

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU

FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET INFORMATIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE



Memoire



De fin d'études

En vue de l'obtention du Diplôme de Master Académique en Electrotechnique

Option : Machines Electriques

Thème

**Calcul optimal d'un moteur Asynchrone
à double cages à haut rendement**

Proposé par :

M^r Dj. BENTAHA

Dirigé par :

M^r BELASSEL. Mohand-Tahar

Réalisé par :

M^r HOSNI Hassene

M^r LADJEL Fahim

Promotion 2012

Remerciements

Nous tenons à remercier tout premièrement Dieu le tout puissant pour nous avoir donné la volonté, la santé et la patience.

Nous tenons à adresser nos vifs remerciements à Mr. belassel Mohand-Tahar, professeur au département Electrotechnique, qui nous a proposé ce sujet, nous a orienté le long de la réalisation de ce mémoire, nous a prodigué les précieux conseils qu'il trouve ici l'expression de notre profonde gratitude. Nous tenons également à remercier vivement toute personne qui nous a aidé à élaborer et à réaliser ce mémoire, ainsi qu'à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à accomplir ce travail. Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants du département d'Electrotechnique qui ont contribué à notre formation, nos sincères remerciements s'adressent à tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

En fin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis pour leur soutien moral et matériel...

Dédicaces

Je dédie ce travail à toute ma famille, mes chers parents, mon cher frère, et mes chères sœurs

Comme je le dédie à tous mes amis et à tous ceux qui me sont proches.

Hassene

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A mes très chers parents à qui je dois tout

A mes chers frères samir, menad, ferhat et madjid

A mes chères sœurs lynda, leïla et sekoura

A tous mes ami(e)s

A toute la promotion d'électrotechnique (2012)

*A tous ceux qui ont contribué de prêt ou de loin
à la réalisation de ce mémoire.*

Fahim.

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur les moteurs asynchrones	
Introduction.....	2
I.1. Historique de la machine asynchrone.....	2
I.2. Présentation de la machine asynchrone.....	3
I-3 : Les différents types de moteurs asynchrones	6
I-3-a: Rotor bobbin	6
I-3-b: Rotor à cage.....	7
I-3-c : Rotor à double cage	8
I-3-d : Rotor à encoches profondes.....	8
I-4 : Principe de fonctionnement.....	9
I-5 : Le glissement du moteur asynchrone.....	10
I-6 : Inventaire des pertes et schéma bloc d'un moteur asynchrone.....	10
I-7 : Le couple d'un moteur asynchrone.....	13
I-8 : Comparaison entre moteur monophasé et moteur triphasé.....	15
I-9 : Démarrage des moteurs monophasés.....	16
I-10 : Classification des moteurs asynchrone selon les caractéristiques électriques et mécaniques.....	17
I-10-a : moteur à couple normal et a courant de démarrage normal (CEMA classe A).....	17
I-10-b : Moteurs à faible courant et à couple de démarrages normal (CEMA classe B)....	18
I-10-c : Moteurs à faible courant et à couple de démarrage élevé (NEMA classe C).....	18
I-10-d : Moteurs à glissement élevé (NEMA classe D).....	18
I-10-e : moteur à faible couple et faible courant de démarrage (NEMA classe F).....	19
I-11 : Démarrage des moteurs asynchrone.....	20
I-12 : Freinage des moteurs asynchrones.....	21
I-13 : Protection des moteurs électriques.....	22

Sommaire

I-13-1 : Les relais à maximum de courant	22
I-13-2 : Définition de l'échauffement	22
I-13-3 : Dispositif de protection contre l'échauffement.....	22
Conclusion.....	23
Chapitre II : Aperçu théorique sur les moteurs à haut rendement	
Introduction.....	24
II-1 : Moteurs à induction à haut rendement	24
II-2 : spécificités des machines à induction à haut rendement	25
II-2-a : caractéristiques technique.....	25
II-2-b : tension d'alimentation.....	26
II-2-c : La vitesse.....	26
II-2-d : Le couple.....	27
II-3 : caractéristiques des moteurs à haut rendement	27
II-4 : avantage d'utilisation des moteurs à haut rendement	28
II-5 : Répartition et classes de rendement des moteurs électriques	28
II-6 : Classes de rendement des moteurs précédemment en vigueur en Europe.....	29
II-7 : Nouvelle norme internationale relative aux classes de rendement des moteurs.....	29
II-8 : Nouvelles méthodes de mesure CEI.....	30
II-9 : Comparaison des classes de rendement anciennes et nouvelles	31
II-10 : Domaine d'application du nouveau système de classes de rendement CEI.....	31
II-11 : Marquage de rendement sur le moteur.....	35
II-12 : Facteurs influents sur le rendement des moteurs électriques	35
II-12-a : Qualité d'alimentation en énergie.....	35
II-12-b : Charge du moteur.....	36
II-12-c : Maintenance du moteur	36

Sommaire

II-12-d : Plage d'utilisation des moteurs	36
II-13 : Économie d'énergie par les moteurs à induction à haut rendement	36
II-14 : Economies réalisées par l'amélioration du facteur de puissance	37
II-15 : Analyse technico-économique	37
Conclusion.....	37
Chapitre III : Calcul électromagnétique	40
III-1 : Dimensionnement du stator	40
III-1-1 : Dimensionnement de l'enroulement statorique	40
a) Puissance électromagnétique	40
b) Longueur virtuelle de l'induit	40
c) Courant nominal	42
d) Nombre de conducteurs effectifs dans une encoche	42
e) Nombre de spire d'une voie parallèle.....	42
f) Section effective transversale d'un conducteur de l'enroulement	43
III-1-2 : Dimensionnement de la feuille statorique	43
a) Largeur de la dent	43
b) Hauteur du dos du stator	43
c) Hauteur de la dent	43
d) Largeur minimale de l'encoche	44
e) Largeur maximale de l'encoche	44
f) Hauteur de l'encoche	44
g) Section de l'encoche statorique	44
h) coefficient de remplissage	44
III 1-3 : Vérification des charges électromagnétique	45
a) Charge linéaire	45
b) Induction magnétique dans l'entrefer	45
c) Flux sous un pôle	45

Sommaire

III-1-4 : Choix de l'entrefer.....	45
III-2 : Dimensionnement du rotor	46
III-2-1 : Choix du nombre d'encoches rotorique	46
III-2-2 : Diamètre extérieur du rotor	46
III-2-3 : Dimensionnement de la feuille rotorique	47
a) Hauteur de la culasse rotorique	47
b) hauteur de la dent	47
c) largeur de la dent	47
d) sections des barres rotoriques.....	48
e) Densité du courant	48
III-2-4 : Dimensionnement des anneaux de court- circuit	48
a) Les hauteurs des anneaux	48
b) Les sections des anneaux	49
c) Largeur de l'anneau	49
d) Diamètre moyen de l'anneau.....	49
III-2-5 : Calcul du circuit magnétique.....	50
III-2-5-1 : Circuit magnétique statorique.....	50
a) Longueur moyenne des lignes de champs dans la culasse statorique	50
b) Force magnétomotrice de la culasse statorique	50
c) Force magnétomotrice dans la dent du stator.....	51
III-2-5-2 : Circuit magnétique rotorique	51
a) Longueur moyenne des lignes du champ magnétique dans la culasse du rotor.....	51
b) Force magnétomotrice dans la culasse du rotor	51
c) Force magnétomotrice dans la dent du rotor.....	52
III-2-5-3 : Force magnétomotrice dans l'entrefer	52
III-2-5-4 : Force magnétomotrice totale par paire de pôle.....	53
III-2-6 : Coefficients de saturation.....	53
a) Saturation des dents	53
b) Coefficient de saturation de la machine	53
III-2-7 : Courant magnétisant	53

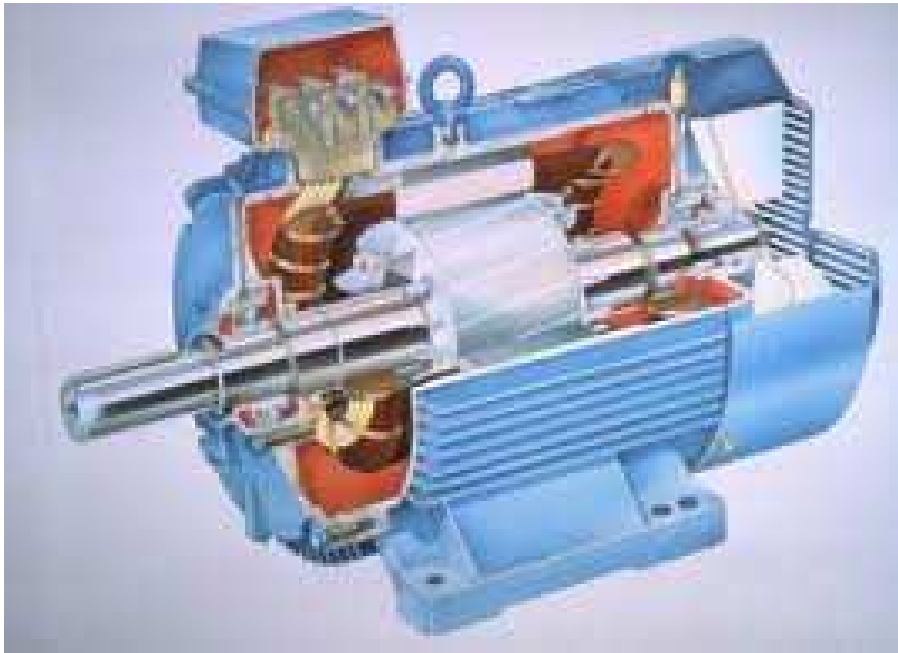
Sommaire

III-2-8 : Réactance de magnétisation.....	53
III-2-9 : Coefficient de dispersion magnétique du stator	54
III-2-10 : Force électromotrice à vide E_0	54
III-2-11 : Calcul des paramètres électriques des enroulements	54
III-2-11-1 : paramètres statoriques	54
a) résistance active d'une phase du stator	54
b) Réactances de fuites et perméances de fuites du stator	55
III-2-11-2 : paramètres rotorique	57
a) Résistance rotorique.....	57
b) Les réactances	59
III-2-11-3 : Paramètres au démarrage.....	60
III-2-11-3 : Paramètres du rotor au régime à vide et au fonctionnement nominal	62
III-2-11-4 : Calcul des pertes et du rendement.....	63
a) Pertes principale dans le fer.....	63
b) Pertes électriques dans le cuivre et dans le bronze.....	64
c) Pertes mécaniques.....	65
d) Pertes supplémentaires.....	65
e) Pertes totales.....	66
f) Rendement de la machine.....	66
III-2-11-5 : Calcul de la résistance de magnétisation.....	66
III-2-11-6 : Calcul des performances du moteur	67
a) Schéma équivalent d'un moteur à deux cages.....	67
b) Caractéristiques de fonctionnement du moteur.....	67
III-2-11-7 : Caractéristiques de démarrage	70
a) Résistance et réactance équivalentes au démarrage	70
b) Courant de démarrage	71
c) Couple de démarrage.....	71
d) Le couple max.....	72

Chapitre IV:

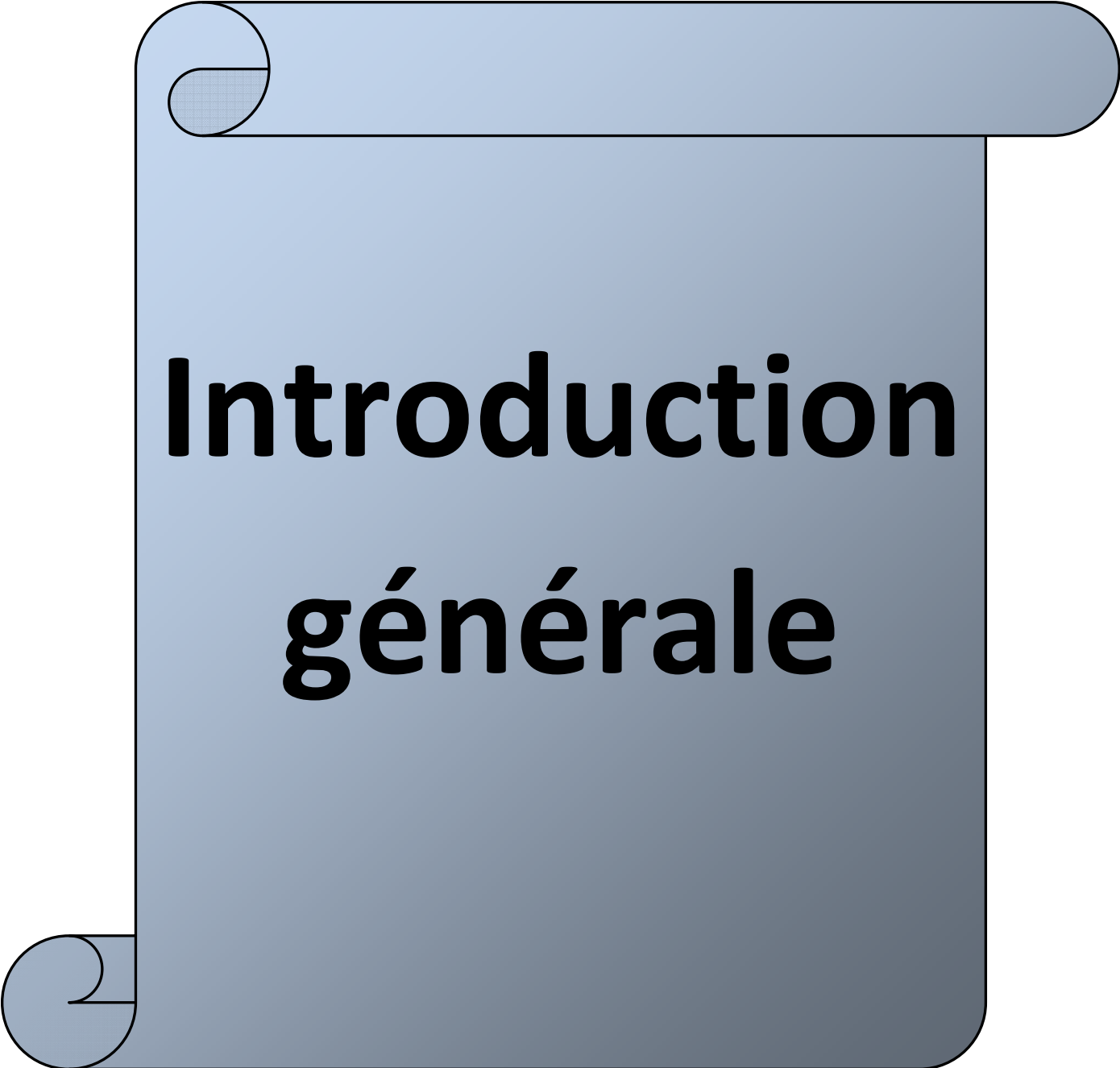
Elaboration du programme de calcul	72
Comparaison et interprétations des résultats	105
Conclusion générale	106

Cahier de charges



Cahier de charges

Puissance nominale :	$P_n = 200 \text{ KW.}$
Hauteur d'axe :	$h = 315 \text{ mm.}$
Tension nominale :	$U_n = 380 \text{ V.}$
Vitesse nominale :	$N_n = 2980 \text{ tr/min.}$
Fréquence du réseau d'alimentation :	$F = 50 \text{ Hz.}$
Facteur de puissance :	$\cos \phi_n = 0.89.$
Rendement :	$\eta_n = 0.96.$
Nombre de phases :	$m = 3.$
Classe d'isolation :	F.
Degré de protection :	IP 55.



Introduction générale

Introduction générale

Vu sa facilité de mise en oeuvre, son cout de fabrication relativement faible, son bon rendement et son excellente fiabilité, le moteur asynchrone ou moteur à induction est actuellement le moteur électrique dont l'usage est le plus répandu dans les domaines industriels et domestiques.

Dans le domaine de construction des moteurs, il existe plusieurs méthodes de calcul et de dimensionnement, celles-ci diffèrent d'un constructeur à un autre.

En conséquence la construction des machines est devenue un art sur la base de formules semi empiriques ou chaque constructeur développe une méthode de calcul plus en moins précise, qui tien compte des hypothèses tirées de l'expérience passée.

Récemment, à la suite de la crise énergétique, les fabriquant des moteurs électriques ainsi que les consommateurs s'intéressent à la réduction de la consommation d'énergie des systèmes électriques. Ce qui a conduit au lancement d'importants travaux a travers le monde, particulièrement pour l'amélioration du rendement et du facteur de puissance des moteurs.

C'est dans le cadre de calcul d'un moteur asynchrone à double cage, à haut rendement, et à haut facteur de puissance avec un volume et un poids les plus réduits possible, en respectant un cahier de charge et en agissant sur les défèrent paramètres de la machine, ensuit comparer les résultats trouvés au résultats d'un moteur standard fabriqué par Electro-industrie d'Azazga, que s'inscrit la problématique de notre travail.

À l'aide d'un logiciel de calcul et de programmation, nous allons utiliser une méthode de calcul semi-empirique, elle repose essentiellement sur un nombre élevé de formules Développées en associant les connaissances théoriques et les expériences pratiques des constructeurs.

Nous allons divisé le contenu de notre travail en cinq chapitres dont le premier chapitre traite des généralités sur les moteurs asynchrones, tandis que le deuxième chapitre sera consacré pour un aperçu théorique sur les moteurs a haut rendement, le troisième chapitre sera réservé pour la méthode de calcul de notre moteur, quand au dernier chapitre, nous allons le réservé pour l'élaboration du programme de calcul et pour la comparaison des résultats de notre moteur calculé avec les résultats d'un moteur réel construit par le fabriquant Electro Industrie (ex : ENEL). En fin nous terminerons notre travail par une conclusion générale.



Chapitre /

**Généralités sur les moteurs
asynchrones**

Introduction :

Vu leur simplicité de construction, leur robustesse, leur entretien limité, et à cause de la facilité de leur alimentation, le moteur asynchrone détrône de plus en plus la machine à courant continu et concurrence son homologue synchrone. Les moteurs asynchrones plus particulièrement ceux à cage d'écureuil, représentent environ 90-95% de la consommation d'énergie des moteurs électriques. Dans notre premier chapitre nous nous intéressons à présenter quelques généralités sur le moteur asynchrone.

I.1. Historique de la machine asynchrone :

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

Du fait de sa simplicité de construction, d'utilisation et d'entretien, de sa robustesse et de 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 quelques milliers de kilowatts.

Quant la machine asynchrone est alimentée à partir d'un réseau de fréquence fixe, il est difficile de faire varier sa vitesse. En plus, au démarrage le couple est faible et le courant élevé. Deux solutions historiques ont résolu ce problème : le rotor à encoches profondes et le rotor à double cage mis en point en 1912 par **PAUL BOCHROT**. Grâce aux progrès de l'électronique de puissance, l'alimentation par un onduleur à fréquence variable permet maintenant de démarrer la machine convenablement et de la faire fonctionner avec une vitesse réglable dans une large plage. C'est pourquoi il est utilisé pour la motorisation des nouveaux TGV ainsi que les nouveaux métros parisiens. [11]

I.2. Présentation de la machine asynchrone :



Figure (1-1) : moteur asynchrone

La machine asynchrone, connue également sous le terme « anglo-saxon » machine a induction, est une machine électrique a courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor. Les machines possédant un rotor en «cage d'écureuil »sont aussi connues sous le nom machine a cage ou machine a cage d'écureuil. Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas forcément proportionnelle à la fréquence des courants qui les traversent.



Figure (1-2) : Symboles électrique du moteur

(a): Moteur a rotor bobiné

(b) : Moteur a cage

La machine asynchrone a longtemps été fortement concurrencée par la machine synchrone dans les domaines de forte puissance, jusqu'à l'avènement de l'électronique de puissance.

La machine asynchrone est utilisée aujourd'hui dans de nombreuses applications, notamment dans le transport (métro, trains, propulsion des navires, automobiles électriques), dans l'industrie (machines, outils), dans l'électroménager. Elle était à l'origine uniquement

utilisée comme moteur, mais grâce à l'électronique de puissance, elle est de plus en plus souvent utilisée en génératrice. C'est par exemple le cas dans les éoliennes.

Pour fonctionner en courant monophasé, les machines asynchrones nécessitent un système de démarrage. Pour les applications de puissance, au-delà de quelques kilowatts, les moteurs asynchrones sont uniquement alimentés par des systèmes de courants triphasés.

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

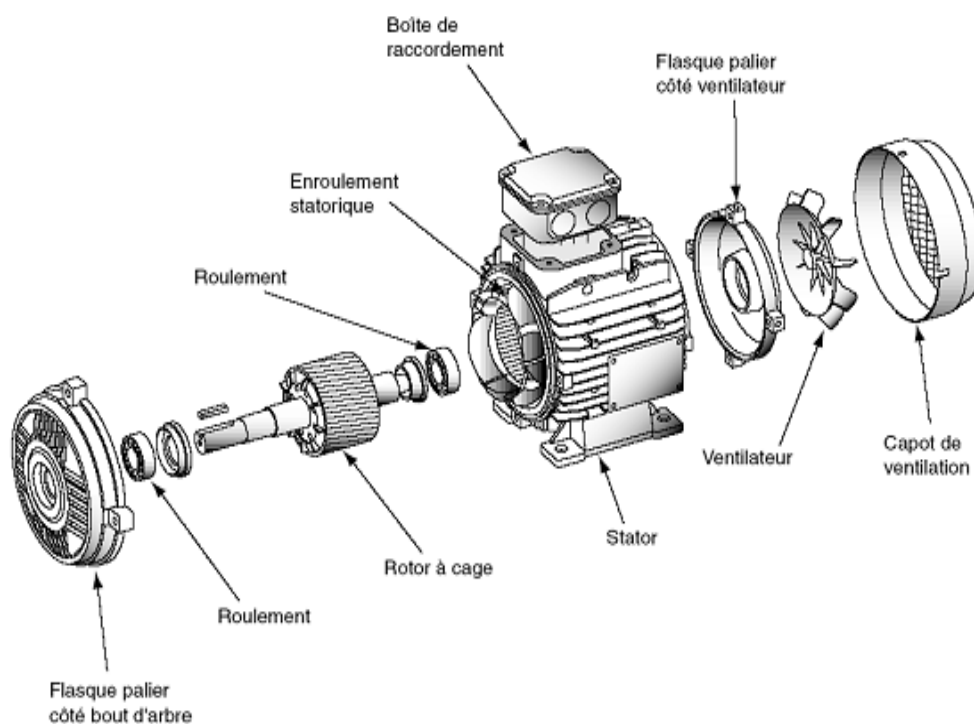


Figure (1-3) : Eclaté d'un moteur asynchrone à cage.

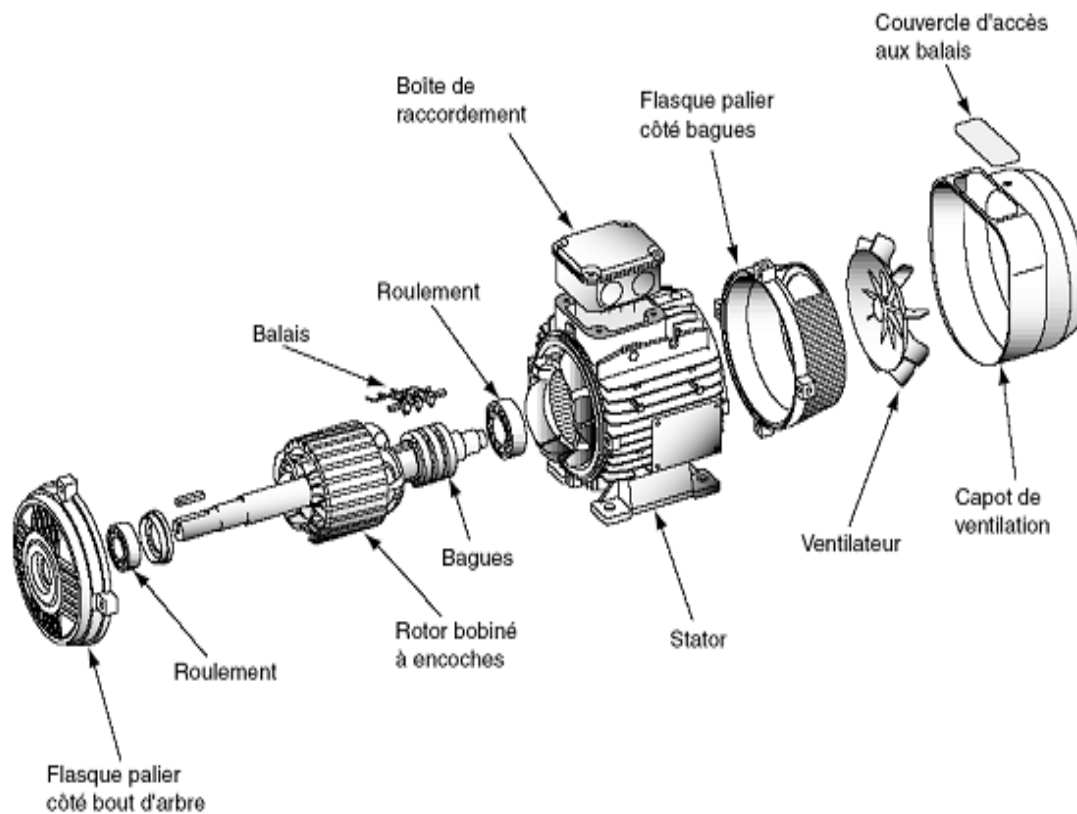


Figure 1-4) : Eclaté d'un moteur asynchrone à bagues.

