

République algérienne démocratique et populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mouloud MAMMERY DE TIZI-OUZOU

Faculté de Génie électrique et informatique

Département d'électrotechnique

MEMOIRE

De fin d'études

En vue d'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en

Electrotechnique

Option : Machines Electriques

Thème :

***CALCUL D'UN MOTEUR
ASYNCHRONE A DOUBLE CAGE***

Proposé par:

M^{elle}: KICHOU.N

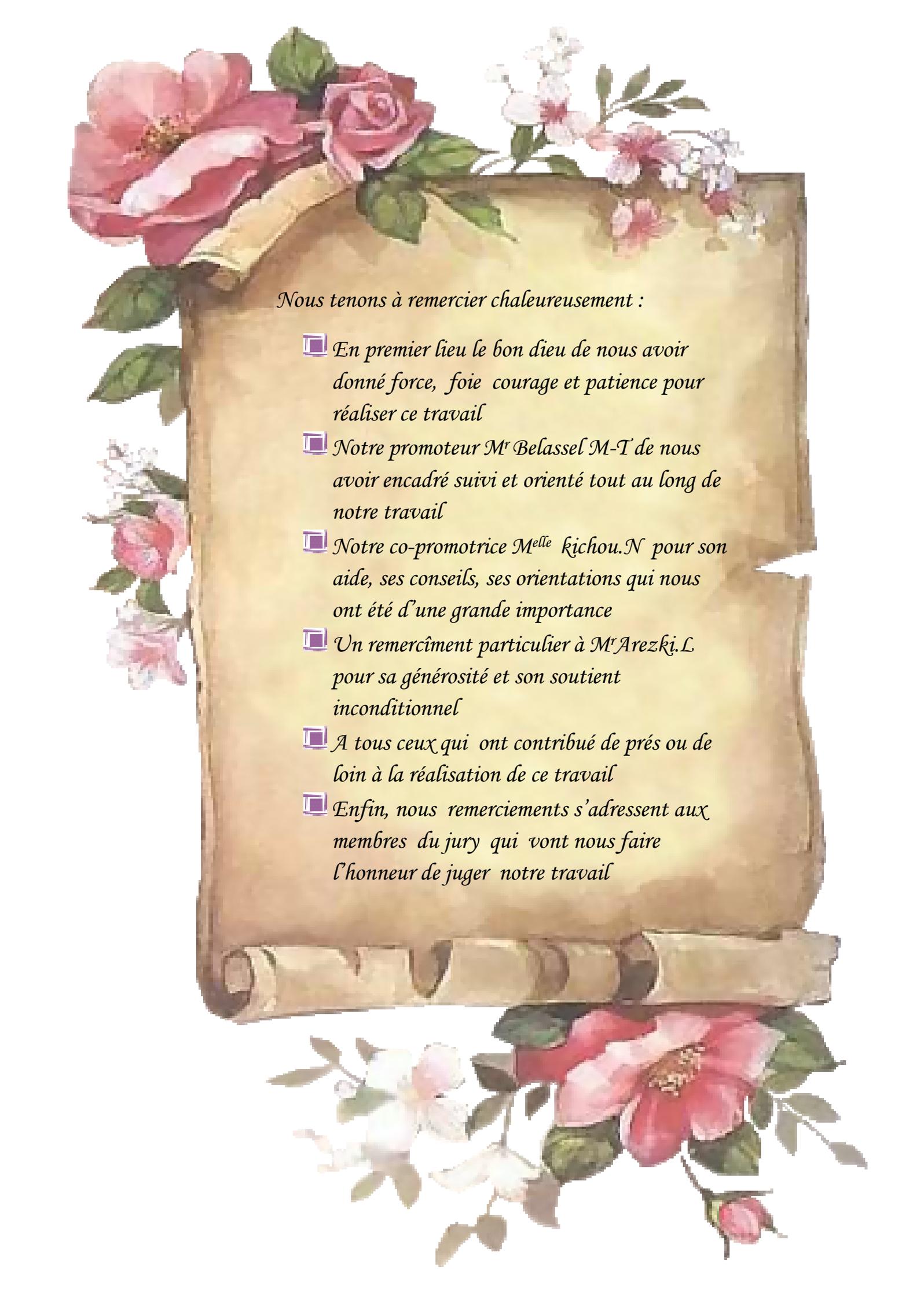
Dirigé par:

M^r: BELASSEL.M-T

Réalisé par:

M^{elle}: SALAH DJAMILA

M^{elle}: AHCENE FAZIA



Nous tenons à remercier chaleureusement :

- ▣ *En premier lieu le bon dieu de nous avoir donné force, foie courage et patience pour réaliser ce travail*
- ▣ *Notre promoteur M^r Belassel M-T de nous avoir encadré suivi et orienté tout au long de notre travail*
- ▣ *Notre co-promotrice M^{elle} Kichou.N pour son aide, ses conseils, ses orientations qui nous ont été d'une grande importance*
- ▣ *Un remerciement particulier à M^r Arezki.L pour sa générosité et son soutien inconditionnel*
- ▣ *A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail*
- ▣ *Enfin, nous remercions s'adressent aux membres du jury qui vont nous faire l'honneur de juger notre travail*



Sommaire

SOMMAIRE

Introduction générale	1
Chapitre I : présentation de l'entreprise	
I.1. Introduction.....	2
I.2. Présentation de l'entreprise.....	2
I.2.1. Historique de l'entreprise.....	3
I.2.2. Entrée en production	4
I.2.3. Evolution à 1998	4
I.2.4. Présentation de l'UMAGE.....	4
I.3. Description du processus de fabrication, Organisation des ateliers et leurs fonctions principales	4
I.3.1. .Découpage.....	4
I.3.1.1. Fabrication des tôles statoriques et rotoriques	5
I.3.1.2. Fabrication des capots de ventilateurs	5
I.3.2. Moulage sous pression	5
I.3.3. Bobinage	5
I.3.3.1. Secteur préparation isolation.....	6
I.3.3.2. Secteur préparation bobines	6
I.3.3.3. Secteur préparation du stator bobiné.....	6
I.3.4. Usinage	8
I.3.4.1. Fabrication de l'arbre	8
I.3.4.2 Usinage du rotor.....	8
I.3.4.3. Usinage des différentes pièces :(carcasse, flasque, boite à borne...).....	9
I.3.5. Montage	9
I.3.5.1. Secteur prés montage	9
I.3.5.2. Secteur montage final	9

I.3.6. Contrôle finale	10
I.4. Normes	11

Chapitre II : Aperçu théorique sur les machines asynchrone

II.1. Introduction	12
II.2. Constitution de la machine asynchrone	12
II.2.1. Le stator	12
II.2.2. L'entrefer	13
II.2.3 .Le rotor	13
II.2.4. Les organes mécaniques	14
II.3. Bobinage de la machine asynchrone	15
II.4. Isolation du bobinage.....	15
II.5. Classes d'isolations thermiques.....	16
II.6. Principe de fonctionnement.....	16
II.7. Classification des moteurs à cage d'écureuil selon les caractéristiques électriques et mécanique.....	16
II.8. Démarrage des moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil.....	17
II.8.1. Les deux principes de démarrage d'un moteur asynchrone	17
II.8.2. Procédés de démarrage	17
II.9. Freinage des moteurs asynchrone.....	19
II.10. Inversion du sens de rotation.....	20
II.11. Amélioration des performances au démarrage à la construction du moteur	20
II.11.1. Moteur à double cage.....	20

