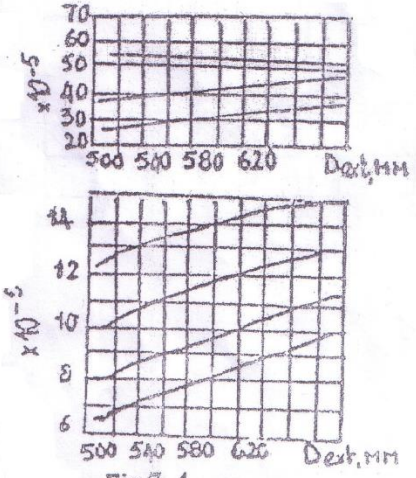


Fig 7.4

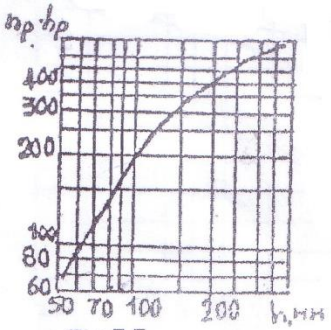


Fig 7.7

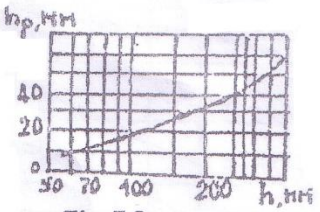


Fig 7.8

Tableau T-4 : Inductions dans la culasse et dent statorique en fonction de la hauteur d'axe et de nombre de pôles.

Hauteur d'axe h [mm]	Le nombre de poles	B_{z1} [T]	B_{c1} [T]
50-132	2, 4	[1,75 ÷1,95]	[1,5 ÷1,65]
	6	[1,75 ÷1,95]	[1,50 ÷1,65]
	8	[1,75÷ 1,95]	[1,45 ÷1,60]
160-225	2	[1,75 ÷2,0]	[1,45 ÷1,70]
	4	[1,75 ÷2,0]	[1,45 ÷1,70]
	6	[1,70 ÷1,85]	[1,35 ÷1,50]
	8	[1,70÷1,85]	[1,10 ÷1,20]
180-250	2	[1,70 ÷1,90]	[1,45 ÷1,65]
	4,6	[1,70 ÷1,90]	[1,45 ÷1,65]
	8	[1,70 ÷1,85]	[1,10 ÷1,20]

Tableau T-5: Inductions maximales dans la culasse et dents rotorique en fonction de la hauteur d'axe et de nombre de pôles

Hauteur d'axe [mm]	Nombre de poles	B_{z2} [T]	B_{c2} [T]
50-132	2	[1,75÷1,95]	[1,35÷1,45]
	4	[1,75÷1,95]	[1,15÷1,25]
	6	[1,70÷1,95]	[1,05÷1,15]
	8	[1,70÷1,90]	[0,75÷0,85]
160-225	2	[1,75÷1,95]	[1,35÷1,45]
	4	[1,55÷1,80]	[1,15÷1,25]
	6	[1,65÷1,90]	[1,05÷1,15]
	8	[1,65÷1,90]	[0,75÷0,85]
180-250	2	[1,60÷1,85]	[1,35÷1,45]
	4	[1,80÷2,00]	[1,15÷1,25]
	6	[1,65÷1,90]	[1,05÷1,15]
	8	[1,65÷1,90]	[0,75÷0,85]

Bibliographie

Bibliographie:

[1]. AMEUR.T et ANKOUR.A et ARTBAS.M . Conception d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil alimenté par un convertisseur de fréquence. Thèse ingénieur.
Université de Tizi-Ouzou. 2008.

[2]. TADRIST .M . Dimensionnement d'un moteur asynchrone de grande puissance alimenté par 5,5 kW. Thèse ingénieur UMMTO .2011.

[3]. REBBAH REDJEM. Calcul et Conception Assistée par Ordinateur des Machines Electriques **.**Application aux moteurs asynchrones. Thèse magister.
Université de Constantine. 2006.

[4]. BELASSEL.M.T. Etude des processus ondulatoire et des surtensions dans des moteurs asynchrones alimente par des convertisseurs à semi-conducteur. Thèse de doctorat. Université de Tizi-Ouzou. 2006.

[5]. Catalogue de l'entreprise nationale électrotechnique. Azazga.
Moteurs asynchrones Alternateurs. 2005.

[6]. R EAL-PAUL BOUCHARD GUY OLIVIER. Conception de moteurs asynchrone triphasés. Edition Ecole polytechnique du CANADA. 1997.

[7]. WILDI .T avec la collaboration de SYBIELLE.G .Electrotechnique . 4eme Edition De Boeck Université. CANADA.1997.

[8]. M.AZZOUG et M.ZIRIFI. ″Etude expérimentale de l'échauffement d'un moteur asynchrone à cage de puissance 7.5kW″, mémoire d'ingénieur, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2003.

[9]. G. VEINOTT,″ Moteur asynchrone triphasé ″ Les moteur électriques à puissance fonctionnaire, 1999.