Le stator comporte une carcasse en acier renfermant un empilage de tôles identiques qui constituent un cylindre vide ; ces tôles sont percées de trous à leur périphérie intérieure. L'alignement de ces trous forme des encoches dans lesquelles on loge un bobinage triphasé.



Figure (1-5) : Stator d'un moteur asynchrone triphasé

Le rotor se compose d'un cylindre de tôles poinçonnées à leur périphérie extérieure pour former les encoches destinées à recevoir des conducteurs, Il est séparé du stator par un entrefer très court - de l'ordre de 0,4 à 2 mm seulement.

I-3 : Les différents types de moteurs asynchrones :

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

Les différents types du rotor qu'on peut distinguer sont :

I-3-a : Rotor bobiné :

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



Figure (1-6) : rotor bobiné

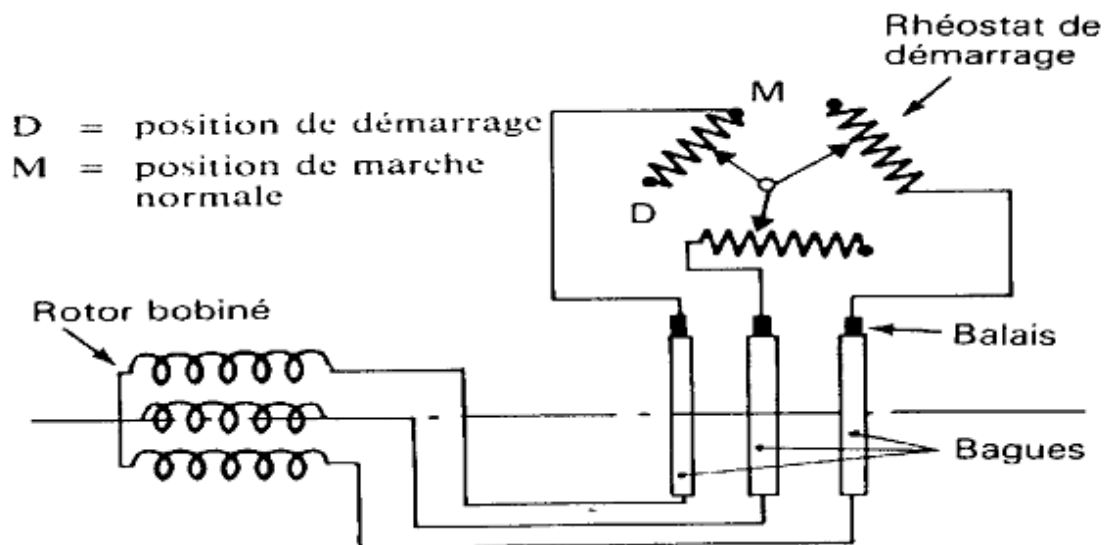


Figure (1-7) : schéma de principe d'un rotor bobiné

I-3-b: Rotor à cage:

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,), 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, est d'un prix de revient inférieur et a une robustesse intrinsèquement plus grande. Il n'est donc pas étonnant qu'il constitue, et de loin, la plus grande partie du parc des moteurs asynchrones en service.

Son inconvénient majeur est qu'il ne permet pas d'insérer un rhéostat et qu'il a, au démarrage, de mauvaises performances (courant élevé et couple faible). C'est pour remédier à cette situation qu'ont été développés deux autres types de moteur (rotor à double cage et rotor à encoches profondes). [2]

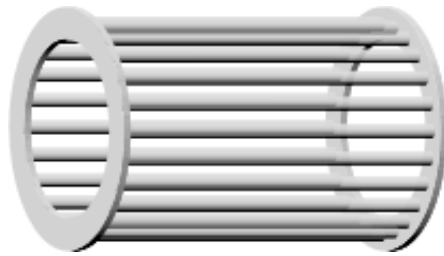


Figure (1-8) : rotor à cage d'écureuil

I-3-c : Rotor à double cage :

Le rotor comporte deux cages coaxiales. La cage externe (fréquemment réalisée en laiton ou en bronze) à une résistance élevée, elle est active au démarrage pour réduire l'appel de courant et d'augmenter le couple. La cage interne (en cuivre) est moins résistive, elle est active en régime nominal et cela pour réduire les pertes par effet Joule au rotor. [5]



Figure (1-9) : tôle magnétique rotorique d'un moteur asynchrone à double cage.

I-3-d : Rotor à encoches profondes :

C'est un rotor à cage simple avec des barres très plates s'enfonçant dans le circuit magnétique. Au démarrage, et par effet de peau, le courant se localise dans la partie supérieure de la barre et donc la section utile réduite, la résistance augmente et le courant diminue. Mais au fonctionnement nominal, cet effet diminue avec l'augmentation de la vitesse et la diminution de la fréquence, ce qui va réduire la résistance des barres. [5]



Figure (1-10) : Rotor a encoches profondes.

I-4 : Principe de fonctionnement :

Au moment où l'on ferme l'interrupteur pour brancher les enroulements du stator d'un moteur asynchrone sur une ligne triphasée, ce système des courants triphasés va créer un champ tournant au stator (**loi d'ampère**). Le rotor à cage est encore au repos. Le champ tournant qui provient du stator coupe les conducteurs du rotor et il engendre une tension dans ceux-ci (**loi de faraday**). Cette tension est alternative car les conducteurs sont tantôt devant un pôle nord, tantôt devant un pôle sud du champ tournant, la valeur efficace de cette tension est égale au produit de l'induction magnétique B par la vitesse linéaire du champ V par la longueur virtuelle de l'induit L ($E=B.L.V$). La fréquence de la tension dépend du nombre de pôles N et S passant devant un conducteur en une seconde; lorsque le rotor est au repos, elle est toujours égale à la fréquence du réseau. Les conducteurs étant court-circuités à leurs extrémités par les deux anneaux, la tension induite fait circuler des courants. La résistance et l'inductance offertes par la cage sont très faibles et les courants sont intenses : quelques centaines d'ampères pour les machines de moyenne puissance. Les mêmes conducteurs du rotor portant ces courants se trouvent toujours dans le chemin du flux provenant du stator ; ils sont alors soumis à des forces électromagnétiques (**force de Laplace** $\vec{F} = I \cdot \vec{L} \wedge \vec{B}$). Ces forces tendent à faire tourner le rotor de le même sens de rotation du champ tournant.

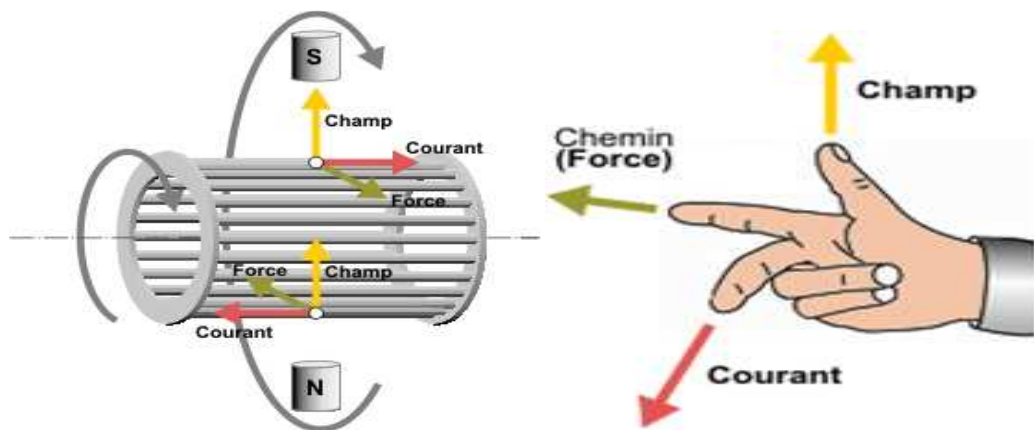


Figure (1-11) : La force produite de l'interaction entre champ magnétique et courant électrique.

I-5 : Le glissement du moteur asynchrone :

Etant donné que le rotor du moteur asynchrone ne peut pas tourner à la vitesse de synchronisme (si non le champ tournant ne coupera pas les conducteurs rotoriques) et pour caractériser la vitesse du rotor, on définit le glissement g , qui est l'écart relatif entre la vitesse de synchronisme N_s et sa vitesse réelle N soit :

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} = \frac{W_r}{W_s}$$

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

N : vitesse mécanique du moteur en tr/min

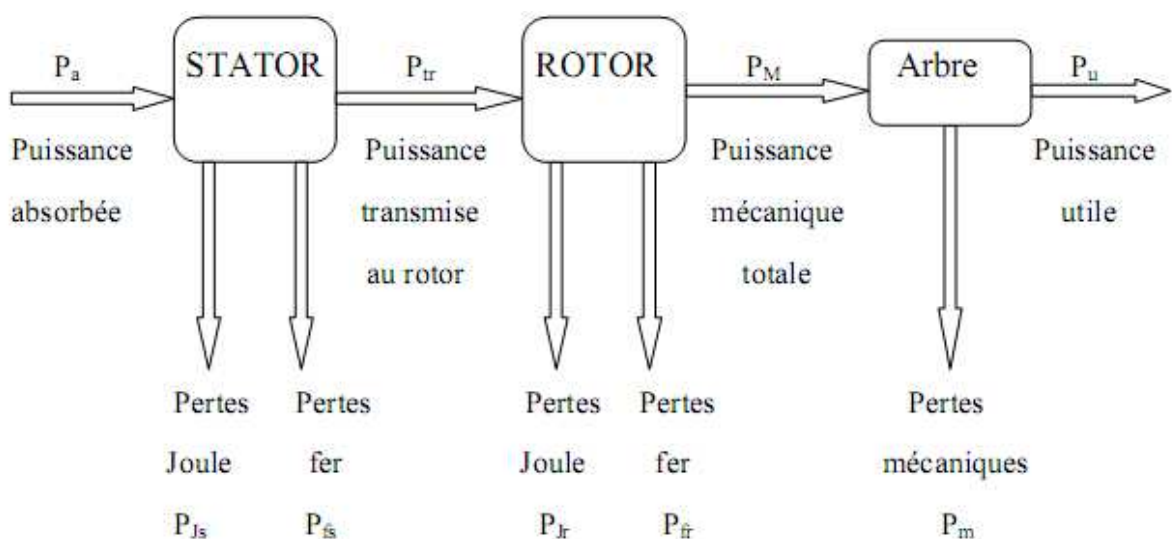
W_s : pulsation des courants inducteurs (courants statoriques)

W_r : pulsation des courants induits (courants rotoriques)

I-6 : Inventaire des pertes et schéma bloc d'un moteur asynchrone :

Il existe des pertes fers (par hystérésis et par courant de Foucault) ainsi que des pertes Joules (Cuivre des enroulements), aussi bien au stator qu'au rotor.

Nous considérons les pertes mécaniques (par ventilation et par frottement) comme indépendantes pour séparer le système mécanique de l'électrique.



Comme la fréquence des courants induits du rotor est faible, nous pouvons négliger les pertes fer rotoriques $p_{fr} = 0$. En effet le rotor tourne presque à la vitesse du champ tournant.

P_{Tr} : est la puissance électromagnétique transmise du stator au rotor par le couple électromagnétique du champ tournant dont la vitesse angulaire est ω_s . [3]

Puissance électrique absorbée P_a :

La puissance électrique P_a absorbée par un stator d'un moteur asynchrone quelque soit le couplage de ses bobines (étoile ou triangle) est :

$$P_a = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi \quad [\text{W}].$$

Avec :

U : Tension composée (entre deux phases) du réseau d'alimentation en volt [V].

I : Courant de ligne en ampère [A].

$\cos\varphi$: Facteur de puissance du moteur.

Pertes Joule au stator P_{js} :

Elles représentent les pertes ohmiques dans l'enroulement statorique, donc c'est l'énergie dissipée sous forme de chaleur.

$$P_{js} = 3 \cdot R_1 \cdot I_1^2$$

Avec :

R_1 : La résistance d'une phase statorique [Ω].

I_1 : Le courant efficace traversant l'enroulement statorique [A].

Les pertes dans le fer :

Il ne se produit aucune perte dans une pièce de fer traversée par un flux qui ne change ni d'intensité, ni de direction. Ainsi, lorsqu'un électro-aimant est excité par un courant continu, il se produit des pertes dans le cuivre de la bobine seulement ; il n'y en a aucune dans le fer du noyau. Par contre, des pertes importantes se produisent dans les parties en fer où le flux varie en grandeur ou en direction. C'est le cas du circuit magnétique des machines à courant alternatif dans lesquelles le flux est alternatif. C'est aussi le cas de l'induit des machines à

courant continu où le flux, bien que constant en intensité, change de sens périodiquement et rapidement. Les pertes dans le fer sont attribuables au phénomène d'hystérésis et aux courants de Pertes par courant de Foucault [1]

Pertes par courant de Foucault :

Ce sont les pertes engendrées par la circulation des courants induits (courant de Foucault) dans la masse du métal qui sont dus à la variation du champ magnétique, ce phénomène a été découvert par le physicien Français Léon Foucault en 1851. Elles sont proportionnelles au carré de la fréquence et de l'amplitude de l'induction. [7]

$$P_F = K_f \cdot f^2 \cdot V \cdot e^2 \cdot B_{max}^2 \quad [\text{W}].$$

Pertes par cycle d'Hystérésis :

L'hystérésis est le retard de l'effet sur la cause. Donc ces pertes sont dues au fait que les domaines du métal présentent une certaine constante de temps avant de s'orienter, il existe un retard entre l'application du champ et l'apparition de l'induction. Elles sont proportionnelles à la fréquence f , et au carré de l'induction maximale. [7]

$$P_H = K_h \cdot f \cdot V \cdot B_{max}^2 \quad [\text{W/Kg}]$$

Avec :

K_f et K_h : sont des constantes caractérisant la tôle.

B_{max} : L'induction maximale [T].

V : Le volume d'une tôle magnétique [m³].

e : L'épaisseur d'une tôle magnétique [mm].

Pertes joule rotoriques :

Elles représentent les pertes dans par effet joule dans le rotor du moteur quelques soit se dernier a bagues ou bobiné, elles sont fonction de la puissance électromagnétique transmise du stator au rotor et du glissement du moteur.

$$P_{jr} = g \cdot P_{tr}$$

Et dans le cas d'un rotor bobiné les pertes joule rotoriques peuvent être calculées comme celles du stator.

$$P_{jr} = 3.R_2.I_2^2$$

Avec

g : glissement du moteur.

R_2 : résistance d'une phase rotorique en $[\Omega]$.

I_2 : Le courant rotorique en [A].

Puissance mécanique totale :

La puissance mécanique c'est la puissance transmise à l'arbre du moteur.

$$P_M = P_{tr} - P_{jr} = (1-g).P_{tr}$$

Avec les pertes fer rotoriques négligées.

Pertes mécaniques :

Elles regroupent les pertes par frottements et par ventilation, et elles dépendent uniquement de la vitesse de rotation du moteur. Puisque la vitesse de rotation du moteur varie peu avec la charge, donc on peut considérer ces pertes comme constantes.

La puissance utile :

C'est la puissance transmise à la charge.

$$P_u = P_M - P_m$$

I-7 : Le couple d'un moteur asynchrone :

Considérons un moteur à cage, alimenté par une source triphasée dont la tension et la fréquence sont fixes. A mesure qu'on augmente la charge mécanique, la vitesse baisse progressivement. Cependant, lorsque le couple atteint la valeur critique appelée point de décrochage, la vitesse chute subitement et le moteur s'arrête.

Il existe donc une relation entre le couple développé par le moteur et sa vitesse. Cette relation n'est pas simple ; c'est pourquoi on préfère la présenter sous forme de courbe plutôt que par une équation.

On montre à la Figure (1-10) une courbe du couple en fonction de la vitesse pour un moteur de 1 kW, de construction conventionnelle. Si T désigne la valeur du couple de pleine charge, on voit que le couple de démarrage vaut $1,5 T$. À mesure que la vitesse croît, le couple diminue, et passe par un minimum avant d'augmenter de nouveau. Il atteint une valeur maximale de $2,5 T$ à 80 % de la vitesse synchrone. Passé ce point, le couple diminue, tandis que la vitesse continue à augmenter. On passe alors par le point d'opération normal (T, n) de pleine charge, avant d'atteindre la vitesse synchrone n_s , où le couple est nul.

Les moteurs de petite puissance (10 kW et moins) atteignent leur couple de décrochage à une vitesse n_d qui est d'environ 80 % de la vitesse synchrone ; les machines de grosse puissance (1000 kW et plus) décrochent à une vitesse de l'ordre de 0,98 n_s .

La forme de la courbe couple/vitesse dépend donc de la grosseur du moteur et de ses caractéristiques particulières. [1]

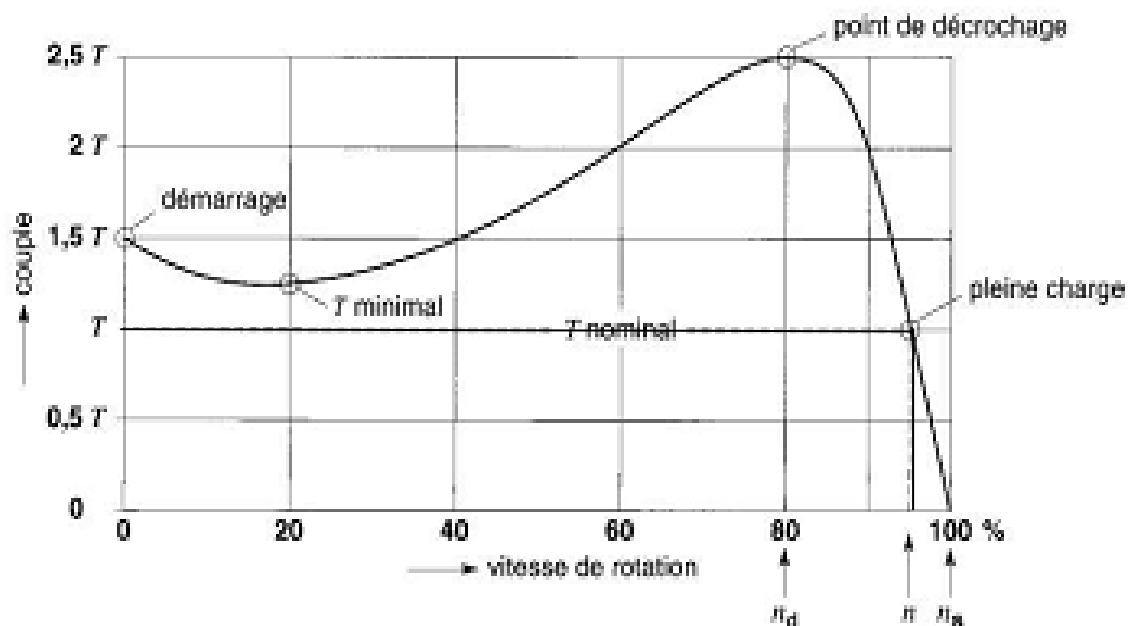


Figure (1-10) : Courbe typique du couple en fonction de la vitesse d'un moteur asynchrone triphasé de 1 kW.

I-8 : Comparaison entre moteur monophasé et moteur triphasé :

Le moteur monophasé et le moteur triphasé sont construits de façon semblable, avec toutefois cette différence importante que, dans le moteur monophasé, on ne se sert généralement que des deux tiers des encoches du stator. Par conséquent, dans ce moteur, les matériaux sont moins bien utilisés. Par ailleurs, à dimensionnement égal, le moteur monophasé a des performances inférieures à celles de son homologue triphasé, et, en particulier, n'a pas de couple de démarrage, ce qui impose de faire appel à un artifice pour le lancer.

A priori, le moteur triphasé s'impose donc, sauf si l'on ne dispose pas d'une source d'alimentation triphasée ou si l'on veut profiter de la plus grande facilité d'installation du moteur monophasé. Actuellement, ces deux raisons ne peuvent apparaître que dans le domaine de la basse tension. Dans ce domaine, la politique des distributeurs d'électricité varie grandement d'un pays à l'autre :

En Amérique du Nord (États-Unis et Canada), la distribution ne se fait pratiquement que par des réseaux monophasés, ce qui amène les utilisateurs à employer systématiquement des moteurs monophasés

En Europe, au contraire, la distribution se fait essentiellement par des réseaux triphasés ; en particulier, en France, les utilisateurs sont raccordés en triphasé dès que leur puissance souscrite avoisine la dizaine de kilowatts. Toutefois, il faut remarquer que, même si les utilisateurs domestiques ont un branchement triphasé, leur installation intérieure est normalement réalisée par des liaisons à deux fils (conducteur de sécurité non compris), ce qui amène les constructeurs d'appareils usuels, du type électroménager par exemple, à n'employer que des moteurs monophasés.

Le moteur monophasé ayant par ailleurs un sens de rotation fixé par construction, c'est-à-dire après fixation de son dispositif de démarrage, présente un avantage pour les appareils mobiles (scies de chantier par exemple). Il évite, en effet, d'avoir, à chaque branchement, à rechercher le sens adéquat de rotation des phases.

I-9 : Démarrage des moteurs monophasés :

Dans le domaine de basse tension et de puissance inférieure à quelques kilowatts, le procédé de démarrage des moteurs monophasés le plus employé est celui du **condensateur auxiliaire** dans la partie du stator non utilisée par l'enroulement principal, on insère un enroulement auxiliaire, que l'on met en série avec un condensateur, le tout étant alimenté par le réseau. Du déphasage entre les courants des deux enroulements, principal et auxiliaire, résulte un champ tournant elliptique et, par suite, un couple de démarrage. Ce procédé de démarrage nécessite de fortes valeurs de capacité (environ 50 μF pour un moteur de 600 W) qui, en pratique, ne peuvent être obtenues que par des condensateurs électrochimiques. Ces éléments, présentant un facteur de pertes élevé (de l'ordre de 10 %), ne sont pas laissés sous tension permanente ; ils sont déconnectés automatiquement, après le démarrage, par un relais mis sur l'arbre et sensible à la force centrifuge, ou par un relais chronométrique.

L'enroulement auxiliaire n'ayant, dans ces conditions, qu'une durée d'utilisation très faible, ne subit pas de fortes contraintes thermiques et peut être réalisé en fil fin.

Pour des moteurs ayant une puissance nominale réduite (100 à 300 W par exemple), dont le démarrage n'exige pas de capacités supérieures à quelques microfarads, on utilise parfois un **condensateur branché en permanence**. Dans ce cas, la capacité du condensateur et les caractéristiques de l'enroulement auxiliaire peuvent être déterminées de façon que les performances du moteur à son régime nominal (mais à lui seul) soient équivalentes à celles de son homologue triphasé.

On peut, également pour des moteurs de puissance réduite, éviter l'emploi d'un condensateur en utilisant un enroulement auxiliaire, conçu de telle sorte que le courant qui le traverse ait un déphasage important (de l'ordre de 30° par exemple) par rapport au courant de l'enroulement principal. Le plus souvent, ce déphasage est obtenu sans artifice externe, en jouant sur la section du fil et le nombre de tours de l'enroulement auxiliaire.

Cet enroulement doit être déconnecté après démarrage, son échauffement devenant rapidement excessif.

Une autre solution, utilisable pour démarrer un moteur monophasé, consiste à utiliser un moteur pilote, c'est-à-dire un moteur auxiliaire doté de trois enroulements couplés en étoile dont la puissance est faible vis-à-vis de celle du moteur principal. On lance tout d'abord ce petit moteur, par exemple à la main ; une fois mis en rotation, il délivre à ses

bornes un système de tensions triphasées à peu près équilibrées, qui sert de source pour le démarrage du moteur principal (lequel doit comporter également trois enroulements en étoile). À son tour d'ailleurs, celui-ci peut servir de source d'alimentation pour un moteur plus puissant, et ainsi de suite.