Chapitre III : Calcul d'un moteur asynchrone à double cage

III.1. Calcul électromagnétique	23
III.1.1. Dimensionnement du moteur asynchrone à double cage	23
III.1.1.1. Dimensionnement du stator	23
III.1.1.2. Dimensionnement de la feuille statorique	26
III.1.1.3. Dimensionnement du rotor	28
III.1.1.4. Dimensionnement de la feuille rotorique	29
III.1.1.5. Dimensionnement des anneaux de court circuit.....	31
III.1.2. Calcul du circuit magnétique.....	32
III.1.2.1. Circuit magnétique statorique	33
III.1.2.2. Circuit magnétique rotorique	33
III.1.2.3. Force magnétomotrice dans l'entrefer.....	34
III.1.2.4. Force magnétomotrice totale par paire de pôle	34
III.1.2.5. Coefficients de saturation.....	35
III.1.2.6. Courant magnétisant.....	35
III.1.2.7. Réactance de magnétisation	35
III.1.2.8. Coefficient de dispersion magnétique du stator	35
III.1.2.9. Force électromotrice à vide E_0	35
III.1.3. Calcul des paramètres électriques des enroulements	36
III.1.3.1. Paramètres statoriques.....	36
III.1.3.2. Paramètres rotoriques	38
III.1.3.2.1. Résistances actives des cages	38
III.1.3.2.2. Résistances rotoriques	39
III.1.3.2.3. Résistance de dispersion, réactance et perméance du rotor.....	39
III.1.3.2.4. Réactance du rotor ramenée au stator.....	40
III.1.3.3. Paramètres au démarrage.....	41

III.1.3.4. Paramètres du rotor au régime à vide et au fonctionnement nominal	42
III.1.4. Calcul des pertes et du rendement	43
III.1.4.1. Pertes principales dans le fer	43
III.1.4.2 Pertes électriques dans le cuivre et dans le bronze.....	44
III.1.4.3. Pertes mécaniques	45
III.1.4.4. Pertes supplémentaires	45
III.1.4.5. Pertes totales.....	45
III.1.4.6. Rendement de la machine.....	46
III.1.4.7. Calcul de la résistance de magnétisation.....	46
III.1.5. Calcul des performances du moteur	46
III.1.5.1. Schéma équivalent d'un moteur à double cages	47
III.1.5.2. Caractéristiques de fonctionnement du moteur	47
III.1.5.3. Caractéristiques de démarrage	50

Chapitre IV Elaboration d'un programme de calcul

IV.1.Elaboration d'un programme de calcul	52
IV.2.Comparaison et Interprétation des résultats	75
IV.2.1.Comparaison des résultats.....	75
IV.2.2. Interprétation des résultats	76

Conclusion générale	77
----------------------------------	-----------



Cahier De Charge :

Puissance nominale :	$P_n = 132 \text{ KW}$
Tension nominale :	$U_{n1} = 380 \text{ V}$
Couplage :	Δ
Nombre de paires de pôles	$P = 2$
Fréquence du réseau d'alimentation :	$f = 50 \text{ Hz}$
Facteur de puissance :	$\cos \Phi_n = 0,87$
Rendement :	$\eta_n = 95,5$
Hauteur d'axe :	$h = 313 \text{ mm}$
Nombre de phase :	$m = 3$
Classe d'isolation :	F
Degré de protection :	IP 44
Système de refroidissement :	IC

Introduction générale

Introduction Générale

On peut difficilement imaginer de nos jours, un monde sans moteurs électriques. Du plus petit moteur de montre à quartz au moteur de navire de plus d'un million de chevaux, les moteurs ont trouvé d'innombrables applications dans les domaines les plus divers.

Parmi tous les types de moteurs existants, les moteurs asynchrones triphasés notamment les moteurs à cage sont les plus utilisés dans l'industrie en raison des avantages qu'ils présentent.

Certains moteurs sont conçus de façon à améliorer leurs performances au démarrage comme les moteurs à double cage, utilisés généralement dans la grande industrie.

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

Nous allons utiliser une méthode de calcul précise qui repose essentiellement sur des formules développées en associant les connaissances théoriques et les expériences pratiques des constructeurs, toutes en utilisant le logiciel de calcul et de programmation MATHCAD14.

Notre travail est subdivisé en quatre chapitres

- Le premier est consacré à la présentation de l'entreprise d'Electro-Industries et ses différents ateliers par lesquels le moteur à double cage suit sa chaîne de fabrication.
- Le deuxième est un aperçu théorique sur les machines asynchrones.
- Le troisième correspond au calcul d'un moteur asynchrone à double cages.
- Le quatrième est réservé à l'élaboration d'un programme de calcul à l'aide du logiciel Mathcad14 et à la comparaison et interprétation des différents résultats.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I

Présentation de l'entreprise

I.1. Introduction

Dans cette partie du premier chapitre, nous allons présenter l'entreprise Electro-Industries de Fréha où nous avons accompli un stage sur le processus de fabrication d'un moteur asynchrone à double cage d'écurueil et nous avons été suivis par un ingénieur d'état en électrotechnique pendant toute la durée du stage.

En effet, nous avons suivi les différentes étapes de fabrication d'un moteur asynchrone à double cage et ses différents essais et contrôles qui lui sont appliqués et dans cette partie on donnera aussi la présentation des différents ateliers par lesquels le moteur passe pendant sa fabrication.

I.2. Présentation de l'entreprise

L'entreprise Electro- Industries est d'une superficie de 45 Ha est située sur la route nationale N°12, distante de 30 Km du chef lieu de la Wilaya de Tizi Ouzou, et à 8 Km de la commune d'Azazga.

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

La production actuelle d'Electro-Industries est écoulee sur le marché Algérien et génère un chiffre d'affaire de 1,8 Milliards de Dinars.

La capacité de production de transformateurs de l'entreprise couvre les besoins du marché à 70% environ.

La vente de moteurs représente 30% environ de la capacité de production.

Il est signalé qu'Electro-Industries est le seul fabricant de ces produits en Algérie.

L'entreprise emploie un effectif de 755 travailleurs dont 14,04% de cadre, 33,91% de maîtrise et 52,06% d'exécution.

En matières de qualité, Electro-Industries dispose de ses propres laboratoires d'essai et mesure, de ses produits ainsi pour le contrôle des principaux matériaux utilisés dans sa fabrication.