En pratique, avec la généralisation des réseaux d'alimentation triphasés, cette solution est devenue obsolète. [2]

I-10 : Classification des moteurs asynchrone selon les caractéristiques électriques et mécaniques

Lorsqu'on veut utiliser un moteur asynchrone triphasé pour une application particulière, on se rend compte que plusieurs types de moteurs remplissent les exigences de la charge. Il faut donc faire un choix. Le problème est généralement simplifié du fait que le fabricant du tour, du ventilateur, de la pompe, etc. ., indique la catégorie de moteur convenant le mieux à la charge à entraîner. Il est cependant très utile de connaître les caractéristiques de construction et d'utilisation des différents types de moteurs asynchrones triphasés, car ce sont elles qui en déterminent le choix. [1]

Cette classification se base sur la variation de la Résistance et 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. [6]

Nous ne donnons ici que les principales catégories selon la classification de la NEMA (National Electrical Manufacturers Association) :

I-10-a : moteur a couple normal et a courant de démarrage normal (CEMA classe A) :

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

I-10-b : Moteurs à faible courant et à couple de démarrages normal (CEMA classe B) :

La grande majorité des moteurs asynchrones appartient à ce groupe. Ces moteurs, d'usage général, peuvent entraîner des ventilateurs, des pompes centrifuges, des machines-outils, etc. Ses caractéristiques découlent de l'emploi d'encoches profondes et étroites. Lors du démarrage, la réactance est plus forte dans le bas du conducteur, ce qui en réduit la surface active et augmente sa résistance. Le courant se trouve ainsi limité et on peut, dans bien des cas, démarrer ce moteur à pleine tension, c'est un avantage par rapport au moteur de classe A. [1] [6]

I-10-c : Moteurs à faible courant et à couple de démarrage élevé (NEMA classe C) :

Ces moteurs sont utilisés dans les cas où le démarrage est difficile ou d'une durée plutôt longue. Les pompes et les compresseurs à piston qui démarrent en charge doivent être entraînés par de tels moteurs. Ces moteurs comportent, en général, un rotor spécial à double cage. Le fonctionnement du rotor à double cage (moteur classe C) est basé sur le fait que la fréquence du courant rotorique diminue à mesure que la vitesse du moteur croît, et que la réactance inductive est plus grande pour un conducteur logé profondément dans l'acier que pour un autre placé près de la surface du rotor). De plus, à cause de sa petite section, la résistance de la cage 1 est sensiblement plus grande que celle de la cage 2.

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

On peut constater que la valeur de la résistance effective du rotor est élevée au démarrage et basse en régime normal.

I-10-d : Moteurs à glissement élevé (NEMA classe D) :

En plus de développer un couple de démarrage très élevé, ces moteurs ont un bas courant de démarrage. Ainsi, les moteurs qui entraînent des charges à grande inertie (comme un séchoir centrifuge) démarrent lentement ; leur courant de démarrage doit donc être assez faible pour éviter l'échauffement excessif des bobinages. La vitesse nominale de ces moteurs est d'environ 10 % plus faible que leur vitesse synchrone. Cette caractéristique est parfois mise à profit pour l'entraînement de machines telles que cisailles, poinçonneuses et presses. Celles-

ci comportent un volant qui emmagasine de l'énergie mécanique et la restitue lorsque de fortes surcharges sont brusquement appliquées. Ces moteurs sont aussi employés avec des appareils de levage. Cependant, dans tous les cas, leur régime de charge doit être intermittent afin de prévenir tout échauffement excessif. La cage d'écureuil de ces moteurs est généralement en laiton. [1]

I-10-e : moteur à faible couple et faible courant de démarrage (NEMA classe F) :

Les conducteurs du rotor d'un moteur de classe F sont placés loin de l'entrefer. au démarrage, la réactance est grande et le courant est faible ; mais le circuit est très inductif et le couple développé est faible. [6]

Le graphique de la Figure (1-11) permet de comparer les caractéristiques couple-vitesse de ces différents moteurs. Les détails de construction de leurs rotors y sont également indiqués. Remarquer que les différentes caractéristiques sont obtenues surtout par des changements effectués sur le rotor. Ainsi, plus la résistance de la cage d'écureuil est élevée, plus le couple de démarrage est grand et plus la vitesse nominale est basse. L'emploi du laiton au lieu du cuivre dans le rotor a pour effet d'augmenter sa résistance et, par conséquent, son couple. Par contre, plus la résistance du rotor est considérable, plus les pertes dans celui-ci sont grandes en régime normal, et plus le rotor s'échauffe. [1]

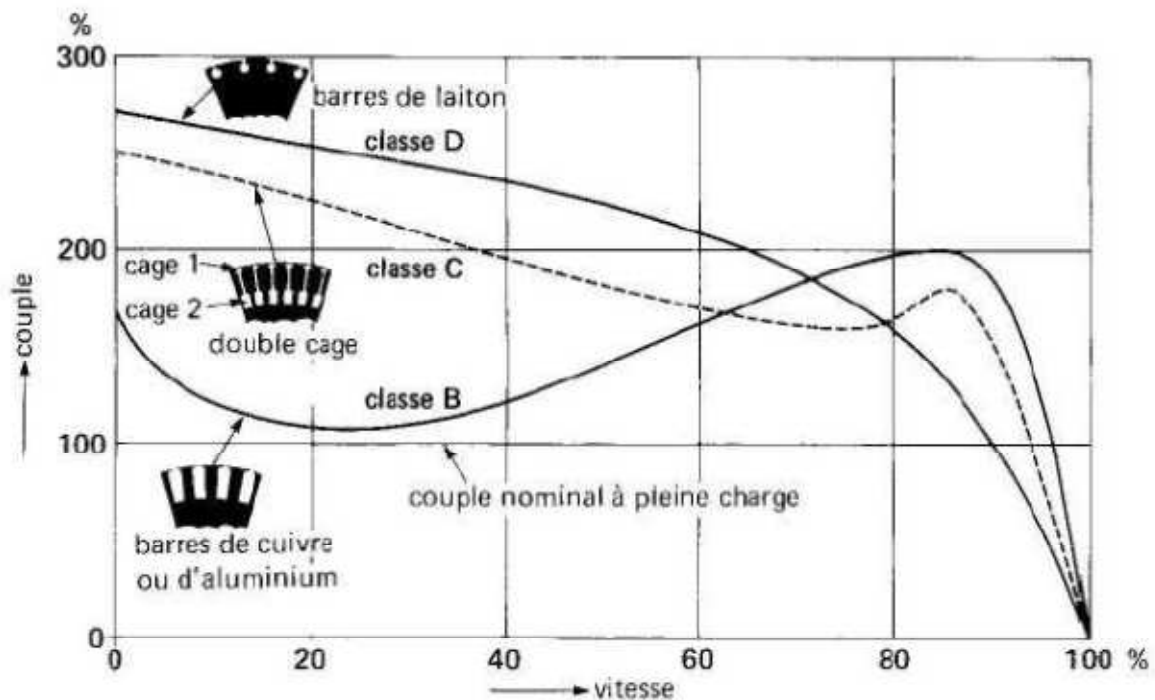


Figure (1-11) : caractéristique couple-vitesse des différents moteurs.

I-11 : Démarrage des moteurs asynchrone :

Lors du démarrage d'un moteur asynchrone, le courant peut atteindre 10 fois le courant nominal de la machine. Afin d'éviter ce pic de courant plusieurs solutions techniques sont proposées.

I-11-1 : Démarrage sous tension réduite :

Plusieurs dispositifs permettent de réduire la tension aux bornes des enroulements du stator pendant la durée du démarrage ce qui est un moyen de limiter l'intensité du courant de démarrage.

I-11-1-a : Démarrage étoile - triangle :

Il nécessite la sortie des 6 bornes du moteur et n'est envisageable que pour des petites puissances à cause de la brutalité des régimes transitoires lors du changement de couplage. C'est un procédé extrêmement simple et peu coûteux. Le couplage nominal de la machine doit être "triangle". [4]

I-11-1-b : Insertion de résistances ou inductances statoriques :

Cette méthode permet d'avoir plusieurs crans de démarrage. Les résistances sont de type métallique ou électrolytique à variation continue. Cette opération peut être effectuée progressivement par un opérateur à l'aide d'un rhéostat de démarrage. Cette solution est de plus en plus abandonnée au profit de solutions électroniques d'un coût voisin, d'un volume moindre et d'un rendement bien meilleur.

I-11-1-c : Démarrage par autotransformateur:

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

I-11-2 : démarrage rotorique :

Pour les moteurs à rotor bobiné muni de contacts glissants (bagues et balais), on a la possibilité d'insérer, lors d'un démarrage, des résistances dans le circuit rotorique. Cette solution permet à la fois de diminuer le courant de démarrage et d'augmenter le couple moteur. Les résistances sont de type métallique ou électrolytique à variation continue.

I-12 : Freinage des moteurs asynchrones

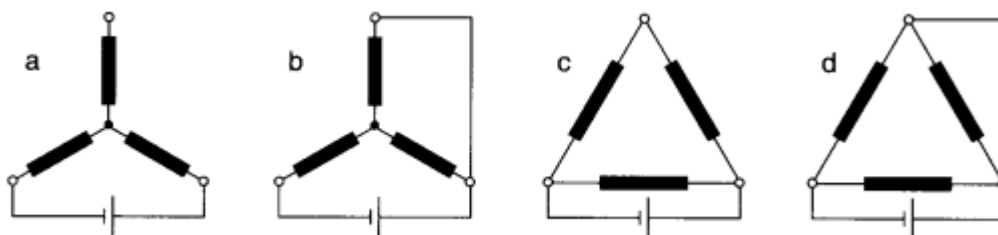
I-12-a : Freinage par contre courant :

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

Les sollicitations thermiques, pendant le freinage, sont 3 fois plus importantes que pour une mise en Vitesse. [4]

I-12-b : Freinage par injection de courant continu :

C'est la méthode la plus efficace pour freiner la machine, dans ce mode de freinage, le moteur asynchrone est couplé au réseau et le freinage est obtenu par coupure de la tension alternative et application d'une tension continue au stator. Quatre couplages des enroulements sur la tension continue peuvent être réalisés. La tension continue d'alimentation statorique crée un champ statique dans la machine qui s'oppose au mouvement, cette tension est généralement fournie par une cellule de redresseur branchée sur le réseau. Les sollicitations thermiques sont approximativement 3 fois moins élevées que pour le mode de freinage par contre-courant. Le contrôle de l'intensité du courant continu permet de contrôler le freinage. [4]



Couplage des enroulements du moteur sur la tension continue.

I-12- c : Freinage en génératrice asynchrone (hyper synchrone) :

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

I-12-d : Freinage mécanique :

Des freins électromagnétiques (excitation en courant continu ou en courant alternatif) peuvent être montés à l'arrière des moteurs. Ils peuvent venir en complément d'un freinage électrique pour l'arrêt complet du moteur et son maintien en position sans alimentation. Ces freins sont toujours à manque de courant c'est à dire que le freinage se fait en l'absence d'alimentation du frein. [4]

I-13 : Protection des moteurs électriques :**I-13-1 : Les relais à maximum de courant :**

Ces dispositifs sont composés d'une partie fixe, armature mobile et d'une bobine.

Un mécanisme déclenchement est actionné par l'armature mobile, cette armature reliée en série avec l'une des phases du récepteur, est parcourue par le courant à contrôler.

En fonctionnement nominal, cette armature reste immobile, lorsque le courant qui l traverse dépasse la valeur de réglage, il ya attraction de cette armature sous l'effet du champ magnétique produit par la bobine provoquant la coupure de l'alimentation.

I-13-2 : Définition de l'échauffement :

L'échauffement s'explique par l'augmentation anormale de la température à l'intérieur du moteur, cela est dû aux différentes pertes (pertes par effet joule, par courant de Foucault et pertes mécaniques) et l'effet de surcharge.

I-13-3 : Dispositif de protection contre l'échauffement :

Pour protéger le moteur contre l'échauffement, on utilise des détecteurs de températures. En cas d'échauffement anormal, ces détecteurs signalent le problème via un autre système (visuel, sonore.....). On utilise aussi les mêmes dispositifs que pour la protection contre la surcharge, car cette dernière provoque aussi l'échauffement

I-13-3-a : Les relais à sondes thermistances CTP :

Ce dispositif est composé d'une ou de plusieurs sondes thermistance à coefficient de température positif (CTP). Ce sont des résistances qui augmentent brutalement quand la température atteint un seuil appelé : température nominale de fonctionnement (TNF).

Un dispositif électrique mesure en permanence les résistances des sondes qui lui sont associées.

I-13-3-b : Les relais thermiques de surcharge à bilame :

Leur principe de fonctionnement repose sur la déformation de ses bilames chauffés par les courants de surcharges qui les traversent, cette déformation provoque le déclenchement du dispositif. Ces relais protègent les moteurs contre les surcharges, mais ils doivent admettre la surcharge temporaire due au démarrage. Il est donc nécessaire de disposer de relais adaptés à la durée de démarrage.[9]

Conclusion :

Etant donné que notre travail consiste à dimensionner un moteur asynchrone a haut rendement, nous avons donné dans ce premier chapitre quelques généralités sur ce moteur comme sa constitution, son principe de fonctionnement, ses différents types, son bilan de puissance ainsi que la classification de ses moteurs selon les caractéristiques techniques et mécaniques. Comme on a aussi donné quelques notions sur le moteur asynchrone monophasé concernant son démarcage et sa comparaison avec le moteur triphasé. Et enfin, par raison de sécurité on a illustré les différents types de démarrage et de freinage des moteurs asynchrones.

La maîtrise de ces notions de base nous aidera beaucoup a calculer un moteur a haut rendement et ce dernier fera l'objet du prochain chapitre.



Chapitre II

**Aperçu théorique sur les moteurs
à haut rendement**

Introduction

Un moteur électrique à courant alternatif est une machine qui transforme de l'énergie électrique en énergie mécanique, cette transformation de l'énergie est caractérisée par un facteur appelé rendement (η) qui est donné par le rapport entre ce que le moteur nous offre comme puissance mécanique utile et ce qu'il absorbe comme puissance électrique ($\eta = \frac{P_u}{P_a}$).

Ce facteur ne peut jamais atteindre l'unité, c'est à dire qu'une machine ne pourra jamais transformer toute la puissance absorbée en puissance utile, la différence entre ces deux puissances, sans doute est une perte et donc un bon moteur ou bien un moteur à haut rendement c'est celui qui transforme le maximum de la puissance qu'il absorbe en puissance utile et transforme le minimum de cette puissance en pertes, soit par échauffement (pertes Joule et pertes fer), ou bien par frottement (pertes mécaniques).

II-1 : Moteurs à induction à haut rendement :

Récemment, à la suite de la crise énergétique, une nouvelle génération de moteurs, appelés moteurs à haut rendement, a fait son apparition. Comme leur appellation l'indique, ces moteurs ont un rendement et un facteur de puissance supérieur à ceux des moteurs équivalents amortis par les économies d'énergie réalisées lorsqu'ils fonctionnent pendant de longues périodes et à des charges se rapprochant de la pleine charge.

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

II-2 : spécificités des machines à induction à haut rendement :**II-2-a : caractéristiques techniques :**

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

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

Les performances attendues du moteur :

1. La puissance et le facteur de service.
2. L'échauffement et la classe d'isolation.
3. La tension d'alimentation.
4. Le courant de démarrage maximal.
5. Le couple de démarrage minimal.
6. Le couple de décrochage (minimal ou maximal).
7. La plage des facteurs de puissance.
8. La plage des rendements.

Les conditions d'environnements du moteur :

1. La température ambiante.
2. L'altitude.
3. Le taux d'humidité.
4. Le degré d'abrasion.
5. Le degré de sécurité.

La protection nécessaire ainsi que toute option supplémentaire :

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

II-2-b : La tension d'alimentation :

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

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

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

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

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

II-2-c : La vitesse :

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

II-2-d : Le couple :

Le couple mesure la force servant à produire une rotation. Les dimensions du moteur sont proportionnelles à son couple et non à sa puissance en hp (puissance=couple x vitesses). Ainsi, un moteur à couple élevé est plus gros et coûte habituellement plus cher. Les moteurs à induction sont classés selon leur couple (modèles A, B, C, D et F). Le modèle C est le modèle de notre étude.

Les modèles C et D ont un couple de démarrage élevé.

Le glissement est plus élevé dans le cas du modèle D que dans le cas des modèles B ou C, puisque le modèle D, au couple à pleine charge, fonctionne à un pourcentage moindre de la vitesse synchrone.

II-3 : caractéristiques des moteurs à haut rendement :

Les moteurs à haut rendement ont la même construction que les moteurs classiques mais ils se distinguent par :

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

Pour un coût supplémentaire de 20 à 30%, les moteurs à haut rendement, ont un rendement meilleur de 2 à 6 %, ce qui représente des économies d'énergie significatives.

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

1. La fiabilité augmente.
2. Les coûts de maintenance et l'arrêt sont réduits.

3. La capacité de résistance aux surcharges s'améliore.
4. La résistance aux conditions de fonctionnement anormales – sous et sur tension, aux phases non équilibrées, aux variations de la forme de la puissance et du courant (par exemple les harmoniques), etc. s'améliore.
5. Le facteur de puissance s'améliore.

II-4 : avantage d'utilisation des moteurs à haut rendement :

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

1. Ces moteurs à haut rendement produisent la même puissance de sortie, mais avec une puissance d'entrée électrique moindre que les moteurs standard
2. Fiabilité et rendement suffisamment élevé.
3. Ces moteurs à haut rendement sont disponibles aux différentes puissances et avec différentes vitesses (750, 950, 1500, et de 3000 t /mn) à 220/380 V.
4. L'économie à employer un moteur à haut rendement est beaucoup plus grande que son coût initial.
5. Ces moteurs à haut rendement ont typiquement 30-50% de pertes inférieures que les moteurs standards équivalents.
6. Panne réduite en raison de leur conception et construction.
7. Donner beaucoup d'années de service valable au-delà de la période de remboursement initiale.
8. L'épargne significative en raison du choix, achat, fonctionnement efficace et correct du moteur pour une telle application.
9. Réduction de la sensibilité du facteur de puissance et le rendement aux fluctuations de tension et de charge. [6]

II-5 : Répartition et classes de rendement des moteurs électriques :

Le terme « rendement » décrit le niveau d'efficacité avec lequel un moteur électrique transforme l'énergie électrique en énergie mécanique. Jusqu'à présent, en Europe, les moteurs triphasés basse tension étaient classés et commercialisés selon trois classes de rendement (EFF3, EFF2 et EFF1), sur la base d'un accord volontaire entre les fabricants de moteurs et la Commission Européenne. Ce système de classification a fait ses preuves et a été adapté dans de nombreux pays à travers le monde. Cependant, d'autres pays ont également développé leurs propres systèmes nationaux, qui sont très différents du système

européen. C'est la raison qui a conduit les fabricants européens de moteurs du CEMEP (Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics, Comité européen des constructeurs de machines électriques et d'électronique de puissance) à développer une norme de rendement énergétique pour la Commission électrotechnique internationale (CEI).

L'objectif de cette démarche consistait à créer une norme internationale commune remplaçant tous les différents systèmes nationaux. Ce projet a été mis en œuvre avec succès et son objectif a été atteint. La nouvelle norme internationale CEI 60034-30:2008 définit les classes de rendement IE1, IE2 et IE3 pour les moteurs triphasés. Elle établit une référence internationale commune pour la conception et la classification des moteurs, ainsi que pour les activités législatives nationales.

Dans le même temps, la CEI a développé des méthodes améliorées pour déterminer les niveaux de rendement de ces moteurs. Les normes internationales CEI 60034-30:2008 (classification) et CEI 60034-2-1:2007 (méthodes de mesure) ont été adoptées en tant que normes européennes, sans modifications, sous les références EN 60034-30:2009 et EN 60034-2-1:2007. [8]

II-6 : Classes de rendement des moteurs précédemment en vigueur en Europe :

En 1998, dans le cadre de l'accord volontaire établi entre le Comité européen des constructeurs de machines électriques et d'électronique de puissance (CEMEP) et la Commission Européenne, trois classes de rendement ont été définies pour la plage de puissance comprise entre 1,1 kW et 90 kW :

- **EFF3 = Moteurs à bas niveau de rendement.**
- **EFF2 = Moteurs à niveau de rendement amélioré.**
- **EFF1 = Moteurs à haut niveau de rendement.** [8]

II-7 : Nouvelle norme internationale relative aux classes de rendement des moteurs :

Cet accord volontaire a depuis lors expiré. Cependant, les classes de rendement font toujours l'objet d'une marque déposée européenne. L'utilisation des classes de rendement repose sur un accord contractuel de licence entre les participants à l'accord volontaire (fabricants de moteurs) et le détenteur de la licence (CEMEP/Gimélec).

La norme CEI 60034-30 :2008 définit les classes de rendement des moteurs triphasés basse tension avec une plage de puissance comprise entre 0,75 kW et 375

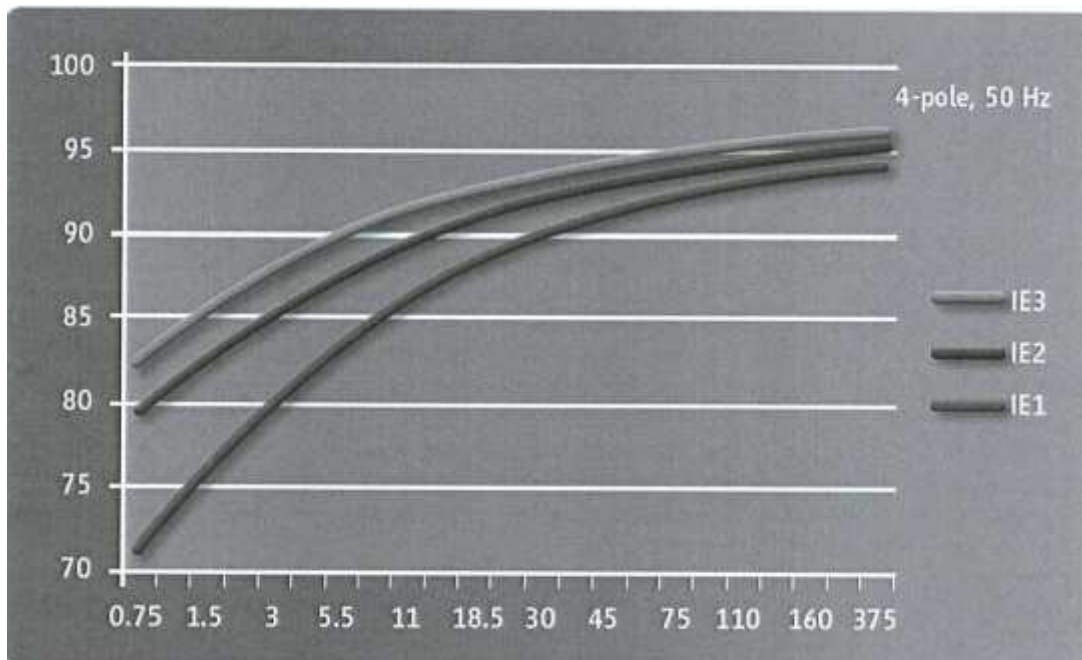
kW. L'abréviation « IE » fait référence à l'expression « International Efficiency» (rendement international) et est associé à un chiffre :

- **IE1 = Rendement standard**

- **IE2 = Haut rendement**

- **IE3 = Rendement « Premium »**

La mesure des niveaux de rendement s'effectue conformément à la procédure décrite dans la norme CEI 60034-2-1:2007.



Figure(1) : Courbe du rendement en fonction de la puissance selon la norme internationale. [8]

II-8 : Nouvelles méthodes de mesure CEI

Les nouvelles méthodes de mesure selon la norme CEI 60034-2-1 :2007 Méthodes normalisées pour la détermination des pertes et du rendement à partir d'essais s'appliquent à tous les moteurs décrits par la norme CEI 60034-1. Ces méthodes contribuent à générer des données offrant une plus grande exactitude concernant les pertes supplémentaires en charge. La nouvelle norme remplace la norme européenne EN 60034-2 :1996 précédentes, arrivées à expiration le 1er novembre 2010. Les moteurs portant

le marquage du nouveau système de classes de rendement (code IE) doivent faire l'objet de mesures conformément aux nouvelles méthodes de mesure. [8]

II-9 : Comparaison des classes de rendement anciennes et nouvelles :

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

La principale différence entre les classes de rendement (EFF et IE) réside dans la méthode utilisée pour les déterminer. En comparant directement un même moteur, le rendement déterminé selon la nouvelle méthode de mesure est censé être inférieur. Par exemple, un moteur EFF1 de 11 kW à 4 pôles présentant un rendement de 91,0 % est physiquement identique à un moteur IE2 présentant un rendement de 89,8 %.

II-10 : Domaine d'application du nouveau système de classes de rendement CEI:

Le système de classes de rendement spécifié par la norme CEI 60034-30 est valide pour les moteurs à induction triphasés à cage basse tension, présentant les spécifications suivantes :

- Tension nominale jusqu'à 1 000 V
- Puissance nominale de sortie de 0,75 à 375 kW
- 2, 4 ou 6 pôles
- Assignés sur la base d'un fonctionnement continu (S1) ou périodique intermittent(S3) avec un facteur de durée cyclique de 80 % ou plus
- Destinés à être alimentés directement à partir du réseau industriel
- Présentant des conditions de fonctionnement assignées conforme à la norme CEI 60034-1 (température, altitude d'installation, etc.).

Les moteurs avec brides, à pattes et/ou avec arbres ayant des dimensions mécaniques différentes de celles fixées par la norme CEI 60072-1 sont couverts par cette norme.

Les moteurs avec réducteurs et les moteurs freins sont couverts par cette norme bien que des arbres et brides spécifiques peuvent être utilisés dans de tels moteurs.

Certains moteurs couverts par cette norme peuvent être équipés de dispositifs auxiliaires. Cependant, lorsque ces dispositifs auxiliaires ne font pas partie intégrante de la construction du moteur, la détermination de la classe de rendement selon toutes les combinaisons possibles n'est pas réalisable. La détermination du rendement de tels moteurs standard modifiés doit être réalisée sur des moteurs basiques, sans dispositif auxiliaire installé.

Sont exclus du système de classification :

- Les moteurs destinés à un fonctionnement de courte durée (S2) ou commuté

($S3 < 80 \% S10$).

- Les moteurs spécialement conçus pour les applications à vitesse variable selon la norme CEI 60034-25.

- Les moteurs présentant une conception hautement spécialisée, personnalisée pour une application spécifique de telle façon qu'il est impossible de mesurer séparément le rendement du moteur (par exemple, les moteurs de pompes à rotor humide). [8]

Classes de rendement IE1, IE2 et IE3

P_n in kW	IE1, 50 Hz			IE2, 50 Hz			IE3, 50 Hz		
	Number of Poles								
	2	4	6	2	4	6	7	8	6
0.75	72.1	72.1	70.0	77.4	79.6	79.9	80.7	82.5	78.9
1.1	75.0	75.0	72.9	79.6	81.4	78.1	82.7	84.1	81.0
1.5	77.2	77.2	75.2	81.3	82.8	79.8	84.2	85.3	82.5
2.2	79.7	79.7	77.7	83.2	84.3	81.8	85.9	86.7	84.3
3	81.5	81.5	79.7	84.6	85.5	83.3	87.1	87.7	85.6
4	83.1	83.1	81.4	85.8	86.6	84.6	88.1	88.6	86.8
5.5	84.7	84.7	83.1	87.0	87.7	86.0	89.2	89.6	88.0
7.5	86.0	86.0	84.7	88.1	88.7	87.2	90.1	90.4	89.1
11	87.6	87.6	86.4	89.4	89.8	88.7	91.2	91.4	90.3
15	88.7	88.7	87.7	90.3	90.6	89.7	91.9	92.1	91.2
20.5	89.3	89.3	88.6	90.9	91.2	90.4	92.4	92.6	91.7
27	89.9	89.9	89.2	91.3	91.6	90.9	92.7	93.0	92.2
37	90.7	90.7	90.2	92.0	92.3	91.7	93.3	93.6	92.9
48	91.2	91.2	90.8	92.5	92.7	92.2	93.7	93.9	93.3
63	91.7	91.7	91.4	92.9	93.1	92.7	94.0	94.2	93.7
80	92.1	92.1	91.9	93.2	93.5	93.1	94.3	94.6	94.1
100	92.7	92.7	92.6	93.8	94.0	93.7	94.7	95.0	94.6
130	93.0	93.0	92.9	94.1	94.2	94.0	95.0	95.2	94.9
170	93.3	93.3	93.3	94.3	94.5	94.3	95.2	95.4	95.1
220	93.5	93.5	93.5	94.6	94.7	94.6	95.4	95.6	95.4
280	93.8	93.8	93.8	94.8	94.9	94.8	95.6	95.8	95.6
375-750	94.0	94.0	94.0	95.0	95.1	95.0	95.8	96.0	95.8

Tableau 2 : classe de rendement pour les moteurs 50Hz selon la norme CIE. [8]

P_g in kW	IE1, 60 Hz			IE2, 60 Hz			IE3, 60 Hz		
	Number of Poles								
	2	4	6	2	4	6	2	4	6
0.75	77.0	78.0	73.0	75.5	82.5	80.0	77.0	85.5	82.5
1.1	78.5	79.0	75.0	82.5	84.0	85.5	84.0	86.5	87.5
1.5	81.0	81.5	77.0	84.0	84.0	86.5	85.5	86.5	88.5
2.2	81.5	83.0	78.5	85.5	87.5	87.5	86.5	89.5	89.5
3.7	84.5	85.0	83.5	87.5	87.5	87.5	88.5	89.5	89.5
5.5	86.0	87.0	85.0	88.5	89.5	89.5	89.5	91.7	91.0
7.5	87.5	87.5	86.0	89.5	89.5	89.5	90.2	91.7	91.0
11	87.5	88.5	89.0	90.2	91.0	90.2	91.0	92.4	91.7
15	88.5	89.5	89.5	90.2	91.0	90.2	91.0	93.0	91.7
18.5	89.5	90.5	90.2	91.0	92.4	91.7	91.7	93.6	93.0
22	89.5	91.0	91.0	91.0	92.4	91.7	91.7	93.6	93.0
30	90.2	91.7	91.7	91.7	93.0	93.0	92.4	94.1	94.1
37	91.5	92.4	91.7	92.4	93.0	93.0	93.0	94.5	94.1
45	91.7	93.0	91.7	93.0	93.6	93.6	93.6	95.0	94.5
55	92.4	93.0	92.1	93.0	94.1	93.6	93.6	95.4	94.5
75	93.0	93.2	93.0	93.6	94.5	94.1	94.1	95.4	95.0
90	93.0	93.2	93.0	94.5	94.5	94.1	95.0	95.4	95.0
110	93.0	93.5	94.1	94.5	95.0	95.0	95.0	95.8	95.8
150	94.1	94.5	94.1	95.0	95.0	95.0	95.4	96.2	95.8
185 - 375	94.1	94.5	94.1	95.4	95.4	95.0	95.8	96.2	95.8

Tableau 3 : classe de rendement pour les moteurs 60Hz selon la norme CIE. [8]

II-11 : Marquage de rendement sur le moteur

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

Le Comité CEMEP considère qu'il est suffisant d'indiquer sur la plaque signalétique le niveau de rendement à 100 % de la charge nominale uniquement, comme décrit dans la norme CEI 60034-1. Il considère également qu'il est suffisant d'indiquer le niveau de rendement à 75 % et 50 % de la charge nominale dans la documentation du produit uniquement. Le Comité CEMEP a sollicité des clarifications de la part de la Commission Européenne. Notez que le texte actuel de la réglementation reste valide jusqu'à nouvel ordre. [8]

II-12 : Facteurs influents sur le rendement des moteurs électriques :

Il y a un nombre de facteurs relatifs au fonctionnement et à l'entretien du moteur qui ont un grand effet sur son rendement. Dans le but de maintenir et d'améliorer le rendement de fonctionnement du moteur, plusieurs facteurs peuvent être utilisés.

Les techniques de commande du moteur, la qualité du système d'alimentation, le réseau de distribution, la taille des moteurs électriques, les moyens mécaniques de transmission, les problèmes d'entretien, cycles de gestion de charge... etc.

II-12-a : Qualité d'alimentation en énergie :

Les moteurs électriques et en particulier moteurs à induction, sont conçus pour fonctionner dans des conditions optimales, une fois alimentés par des formes d'ondes sinusoïdales triphasées symétriques avec la valeur de tension nominale. Les changements de ces conditions idéales peuvent causer la détérioration significative du rendement et une réduction de la vie de moteur ; exemple des alimentations à travers des convertisseurs ou les formes d'ondes qui sont riches en harmoniques. [6]

II-12-b : Charge du moteur :

La charge du moteur peut avoir aussi un effet significatif sur son rendement. Un moteur chargé à plus de 50 % a un rendement relativement stable. A charge plus faible, le rendement diminue considérablement. Les faibles rendements sont dus aux charges inadaptées (les sur charges) ou à un fonctionnement à vide des moteurs ; de telles conditions doivent être évitées. [6]

II-12-c : Maintenance du moteur :

Les moteurs fonctionnent plus efficacement, durent plus longtemps et nécessitent moins d'attention s'ils sont nettoyés, refroidis, séchés et lubrifiés correctement. Les moteurs installés dans un environnement sévère et exposés à une grande humidité et à un lavage fréquent ont une durée de vie largement au dessous de la moyenne. Des corps étrangers ne doivent pas bloquer les branchements corrects font prolonger la durée de vie du moteur et maintiennent un rendement optimal. [6]

II-12-d : Plage d'utilisation des moteurs :

D'une manière générale le rendement (η) des moteurs électriques prend une valeur maximal pour : $0,6 I_n \leq I \leq 1,0 I_n$, car dans cette plage on considère, que le rapport des pertes à la puissance consommée est minimale. En dehors de cette plage, les pertes devenant beaucoup plus prépondérantes, entraînent la croissance de ce rapport donc une réduction du rendement (η).

II-13 : Économie d'énergie par les moteurs à induction à haut rendement :

L'adoption de systèmes moteurs à haut rendement énergétique permettrait de réduire la consommation annuelle d'électricité en Europe de 202 milliards de KWh, soit une réduction annuelle de 10 milliards d'euros en coûts de fonctionnement pour l'industrie. Cela présenterait également les avantages suivants :

1. Une économie annuelle de 5 à 10 milliards d'euros de coûts de fonctionnement pour l'industrie européenne, grâce à une réduction de la maintenance et à une amélioration des opérations.
2. Une réduction de 45 GW des besoins en nouvelles capacités installées pour les centrales électriques au cours des 20 prochaines années.

3. Une réduction de 6% des importations d'énergie de l'Europe. Pour atteindre ce résultat, un ensemble de mesures s'étalant sur 4 ans et proposé. Celui-ci prévoit d'investir 400 millions d'euros dans le marché des systèmes entraînés par un moteur. [6]

II-14 : Economies réalisées par l'amélioration du facteur de puissance :

Le facteur de puissance d'un moteur à haut rendement peut être jusqu'à 7% supérieur à celui d'un moteur standard. Cette différence peut entraîner des économies appréciables puisqu'elle a des répercussions sur le facteur de puissance de l'ensemble.

Puisque certaines entreprises affichent un haut facteur de puissance, nous ne calculerons pas ici les économies réalisées grâce à l'amélioration du facteur de puissance. On peut facilement calculer les économies annuelles d'électricité en utilisant l'équation :

Economies annuelles totales = économies réalisées par la réduction de la consommation d'énergie + économies réalisées par la réduction de la demande + économies réalisées par l'amélioration du facteur de puissance. [6]

II-15 : Analyse technico-économique :

Les moteurs à haut rendement généralement coûtent plus cher que les moteurs standards compte tenu de leurs caractéristiques particulières. Dans la plupart des cas, leur prix d'achat est vite recouvert par les économies qu'ils permettent de réaliser. L'importance de ces économies par rapport au prix d'achat détermine la rentabilité de l'installation du moteur à haut rendement.

L'analyse différentielle d'un moteur à haut rendement et d'un moteur standard permet d'illustrer ces méthodes en mesurant la différence entre les deux types de moteurs au chapitre du prix d'achat et du total des KW et des KWh utilisés.

Pour illustrer, l'épargne d'énergie on utilise les moteurs à induction à haut rendement avec une meilleure qualité d'amélioration en énergie électrique, deux types de moteurs sont analysés dans cette partie de notre travail, le premier classique, et le deuxième est à haut rendement, sachant que le prix national moyen de l'énergie est de 4 DA/KWh. La période annuelle moyenne d'utilisation est de 6000h, à 80% de la charge, ce qui est dans la gamme du rendement maximum. Le tableau ci-dessous montre les économies annuelles relatives d'énergie, pour deux moteurs à induction classique et à haut rendement qui sont utilisés dans (U.E) puis dans (l'USA).

Tableau	Moteur(1) (78%) MI-classiques E.E- I AZAZGA	moteur(2) (85%) MI-Haut rendement (E.U)	Moteur(3) (87%) E-E. Ms (USA)	Economie d'énergie (1- 2)	Economie d'énergie (1- 3)
Energie (KWh)	13538 ,4	12423,5	12137,9	1114,9	1400 ,5
Prix (10 ³ .DA)	48,7384	44,7247	43,6965	4,0136	5,0418

Tableau 4 : l'énergie et l'économie d'énergie avec les moteurs à induction à haut rendement de 2.2 KW. [6]

Conclusion :

L'énergie électrique est produite à partir d'une autre forme d'énergie qui peut être une énergie renouvelable issue de l'activité du soleil, du vent, de la biomasse et de la géothermie, ou bien une énergie non renouvelable issue des combustibles fossiles.

Actuellement cette énergie produite ne satisfait pas la demande, et l'une des solutions proposées pour limiter cette crise énergétique est l'utilisation des moteurs électriques à haut rendement et à haut facteur de puissance, c'est pour cela que l'amélioration du rendement des moteurs électriques et son impacte sur l'épargne de l'énergie sont un grand défi pour les chercheurs et fabricant de moteurs dans le monde.

Dans ce chapitre nous avons présenté les moteurs à haut rendement, leurs spécificités, leurs caractéristiques, les facteurs influant sur le rendement ainsi que l'avantage d'utilisation de ces moteurs par rapport à leurs homologues classiques et l'impact de ces moteurs sur l'économie d'énergie en Europe et USA.

Comme on a aussi donné la répartition et les classes du rendement des moteurs électriques précédemment et actuellement.

Dans ce qui suit, nous entamerons nos calculs pour dimensionner un moteur asynchrone a haut rendement (IE2) toute en respectant un cahier de charges donné par le fabricant de moteurs électriques Electro-industrie d'Azazga.



Chapitre *III*

Calcul du moteur asynchrone

Calcul électromagnétique :

Pour déterminer les dimensions de la machine asynchrone il faut prendre compte des caractéristiques techniques et des contraintes électromagnétiques.

III-1 : Dimensionnement du stator :

III-1-1 : Dimensionnement de l'enroulement statorique :

a) Puissance électromagnétique :

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

$$P_e = K_e \cdot \frac{P_u}{\cos(\Phi_n) \cdot \eta_n} \quad (\text{KW})$$

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.

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

b) Longueur virtuelle de l'induit :

Elle est donnée par :

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

Ou :

α_i : Coefficient de recouvrement polaire.

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

N : vitesse de rotation de synchronisme.

D_1 : Diamètre intérieur du stator.

A_1 : Charge linéaire.

β_δ : Induction dans l'entrefer.

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

$$K_{en1} = K_{d1} \cdot K_{r1}$$

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

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

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

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

β : Rapport de raccourcissement.

Coefficient de longueur :

Est le rapport entre la longueur virtuelle et le diamètre intérieur de la tôle du stator.

$$\lambda_i = \frac{l_i}{D_1}$$

Pas polaire en mm :

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

$$\tau_{p1} = \frac{\pi \cdot D_1}{2 \cdot p} \quad [\text{mm}]$$

P : Nombre de paires de pôles.

Pas polaire en nombres d'encoches :

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

Z_1 : Nombre d'encoches statoriques.

Pas dentaire :

$$\tau_{p1} = \frac{\pi \cdot D_1}{Z_1} \quad [\text{mm}]$$

c) Courant nominal :

Il est donné par la formule suivante :

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

m_1 : Nombre de phase 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 :

$$U_{enc1} = \frac{a_i \cdot l_1 \cdot A_1 \cdot 10^{-3}}{I_{n1}}$$

a_1 : Nombre de voies parallèles.

e) Nombre de spire d'une voie parallèle :

Il est donné par la formule suivante :

$$W_1 = \frac{P \cdot q_1 \cdot U_{enc1}}{a_1}$$

Angle électrique :

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

Nombre d'encoches par pole et par phase :

$$q_1 = \frac{Z_1}{2 \cdot p \cdot m_1}$$

Pas d'enroulement :

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

$$\gamma_1 = \frac{Z_1}{2 \cdot p} - \varepsilon$$

ε : Raccourcissement.

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

Elle est calculée par l'expression suivante :

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

J_1 : Densité du courant dans l'enroulement satatorique, elle varie entre 2-14 [A /mm²].

III-1-2 : Dimensionnement de la feuille statorique :

a) Largeur de la dent :

La largeur de la dent est calculée a partir de la loi de conservation du flux a travers le pas dentaire, elle est donnée comme suit :

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

Avec :

K_{fer} : Coefficient de remplissage du paquet de tôles statoriques.

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

$K_{fer} = 0.97$ Pour l'isolation en vernis.

B_{Z1max} : Induction maximale dans la dent statorique.

b) Hauteur du dos du stator :

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

$$h_{C1} = \frac{0.5 \cdot \alpha_i \cdot \tau_{p1} \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot B_{C1}} \quad [\text{mm}]$$

B_{C1} : Induction magnétique dans le dos du stator.

c) Hauteur de la dent :

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$h_{Z1} = 0.5(D_{ext} - D_1) - h_{C1} \quad [\text{mm}]$$

D_{ext} : Diamètre extérieur du stator.

d) Largeur minimale de l'encoche :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$b_{enc11} = \frac{\pi \cdot (D_1 + 0.2 \cdot h_{z1})}{z_1} - b_{z1}$$

e) Largeur maximale de l'encoche :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$b_{enc12} = \frac{\pi \cdot (D_1 + 2 \cdot h_{z1})}{z_1} - b_{z1} \quad [\text{mm}]$$

f) Hauteur de l'encoche :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$h_{enc1} = h_{z1} - h_{f1} - h_{k1} \quad [\text{mm}]$$

Avec :

h_{f1} : Hauteur de la fente d'encoche statorique, elle varie entre 1.2 et 1.8 [mm].

h_{k1} : Hauteur de la clavette.

g) Section de l'encoche statorique :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$s_{en1} = 0.5 (b_{enc11} - b_{enc12}) \cdot h_1 + \frac{\pi \cdot b_{enc12}^2}{8} - s_{iso} \quad [\text{Mm}]$$

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

$$s_{iso} = 0.5 \left(\pi \cdot \frac{b_{enc12}^2}{2} + 2 \cdot h_1 + b_{enc11} \right) \cdot e_1 \quad [\text{Mm}]$$

e_1 : Epaisseur de l'isolant.

h) coefficient de remplissage :

Le coefficient de remplissage est défini comme étant le rapport de la section des conducteurs occupants l'encoche a la section utile de l'encoche, il doit varier dans l'intervalle (0.7-0.75), il est donné par l'expression suivante :

$$K_{r1} = N_{elt} \cdot \frac{d_{iso}^2}{s_{enc1}}$$

Avec

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

d_{iso} : Diamètre de conducteurs avec isolation.

S_{enc1} : Section de l'encoche en [mm²].

III 1-3 : Vérification des charges électromagnétique :

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

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

a) Charge linéaire :

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

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

b) Induction magnétique dans l'entrefer :

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

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_i \cdot \tau_{p1} \cdot l_i \cdot 10^{-6}} \quad [\text{T}]$$

c) Flux sous un pôle :

$$\Phi = \frac{U_{n1} \cdot K_e}{4 \cdot K_f \cdot f_1 \cdot W_1 \cdot K_{enc1}} \quad [\text{Weber}]$$

III-1-4 : Choix de l'entrefer:

Pour des raisons mécaniques, on choisit l'entrefer le plus grand possible pour réduire les pertes supplémentaires dans le fer produit par les pulsations du champ, et de la dispersion provoquée par les champs d'harmonique 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 paire de pôles.

III-2 : Dimensionnement du rotor :

Le rotor est à double cage d'écureuil, la cage externe est constituée de barres en bronze **logées** dans des encoches circulaires, la cage interne comporte des barres en cuivre logées dans des encoches rectangulaires. Les deux cages sont court-circuitées à leurs extrémités.

III-2-1 : Choix du nombre d'encoches rotorique :

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

III-2-2 : Diamètre extérieur du rotor :

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

$$D_2 = D_1 - 2\delta \quad [\text{mm}]$$

Pas dentaire rotorique :

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

$$t_2 = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} \quad [\text{mm}]$$

Avec : Z_2 le nombre d'encoches rotoriques.

Z_1 le diamètre extérieur du rotor en [mm].

Courant dans la barre :

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

$$I_2 = \frac{1,11 \cdot I_{n1} \cdot 6 \cdot W_1 \cdot \cos(\phi_n) \cdot K_{en1}}{Z_2} \quad [A].$$

Avec : I_{n1} : Courant nominal statorique.

W_1 : Nombre de spires statoriques.

K_{en1} : Facteur de bobinage d'enroulement statorique.

III-2-3 : Dimensionnement de la feuille rotorique :

a) Hauteur de la culasse rotorique :

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

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

B_{c2} : Induction dans la culasse rotorique.

Pas polaire rotorique :

$$\tau_{p2} = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} \quad [\text{mm}]$$

b) hauteur de la dent :

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

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

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

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

c) largeur de la dent :

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

$$b_{z2} = b_{z2c} + b_{z2r} \quad [\text{mm}]$$

- La largeur de la partie circulaire de la dent :

$$b_{z2c} = \frac{\pi \cdot (D_2 - \frac{2}{3} \cdot d_{bc} - 2 \cdot h_{f2})}{Z_2} - 0,94 \cdot d_{bc} \quad [\text{mm}]$$

- **La largeur de la partie rectangulaire de la dent :**

$$b_{Z2r} = \frac{\pi \cdot (D_2 \cdot \frac{2}{3} \cdot hm - 2h_{Z2})}{Z_2} - b_{br} \quad [\text{mm}]$$

$$b_{Z2} = \frac{b_{Z2c} + b_{Z2r}}{2} \quad [\text{mm}]$$

$$b_{Z2} = \frac{t_2 \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot b_{Z2}} \quad [\text{mm}]$$

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

- d) sections des barres rotoriques :**

Elle est donnée e fonction des dimensions de l'encoche :

$$S_b = S_{bc} + S_{br} \quad [\text{mm}^2].$$

Avec :

- **Section de la barre circulaire :**

$$S_{bc} = \pi \cdot \frac{d_{bc}^2}{4} \quad [\text{mm}^2]$$

- **Section de la barre rectangulaire :**

$$S_{br} = a \cdot b \quad [\text{mm}^2]$$

- e) Densité du courant :**

Elle est donnée par la formule suivante :

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

III-2-4 : Dimensionnement des anneaux de court- circuit :

Les anneaux sont dimensionnés d la manière suivante :

- a) Les hauteurs des anneaux :**

Les hauteurs des anneaux s'expriment comme suit :

- Hauteur de l'anneau de la cage externe :

$$h_{anc} = (1,1 \div 1,25) \cdot h_{Z2c} \quad [\text{mm}]$$

- Hauteur de l'anneau de la cage interne :

$$h_{anc} = (1,1 \div 1,25) \cdot h_{Z2r} \quad [\text{mm}]$$

b) les sections des anneaux :

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

$$S_{an} = S_{anc} + S_{anr} \quad [\text{mm}^2]$$

- La section de l'anneau de la cage externe

$$S_{anc} = (0.35 \div 0.45) \cdot \frac{Z_2 \cdot S_{bc}}{2 \cdot p} \quad [\text{mm}^2]$$

- La section de l'anneau de la cage interne

$$S_{anc} = (0.35 \div 0.45) \cdot \frac{Z_2 \cdot S_{br}}{2 \cdot p} \quad [\text{mm}^2]$$

c) largeur de l'anneau :

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

- La largeur de l'anneau de la cage externe

$$b_{anc} = \frac{S_{anc}}{h_{anc}} \quad [\text{mm}]$$

- La largeur de la cage interne

$$b_{anr} = \frac{S_{anr}}{h_{anr}} \quad [\text{mm}]$$

d) Diamètre moyen de l'anneau :

- Diamètre moyen de l'anneau de la cage externe

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

- Diamètre moyen de l'anneau de la cage interne

$$D_{anr} = (D_2 - 16.3) - h_{anr} \quad [\text{mm}]$$

III-2-5 : Calcul du circuit magnétique :

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

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

Dans notre cas, $\oint H \cdot dl$ représente la somme $\sum H_x \cdot l_x$

Où : H_x : représente l'intensité du champ magnétique correspondant à l'induction dans le tronçon x ; H_x est donné en [A /m].

l_x : représente la ligne moyenne du tronçon choisi en [m].

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

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

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

III-2-5-1 : 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 :

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

(2.1)

b) Force magnétomotrice de la culasse statorique :

Elle est donnée par :

$$F_{c1} = h_{c1} \cdot L_{c1} \cdot 10^{-3} \quad [\text{A}]$$

(2.2)

Avec h_{c1} : intensité du champ magnétique dans la culasse statorique qui correspond à l'induction B_{c1} .

c) Force magnétomotrice dans la dent du stator

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$F_{z1} = H_{z1} \cdot h_{z1} \cdot 10^{-3} \quad [\text{A}]$$

(2.3)

Ou :

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

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

III-2-5-2 : Circuit magnétique rotorique :

Pour pouvoir calculer le circuit magnétique rotorique d'une machine asynchrone il faut procéder de la manière suivante en tenant compte des données :

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

Elle est donnée par la formule suivante :

$$L_{c2} = (D_2 - 2 \cdot h_{z2} - h_{c2}) \cdot \pi / 2 \cdot p + h_{c2} \quad [\text{mm}]$$

(2.4)

Avec :

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

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

b) Force magnétomotrice dans la culasse du rotor :

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$F_{c2} = h_{c2} \cdot L_{c2} \cdot 10^{-3} \quad [\text{A}]$$

Ou :

h_{c2} : Intensité du champ magnétique dans la culasse rotorique qui correspond à l'induction B_{c2} .

c) Force magnétomotrice dans la dent du rotor :

Pour le type d'encoche utilisée on a :

$$F_{z2} = F_{zc} - F_{zr} \quad [A]$$

• **Force magnétomotrice dans la partie circulaire de la dent :**

$$F_{zc} = H_{z2} \cdot h_{zc} \cdot 10^{-3} \quad [A]$$

• **Force magnétomotrice dans la partie rectangulaire de la dent :**

$$F_{zr} = H_{z2} \cdot h_{zc} \cdot 10^{-3} \quad [A]$$

Ou :

H_{z2} : Intensité du champ magnétique dans la dent rotorique.