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

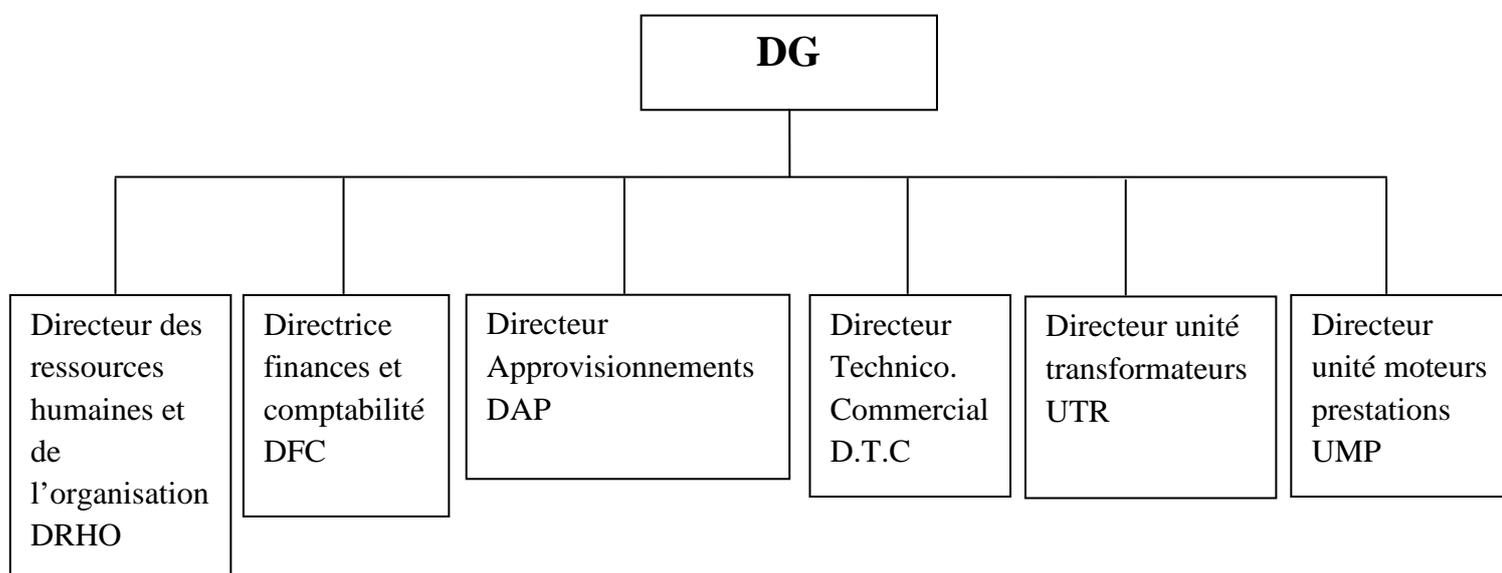
L'entreprise a procédé à la mise en place de son système de qualité en 2002 et a été certifiée par QMI CANADA le 24.07.2004, ISO 9001 VERSION 2000

Elle est également dotée d'un équipement adéquat qui offre au secteur industriel d'importantes capacités de sous-traitance.

Les produits Electro-Industries sont réalisés et contrôlés suivant les normes DIN (Degrés de protection des moteurs électriques), VDE (Règlement relatif aux machines électriques) et sont conformes aux recommandations européennes CE et aux normes internes sévères préconisées par le donneur de licence Siemens. Le niveau de leur qualité a été approuvé par la clientèle locale (SONELGAZ, ENMTP, ENIEM, KAHRIF) et étrangère (Russie, Pays Africains, Le Sénégal, le Mali....).

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

Organigramme du complexe d'AZAZGA (M E I)



I.2.1 Historique de l'entreprise

A l'origine, l'entreprise est issue de la réorganisation du secteur industriel opéré en Algérie entre 1980 et 2000 qui a conduit en 1999 à la restructuration de l'ancienne ENEL (Entreprise Nationale des Industries Electrotechniques) en un certain nombre d'entreprises publiques économiques, société par action (EPE/SPA), parmi lesquelles figure Electro-Industries. L'usine a été réalisée dans le cadre d'un contrat produit en main avec des partenaires allemands, en l'occurrence, SIEMENS pour le produit et FRITZ WERNER pour l'engineering et la construction, l'infrastructure est réalisée par Les entreprises algériennes ECOTEC, COSIDER et BATIMAL:

La production annuelle prévue initialement porte sur:
1500 transformateurs de 50 à 1600 KVA.
50000 moteurs asynchrones triphasés de 0.18 à 400 KW.
2000 alternateurs de 17.5 à 200 KVA.

I.2.2 Entrée en production

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

I.2.3 Evolution à 1998

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

I.2.4 Présentation de l'Unité Moteur Asynchrone et Générateurs Electriques (UMAGE)

L'unité Moteur Asynchrone et Générateurs Electriques (UMAGE) s'occupe de la fabrication des moteurs asynchrones à différentes puissances et à différentes hauteurs d'axes et les générateurs.

I.3. Description du processus de fabrication, Organisation des ateliers et leurs fonctions principales

L'UMAGE se compose de différents ateliers.

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

I.3.1 .Découpage

Dans cet atelier sont réalisés tous les travaux de transformation de tôles utilisées pour la fabrication des différentes pièces, à noter:

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

I.3.1.1 Fabrication des tôles statoriques et rotoriques

L'atelier reçoit des rouleaux de tôles magnétiques importés par Electro-Industries de nature:

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

a. Procédé de découpage

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

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

- Procède de découpage automatique.
- Procède de découpage semi-automatique.

Tous ces procédés aboutissent au même résultat.

I.3.1.2 Fabrication des capots de ventilateurs

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

I.3.2 Moulage sous pression

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

- Injection du rotor en aluminium pur à 99.5%.
- Réalisation des pièces en alliage d'aluminium (Silicium, Manganèse, Cuivre) comme: carcasse, flasque (AS, BS), boîtes à bornes, couvercles de boîte à bornes.

I.3.3 Bobinage

L'atelier de bobinage se divise en trois secteurs

- Secteur préparation isolation.

- .-Secteur préparation bobines.
- Secteur bobinage.

I.3.3.1. Secteur préparation isolation

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

- Caniveaux d'encoches.
- Cale de fermeture.
- Gaines isolantes.
- Séparateur de phase.
- Lame intermédiaire.
- Câble de raccordement.

Les isolants utilisés par l'Electro-Industries garantissent une qualité conforme aux normes internationales en vigueur

I.3.3.2 Secteur préparation bobines

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

I.3.3.3 Secteur préparation du stator bobiné

Secteur plus grand que ceux notés précédemment où se déroule le processus de fabrication stator bobiné allant de l'insertion des caniveaux d'encoches jusqu'à l'imprégnation.

a. Insertion des caniveaux d'encoches

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

b. Insertion des bobines dans le stator

L'insertion se fait soit:

- Automatiquement pour les moteurs à hauteur d'axe 70 mm à 130 mm.
- manuellement pour les moteurs à hauteur d'axe 132 mm à 400 mm.

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

-Une fois les bobines introduites, on place les séparateurs de phases pour éviter les courts-circuits entre phases, après cela, on procède au formage de têtes de bobines

manuellement avec un mandrin et un marteau en bois (maillet) pour respecter l'homogénéité et les dimensions des têtes de bobines coté AS (coté entraînement) et BS (coté ventilation).

c. connexion

-Connexion entre les bobines

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

Les points de connexion sont brasés et isolés avec des gaines isolantes déjà placées.