III-2-5-3 : Force magnétomotrice dans l'entrefer :

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

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

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 :

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

Avec :

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

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

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

III-2-5-4 : Force magnétomotrice totale par paire de pôle :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$F = \sum F_i = 2 \cdot (F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2}) + F_{c1} + F_{c2} \quad [A]$$

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

III-2-6 : Coefficients de saturation

Ils sont donnés comme suit :

a) Saturation des dents :

Il est donnée par :

$$K_{\mu z} = \frac{F_{\delta} \cdot F_{z1} \cdot F_{z2}}{F_{\delta}}$$

b) Coefficient de saturation de la machine :

Il est donnée par :

$$K_{\mu z} = \frac{\sum F_i}{2 \cdot F_{\delta}}$$

III-2-7 : Courant magnétisant :

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

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

III-2-8 : Réactance de magnétisation

Elle est exprimée par :

$$X_m = \frac{K_e \cdot U_{n1}}{I_{\mu}} \quad [\Omega]$$

Où : K_e : facteur de majoration, il varie entre 0,9 et 0,98

III-2-9 : Coefficient de dispersion magnétique du stator :

Il est donnée par :

$$\sigma_{\mu} = \frac{X_1}{X_m}$$

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

III-2-10 : Force électromotrice à vide E_0 :

Elle est donnée par :

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

III-2-11 : Calcul des paramètres électriques des enroulements :

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

III-2-11-1 : paramètres statoriques :

Le calcul des paramètres statoriques s'effectue comme suit :

a) résistance active d'une phase du stator :

$$R_1 = \rho_{cu} (T) \frac{W_1 \cdot L_{w1} \cdot 10^{+3}}{a_1 \cdot N_{el} \cdot S_{elt1}} \quad [\Omega]$$

AVEC : S_{elt1} Section standard d'un conducteur.

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

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

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

$$T = 75^{\circ}\text{C} \quad \rho_{cu} = 21,3 \cdot 10^{-9} \quad [\Omega \cdot \text{m}]$$

Avec : L_{w1} : longueur moyenne d'une spire de l'enroulement statorique, calculée comme suit :

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

ou : L_i : longueur virtuelle de l'induit.

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

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

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

$$b_{1\text{moy}} = \frac{\pi \cdot (D1 + h_{z1}) \cdot y_{1\text{moy}}}{Z_1} \quad [\text{mm}]$$

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

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

La réactance de fuite globale du stator comprend :

- **Réactance de fuite d'encoche :**

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

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

- **Réactance de fuite différentielle :**

C'est le résultat des flux suivant :

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

Elle est donnée par :

$$X_{1d} = \frac{1,58 \cdot f_1 \cdot W_1^2}{p \cdot q_1 \cdot 10^8} \cdot \lambda_{1f}$$

- **Réactance de fuite frontale :**

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

$$X_{1f} = \frac{1,58 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot W_1^2}{q_{1,P} \cdot 10^8} \cdot \lambda_{1f} \quad [\Omega]$$

La réactance totale est donnée par :

$$X_1 = 1,58 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot W_1^2 \cdot \frac{\lambda_1}{p \cdot q_{1,10^8}} \quad [\Omega]$$

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

$$\lambda_1 = \lambda_{enc1} + \lambda_{1d} + \lambda_{1f}$$

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

$$\lambda_{enc1} = \frac{h_1 \cdot K_{B1}}{3 \cdot d_{enc11}} + \left(\frac{h_{11}}{d_{enc11}} + \frac{3 \cdot h_{K1}}{d_{enc11} + 2 \cdot b_{f1}} + \frac{h_{f1}}{b_{f1}} \right) K_{B2}$$

Où: K_{B1} , K_{B2} : coefficients donné par la figure 2,4 (voire l'annexe).

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

$$K_{r1} = 1 - \frac{0,033 \cdot b^2 \cdot f_1}{\delta \cdot t_1}$$

Où : K_{rr1} : Coefficient qui dépende Q_1 (voire l'annexe , Tableau 4)

K_{dd1} : Coefficient de fuite différentielle donnée en fonction de $\frac{Z_2}{p}$ et q

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

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

III-2-11-2 : paramètres rotorique :

Le rotor contient des paramètres électriques qui permettent de définir et comprendre le fonctionnement d'un moteur asynchrone.

a) Résistance rotorique :

Elle est déduite après le calcul suivant :

- **Résistance actives des cages :**

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

Où : K_{red} coefficient de réduction.

- **Résistance active de la cage externe :**

Elle est donnée par :

- **Résistance active de la barre circulaire :**

Pour $T = 20^\circ\text{C}$

$$p_{cuSn6}(T) = 128.86 (\Omega \cdot m)$$

$$R_{bc} = p_{cuSn6}(T) \cdot \frac{K_{dep} \cdot L_2 \cdot 2 \cdot 10^3}{S_{bc}} \quad [\Omega]$$

- **Résistance de l'anneau de la cage externe :**

$$R_{anc} = \frac{p_{cuSn6}(T) \cdot 2 \cdot \pi \cdot D_{anc} \cdot 10^3}{S_{bc}} \quad [\Omega]$$

$$R_{c1} = R_{bc} + 2 \cdot \frac{R_{anc}}{K_{red}^2} \quad [\Omega]$$

- **Résistance active de la cage interne :**

Elle est calculée par :

- **Résistance active de la barre rectangulaire :**

Pour $T = 20^\circ\text{C}$

$$p_{cu}(T) = 0.0172 \cdot 10^{-6} (\Omega \cdot m)$$

$$R_{br} = p_{cu(T)} = \frac{K_{dep} \cdot L_2 \cdot 10^3}{S_{br}} \quad [\Omega]$$

- **Résistance de l'anneau de la cage interne**

$$R_{anr} = \frac{p_{cu(T)} \cdot 2 \cdot \pi \cdot D_{anr} \cdot 10^3}{Z_2 \cdot S_{anr}} \quad [\Omega]$$

$$R_{c2} = R_{br} + 2 \cdot \frac{R_{anr}}{K_{red}^2} \quad [\Omega]$$

- **Résistance de l'anneau ramenée à la barre :**

- **La cage externe :**

$$R_{anrambc} = \frac{R_{anc}}{K_{red}^2} \quad [\Omega]$$

- **La cage interne**

$$R_{anrambr} = \frac{R_{anr}}{K_{red}^2} \quad [\Omega]$$

$$R_{anrambt} = \frac{R_{anrambc} \cdot R_{anrambr}}{R_{anrambc} + R_{anrambr}} \quad [\Omega]$$

- **Résistance de l'anneau ramenée au stator :**

$$B_{ob} = \frac{t_1}{t_2}$$

$$\alpha_{ob} = \frac{2 \cdot \pi \cdot p \cdot B_{ob}}{Z_2}$$

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

$$M = \left(\frac{4 \cdot m_1}{Z_2}\right) \cdot \left(\frac{w_1 \cdot K_{en1}}{K_{ob}}\right)$$

$$R_{anrams} = M \cdot R_{anrambt} \quad [\Omega]$$

- **Résistance active d'une phase rotorique :**

$$R'_2 = R_{bc} + R_{anrambc}$$

$$R''_2 = R_{br} + R_{anrambr}$$

$$R_2 = \frac{R'_2 \cdot R''_2}{R'_2 + R''_2}$$

- **Résistance d'une phase rotorique ramenée au stator :**

$$R_{2ram} = M \cdot R_2 \quad [\Omega]$$

- **Résistance de dispersion, réactance et perméance du rotor :**

- **La cage externe :**

$$I_{an} = \frac{I_2}{K_{red}} \quad [A]$$

$$J_{anc} = \frac{I_{an}}{S_{anc}} \quad [A/mm^2]$$

- **Facteur de conductibilité magnétique :**

$$K_c = 1$$

$$K_r = K_c$$

$$\lambda_{cm} = \left(0.785 - \frac{1}{2 \cdot d_{bc}}\right) \cdot K_c + \frac{h_{f2}}{b_{f2}}$$

- **Perméance frontale :**

$$\lambda_{2fc} = \frac{2.3 \cdot D_{ancmoy}}{Z_2 \cdot L_i \cdot K_{red}^2} \cdot \log \left[\frac{4.7 \cdot D_{ancmoy}}{2 \cdot (h_{anc} + b_{anc})} \right]$$

- b) **Les réactances :**

- **Réactance de la cage extérieure :**

$$X_{2ext} = X_{fbag} + X_{fenc}$$

$$X_{2ext} = 7.9. f_1. L_i. (\lambda_{cm} + \lambda_{2fc}). 10^{-6} \quad [\Omega]$$

- **La cage interne :**

$$J_{anr} = \frac{I_{an}}{S_{anr}} \quad [A/mm^2]$$

- **La réactance de la cage intérieure :**

$$X_{2int} = X_{fba} + X_{fenc}$$

$$X_{2int} = 7.9. f_1. L_i. (\lambda_{disenc} + \lambda_{2fr}). 10^{-6} \quad [\Omega]$$

$$X_2 = \frac{X_{2ext} \cdot X_{2int}}{X_{2ext} + X_{2int}} \quad [\Omega]$$

- **Réactance du rotor ramenée au stator :**

$$X_{2ram} = M. X_2 \quad [\Omega]$$

- c) **Facteur de dispersion d'encoche :**

$$\lambda_{disenc} = \frac{h_m}{3.b_{br}} \cdot Kr + \frac{h_{f22}}{b_{f22}}$$

$$\lambda_{2fr} = \frac{2.3.D_{anmoy}}{Z_2.L_i.K_{red}^2} \log \left[\frac{4.7.D_{anmoy}}{2.(h_{anr} + b_{anr})} \right]$$

III-2-11-3 : Paramètres au démarrage :

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

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

- **Profondeur de pénétration :**

Elle est donnée par :

$$h_{pp} = \frac{h_b}{1+\varphi_1} \quad [\text{mm}]$$

Où : h_b – Hauteur de la barre.

φ – Coefficient qui dépend de la valeur de ξ_1

$$\xi_1 = 0.064 \cdot h_b \sqrt{g}$$

- **Section de la barre pénétrée par la courant de démarrage :**

Elle est donnée par :

$$S_{bdem} = S_{bc} \quad [\text{mm}^2]$$

- **Résistance de la barre au démarrage :**

Pour notre type d'encoche

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

Où : 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.

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

- **Résistance de la cage au démarrage :**

Elle est donnée comme suit :

$$R_{2dem} = R_{anrambc} + R_{bdem} \quad [\Omega]$$

- **Résistance de la cage au démarrage ramenée au stator :**

Elle est donnée par :

$$R_{2dem-ram} = M \cdot (R_{anrambc} + R_{bdem}) \quad [\Omega]$$

- **résistance du rotor pour les bagues séparées :**

$$\alpha = \frac{R_{bc}}{R_{bc} + R_{br}} \quad [\Omega]$$

$$\alpha = 1$$

$$\Delta z = 0,05$$

$$\xi = 1 + \frac{1}{5} \left(\frac{\pi \cdot p}{Z_2} \right)^2 - \frac{\Delta z}{1 - \left(\frac{p}{Z_2} \right)^2}$$

$$\lambda_{\pi 1} = \frac{t_1}{12 \cdot \delta \cdot K_\delta} \cdot \xi$$

$$\lambda_{\pi 2} = \frac{t_2}{12 \cdot \delta \cdot K_\delta} \cdot \xi$$

$$\beta' = \frac{X_{2int}}{R_{bc} + R_{br}}$$

$$r'2 = R_{2ram} \frac{I_{n1}}{U_{n2}} \quad [\Omega]$$

$$X'2 = X_{2ram} \frac{I_{n1}}{U_{n1}}$$

$$K' = \frac{1}{1 + \beta'^2 \cdot g^2}$$

$$r_{2\xi} = R_{bc} \cdot (1 - \alpha \cdot K') \quad [\Omega]$$

- **Réactance du rotor pour des bagues séparées :**

$$X_{2\xi} = 7,9 \cdot f_1 \cdot L_2 (\lambda_{2fc} + \lambda_{2fr} \cdot \alpha^2 \cdot K' + \lambda_{disenc} + \lambda_{\pi 2}) \cdot 10^{-9} \quad [\Omega]$$

III-2-11-3 : Paramètres du rotor au régime à vide et au fonctionnement nominal

Les paramètres rotoriques au régime à vide et au fonctionnement nominal d'un moteur asynchrone à double cage sont calculés comme suit :

- **Résistance du rotor pour des bagues séparées :**

$$r_2 = R_{bc} \cdot (1 - \alpha) \quad [\Omega]$$

- **Réactance du rotor pour des bagues séparées :**

$$x_2 = 7,9 \cdot f_1 \cdot L_2 \cdot (\lambda_{2fc} + \lambda_{2fr} \cdot \alpha^2 + \lambda_{disenc} + \lambda_{\pi 2}) \cdot 10^{-9} \quad [\Omega]$$

$$K_R = \frac{r_{2\xi}}{r_2}$$

$$r'_{2\xi} = K_R \cdot r'_2 \quad [\Omega]$$

III-2-11-4 : Calcul des pertes et du rendement :

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

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

On peut distinguer quatre groupes de perte :

- Pertes principales dans le fer.
- Perte électrique dans le cuivre et le bronze.
- Perte mécaniques.
- Perte supplémentaires.

a) Pertes principale dans le fer

Les pertes principales dans le fer sont les pertes par hystérésis, dues au déphasage entre le courant magnétisant et le flux fondamental, et les pertes par courant de Foucault dues à la circulation des courants induits par le flux fondamental dans les tôles magnétiques.

Les dents et la culasse statorique sont les parties les plus touchées par ces pertes.

Les pertes magnétiques dans le rotor sont négligeables à cause de la faible fréquence du flux.

- **Pertes dans les dents :**

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

$$P_{fz1} = 1,7 \cdot P_{1/50} \cdot B_{z1max}^2 \cdot G_{z1} \quad [\text{W}]$$

$$P_{1/50} := 4,5 [W \cdot Kg^{-1}] \text{ pour l'acier 2013}$$

$$G_{z1} = 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot L_i \cdot K_{fer} \cdot [h_{z1} \cdot \pi \cdot (D_1 + h_{z1}) - S_{enc1} \cdot Z_1]. \quad [\text{Kg}]$$

G_{z1} : Poids des dents statorique.

- **perdes dans la culasse statorique :**

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

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

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

G_{c1} :Poids de la culasse statorique.

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

$$P_{fer} = P_{c1} + P_{fz1} \quad [\text{W}]$$

b) Pertes électriques dans le cuivre et dans le bronze

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

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

- **Pertes joules statoriques :**

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

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

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

I_{n1} : Courant dans une phase statorique.

- **Pertes joules rotoriques :**

Ce sont les pertes dans le bronze et cuivre, elles sont données par la formule suivante :

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

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

I_2 : Courant dans la barre.

R_2 : Résistance d'une phase rotorique.

c) Pertes mécaniques

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

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

Avec: K_t : facteur de majoration.

- $K_t = 1,3 \cdot (1 - D_{ext} \cdot 10^{-3})$ pour $2p=2$.

- $K_t = 1$ pour $2p > 2$.

d) 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 :

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

e) Pertes totales

Elles sont données par la relation suivante :

$$P_{tot} = P_{fer} + P_{j1} + P_{j2} + P_{mec} + P_{sup} \quad [W]$$

Schéma de bilan de puissance et les pertes dans le moteur

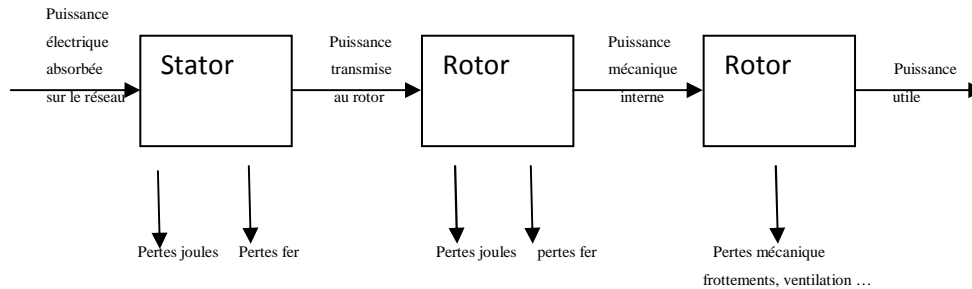


Figure.10.bilan des puissances

f) Rendement de la machine

Le rendement est donné par la relation suivante :

$$\eta = \frac{P_n \cdot 10^3}{P_n \cdot 10^3 + P_{tot}}$$

III-2-11-5 : 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 :

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

D'où :

$$R_m = \frac{X_m \cdot I_\mu}{I_{oa}} \quad [\Omega]$$

Avec : I_μ : Courant magnétisant.

X_m : Réactances magnétisante exprimée.

III-2-11-6 : Calcul des performances du moteur :

Dans cette partie de calcul, nous étudions les performances du moteur, en utilisant une méthode analytique on se basant sur le schéma équivalent de la machine asynchrone à rotor double cage.

a) Schéma équivalent d'un moteur à deux cages

C'est un schéma conventionnel monophasé ramené au stator

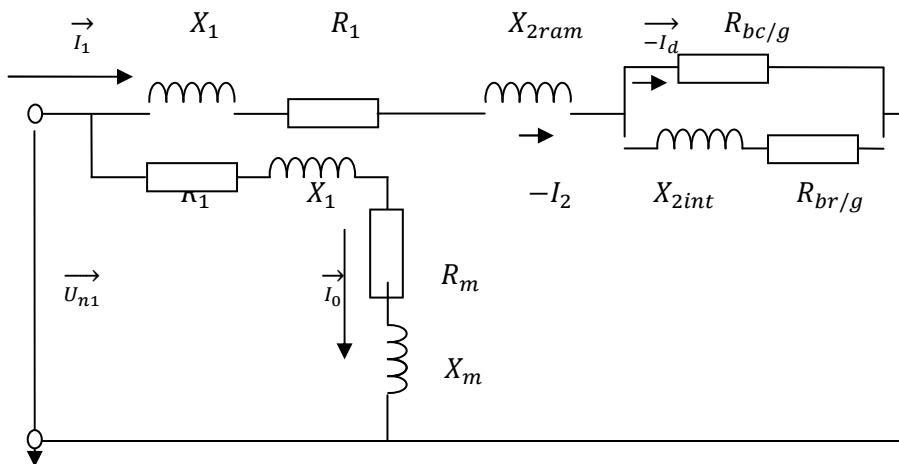


Figure.11. schéma équivalent en L d'un moteur asynchrone à double cage

R_1 : Résistance statorique en $[\Omega]$

X_1 : Réactance de fuite du stator en $[\Omega]$

X_{2ram} : Réactance de fuite du rotor ramené au stator en $[\Omega]$

R_{bc} : Résistance rotorique de la barre circulaire $[\Omega]$

R_{br} : Résistance rotorique de la barre rectangulaire $[\Omega]$

X_{2int} : Réactance de la cage interne du rotor $[\Omega]$

R_m : Résistance magnétisante en $[\Omega]$

X_m : Réactance magnétique en $[\Omega]$

b) Caractéristiques de fonctionnement du moteur

Les caractéristiques de fonctionnement d'un moteur asynchrone sont :

- **Puissance rapporté du circuit primaire au circuit secondaire**

$$P_2 = P_n + P_{sup} + P_{mec} \quad [W]$$

- **Calcul de l'impédance :**

$$C_1 \approx 1 + \frac{X_1}{X_m}$$

C_1 : Constante de transformation du schéma en T vers le schéma en L.

$$a' = C_1^2$$

$$s = \frac{a' \cdot r'2}{g}$$

$$a = C_1 \cdot R_{1T75}$$

$$R = a + (a' \cdot r'2) / g \quad [\Omega]$$

$$x'2 = x_2 \cdot \frac{4 \cdot m_1 \cdot (W_1 \cdot K_{en1})^2}{Z_2 \cdot K_{ob}^2} \quad [\Omega]$$

$$b = C_1 \cdot (x_1 + C_1 \cdot x'2)$$

$$X = b + \frac{b' \cdot r'2}{g} \quad [\Omega]$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad [\Omega]$$

- **Calcul du courant secondaire :**

Le courant dans le circuit secondaire et donné par :

$$I''_2 = \frac{U_{n1}}{Z} \quad [A]$$

$$I'_2 = C_1 \cdot I''_2$$

Avec : I''_2 : Le courant dans le circuit secondaire transformé en L.

I'_2 : Le courant dans le circuit secondaire ramené au primaire.

- **Facteur de puissance rotorique**

Le facteur de puissance rotorique est donnée par :

$$\cos\phi_2 = \frac{R}{Z}$$

D'où :

- **Courant actif :**

$$I''_{2a} = I''_2 \cdot \cos\phi_2 \quad [A]$$

- **Courant réactif :**

$$I''_{2r} = I''_2 \cdot \sin\phi_2 \quad [A]$$

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

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

- **Courant magnétisant:**

$$I_{or} = \frac{P \cdot \Sigma F_i}{0,9 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot K_{en1}} \quad [A]$$

- **Courant total à vide:**

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

- **Courant absorbé:**

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

Avec:

$$I_{1a} = I_{0a} + I''_{2a} \quad [A]$$

$$I_{1r} = I_{0r} + I''_{2r} \quad [A]$$

Le facteur de puissance de la machine est donnée par :

$$\cos\phi_1 = \frac{I_{1a}}{I_1}$$

- **Puissance absorbée par le moteur :** Elle est exprimée par la relation suivante :

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

- **Vitesse de rotation du moteur :**

Elle est donnée par la relation :

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

Avec : N : Vitesse du synchronisme.

G : Glissement.

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

- **Couple utile sur l'arbre du moteur :**

Il est donnée par :

$$C_u = 9,55 \frac{P_n}{N_2} \quad [\text{N.m}]$$

III-2-11-7 : Caractéristiques de démarrage :

Les caractéristiques d'un moteur asynchrone sont données comme suit :

a) Résistance et réactance équivalentes au démarrage :

Elles sont calculées comme suit :

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{b_{f1}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{f1}}{\delta}}$$

$$k' \delta = \frac{t_1}{t_1 - \gamma_1 \cdot \delta}$$

$$x_{12n} = k_\mu \cdot X_m \quad [\Omega]$$

$$C_{1nm} = 1 + \frac{x_{1m}}{x_{12n}}$$

$$R_{\pi m} = R_{1T20} + C_{1nm} \cdot \frac{r'2\xi}{g} \quad [\Omega]$$

$$X_{\pi m} = x_{1m} + C_{1nm} \cdot x' r' 2 \xi m \quad [\Omega]$$

b) Courant de démarrage :

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

$$I_d = I''2m \cdot \frac{\sqrt{R_{\pi m}^2 + (X_{\pi m} + X_m)^2}}{C_{1nm} \cdot X_m} \quad [A]$$

Avec:

$$I''2m = \frac{U_{n1}}{\sqrt{R_{\pi m}^2 + X_{\pi m}^2}} \quad [A]$$

c) Couple de démarrage:

$$C_d = C_u \cdot C_{drap} \quad [N.m]$$

Avec :

$$C_{drap} = \left(\frac{I'2m}{I_2} \right)^2 \cdot K_R \cdot \frac{g_n}{g}$$

$$K_R = 1.001$$

$$I'2m = C_{1nm} \cdot I''2m \quad [A]$$

d) Le couple max :

$$C_{max} = M1 \cdot \frac{I'2^2 \cdot r'2}{2 \cdot \pi \cdot F1 \cdot g_n}$$



Chapitre *IV*

**Elaboration du programme de
calcul et interprétation des
résultats**

les données principales du programme

la puissance nominale	$P_n := 200$	(KW)
Nombre de phases	$M1 := 3$	
la frequence	$F1 := 50$	(Hz)
le nombre de paires de pôles	$P := 1$	
la tension nominle par phase	$V_n := 220$	(V)
vitesse de synchronisme	$N_s := 3000$	$\left(\frac{\text{tr}}{\text{min}} \right)$
le facteur de puissance nominal	$\cos(\phi) := 0.89$	
	$\phi := 0.47$	(rad)
le rendement nominal	$\eta_n := 0.966$	

calcul des dimentions principales

le nombre d'encoches statoriques	$Z1 := 48$	(encoches)
le diamètre exterieur du stator	$D_{ext1} := 460$	(mm)

la puissance électromagnétique

le facteur de majoration de la tension

$$K_e := 0.98 - 5 \cdot P \cdot 10^{-3} \quad K_e = 0.975$$

$$P_e := K_e \cdot \frac{P_n}{\cos(\phi) \cdot \eta_n} \quad P_e = 226.813 \quad (\text{KVA})$$

coefficient de recouvrement polaire

$$\alpha_i := 0.6366$$

facteur de la forme de la courbe d'induction

$$K_f := 1.11$$

nombre d'encoches par pôle par phase

$$q_1 := \frac{Z_1}{2 \cdot P \cdot M_1}$$

$$q_1 = 8$$

le pas polaire en nombre d'encoches

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

$$\tau_p = 24$$

le pas d'enroulement

$$\epsilon_r := 4$$

$$y_1 := \left(\frac{Z_1}{2 \cdot P} \right) - \epsilon_r$$

$$y_1 = 20$$

(encoches)

le rapport de raccourcissement

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

$$\beta = 0.833$$

coefficient de distribution

$$K_{d1} := \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot M_1}\right)}{q_1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot q_1 \cdot M_1}\right)}$$

$$K_{d1} = 0.956$$

coefficient de raccourcissement polaire

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

$$K_{r1} = 0.966$$

le facteur de bobinage de l'enroulement statorique

$$Ken1 := Kd1 \cdot Kr1$$

$$Ken1 = 0.923$$

le diamètre interieur du stator

$$KD := 0.675$$

$$D1 := KD \cdot Dext1 - 5$$

$$D1 = 305.5$$

(mm)

induction dans entrefer

$$B\delta := 0.46 \quad (\text{T})$$

la longueur virtuelle de l'induit

$$Li := \frac{6.1 \cdot Pe \cdot 10^{12}}{\alpha_i \cdot Kf \cdot Ns \cdot D1^2 \cdot A1 \cdot B\delta \cdot Ken1}$$

$$Li := 510 \quad (\text{mm})$$

$$PROD := A1 \cdot B\delta$$

$$PROD := \frac{6.1 \cdot Pe \cdot 10^{12}}{\alpha_i \cdot Kf \cdot Ns \cdot D1^2 \cdot Li \cdot Ken1}$$

$$PROD = 1.485 \times 10^4$$

la charge lineaire

$$A1 := \frac{PROD}{B\delta}$$

$$A1 = 3.229 \times 10^4$$

$\left(\frac{\text{A}}{\text{m}}\right)!$

le courant nominale dans une phase

$$In1 := \frac{Pn \cdot 10^3}{M1 \cdot Vn \cdot \cos(\phi) \cdot \eta n}$$

$$In1 = 352.467$$

(A)

le coefficient de longueur

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

$$\lambda = 1.669$$

le pas polaire en mm

$$\tau_p := \frac{\pi \cdot D1}{2 \cdot P}$$

$$\tau_p = 479.878$$

(mm)

le pas dentaire

$$\tau_1 := \frac{\pi \cdot D1}{Z1}$$

$$\tau_1 = 19.995$$

(mm)

angle électrique entre deux encoches voisines

$$\tau := P \cdot \frac{360}{Z1}$$

$$\tau = 7.5$$

la zone de phase

$$\alpha := q1 \cdot \tau$$

$$\alpha = 60$$

le nombre de voix paralleles

$$a1 := 2$$

le flux utile

$$\phi_1 := \frac{B\delta \cdot D1 \cdot L_i \cdot 10^{-6}}{P}$$

$$\phi_1 = 0.072$$

(wb)

le nombre de conducteurs effectifs dans une encoche

$$Nen1 := \frac{a1 \cdot \tau_1 \cdot A1 \cdot 10^{-3}}{In1}$$

$$Nen1 = 3.664$$

(conducteurs)

$$Nen11 := \text{round}(Nen1) = 4$$

nombre de spires d'une voix parallele

$$W1 := \frac{Nen11 \cdot q1 \cdot P}{a1}$$

$$W1 = 16$$

(spires)

$$W1 := \frac{Ke \cdot Vn \cdot 50}{222 \cdot Ken1 \cdot \phi1 \cdot F1}$$

la densité de courant statorique

$$J1 := 4.3$$

$\left(\frac{A}{mm^2} \right)$

la section effective d'un conducteur statorique

$$Seff := \frac{In1}{J1 \cdot a1}$$

$$Seff = 40.985$$

(mm^2)

la section élémentaire

$$Sell := \frac{Seff}{Nell}$$

$$Nell := 25$$

$$Sell = 1.639$$

(mm^2)

$$Sel11 := 1.651$$

(mm^2)

$$dnu := 1.45$$

$$dis := 1.535$$

(mm)

verification des resultats

la charge lineaire

$$A1 := \frac{10 \cdot Nen11 \cdot Z1 \cdot In1}{\pi \cdot D1 \cdot a1}$$

$$A1 = 352.557$$

$\left(\frac{A}{cm} \right)$

induction dans l'entrefer

$$B\delta := \frac{\phi1}{\alpha i \cdot \tau p \cdot Li \cdot 10^{-6}}$$

$$B\delta = 0.46$$

(T)

le flux sous un pôle

$$\phi := \frac{V_n \cdot K_e}{4 \cdot K_f \cdot F_1 \cdot W_1 \cdot K_{en1}} \quad \phi = 0.065 \quad (\text{Wb})$$

calcul de la tôle magnétique statorique

induction dans la culasse statorique

$$B_{c1} := 1.4 \quad (\text{T})$$

la hauteur du dos du stator

$$h_{c1} := \frac{\phi_1 \cdot 10^6}{2 \cdot L_i \cdot K_{fer} \cdot B_{c1}} \quad K_{fer} := 0.97 \quad h_{c1} = 51.742 \quad (\text{mm})$$

induction dans la dent statorique

$$B_{z1} := 1.75 \quad (\text{T})$$

la largeur de la dent statorique

$$b_{z1} := \frac{B_{\delta} \cdot \tau_1}{K_{fer} \cdot B_{z1}} \quad b_{z1} = 5.418 \quad (\text{mm})$$

la hauteur de la dent du stator

$$h_{z1} := 0.5 \cdot (D_{ext1} - D_1) - h_{c1} \quad h_{z1} = 25.508 \quad (\text{mm})$$

la hauteur de la clavette

$$h_{k1} := 1 \quad (\text{mm})$$

la hauteur de la fente

$$h_{f1} := 1 \quad (\text{mm})$$

la hauteur de l'encoche statorique

$$h_{enc1} := h_{z1} - (h_{k1} + h_{f1}) \quad h_{enc1} = 23.508 \quad (\text{mm})$$

la largeur maximale de l'encoche

$$r := 8.346 \quad (\text{mm})$$

$$r = 8.346$$

$$b_1 := \left[\frac{\pi \cdot [D_1 + 2 \cdot (h_{enc1} - r + h_{f1})]}{Z_1} \right] - b_{z1} \quad b_1 = 16.692 \quad (\text{mm})$$

la largeur minimale de l'encoche

$$bf1 := 5 \quad (\text{mm})$$

$$b2 := \left[\frac{\pi \cdot [D1 + 2 \cdot (hz1 - henc1)]}{Z1} \right] - bz1 \quad b2 = 14.838 \quad (\text{mm})$$

la section de l'encoche

$$h1 := henc1 - \frac{b1}{2} \quad h1 = 15.162 \quad (\text{mm})$$

$$Senc1 := \left(\frac{b1 + b2}{2} \right) \cdot h1 + \frac{\pi \cdot b1^2}{2 \cdot 4} \quad Senc1 = 348.457 \quad (\text{mm})^2$$

$$bis := 0.3 \quad (\text{mm})$$

$$Sis := \left[\pi \cdot \left(\frac{b1}{2} \right) + 2 \cdot h1 + b2 \right] \cdot bis \quad Sis = 21.415 \quad (\text{mm})^2$$

la section de l'encoche occupée par l'enroulement

$$See1 := Senc1 - Sis \quad See1 = 327.042 \quad (\text{mm})^2$$

coefficient de remplissage de l'encoche

$$KR_a := \frac{N_{ell} \cdot N_{en1} \cdot dis^2}{See1} \quad KR_a = 0.72$$

Dimensionnement du rotor

Nombre d'encoches rotorique

$$Z2 := 38$$

Diamètre extérieur du rotor

épaisseur de l'entrefer

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

$$\text{Dex2} := \text{D1} - 2\delta$$

$$\text{Dex2} = 303.9 \quad (\text{mm})$$

Diamètre de l'arbre

$$\text{dar} := 110 \quad (\text{mm})$$

Pas d'entaine

$$\text{tz2} := \frac{\pi \cdot \text{Dex2}}{Z2}$$

$$\text{tz2} = 25.124 \quad (\text{mm})$$

courant dans la barre

$$I2 := \frac{1.11 \cdot \text{In1} \cdot 6 \cdot \text{W1} \cdot \cos(\text{phi}) \cdot \text{Ken1}}{Z2}$$

$$I2 = 811.979 \quad (\text{A})$$

induction dans la culasse rotrique

$$\text{Bc2} := 1.689$$

T

$$\tau p2 := \frac{\pi \cdot \text{Dex2}}{2P}$$

$$\tau p2 = 477.365 \quad \text{mm}$$

$$\text{hc2} := \frac{0.5 \cdot \alpha_i \cdot \tau p2 \cdot \text{B}\delta}{\text{Kfer} \cdot \text{Bc2}}$$

$$\text{hc2} = 42.662 \quad (\text{mm})$$

T

hauteur de la dent

$$\text{hz2} := -\text{hc2} + 0.5 \cdot (\text{Dex2} - \text{dar})$$

$$\text{hz2} = 54.288 \quad \text{mm}$$

Calcul de l'encoche rotorique

induction dans l'encoche

La largeur de la partie circulaire de la dent

$$\text{hf2} := 4 \quad (\text{mm})$$

$$\text{dbc} := 12.3 \quad (\text{mm})$$

$$\text{bz2c} := -0.94 \cdot \text{dbc} + \frac{\pi \cdot \left(\text{Dex2} - \frac{\text{dbc} \cdot 2}{3} \right) - 2 \cdot \pi \cdot \text{hf2}}{Z2}$$

$$\text{bz2c} = 12.223 \quad \text{mm}$$

La largeur de la partie rectangulaire de la dent

$$hm := 30.5 \quad (\text{mm})$$

$$bbr := 7.5 \quad (\text{mm})$$

$$bz2r := -bbr + \pi \cdot \left(\frac{Dex2 - 2 \cdot hz2 + hm \cdot \frac{2}{3}}{Z2} \right)$$

$$bz2r = 10.329$$

mm

$$bz2 := \frac{bz2c + bz2r}{2}$$

$$bz2 = 11.276$$

mm

induction dans la dent

$$Bz2 := \frac{tz2 \cdot B\delta}{Kfer \cdot bz2}$$

$$Bz2 = 1.057$$

T

La cage rotorique

Section de la barre circulaire

$$sbc := \pi \cdot \frac{dbc^2}{4}$$

$$sbc = 118.823$$

mm²

Section de la barre rectangulaire

$$a := 7.5 \quad (\text{mm})$$

$$b := 30.5 \quad (\text{mm})$$

$$sbr := a \cdot b$$

$$sbr = 228.75$$

(mm)²

Section totale

$$sb := sbc + sbr$$

$$sb = 347.573$$

mm²

Densite de courant

$$jb := \frac{I2}{sb}$$

$$jb = 2.336$$

$\frac{A}{\text{mm}^2}$

Dimensionnement des anneaux de court circuit

La hauteur des anneaux

La hauteur de l'anneau de la cage externe

$$hz2c := 16.8 \quad \text{mm}$$

$$hanc := (1.1 \div 1.25) \cdot hz2c$$

$$\underline{hanc} := 1.1 \cdot hz2c$$

$$hanc = 18.48$$

mm

La hauteur de l'anneau de la cage interne

$$hz2r := 37.5 \quad \text{mm}$$

$$hanr := (1.1 \div 1.25) \cdot hz2r$$

$$\underline{hanr} := 1.1 \cdot hz2r$$

$$hanr = 41.25$$

mm

Les sections des anneaux

La section de l'anneau de la cage externe

$$sanc := (0.35 \div 0.45) \cdot \frac{Z2 \cdot sbc}{2P}$$

$$\underline{sanc} := 0.45 \cdot \frac{Z2 \cdot sbc}{2P}$$

$$sanc = 1.016 \times 10^3$$

mm²

La section de l'anneau de la cage interne

$$sanr := (0.35 \div 0.45) \cdot \frac{Z2 \cdot sbr}{2P}$$

$$\underline{sanr} := 0.378 \cdot \frac{Z2 \cdot sbr}{2P}$$

$$sanr = 1.643 \times 10^3$$

mm²

$$san := sanc + sanr$$

$$san = 2.659 \times 10^3$$

mm²

La largeur de l'anneau de la cage externe

$$\text{banc} := \frac{\text{sanc}}{\text{hanc}}$$

$$\text{banc} = 54.975$$

mm

La largeur de l'anneau de la cage interne

$$\text{banr} := \frac{\text{sanr}}{\text{hanr}}$$

$$\text{banr} = 39.827$$

mm

Diamètre moyen de la cage de l'anneau externe

$$\text{Dancmoy} := \text{Dex2} - \text{hanc}$$

$$\text{Dancmoy} = 285.42$$

mm

Diamètre moyen de l'anneau de la cage interne

$$\text{Danrmoy} := (\text{Dex2} - \text{hz2c}) - \text{hanr}$$

$$\text{Danrmoy} = 245.85$$

mm

CALCUL DU CIRCUIT MAGNETIQUE

Calcul du circuit magnétique statorique

Induction dans la dent du stator

$$\underline{Bz1} := \frac{B\delta \cdot \tau 1}{K_{\text{fer}} \cdot bz1}$$

$$Bz1 = 1.75$$

(T)

$$Hz1 := 11.1 \quad \frac{\text{A}}{\text{cm}}$$

$$\underline{Hz1} := 1110 \quad \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

Fmm dans la dent du stator

$$Fz1 := Hz1 \cdot hz1 \cdot 10^{-3}$$

$$Fz1 = 28.314$$

(A)

La longueur moyenne des lignes dans la culasse statorique

$$L_{c1} := \frac{\pi \cdot (D_{ext1} - h_{c1})}{2P}$$

$$L_{c1} = 641.291$$

(mm)

Fmm dans la culasse

$$B_{c1} = 1.4 \quad (T)$$

$$H_{c1} := 7.26 \quad \frac{A}{cm}$$

$$H_{c1} := 726 \quad \frac{A}{m}$$

$$F_{c1} := H_{c1} \cdot L_{c1} \cdot 10^{-3}$$

$$F_{c1} = 465.577$$

A

Fmm dans l'entrefer

$$b_{f1} := 5 \quad mm$$

$$k_{\delta 1} := 1 + \frac{b_{f1}}{\tau_1 - b_{f1} + \frac{5 \cdot \delta \cdot \tau_1}{b_{f1}}}$$

$$k_{\delta 1} = 1.161$$

$$b_{f2} := 3.7 \quad mm$$

$$k_{\delta 2} := 1 + \frac{b_{f2}}{t_{z2} - b_{f2} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_{z2}}{b_{f2}}}$$

$$k_{\delta 2} = 1.076$$

$$k_{\delta} := k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2}$$

$$k_{\delta} = 1.25$$

$$F_{\delta} := 0.8 \cdot B_{\delta} \cdot k_{\delta} \cdot \delta \cdot 10^3$$

$$F_{\delta} = 367.935$$

A

Circuit magnétique rotorique

Induction dans la dent

$$B_{z2} := \frac{B\delta \cdot tz2}{K_{fer} \cdot bz2}$$

$$B_{z2} = 1.057$$

T

$$Hz2 := 14 \quad \frac{A}{cm}$$

$$H_{z2} := 1400 \quad \frac{A}{m}$$

Fmm dans la dent

Fmm dans la partie circulaire de la dent

$$hzc := (1 - 0.1) \cdot dbc$$

$$hzc = 11.07 \quad mm$$

$$Fzc := Hz2 \cdot hzc \cdot 10^{-3}$$

$$Fzc = 15.498$$

A

Fmm dans la partie rectangulaire de la dent

$$hzc := hm \quad hzc = 30.5 \quad mm$$

$$Fzc := Hz2 \cdot hzc \cdot 10^{-3}$$

$$Fzc = 42.7$$

A

$$Fz2 := Fzc + Fzc$$

$$Fz2 = 58.198$$

A

La longueur moyenne des lignes dans la culasse rotorique

$$Lc2 := (Dex2 - 2 \cdot hz2 - hc2) \cdot \left(\frac{\pi}{2P} \right) + hc2$$

$$Lc2 = 282.464$$

mm

Fmm dans la culasse rotorique

$$Bc2 := 1.35 \quad (T)$$

$$Hc2 := 3.73 \quad \frac{A}{cm}$$

$$H_{c2} := 373 \quad \frac{A}{m}$$

$$Fc2 := Hc2 \cdot Lc2 \cdot 10^{-3}$$

$$Fc2 = 105.359$$

A

Fmm totale par paire de pôles

$$F_m := 2(F_\delta + F_{z1} + F_{z2}) + F_{c1} + F_{c2}$$

$$F = 1.48 \times 10^3$$

A

Coëfficient de saturation des dents

$$k_{\mu z} := \frac{F_\delta + F_{z1} + F_{z2}}{F_\delta}$$

$$k_{\mu z} = 1.235$$

Coëfficient de saturation de la machine

$$k_\mu := \frac{F}{2 \cdot F_\delta}$$

$$k_\mu = 2.011$$

Le courant magnetisant

$$I_\mu := \frac{P \cdot F}{0.9 \cdot M1 \cdot W1 \cdot K_{en1}}$$

$$I_\mu = 37.111$$

A

La réactance de magnetisation

$$x_m := \frac{K_e \cdot V_n}{I_\mu}$$

$$x_m = 5.78$$

ohm

Coëfficient de dispersion magnétique du stator

$$x_1 := \frac{1.58 \cdot F1 \cdot L_i \cdot W1^2 \cdot \lambda}{P \cdot q1 \cdot 10^8}$$

$$x_1 = 0.022$$

ohm

$$\sigma_\mu := \frac{x_1}{x_m}$$

$$\sigma_\mu = 3.724 \times 10^{-3}$$

Force electromagnetique à vide

$$E_0 := \frac{V_n}{1 + \sigma_\mu}$$

$$E_0 = 219.184$$

V

PARAMETRES DU STATOR

Résistance active du stator

$$T_{\text{ww}} := 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\rho_{\text{cu}20} := 0.0172 \cdot 10^{-6} \quad \text{ohm}\cdot\text{m}$$

$$y_{1\text{moy}} := y_1$$

$$y_{1\text{moy}} = 20$$

Largeur moyenne d'une section b1moy

$$b_{1\text{moy}} := \pi \cdot \left(\frac{D_1 + h_{z1}}{Z_1} \right) \cdot y_{1\text{moy}} \quad b_{1\text{moy}} = 433.289 \quad \text{mm}$$

Longueur moyenne de la partie frontale d'une demi spire Lf1

$$L_{f1} := (1.16 + 0.14 \cdot P) \cdot b_{1\text{moy}} + 15 \quad L_{f1} = 578.276 \quad \text{mm}$$

La longueur moyenne d'une spire de l'enroulement statorique Lw1

$$L_{w1} := 2 \cdot (L_i + L_{f1}) \quad L_{w1} = 2.177 \times 10^3 \quad \text{mm}$$

$$R_{1T20} := \rho_{\text{cu}20} \cdot \frac{W_1 \cdot L_{w1} \cdot 10^3}{a_1 \cdot \text{Nell} \cdot \text{Sel}11} \quad R_{1T20} = 7.256 \times 10^{-3} \quad \text{ohm}$$

$$T_{\text{ww}} := 75 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\rho_{\text{cu}75} := 21.3 \cdot 10^{-9} \quad \text{ohm}\cdot\text{m}$$

$$R_{1T75} := \rho_{\text{cu}75} \cdot \frac{W_1 \cdot L_{w1} \cdot 10^3}{a_1 \cdot \text{Nell} \cdot \text{Sel}11} \quad R_{1T75} = 8.986 \times 10^{-3} \quad \text{ohm}$$

$$T_{\text{ww}} := 115 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\rho_{cu115} := 24.4 \cdot 10^{-9} \quad \text{ohm}\cdot\text{m}$$

$$R_{1T115} := \rho_{cu115} \cdot \frac{W1 \cdot Lw1 \cdot 10^3}{a1 \cdot Nel1 \cdot Sel11} \quad R_{1T115} = 0.01 \quad \text{ohm}$$

Réactance de fuite frontale

$$Q1 := \frac{Z2}{P} \quad Q1 = 38$$

$$KB1 := 0.88$$

$$KB2 := 0.86$$

Coéfficient de fuite qui depend de q1

$$K_{dd1} := 0.66$$

Coéfficient de fuite différentielle

$$K_{rr1} := 0.0052$$

$$\lambda_{1f} := 0.34 \cdot \frac{q1 \cdot (Lf1 - 0.64 \cdot \beta \cdot \tau p)}{Li} \quad \lambda_{1f} = 1.719$$

$$X_{1f} := 1.58 \cdot F1 \cdot Li \cdot W1^2 \cdot \frac{\lambda_{1f}}{P \cdot q1 \cdot 10^8} \quad X_{1f} = 0.022$$

La réactance de fuite différentielle

$$K_{r1} := 1 - \left(\frac{0.033 \cdot bf1^2}{\delta \cdot \tau 1} \right) \quad K_{r1} = 0.966$$

$$\lambda_{1d} := \frac{0.9 \cdot K_{r1} \cdot (q1 \cdot Ken1)^2 \cdot K_{rr1} \cdot K_{dd1} \cdot K_{r1}}{k \delta \cdot \delta} \quad \lambda_{1d} = 0.152$$

$$X_{1d} := 1.58 \cdot F1 \cdot Li \cdot W1^2 \cdot \frac{\lambda_{1d}}{P \cdot q1 \cdot 10^8} \quad X_{1d} = 1.954 \times 10^{-3} \quad \text{ohm}$$