-Connexion des bobines et câbles de raccordement

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

L'entrée et la sortie de chaque phase, sont distinguées des autres avec des couleurs.

Phase U = orange ; V : noir ; W : rouge.

d. Frettage et pressage des têtes de bobines

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

e. Contrôle

- Contrôle visuel de séparateur de phases et des têtes de bobines par rapport au diamètre extérieur et intérieur du paquet statorique.
- Contrôle électrique.
 - La mesure de la résistance ohmique entre phases.
 - Vérification s'il n'y pas de court-circuit entre spires, court-circuit entre phase et de court-circuit à la masse à haute tension (2000 V).
 - Contrôle de polarité des trois phases en cas d'anomalie on vue de localiser les trois entrées et les trois sorties (U1, V1, W1 et U2, V2, W2)
 - Le contrôle de frettage des têtes de bobines.
 - La vérification des caniveaux d'encoches, coupure de phase et les réglettes de fermeture.

f. Imprégnation

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

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

I.3.4 Usinage

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

I.3.4.1. Fabrication de l'arbre

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

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

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

I.3.4.2 Usinage du rotor

Les opérations effectuées sur le rotor sont:

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

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

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

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

- Equilibrage positif avec l'ajout de rondelles d'acier.
- Equilibrage négatif avec enlèvement de matière.

I.3.4.3 Usinage des différentes pièces :(carcasse, flasque, boîte à borne...)**a. Carcasse**

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

b. Flasques (AS et BS)

Tournage des bords de centrage et cage de roulements.

c. Boîte à bornes

-Perçage et taraudage des trous de fixation recevant le couvercle à l'aide de perceuse à broches.

-Perçage et taraudage du trou de la mise à la terre.

I.3.5 Montage

On recense deux secteurs essentiels dans cet atelier.

I.3.5.1 Secteur prés montage

Les opérations réalisées dans ce secteur sont:

-Huiler l'intérieur de la carcasse pour faciliter l'insertion du paquet statorique dans celle-ci

-Emmanchement du paquet avec une presse.

-Mise en longueur et tournage des bords de centrage de la carcasse coté AS et BS.

-Fraisage des pattes pour retrouver la hauteur d'axe exacte.

-Peinture du diamètre intérieur du stator avec une couche de peinture antirouille.

I.3.5.2 Secteur montage final

Dans ce secteur sont effectuées les opérations suivantes :

1-Mise en place du couvercle du palier intérieur coté BS pour assurer une bonne étanchéité du moteur.

2-Emmanchement des roulements déjà graissés coté AS et BS avec une presse verticale et emplacement de clavette coté AS.

3-Visser le couvercle de palier sur le flasque cela permet de cerner le roulement entre ces deux pièces.

4-Emplacement de la clavette coté BS et emmanchement du ventilateur avec la même presse puis insertion de la bague d'arrêt (serre clips) pour ventilateur.

5-Intégration du rotor complet dans le stator et fixation du flasque coté BS avec des vices.

6-Emplacement des rondelles (rondelles de compensation et rondelles élastiques) sur le flasque coté AS pour éviter le jeu axial du rotor.

7-Fixation du flasque sur la carcasse avec les vices ainsi que le montage du capot du ventilateur.

8-Préparation de la boîte à borne et fixation des câbles de raccordement sur la plaque à bornes.

I.3.6 Contrôle finale

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

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

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

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

I.4. Normes

Les moteurs sont conformes aux normes suivantes :

CEI 34-1 : Machines électriques tournantes- caractéristiques assignées et de fonctionnements.

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

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

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

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

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

CEI 34-9 : Limite des bruits.

CEI 34-11 : Protection thermique incorporée.

CEI 34-12 : caractéristique de démarrage des moteurs a induction à cage, à une seule vitesse, pour des tensions d'alimentations inferieures ou égales à 660V-50Hz.

CEI 34-14 : Vibrations mécaniques des machines à partir de la hauteur d'axe 56 mm.

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

VDE0530 : Règlements relatifs aux machines électriques tournantes.

Chapitre II

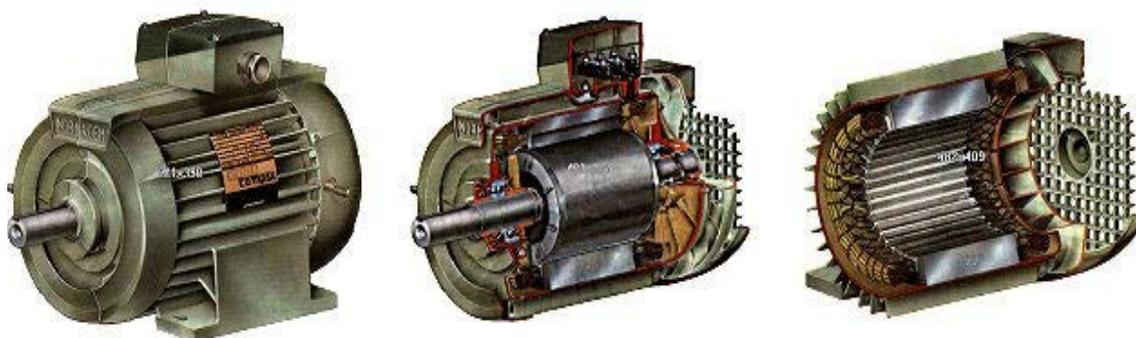
Théorie sur les machines à vapeur

II.1.Introduction

Plus de la moitié de l'énergie électrique produite dans le monde est transformée en énergie mécanique, par des moteurs. La plupart de ceux-ci appartiennent à l'un des types suivants : à courant continu, asynchrone, synchrone, à courant alternatif à collecteur. On estime généralement que les moteurs asynchrones représentent 70 % de la puissance installée, et qu'ils absorbent 40 à 50 % de l'énergie totale consommée. Même si ces chiffres sont imprécis, ils montrent l'importance de ce type d'équipement.

Le moteur asynchrone c'est le plus utilisé dans les applications industrielles et domestiques, du fait de sa facilité d'installation, de son bon rendement et de sa robustesse.

Il existe plusieurs types de moteurs asynchrones : monophasé, triphasé à cage, triphasé à rotor bobiné.



II.2.Constitution de la machine asynchrone

La machine asynchrone est constituée des principaux éléments suivants :

- Le stator
- L'entrefer
- Le rotor
- Les organes mécaniques

II.2.1.Le stator

C'est la partie fixe du moteur. Une carcasse en fonte ou en alliage léger renferme une couronne de tôles minces en acier au silicium de l'ordre de 0,5 mm d'épaisseur, ces tôles sont isolées entre elles par oxydation ou par un vernis isolant. Les tôles sont munies d'encoches dans lesquelles prennent place les enroulements statoriques destinés à produire le champ tournant. Le feuilletage du circuit magnétique réduit les pertes par courants de Foucault.

II.2.2.L'entrefer

C'est l'intervalle d'air entre le stator et le rotor, son épaisseur est de l'ordre de dixième de millimètre, il varie entre 0.2 et 1.2 millimètre.

II.2.3.Le rotor

C'est l'élément mobile du moteur, son circuit magnétique est similaire à celui du stator, il est constitué d'un empilage de tôles minces isolées entre elles et formant un cylindre claveté sur l'arbre du moteur et il contient des encoches destinées à loger l'enroulement.

Il existe deux types de moteurs asynchrones, qui se distinguent par la forme de leur rotor qui est soit bobiné ou à cage, dans tous les cas le stator reste au moins dans son principe, le même.

a) Rotor bobiné

Les tôles de ce rotor sont munies d'encoches où sont placés des conducteurs formant un bobinage de structure généralement semblable à celle des enroulements statoriques.

Dans le cas très fréquent où le bobinage du rotor est triphasé, trois bagues et trois balais sont prévus pour accéder à ces enroulements. Ce dispositif permet de modifier certaines caractéristiques électriques du circuit rotorique et par là, les propriétés électromagnétiques du moteur asynchrone.

Ce type de moteur est utilisé essentiellement dans des applications où les démarrages sont difficiles et/ou nombreux.

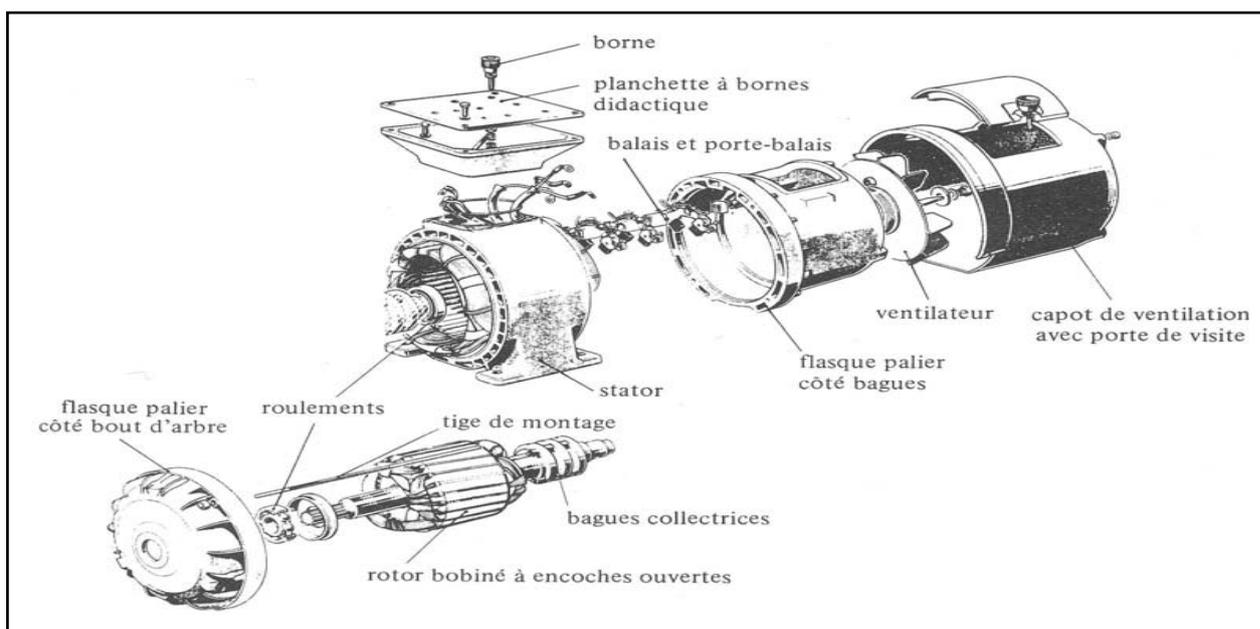


Figure. II-1. Vue éclatée d'une machine asynchrone triphasée à bagues.

b) Rotor à cage

Un rotor à cage d'écureuil porte un système de barres conductrices faites en cuivre, en bronze ou en aluminium logées dans un empilement de tôles. Les extrémités de ces barres sont réunies par deux couronnes également conductrices.

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

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

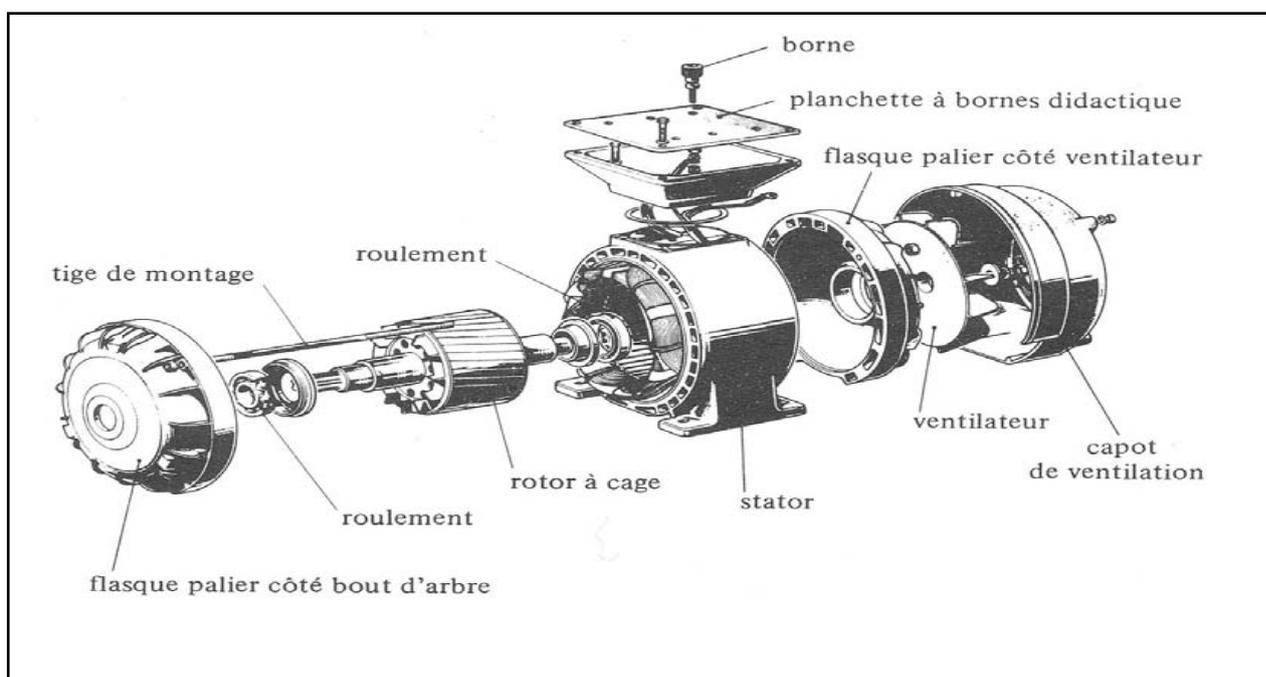


Figure. II-2. Vue éclatée d'une machine asynchrone triphasée à cage.