La réactance de fuite d'encoche

$$h_{l1} := h_{enc1}$$

$$h1 = 23.508 \quad \text{mm}$$

épaisseur de l'isolant h11

$$h11 := 2 \quad \text{mm}$$

hauteur de clavette

$$hk1 = 1 \quad \text{mm}$$

$$\lambda_{enc1} := \left(\frac{h1 \cdot KB1}{3 \cdot b2} \right) + KB2 \cdot \left[\left(\frac{h11}{b2} \right) + \left(\frac{3 \cdot hk1}{b2 + 2 \cdot bfl} \right) + \left(\frac{hf1}{bfl} \right) \right]$$

$$\lambda_{enc1} = 0.857$$

$$X_{enc1} := \frac{1.58 \cdot F1 \cdot Li \cdot W1^2 \cdot \lambda_{enc1}}{P \cdot q1 \cdot 10^8}$$

$$X_{enc1} = 0.011$$

ohm

La réactance totale

$$\lambda1 := (\lambda_{enc1} + \lambda1f + \lambda1d)$$

$$\lambda1 = 2.727$$

$$X1 := 1.58 \cdot F1 \cdot Li \cdot W1^2 \cdot \frac{\lambda1}{P \cdot q1 \cdot 10^8}$$

$$X1 = 0.035$$

ohm

Résistances actives des cages

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

$$K_{red} := 2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot P}{Z2}\right)$$

$$K_{red} = 0.165$$

Coefficient d'inclinaison des encoches

$$\beta_{ob} := \frac{\tau1}{tz2}$$

$$\beta_{ob} = 0.796$$

angle centrale d'inclinaison des encoches

$$\alpha_{ob} := \frac{2 \cdot \pi \cdot P \cdot \beta_{ob}}{Z2}$$

$$\alpha_{ob} = 0.132$$

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

$$K_{ob} = 0.999$$

$$M := \left(\frac{4 \cdot M1}{Z2}\right) \cdot \left(\frac{W1 \cdot Ken1}{K_{ob}}\right)^2$$

$$M = 68.979$$

Résistance actives de la cage externe

$$K_{dep} := 1$$

$$T := 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\rho_{cusn6} := 13 \cdot 10^{-9} \quad \text{ohm} \cdot \text{m}$$

$$R_{bc} := \rho_{cusn6} \cdot \frac{K_{dep} \cdot Li \cdot 10^3}{sbc}$$

$$R_{bc} = 5.58 \times 10^{-5}$$

ohm

Résistance de l'anneau de la cage externe

$$R_{anc} := \frac{\rho_{cu20} \cdot 2 \cdot \lambda_1 \cdot D_{ancmoy} \cdot 10^3}{Z2 \cdot sanc}$$

$$R_{anc} = 6.936 \times 10^{-7}$$

ohm

88

Résistance de l'anneau raménée a la barre circulaire

$$R_{anrambc} := \frac{R_{anc}}{K_{red}^2}$$

$$R_{anrambc} = 2.543 \times 10^{-5}$$

ohm

Résistance totale de la cage externe ramenee au stator

$$R_{cs} := M \cdot (R_{bc} + R_{anrambc})$$

$$R_{cs} = 5.603 \times 10^{-3}$$

ohm

Résistances actives de la cage interne

Résistance active de la barre rectangulaire

$$T := 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\rho_{cu20} := 0.0172 \cdot 10^{-6} \quad \text{ohm}\cdot\text{m}$$

$$R_{br} := \rho_{cu20} \cdot \frac{K_{dep} \cdot Li \cdot 10^3}{s_{br}}$$

$$R_{br} = 3.835 \times 10^{-5}$$

ohm

Résistance totale des barres

$$R_{bt} := \frac{R_{bc} \cdot R_{br}}{R_{bc} + R_{br}}$$

$$R_{bt} = 2.273 \times 10^{-5}$$

ohm

Résistance de l'anneau de la cage interne

$$R_{anr} := \frac{\rho_{cu20} \cdot 2 \cdot \lambda_1 \cdot Danmoy \cdot 10^3}{Z_2 \cdot sanr}$$

$$R_{anr} = 3.694 \times 10^{-7}$$

ohm

Résistance de l'anneau ramenée a la barre rectangulaire

$$R_{anrambr} := \frac{R_{anr}}{K_{red}^2}$$

$$R_{anrambr} = 1.354 \times 10^{-5}$$

ohm

Résistance totale de la cage interne ramenee au stator

$$R_{rs} := M \cdot (R_{br} + R_{anrambr})$$

$$R_{rs} = 3.579 \times 10^{-3}$$

ohm

Résistance totale de rotor ramenée au stator

$$R_s := \frac{R_{cs} \cdot R_{rs}}{R_{cs} + R_{rs}}$$

$$R_s = 2.184 \times 10^{-3}$$

ohm

Deuxième methode

Résistance totale de l'anneau ramenee au barres

$$R_{anrambt} := \frac{R_{anrambc} \cdot R_{anrambr}}{R_{anrambc} + R_{anrambr}}$$

$$R_{anrambt} = 8.837 \times 10^{-6}$$

ohm

Résistance d'anneaux ramenées au stator

$$R_{anrams} := M \cdot R_{anrambt}$$

$$R_{anrams} = 6.096 \times 10^{-4}$$

ohm

Résistance active d'une phase rotorique

$$R'2 := R_{bc} + R_{anrambc}$$

$$R'2 = 8.123 \times 10^{-5}$$

ohm

$$R''2 := R_{br} + R_{anrambr}$$

$$R''2 = 5.189 \times 10^{-5}$$

ohm

$$R2 := \frac{R'2 \cdot R''2}{R'2 + R''2}$$

$$R2 = 3.166 \times 10^{-5}$$

ohm

Résistance d'une phase rotorique ramenée au stator

$$R2ram := M \cdot R2$$

$$R2ram = 2.184 \times 10^{-3}$$

ohm

Réactance de dispersion et permeance de rotor

La cage externe

$$I_{an} := \frac{I2}{K_{red}}$$

$$I_{an} = 4.916 \times 10^3$$

(A)

$$J_{anc} := \frac{I_{an}}{s_{anc}}$$

$$J_{anc} = 4.839$$

$\left(\frac{A}{mm^2} \right)$

Facteur de conductibilite magnétique

$$K_c := 1$$

$$K_r := K_c$$

$$\lambda_{cm} := \left(0.785 - \frac{1}{2 \cdot dbc} \right) \cdot Kc + \frac{hf2}{bf2}$$

$$\lambda_{cm} = 1.825$$

Permeance frontale

$$\lambda_{2fc} := \left(\frac{2.3 \cdot Dancmoy}{Z2 \cdot Li \cdot Kred^2} \right) \cdot \log \left[\frac{4.7 \cdot Dancmoy}{2 \cdot (hanc + banc)} \right]$$

$$\lambda_{2fc} = 1.193$$

La réactance de la cage extérieure

$$X_{2ext} := 7.9 \cdot F1 \cdot Li \cdot (\lambda_{cm} + \lambda_{2fc}) \cdot 10^6$$

$$X_{2ext} = 6.08 \times 10^{11}$$

ohm

La cage interne

$$I_{an} := \frac{I2}{Kred}$$

$$I_{an} = 4.916 \times 10^3$$

(A)

$$Janr := \frac{I_{an}}{sanr}$$

$$Janr = 2.993$$

$\frac{A}{mm^2}$

Facteur de dispersion d'encoche

$$hf22 := 7 \quad mm$$

$$bf22 := 1.8 \quad mm$$

$$\lambda_{disenc} := \left(Kr \cdot \frac{hm}{3 \cdot bbr} \right) + \frac{hf22}{bf22}$$

$$\lambda_{disenc} = 5.244$$

Permeance frontale

$$\lambda_{2fr} := \left(\frac{2.3 \cdot Danrmoy}{Z2 \cdot Li \cdot Kred^2} \right) \cdot \log \left[\frac{4.7 \cdot Danrmoy}{2 \cdot (hanr + banr)} \right]$$

$$\lambda_{2fr} = 0.912$$

La réactance de la cage interieure

$$X_{2int} := 7.9 \cdot F1 \cdot Li \cdot (\lambda_{disenc} + \lambda_{2fr}) \cdot 10^{-6}$$

$$X_{2int} = 1.24$$

ohm

$$X_2 := \frac{X_{2ext} \cdot X_{2int}}{X_{2ext} + X_{2int}}$$

$$X_2 = 1.24$$

ohm

Réactance du rotor ramenée au stator

$$X_{2ram} := M \cdot X_2$$

$$X_{2ram} = 85.552$$

ohm

Paramètre au demarrage

determination de Φ_1 coefficient qui depend de ξ_1

$$hb := 12.8 \quad \text{mm}$$

$$gd := 1$$

$$\xi_1 := 0.064 \cdot hb \cdot \sqrt{gd}$$

$$\xi_1 = 0.819$$

$$\phi_1 := 0$$

CAIcul de la profendeur de penetration

$$h_{pp} := \frac{hb}{1 + \phi_1}$$

$$h_{pp} = 12.8$$

mm

section de la barre penetree par le courant de demarrage

$$s_{bdem} := \frac{\pi \cdot dbc^2}{4}$$

$$s_{bdem} = 118.823$$

mm²

Résistance de la barre au demarrage

$$K_{dep} := \frac{s_{bc}}{s_{bdem}}$$

$$K_{dep} = 1$$

$$R_{bdem} := R_{bc} \cdot K_{dep}$$

$$R_{bdem} = 5.58 \times 10^{-5}$$

ohm

Résistance de la cage au démarrage

$$R_{2dem} := R_{anrambc} + R_{bdem}$$

$$R_{2dem} = 8.123 \times 10^{-5}$$

ohm

Résistance de la cage au démarrage ramenée au stator

$$R_{2demram} := M \cdot (R_{anrambc} + R_{bdem})$$

$$R_{2demram} = 5.603 \times 10^{-3}$$

ohm

Résistance du rotor pour des bagues separees

$$\alpha := \frac{R_{bc}}{R_{bc} + R_{br}}$$

$$\alpha = 0.593$$

$$\Delta z := 0.05$$

$$\xi := 1 + \left(\frac{1}{5}\right) \cdot \left(\frac{\pi \cdot P}{Z2}\right)^2 - \left[\frac{\Delta z}{1 - \left(\frac{P}{Z2}\right)^2} \right]$$

$$\xi = 0.951$$

$$\lambda_{\chi 1} := \left(\frac{\tau 1}{12 \cdot \delta \cdot k \delta}\right) \cdot \xi$$

$$\lambda_{\chi 1} = 1.585$$

$$\lambda_{\chi 2} := \left(\frac{t z 2}{12 \cdot \delta \cdot k \delta}\right) \cdot \xi$$

$$\lambda_{\chi 2} = 1.992$$

$$\beta' := \frac{X_{2int}}{R_{bc} + R_{br}}$$

$$\beta' = 1.317 \times 10^4$$

$$r'2 := R2ram \cdot \frac{In1}{Vn} \quad r'2 = 3.499 \times 10^{-3} \quad \text{ohm}$$

$$x'2 := X2ram \cdot \frac{In1}{Vn} \quad x'2 = 137.065 \quad \text{ohm}$$

$$g := r'2$$

$$K' := \frac{1}{1 + \beta^2 \cdot g^2}$$

$$K' = 4.704 \times 10^{-4}$$

$$r2\xi := Rbc \cdot (1 - \alpha \cdot K') \quad r2\xi = 5.578 \times 10^{-5} \quad \text{ohm}$$

Réactance du rotor pour des bagues séparées

$$x2\xi := 7.9 \cdot F1 \cdot Li \cdot (\lambda2fc + \lambda2fr \cdot \alpha^2 \cdot K' + \lambdadisenc + \lambda\chi2) \cdot 10^{-9} \quad x2\xi = 1.698 \times 10^{-3} \quad \text{ohm}$$

Paramètres du rotor au regime a vide et au fonctionnement nominal

Résistance du rotor pour des bagues séparées

$$r2 := Rbc \cdot (1 - \alpha) \quad r2 = 2.273 \times 10^{-5} \quad \text{ohm}$$

Réactance du rotor pour des bagues séparées

$$x2 := 7.9 \cdot F1 \cdot Li \cdot (\lambda2fc + \lambda2fr \cdot \alpha^2 + \lambdadisenc + \lambda\chi2) \cdot 10^{-9} \quad x2 = 1.763 \times 10^{-3} \quad \text{ohm}$$

$$KR := \frac{r2\xi}{r2}$$

$$KR = 2.454$$

$$r'2\xi := KR \cdot r'2 \quad r'2\xi = 8.588 \times 10^{-3} \quad \text{ohm}$$

CALCUL DES PERTES ET DU RENDEMENT

Pertes principales dans le fer

Pertes dans les dents

p1 pertes totales spécifiques maximale a 50hz pour 1.4 T

$$p1 := 2.38 \quad \text{N250} \quad \left(\text{w} \cdot \text{kg}^{-1} \right)$$

$$Gz1 := 7.8 \cdot 10^{-6} \cdot Li \cdot Kfer \cdot [hz1 \cdot \pi \cdot (D1 + hz1) - See1 \cdot Z1]$$

$$Gz1 = 41.782$$

Kg

$$pfz1 := 1.7 \cdot p1 \cdot Gz1 \cdot Bz1^2$$

$$pfz1 = 517.714$$

W

Pertes dans la culasse statoriques

$$Gc1 := 7.8 \cdot 10^{-6} \cdot Li \cdot Kfer \cdot hc1 \cdot \pi \cdot (D1 - hc1)$$

$$Gc1 = 159.165$$

Kg

$$pfc1 := 1.7 \cdot p1 \cdot Gc1 \cdot Bc1^2$$

$$pfc1 = 1.262 \times 10^3$$

W

$$pfer := pfc1 + pfz1$$

$$pfer = 1.78 \times 10^3$$

W

Pertes electriques dans le cuivre et le bronze

Pertes joules statorique

$$pj1 := M1 \cdot R1T75 \cdot In1^2$$

$$pj1 = 3.349 \times 10^3$$

W

Pertes joules rotorique

$$m2 := Z2$$

$$m2 = 38$$

$$pj2 := m2 \cdot R2 \cdot (I2)^2$$

$$pj2 = 793.283$$

W

Pertes mecaniques

pour $2p > 2$

$$K_t := 1$$

pour $2p = 2$

$$K_t := 1.3 \cdot (1 - D_{ext1} \cdot 10^{-3})$$

$$K_t = 0.702$$

$$p_{mec} := K_t \cdot (N_s \cdot 10^{-3})^2 \cdot (D_{ext1} \cdot 10^{-2})^4$$

$$p_{mec} = 2.829 \times 10^3$$

W

Pertes supplementaires

$$p_{sup} := 0.005 \cdot \frac{P_n \cdot 10^3}{\eta_n}$$

$$p_{sup} = 1.035 \times 10^3$$

W

Pertes totales

$$p_t := p_{fer} + p_{j1} + p_{j2} + p_{mec} + p_{sup}$$

$$p_t = 9.786 \times 10^3 \quad (\text{W})$$

Rendement de la machine

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

$$\eta = 0.953$$

Calcul de la résistance de magnétisation

$$U_n := 380 \quad (\text{V})$$

$$p_{a10} := R_{1T20} \cdot M_1 \cdot I_{\mu}^2$$

$$p_{a10} = 29.98 \quad (\text{W})$$

$$I_{0a} := \frac{p_{fer} + p_{mec} + p_{a10}}{M_1 \cdot U_n}$$

$$I_{0a} = 4.069 \quad (\text{A})$$

$$R_m := \frac{x_m \cdot I_{\mu}}{I_{0a}}$$

$$R_m = 52.715$$

(ohm)

CALCUL DES PERFORMANCES DU MOTEUR

Caractéristique de fonctionnement de moteur

$$P_n := 200000 \quad (\text{W})$$

$$p_2 := P_n + p_{\text{sup}} + p_{\text{mec}}$$

$$p_2 = 2.039 \times 10^5$$

W

$$C_1 := 1 + \frac{X_1}{x_m}$$

$$C_1 = 1.006$$

Calcul de l'impédance

$$a' := C_1^2$$

$$s := \frac{a' \cdot r'^2}{g}$$

$$s = 1.012$$

$$a := C_1 \cdot R_1 T_{20}$$

$$a = 7.3 \times 10^{-3}$$

$$R := a + \frac{a' \cdot r'^2}{g}$$

$$R = 1.02 \quad \text{ohm}$$

$$K_{ob1} := K_{ob}$$

$$x'^2 := x_2 \cdot \frac{4 \cdot M_1 \cdot (W_1 \cdot K_{en1})^2}{Z_2 \cdot K_{ob}^2}$$

$$x'^2 = 0.122$$

ohm

$$b := C1 \cdot (X1 + C1 \cdot x^2)$$

$$b = 0.158$$

$$b' := 0$$

$$X := b + \frac{b' \cdot r^2}{g}$$

$$X = 0.158$$

$$Z := \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$Z = 1.032$$

ohm

Le courant secondaire

$$I''2 := \frac{Un}{Z}$$

$$I''2 = 368.309$$

$$I'2 := C1 \cdot I''2$$

$$I'2 = 370.549$$

A

$$\cos\phi2 := \frac{R}{Z}$$

$$\cos\phi2 = 0.988$$

$$\sin\phi2 := \frac{X}{Z}$$

$$\sin\phi2 = 0.154$$

$$I0a := \frac{pfer + 3 \cdot I\mu^2 \cdot R1T20}{3 \cdot Un}$$

$$I0a = 1.588 \quad A$$

$$I0r := I\mu \cdot \sqrt{3}$$

$$I0r = 64.278 \quad A$$

Courant totale a vide

$$I0 := \sqrt{I0a^2 + I0r^2}$$

$$I0 = 64.298$$

A

Courant absorbé

$$I_{1a} := I_{0a} + I''^2 \cdot \cos^2 \phi$$

$$I_{1a} = 365.528 \quad (\text{A})$$

$$I_{1r} := I_{0r} + I''^2 \cdot \sin^2 \phi$$

$$I_{1r} = 120.839 \quad \text{A}$$

$$I_{11} := \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1r}^2}$$

$$I_1 = 384.984$$

A

Le facteur de puissance d'un moteur

$$\cos(\phi) := \frac{I_{1a}}{I_1}$$

$$\cos(\phi) = 0.949$$

A

Calcul des puissances

$$P'1 := 3 \cdot V_n \cdot I_{n1}$$

$$P'1 = 2.326 \times 10^5$$

(VA)

$$P_{el1} := 3 \cdot I_{n1}^2 \cdot R_{1T75} \cdot 10^{-3}$$

$$P_{el1} = 3.349$$

(W)

$$P_{el2} := 3 \cdot I''^2 \cdot r'2 \cdot 10^{-3}$$

$$P_{el2} = 1.441$$

(W)

$$P^{sup} := 0.005 \cdot P'1$$

$$P^{sup} = 1.163 \times 10^3$$

(W)

La puissance absorbée

$$P_a := M_1 \cdot V_n \cdot I_{1a}$$

$$P_a = 2.412 \times 10^5$$

(W)

Le rendement

$$\eta_1 := 1 - \frac{P_t}{P'1}$$

$$\eta_1 = 0.958$$

Vitesse de rotation du moteur

$$N := N_s \cdot (1 - g)$$

$$N = 2.99 \times 10^3$$

$$\frac{tr}{mn}$$

Le couple utile sur l'arbre du moteur

$$P_n = 2 \times 10^5 \quad \text{W}$$

$$C_u := \frac{9.55 \cdot P_n}{N} \quad C_u = 638.902 \quad \text{N}\cdot\text{m}$$

caractéristique de démarrage

$$\gamma_1 := \frac{\left(\frac{bfl}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{bfl}{\delta}}$$

$$\gamma_1 = 3.472$$

$$K'\delta := \frac{\tau_1}{\tau_1 - \gamma_1 \cdot \delta}$$

$$K'\delta = 1.161$$

$$G_1 := (\tau_1 - bfl) \cdot (1 - K'\delta)$$

$$G_1 = -2.419$$

$$\Delta\lambda_{n1m} := \left(\frac{hf_1 + 0.58 \cdot hk_1}{bfl}\right) \cdot \left(\frac{G_1}{G_1 + 1.5 \cdot bfl}\right)$$

$$\Delta\lambda_{n1m} = -0.15$$

$$\lambda_{n1m} := \lambda_{enc1} - \Delta\lambda_{n1m}$$

$$\lambda_{n1m} = 1.007$$

$$\lambda_{\chi 1m} := \lambda_{\chi 1} \cdot k\delta$$

$$\lambda_{\chi 1m} = 1.981$$

$$X_{1m} := X_1 \cdot \frac{\lambda_{n1m} + \lambda_{\chi 1m} + \lambda_{\chi 1}}{\lambda_{enc1} + \lambda_{1f} + \lambda_{\chi 1}} \quad X_{1m} = 0.039 \quad \text{ohm}$$

$$X_{12n} := k\mu \cdot x_m$$

$$X_{12n} = 11.623$$

$$C_{1nm} := 1 + \frac{X_{1m}}{X_{12n}}$$

$$C_{1nm} = 1.003$$

$$G_2 := (tz_2 - bf_2) \cdot (1 - k\delta)$$

$$G_2 = -5.351$$

$$\Delta\lambda_{n2m} := \left(\frac{hf_2}{bf_2}\right) \cdot \left(\frac{G_2}{bf_2 + G_2}\right)$$

$$\Delta\lambda_{n2m} = 3.503$$

$$K_\chi := \left(\frac{3}{2 \cdot \xi}\right) \cdot \left(\frac{\sinh(2 \cdot \xi) - \sin(2 \cdot \xi)}{\cosh(2 \cdot \xi) - \cos(2 \cdot \xi)}\right)$$

$$K_\chi = 1.484$$

$$\lambda'_{n2} := \left(\frac{hf_2^2}{3 \cdot dbc}\right) \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot dbc^2}{8 \cdot sb}\right)^2 + 0.66 - \frac{bf_2}{2 \cdot dbc}$$

$$\lambda'_{n2} = 0.64$$

$$\Delta\lambda_{n2\xi} := \lambda'_{n2} \cdot (1 - K_\chi)$$

$$\Delta\lambda_{n2\xi} = -0.31$$

$$\lambda_{n2\xi} := \lambda_{disenc} - \Delta\lambda_{n2\xi}$$

$$\lambda_{n2\xi} = 5.554$$

$$\lambda_{n2\xi m} := \lambda_{n2\xi} - \Delta\lambda_{n2m}$$

$$\lambda_{n2\xi m} = 2.051$$

$$X'2\xi_m := x'2 \cdot \frac{\lambda n^2 \xi_m + \lambda^2 f_c + \lambda \chi^2}{\lambda_{disenc} + \lambda^2 f_c + \lambda \chi^2}$$

$$X'2\xi_m = 0.076$$

$$R_{\chi m} := R_{1T20} + C_{1nm} \cdot \frac{r^2 \xi}{g}$$

$$R_{\chi m} = 0.023$$

$$X_{\chi m} := X_{1m} + C_{1nm} \cdot X'2\xi_m$$

$$X_{\chi m} = 0.114$$

ohm

$$I''2m := \frac{U_n}{\sqrt{R_{\chi m}^2 + X_{\chi m}^2}}$$

$$I''2m = 3.254 \times 10^3$$

(A)

Courant de démarrage

$$I_d := I''2m \cdot \frac{\sqrt{R_{\chi m}^2 + (X_{\chi m} + x_m)^2}}{C_{1nm} \cdot x_m}$$

$$I_d = 3.308 \times 10^3$$

A

$$\frac{I_d}{I_{n1}} = 9.385$$

Couple de démarrage

$$I'2m := C_{1nm} \cdot I''2m$$

$$I'2m = 3.265 \times 10^3 \quad (A)$$

$$p_1 := 0.005 \cdot p_2$$

$$p_1 = 1.019 \times 10^3$$

$$g_n := \frac{N_s - N}{N_s}$$

$$g_n = 3.499 \times 10^{-3}$$

$$K_R := 1.0012$$

$$C_{drap} := \left(\frac{I'2m}{I_2} \right)^2 \cdot K_R \cdot \frac{g_n}{g}$$

$$C_{\text{drap}} = 16.084$$

$$C_d := C_u \cdot C_{\text{drap}}$$

$$C_d = 1.028 \times 10^4$$

N·m

$$\frac{C_d}{C_u} = 16.084$$

le couple Max

$$C_{\text{max}} := M1 \cdot \frac{I2^2 \cdot r^2}{2 \cdot \pi \cdot F1 \cdot gn}$$

$$\frac{C_{\text{max}}}{C_u} = 2.052$$

$$C_{\text{max}} = 1.311 \times 10^3$$

(N·m)

Après avoir terminé les calculs de notre moteur, on passe à la comparaison des principaux résultats obtenus dans nos calculs avec les résultats d'un moteur standard réalisé par le fabricant Electro-Industrie (ex : ENEL).

Les principaux résultats obtenus sont regroupés dans le tableau suivant :

	Moteur standard	Moteur calculé
Hauteur d'axe h en (mm)	355	315
La longueur virtuelle de l'induit (mm)	681	510
Diamètre extérieur du stator (mm)	550	460
Vitesse de rotation N en (tr/min)	2980	2989
Rendement η en (%)	94	95.3
Le facteur de puissance cos (ϕ) .	0.90	0.95
Le courant nominal I_n en (A)	395	354.67
Le rapport du courant de démarrage sur le courant nominal (I_d/I_n)	6.5	9.33
Le couple nominale C_n en (N.m)	725	639
Le rapport du couple de démarrage sur le couple nominal (C_d/C_n).	1.2	15.89
Le rapport du couple maximale sur le couple nominal (C_{max}/C_n).	2.5	2.05
Le volume en (m ³).	0.191	0.112
La section effective d'un conducteur statorique S_{eff} en (mm ²).	36	41.24
Diamètre avec isolation des conducteurs statorique diso en (mm).	1.7	1.535
Le nombre de conducteurs dans une encoche N_{enc1}	6	4
Nombre de spires d'une voie parallèle	24	16

Comparaison et interprétation des résultats :

1- le volume du moteur a diminué a cause de la diminution de la longueur virtuelle de l'induit et la diminution de la hauteur de l'axe du moteur, ce qui nous permet d'avoir un moteur moins encombrant.

2- le couple de démarrage a considérablement augmenté a cause de l'utilisation de la technologie du moteur à double cage (moteur de la classe C).

3-la vitesse de rotation a augmentée, ce qui fera diminuer le glissement, ce dernier est proportionnel au couple utile donc le couple utile a diminué.

4-la charge linéaire a diminuée, ce qui fera diminuer le nombre de conducteurs dans une encoche ainsi que le nombre de spires d'une voie parallèle, donc une économie du cuivre.

5-la réactance magnétique d'une phase statorique est proportionnelle au carré du nombre de spire d'une voie parallèle, donc la diminution de ce dernier engendre la diminution de la réactance magnétique, ce qui fera augmenter le facteur de puissance de la machine.