II.2.4. Les organes mécaniques

Le moteur comporte une carcasse qui reçoit de chaque côté un flasque sur lequel le rotor sera positionné grâce à des roulements qui permettent la rotation de ce dernier, un ventilateur placé en bout d'arbre pour le refroidissement de la machine et un bâti qui maintient les différents sous ensembles.

II.3. Bobinage de la machine asynchrone

On peut effectuer le bobinage d'une machine asynchrone de plusieurs façons, la disposition des bobines dans les encoches différencie ces types d'enroulements d'où on trouve habituellement trois types, l'enroulement imbriqué, concentrique et ondulé. Chaque type présente des avantages dans certaines applications.

L'enroulement du stator peut être à une seule ou à deux couches, ce dernier nous permet de raccourcir le pas d'enroulement.

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

II.4. Isolation du bobinage

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

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

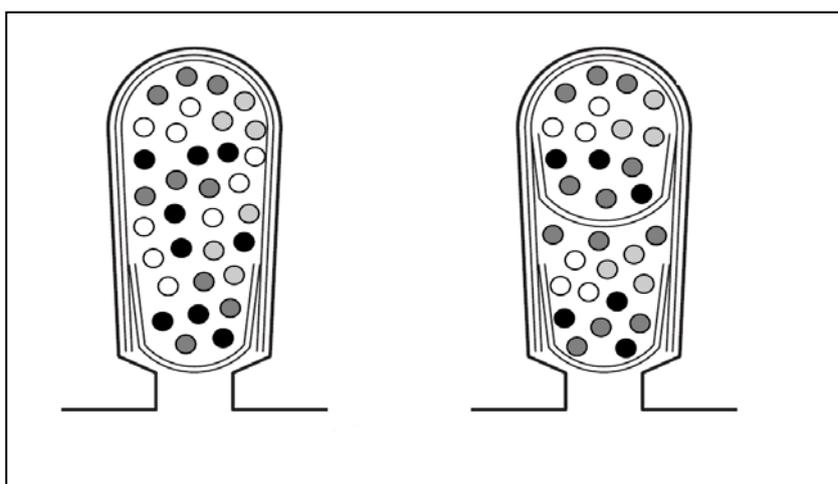


Fig. II-4. Schématisation de l'isolation d'encoches.

II.5. Classes d'isolations thermiques

La tâche la plus difficile et la plus importante est d'assurer la bonne tenue de l'isolation des enroulements, qui se dégrade pour des températures relativement peu élevées. Pour cette raison la charge admissible d'une machine est déterminée tout d'abord par la température admissible des isolants utilisés.

Les matériaux isolants utilisés dans la construction des machines électriques se divisent selon leur tenue à la chaleur en classes Y, A, E, B, F, H et C qui correspondent à des températures maximales de 90°C, 105°C, 120°C, 130°C, 155°C, 180°C, et supérieure à 180°C.

II.6. Principe de fonctionnement

Le fonctionnement de la machine asynchrone est basé sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant, créé par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique par le réseau, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ tournant.

L'interaction électromagnétique des deux parties d'une machine asynchrone n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant (n_1) diffère de celle du rotor (n), car dans le cas contraire lorsque $n=n_1$, le champ serait immobile par rapport au rotor et aucun courant ne serait induit dans l'enroulement rotorique.

II.7. Classification des moteurs à cage d'écureuil selon les caractéristiques électriques et mécanique

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

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

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

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

Classe D: Moteurs à fort glissement

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

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

II.8. Démarrage des moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil

Le moteur asynchrone branché directement sur le réseau est alimenté à fréquence fixe. Il est alors nécessaire de se préoccuper de son démarrage, les éléments principaux du démarrage sont le couple de démarrage et le courant de démarrage.

Pour que le rotor du moteur au démarrage puisse se mettre en mouvement le couple de démarrage développé doit être supérieur au couple résistant sur l'arbre créé par le mécanisme entraîné.

Suivant le type et la puissance du moteur, le courant absorbé variera entre quatre à dix fois le courant nominal. Le plus souvent ce courant excessif est de si courte durée que le moteur pourrait le supporter sans risquer un échauffement dangereux. Mais, dans la dérivation à laquelle est connecté le moteur, elle provoque une brusque chute de tension qui, malgré sa faible durée est dommageable pour tout les usagés branchés sur la même dérivation.

II.8.1. Les deux principes de démarrage d'un moteur asynchrone

Si l'installation peut supporter l'appel de courant à la mise sous tension du moteur, celui-ci peut être directement couplé sur le réseau ; il démarre sur ses caractéristiques naturelles. Dans le cas contraire, le courant de démarrage doit être limité. Pour cela, on peut agir pendant la durée du démarrage, sur l'une des deux grandeurs suivantes :

- la tension d'alimentation du moteur qu'il faudra réduire.
- la résistance des enroulements rotoriques qu'il faudra augmenter.

II.8.2. Procédés de démarrage

Lorsque les caractéristiques de démarrage ne sont pas satisfaisantes, en particulier à cause d'un appel de courant trop important pour le réseau, il est alors nécessaire de mettre en œuvre des procédés particuliers de démarrage.

- **Démarrage étoile - triangle**

Il nécessite la sortie des six bornes moteur et n'est envisageable que pour des petites puissances à cause de la brutalité des régimes transitoires lors des changements de couplage. Au démarrage, le stator est momentanément branché en étoile, puis lorsque le rotor a pratiquement atteint sa vitesse de régime, le couplage passe en triangle.

La connexion en étoile divise par $\sqrt{3}$ la tension appliquée et l'intensité en ligne au démarrage est donc divisée par 3. Le couple étant proportionnel au carré de la tension, il est également réduit dans un rapport 3. C'est un procédé extrêmement simple et peu coûteux.

- **Insertion de résistances statoriques**

Cette méthode permet d'avoir plusieurs crans de démarrage. Des résistances, métalliques ou électrolytiques à variation continue, sont placées en série avec chaque phase du stator au moment du démarrage, ce qui a pour effet de limiter la tension à leur borne, puis éliminées quand le moteur a atteint sa vitesse de régime. 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.

- **Insertion d'inductances statoriques**

Le procédé est similaire au précédent, mais les résistances sont remplacées par des bobines. Cette solution est meilleure sur le plan énergétique, mais le couple de démarrage reste toujours très limité. Ce mode de démarrage présente de l'intérêt pour les moteurs à haute tension de moyenne ou grande puissance.

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

Avec le démarrage par autotransformateur, il s'agit toujours de réduire la tension au moment du démarrage, mais sans interrompre l'alimentation du moteur. La tension est progressivement augmentée, l'intensité du courant ne dépasse pas la valeur maximale désirée. Cette solution est également abandonnée au profit de solutions électroniques d'un coût inférieure.

- **Démarrage par gradateur de tension**

Un gradateur à thyristors, permet de faire varier progressivement la tension en réglant l'angle de retard à l'amorçage. Le résultat est similaire à celui obtenu avec un autotransformateur avec un encombrement moindre et un coût plus avantageux. Néanmoins, la tension obtenue n'est pas sinusoïdale et la présence des harmoniques est néfaste pour le comportement du moteur.