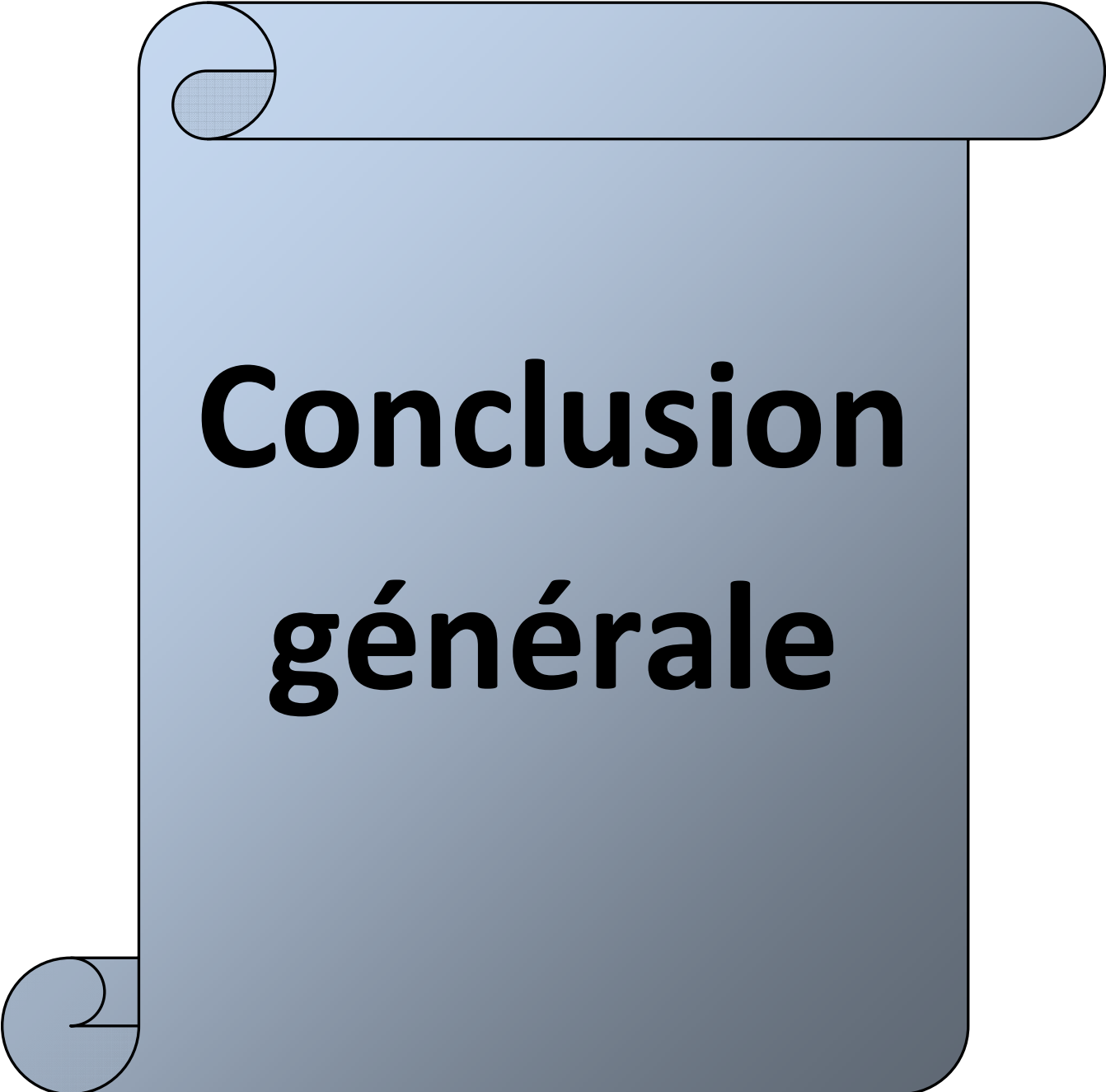
6-pour le moteur calculé, on a utilisé des tôles magnétiques en acier (N250) qui présentent des pertes spécifiques maximales de 2.38W/Kg, tandis que le moteur standard est conçu à base de tôles magnétiques (M530) de pertes spécifiques maximale de 5.3W/Kg, ce qui fera réduire les pertes dans le fer de la machine.

7-la section des conducteurs a augmentée et le nombre de spires d'une voie parallèle a diminué, ce qui fera diminuer la résistance des phases statorique, donc une diminution des pertes joule dans le cuivre statorique.

8- les pertes joule rotoriques sont proportionnelles au glissement, ce dernier a diminué donc ces pertes vont diminuer.

9-le diamètre extérieur du rotor du moteur calculé a diminué, ce qui fera diminuer les pertes mécaniques dues aux frottements.

Toutes ces diminutions de pertes ont contribué a l'augmentation du rendement de moteur qui passe de **94%** a **95.3%**, ce qui nous permet de dire qu'on a fait passer le moteur de la classe des moteurs a **rendement standard (IE1)** a la classe des moteurs a **haut rendement (IE2)** comme le montre le tableau 1 du chapitre II.



**Conclusion
générale**

Conclusion générale

Pour construire une machine électrique, on doit pas seulement tenir compte de ses propriétés électromagnétiques mais faire en sorte qu'elle soit la plus performante possible, le dimensionnement doit satisfaire avant tout les lois de la physique en particulier électriques, magnétiques et mécaniques, comme il doit répondre au exigences du cahier de charge tel que le facteur de puissance, la capacité de surcharge, le rendement et les conditions de démarrage. C'est pour cela que concevoir une machine électrique nécessite une étude profonde et des recherches intenses, ainsi que des moyens, ce qui induit a une longue durée de travail.

Dans notre travail, on a calculé et dimensionné un moteur asynchrone a double cage a partir d'un cahier de charges en utilisant une méthode de calcule plus ou moins précise et a l'aide d'un logiciel de calcul et de programmation, cette méthode de calcul nous a permet d'agir sur certains paramètres de la machine comme le diamètre intérieur du stator, l'induction magnétique et la densité du courant pour faire varier d'autres paramètres comme la charge linéaire et la section des conducteurs.

La comparaison des résultats obtenus dans nos calculs aux résultats d'un moteur standard nous permet de dire qu'on a réussi à optimiser ce moteur de point de vu volume, rendement et facteur de puissance, et ce qui nous permet d'avoir un moteur moins encombrant plus rendable et plus économique.

Enfin, on peut dire que le domaine de calcul d'une machine électrique s'avère très vaste et que l'amélioration d'une méthode de calcul est un sujet d'actualité. Nous souhaitons que d'autres études prennent on considération d'autres paramètres.

ANNEXE

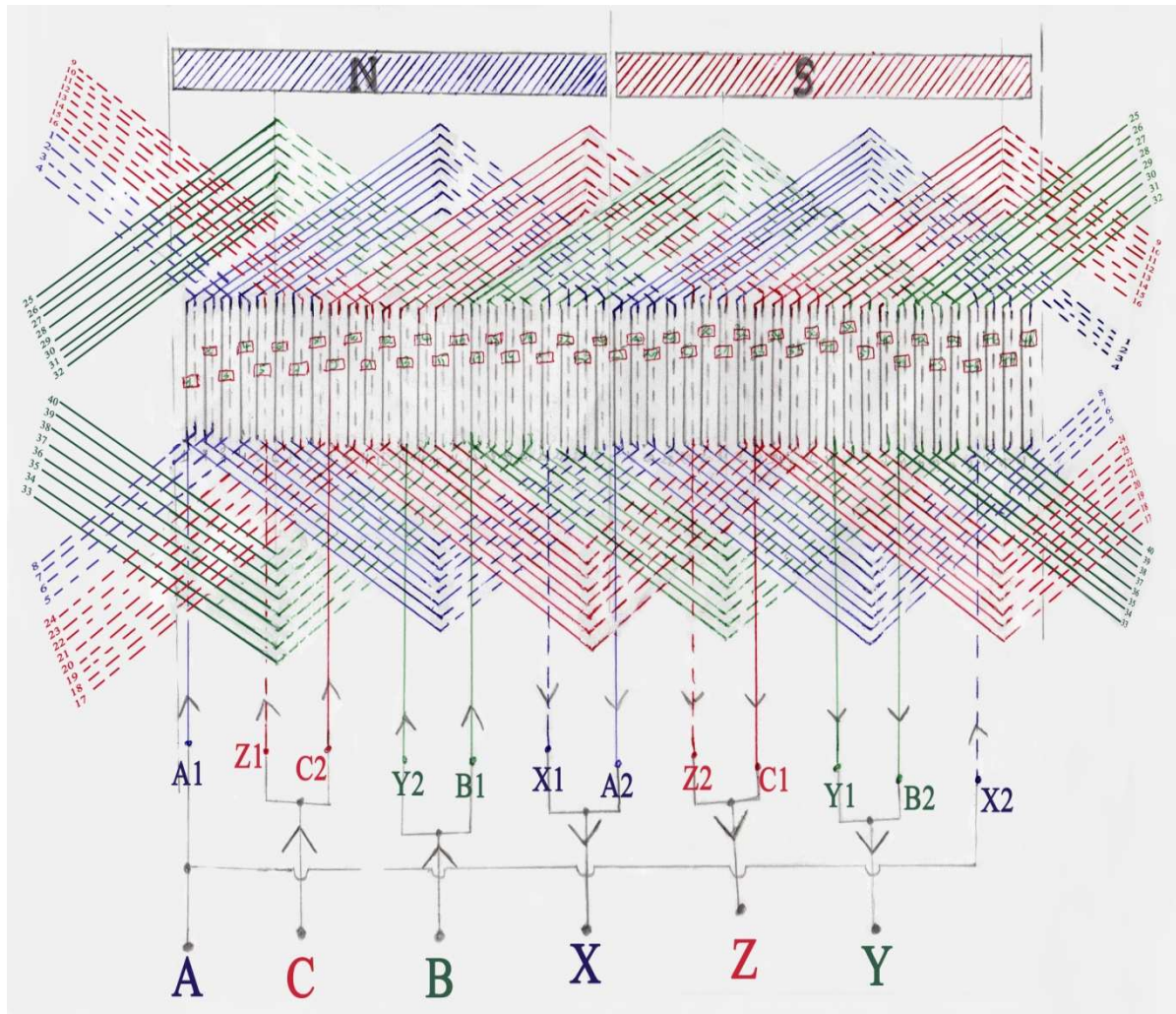


Figure1 : schéma de bobinage du moteur en concentrique

ANNEXE

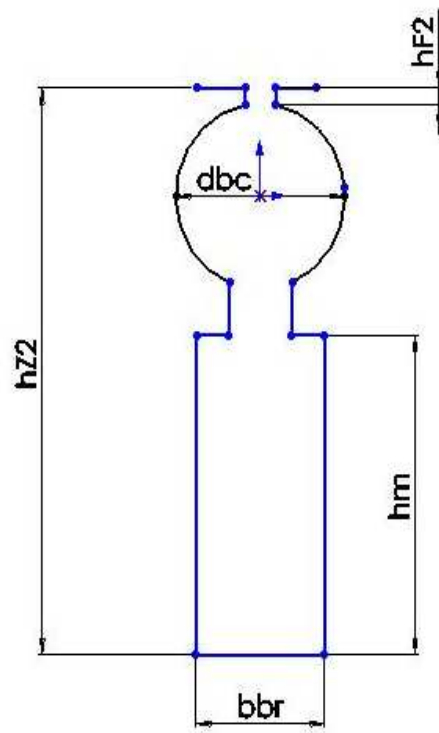


figure 2 ; Représentation de l'encoche rotorique

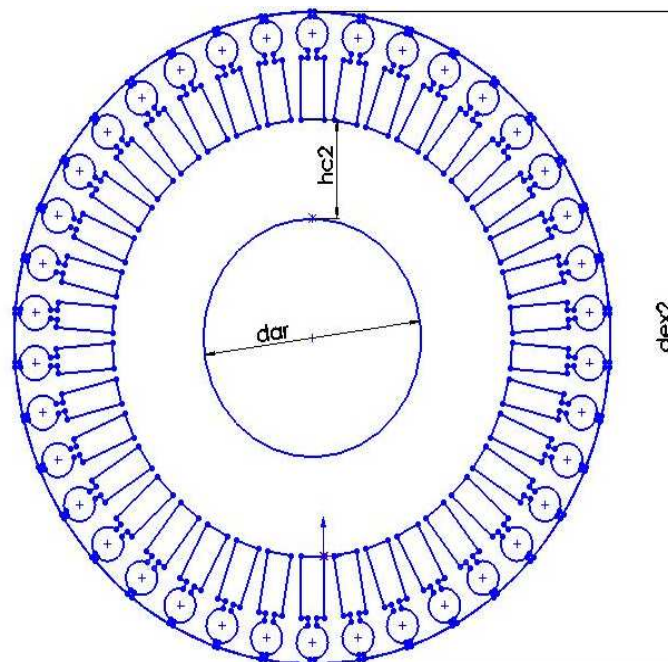


Figure 3 : Représentation de la feuille rotorique

ANNEXE

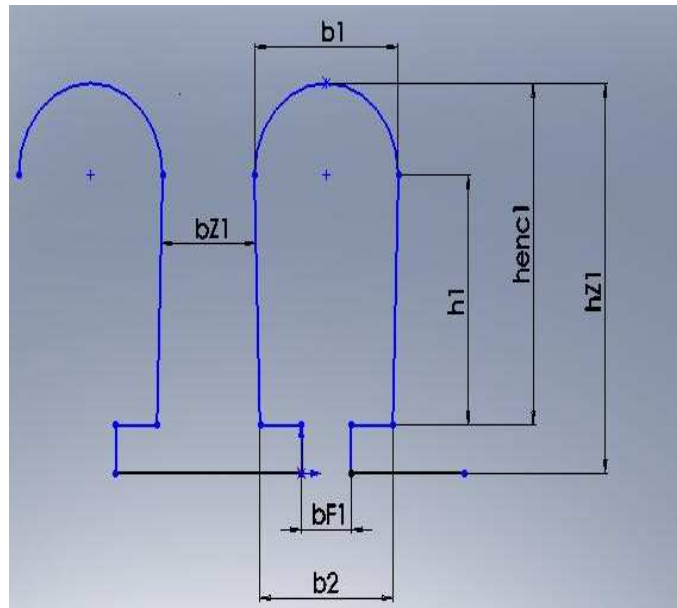


Figure 4 : Représentation de l'encoche et la dent statoriques

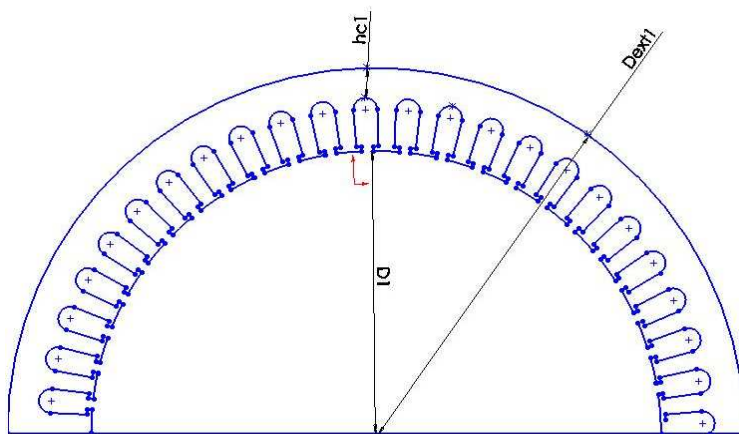


Figure 5 : Représentation de la feuille statorique

ANNEXE

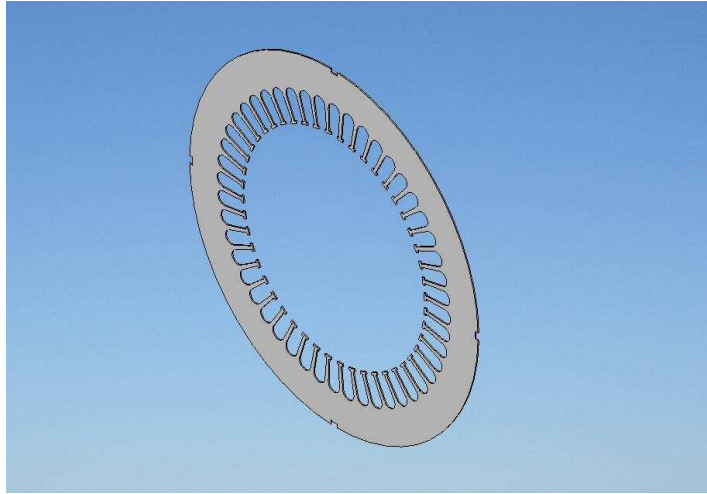


Image 1 ; Représentation en 3D de la tôle magnétique statorique

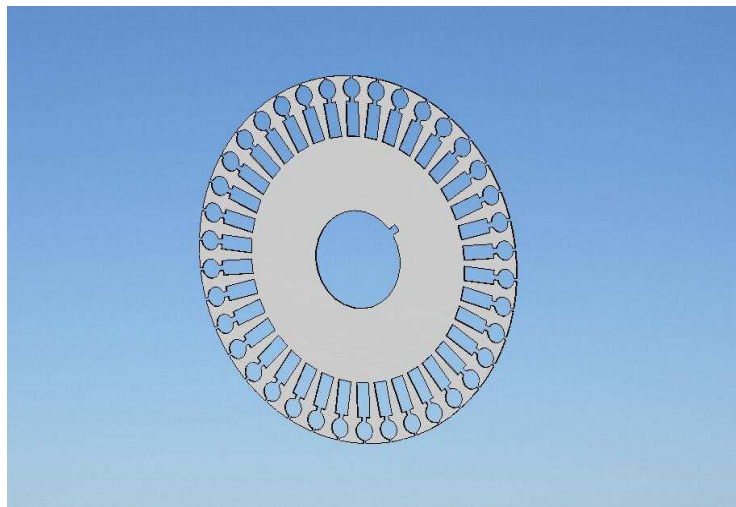


Image 2 : Représentation en 3D de tôle magnétique rotorique

ANNEXE

B.I	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H. A/M									
0,4	121	127	130	133	136	138	141	144	147	150
0,5	154	157	160	164	167	171	174	177	180	184
0,6	188	191	194	198	201	205	208	212	216	220
0,7	223	226	229	233	236	240	243	247	250	253
0,8	256	259	262	265	268	271	274	277	280	283
0,9	286	290	293	297	301	304	308	312	316	320
1,0	321	329	333	338	342	346	350	355	360	365
1,1	370	375	380	385	391	396	401	406	411	417
1,2	424	430	436	442	448	455	461	467	473	479
1,3	486	495	504	514	524	533	563	574	584	585
1,4	580	598	610	622	634	646	658	670	683	696
1,5	709	722	735	749	763	777	791	805	820	835
1,6	850	878	906	934	962	990	1020	1050	1080	1110
1,7	1150	1180	1220	1250	1200	1330	1360	1400	1440	1480
1,8	1520	1570	1620	1670	1720	1770	1830	1890	1950	2010
1,9	2070	2160	2250	2340	2430	2520	2640	2760	2890	3020
2,0	3150	3320	3500	3680	3860	4040	4260	4480	4700	4920
2,1	5140	5440	5740	6050	6360	6670	7120	7570	8020	8470
2,2	8920	9430	9910	10460	10980	11500	12000	12600	13200	13800
2,3	14400	15100	15800	16500	17200	18000	18800	19600	20500	21400

Tableau 1 : caractéristique magnétique au niveau des dents (stator et rotor)

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

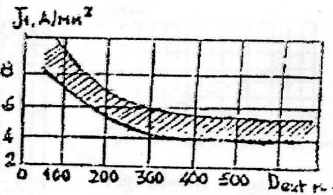
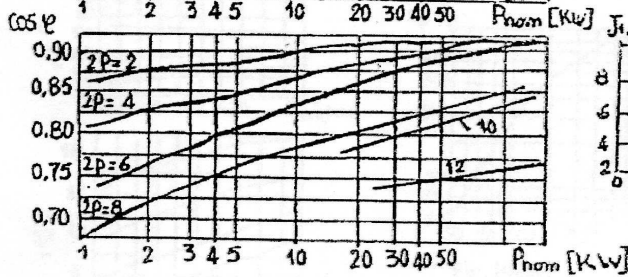
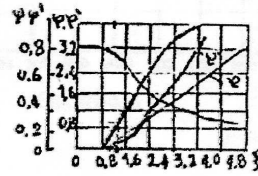
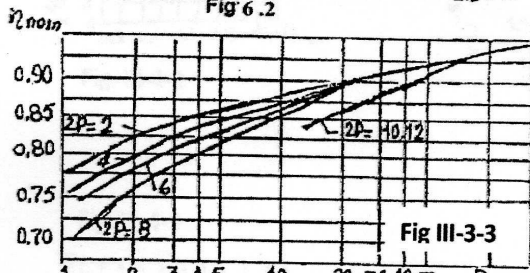
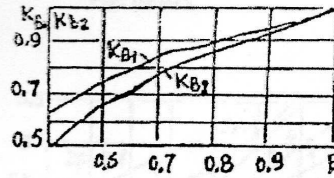
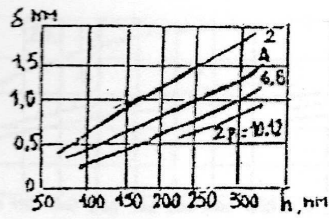
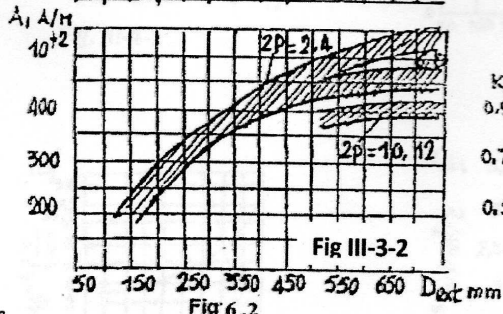
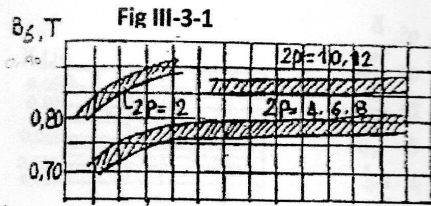
Tableau 2 : Caractéristique magnétique au niveau de la culasse (statorique et rotorique)

ANNEXE

Diamètre du conducteur nu.del (mm)	Diamètre du conducteur isolé. Diso (mm)	Section du conducteur nu qel (mm ²)	Diamètre du conducteur nu del (mm)	Diamètre d'un conducteur isolé. diso(mm)	Section du conducteur nu qel (mm ²)
0,08	0,10	0,00502	0,60	0,655	0,283
0,09	0,11	0,00636	0,63	0,69	0,312
0,10	0,122	0,00785	(0,67)	0,73	0,353
0,112	0,134	0,00985	0,71	0,77	0,396
0,125	0,147	0,01227	0,75	0,815	0,442
(0,132)	0,154	0,01368	0,80	0,865	0,503
0,14	0,162	0,01539	0,85	0,915	0,567
0,15	0,18	0,01767	0,90	0,965	0,636
0,16	0,19	0,0201	0,95	1,015	0,709
0,17	0,20	0,0227	1,00	1,08	0,785
0,18	0,21	0,0255	1,06	1,14	0,883
(0,19)	0,22	0,0284	1,12	1,20	0,985
0,20	0,23	0,0314	1,18	1,26	1,094
(0,212)	0,242	0,0353	1,25	1,33	1,227
0,224	0,259	0,0391	1,32	1,405	1,368
(0,236)	0,271	0,0437	1,40	1,485	1,539
0,25	0,285	0,0491	1,50	1,585	1,767
(0,265)	0,300	0,0552	1,60	1,685	2,011
0,28	0,315	0,0616	1,70	1,785	2,27
(0,30)	0,335	0,0707	1,80	1,895	2,54
0,315	0,350	0,779	1,90	1,995	2,83
0,335	0,370	0,0881	2,00	2,095	3,14
0,355	0,395	0,099	2,12	2,22	3,53
0,375	0,415	0,1104	2,24	2,34	3,94
0,40	0,44	0,1257	2,36	2,46	4,36
0,425	0,465	0,1419	2,50	2,60	4,91
0,45	0,49	0,1590			
(0,475)	0,515	0,1772			
0,5	0,545	0,1963			
(0,53)	0,585	0,221			
0,56	0,615	0,246			

Tableau 3 : Diamètre et section normalisés des conducteurs

ANNEXE



2

Bibliographie

- [1] : T. WILDI et G. SYBILLE « électrotechnique » 4^{ème} édition de BOECK, Canada 2005.
- [2] : M. DESSOUDE « moteur asynchrone choix et problèmes connexes », mise à jour du texte rédigé par MICHEL FALLOU. Article publié en 10 juin 1996.
- [3] : ALEXANDERE6CORNET Ciney « électricité 4, moteur asynchrone triphasé ».
- [4] : Philippe. LEBRUN « machine asynchrone, technologie, choix et alimentation des machines asynchrones » édition du lycée Luise. ARMAND de Strasbourg.
- [5] : M. KOSTINCO L et PIOTROVSKI « machine électrique » Tome 2, édition MIR 1979.
- [6] : M. CHAIB et T. RAHAB « conception optimale d'un moteur asynchrone triphasé a cage d'écureuil à haut rendement (IE2) » mémoire de Master UMMTO. 2011.
- [7] N. ARKAB et Y. BOUZIDI et F. MEHOUBI « identification des paramètres d'une machine asynchrone a rotor bobiné » Mémoire D.E.U.A, UMMTO 2007.
- [8] : groupement des industries de l'équipement électrique, du contrôle-commande et des services associés. www.gimelec.com.
- [9] : A. LOUNI et M. ALOUCHENE « identification des paramètres d'un moteur asynchrone à cage », Mémoire Master UMMTO, 2012.
- [10] : Catalogue de l'entreprise nationale des industries électrotechniques « ELECTRO-INDUSTRIES ». AZAZGA.
- [11] : le site internet www.moteur.asynchrone.com.