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

Quoi que plus souvent utilisé pour faire de la variation de vitesse, l'onduleur de tension peut permettre de faire un démarrage souple avec limitation du courant dans les situations où aucune baisse du couple n'est possible.

- **Démarrage rotorique**

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

II.9.Freinage des moteurs asynchrone

Pour arrêter un moteur, il suffit de couper son alimentation. Le processus est plus au moins long selon l'inertie et les couples résistants présents. Dans certaines applications, il est nécessaire de freiner le moteur, soit dans le but de l'arrêter, soit pour simplement limiter une vitesse qui devient trop élevée.

Plusieurs solutions peuvent être utilisées pour obtenir un freinage électrique.

- **Freinage hypersynchrone**

Dans le domaine du levage ou des ascenseurs, la charge en descente entraîne le moteur et tend à lui imposer une vitesse de synchronisme freine spontanément.

En effet, si un moteur asynchrone est entraîné au-delà de la vitesse de synchronisme, le glissement et le moment du couple électromagnétique deviennent négatifs ; la machine fonctionne en générateur asynchrone. C'est alors la charge qui produit un couple moteur et la machine asynchrone qui oppose un couple résistant.

Ce freinage se produisant pour une vitesse supérieure à la vitesse de synchronisme, il est qualifié d'hypersynchrone, Cette méthode n'est pas donc très efficace pour freiner rapidement une machine asynchrone.

- **Freinage à contre-courant**

Le freinage à contre-courant consiste à inverser le sens de rotation du champ tournant en permettant deux phases du stator. Il en résulte un couple résistant, la vitesse de synchronisme passe de (Ω_s) à $(-\Omega_s)$. Il en résulte un courant plus élevé et un couple plus faible que lors d'un démarrage. La conséquence en est que les enroulements du moteur risquent un sur-échauffement.

En fin avec cette méthode le couple décélérateur reste négatif même lorsque la vitesse est nulle, il faut donc prévoir de couper l'alimentation quand la vitesse est nulle, sinon la rotation s'inverse.

- **Freinage par injection de courant continu**

L'alimentation triphasée du stator est débranchée et une source de tension continue est connectée entre deux bornes. Il en résulte un champ magnétique fixe qui produit un couple résistant freinant le moteur. L'énergie cinétique de rotation est transformée en effet joule dans le rotor. C'est la méthode la plus efficace pour freiner la machine mais les contraintes en courant sont également très sévères, le contrôle de l'intensité du courant continu permet de contrôler le freinage.

- **Freinage mécanique**

Ce système est constitué d'un frein à disque solidaire de l'arbre de la machine asynchrone et dont les mâchoires initialement serrées hors tension sont commandées par un électroaimant. Après l'alimentation de l'électroaimant, les mâchoires se desserrent laissant la rotation libre. La coupure de l'alimentation provoque le freinage. Ce dispositif est souvent prévu comme dispositif d'arrêt d'urgence.

II.10. Inversion du sens de rotation

Pour inverser le sens de rotation d'un moteur asynchrone, il suffit d'inverser le sens du champ tournant en permettant les connexions de deux phases de son alimentation.

II.11. Amélioration des performances au démarrage à la construction du moteur

Certains moteurs, destinés à être alimentés directement sur le secteur sont conçus de façon à améliorer leurs performances au démarrage. Deux solutions sont rencontrées : les moteurs à double cage et les moteurs à encoches profondes, nous nous limitons au moteur à double cage.

II.11.1. Moteur à double cage

a) Formes d'exécution des moteurs à double cage

Le moteur à double cage représente l'une des variantes des moteurs asynchrones à rotor en court-circuit où on utilise le phénomène de roufoulement du courant dans l'enroulement rotorique pour améliorer les propriétés de démarrage du moteur.

Le stator d'un moteur à deux cages ne diffère pas de celui du moteur ordinaire mais son rotor est à double cage d'écureuil.

La cage supérieure située plus près de l'entrefer est en matériaux à grande résistivité tel que laiton, bronze d'aluminium, etc., et la cage inférieure est en cuivre rouge, les deux enroulements étant séparés l'un de l'autre par les fentes étroites des encoches. Pour cette raison la cage inférieure a une grande perméance pour les flux de dispersion et la cage supérieure a une perméance relativement petite par suite de quoi la réactance de dispersion de la cage inférieure est de beaucoup supérieure à celle de la cage supérieure.

La cage supérieure dans la partie qui se trouve dans le fer n'as pratiquement pas de flux de dispersion propre.

Les barres supérieures et inférieures peuvent avoir un anneau de court-circuitage commun ou chacun des enroulements peut avoir son anneau de court-circuitage propre, pratiquement on utilise des moteurs à anneaux séparés, car dans ce cas les barres des deux cages qui s'échauffent de façon différente au démarrage peuvent s'allonger librement et indépendamment.



Fig. II-5. Rotor à double cage.

b) Principe de fonctionnement d'un moteur à double cage

Le moteur à double cage a deux cages, la cage externe (nommer cage de démarrage) à une résistance plus élevée que la cage interne (nommer cage de travail). La différence de résistance est obtenue par une section plus faible pour les barres de la cage externe et éventuellement par une résistivité plus grande du matériau utilisé.

Au démarrage, la fréquence rotor est celle du réseau et la cage interne est très faiblement résistante, douée au contraire d'une forte réactance d'induction L_w , joue le rôle d'écran électrodynamique, de telle sorte que le flux qui la traverse est à peu près nul. Le flux passe entre les deux cages et seule la cage externe est utile.

Or le constructeur a donné à la cage externe une résistance telle qu'au démarrage elle soit égale à sa réactance d'induction. Le démarrage s'effectue donc avec un bon couple. Lorsque la vitesse croît, la fréquence rotor décroît ; la cage interne abandonne de plus en plus son rôle d'écran et lorsque la vitesse est voisine de synchronisme, la cage externe très résistante est parcourue par un faible courant et intervient très faiblement dans la production du couple.

On peut admettre qu'à tout instant le couple résultant est la somme des couples que donneraient séparément les deux cages.

Le couple moteur élevé au démarrage reste à peu près constant entre le démarrage et une vitesse voisine de synchronisme, propriété intéressante en ce sens que le moteur à double cage n'a

pas de zone d'instabilité, c'est-à-dire qu'en cas de surcharge il ne risque pas de caler : sa vitesse baisse et dès que la surcharge a disparu, il accélère automatiquement.

L'inconvénient est que le facteur de puissance est faible du fait de la consommation de puissance réactive due aux fuites magnétiques importantes de la cage interne.

c) Caractéristique du moteur à double cage

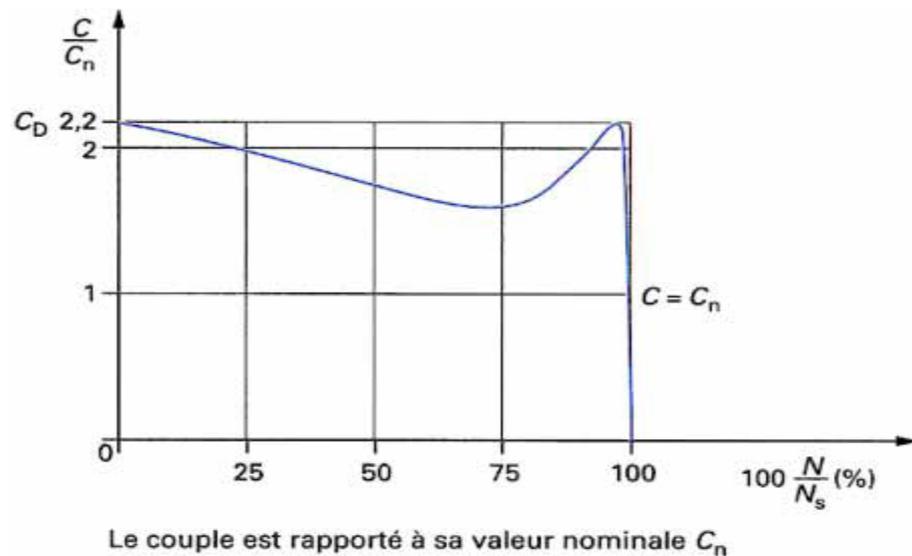


Figure. II-5. Moteur à double cage : courbe du couple en fonction de sa vitesse.

Chapitre III

Calcul d'un moteur asynchrone

III.1. Calcul électromagnétique

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

III.1.1. Dimensionnement du moteur asynchrone à double cage

Nous déterminons les dimensions géométriques et électriques des différentes parties du moteur toutes en respectant les contraintes électromagnétiques et les critères techniques exigés.

Et ce dimensionnement nous permet de caractériser simplement la machine et faire une étude et un calcul de fonctionnement.

III.1.1.1. Dimensionnement du stator

a) Puissance électromagnétique

C'est la puissance transmise au rotor par le champ tournant à travers l'entrefer, elle est donnée par la formule suivante:

$$P_e = \frac{K_e \cdot P_n}{\eta_n \cdot \cos(\Phi_n)} \quad [\text{KVA}] \quad (1.1)$$

Avec: $\cos(\Phi_n)$ - Facteur de puissance.

η_n - Rendement nominal de la machine.

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

Où :

$$K_e = \frac{E_1}{u_n}$$

$$E_1 = 4 \cdot K_f \cdot K_{en1} \cdot W_1 \cdot f_1 \cdot \Phi \quad [\text{V}]$$

b) Longueur virtuelle de l'induit

Elle est donnée par:

$$L_i = \frac{6.1 \cdot 10^{12} \cdot P_e}{\alpha_i K_f \cdot N \cdot D_1^2 \cdot A_1 \cdot B_\delta \cdot K_{en1}} \quad [\text{mm}] \quad (1.2)$$

Où: 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 est extraite de la Fig. III-1. (Annexe 7).

B_δ - Induction dans l'entrefer est donnée par la relation suivante:

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_i \cdot \tau_{p1} \cdot L_i \cdot 10^{-6}} \quad [\text{T}] \quad (1.3)$$

Φ - Le flux sous un pôle :

$$\Phi = \frac{K_e \cdot U_{n1}}{4 \cdot K_f \cdot W_1 \cdot f_1 \cdot K_{en1}} \quad [\text{Weber}] \quad (1.4)$$

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

$$k_{en1} = K_{d1} \cdot K_{r1} \quad (1.5)$$

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

$$K_{d1} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m_1}\right)}{q_1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m_1 \cdot q_1}\right)} \quad (1.6)$$

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

$$K_{r1} = \sin\left(\frac{\beta \cdot \pi}{2}\right) \quad (1.7)$$

β - Rapport de raccourcissement.

- **Coefficient de longueur**

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

$$\lambda_i = \frac{L_i}{D_1} \quad (1.8)$$

- **Pas polaire**

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

$$\tau_{p1} = \frac{\pi \cdot D_1}{2 \cdot p} \quad [\text{mm}] \quad (1.9)$$

Avec: P- Nombre de paires de pôles.

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

$$\tau_p = \frac{Z_1}{2 \cdot p} \quad (1.10)$$

- **Pas dentaire**

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D_1}{Z_1} \quad [\text{mm}] \quad (1.11)$$

Avec: Z_1 - Nombre d'encoches statoriques

c) Courant nominale

Il est donné par la formule suivante:

$$I_{n1} = \frac{P_n \cdot 10^3}{m_1 \cdot \eta_n \cdot \cos(\Phi_n) \cdot U_{n1}} \quad [\text{A}] \quad (1.12)$$

Où: m_1 - Nombre de phases statoriques.

U_{n1} - Tension nominale.

d) Nombre de conducteurs effectifs dans une encoche

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

$$U_{en1} = \frac{a_1 \cdot t_1 \cdot A_1 \cdot 10^3}{I_{n1}} \quad (1.13)$$

Où : a_1 - Nombre de voies parallèles.

e) Nombre de spires d'une voie parallèle

Il est donné par la formule suivante :

$$W_1 = \frac{p \cdot q_1 \cdot U_{n1}}{a_1} \quad (1.14)$$

- **Angle électrique entre deux encoches adjacentes**

$$\gamma = \frac{p \cdot 360}{Z_1} \quad (1.15)$$

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

$$q_1 = \frac{Z_1}{2 \cdot p \cdot m_1} \quad (1.16)$$

- **Pas de la section de l'enroulement**

C'est la distance entre deux faisceaux de la même section qui se suivent.

$$y_1 = \frac{Z_1}{2 \cdot p} - \varepsilon \quad (1.17)$$

Où : ε - la valeur du raccourcissement du pas d'enroulement.

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

Elle est calculée par la formule suivante :

$$S_{eff1} = \frac{I_{n1}}{a_1 \cdot J_1} \quad [\text{mm}^2] \quad (1.18)$$

Avec : J_1 - Densité de courant dans l'enroulement statorique, elle varie entre (2÷14) [A/mm²] représentée par la Fig. III-2. (Annexe 7).

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

$$S_{el1} = \frac{S_{eff1}}{N_{el}} \quad [\text{mm}^2] \quad (1.19)$$

Où : N_{el} - Nombre de conducteurs élémentaires.

Les sections normalisées sont données par le tableau de Section Normalisée (Annexe 1).

III.1.1.2. Dimensionnement de la feuille statorique

La méthode de calcul de la feuille statorique sera illustrée pour une encoche ovale.

a) Largeur de la dent

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

$$b_{z1} = \frac{t_1 \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot B_{z1max}} \quad [\text{mm}] \quad (1.20)$$

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

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

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

B_{z1max} - Induction maximale dans la dent statorique [T].

b) Hauteur de dos du stator

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

$$h_{c1} = \frac{0.5 \cdot \alpha_i \cdot \tau_{p1} \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot B_{c1}} \quad [\text{mm}] \quad (1.21)$$

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

c) Hauteur de la dent

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

$$h_{z1} = 0.5 \cdot (D_{ext} - D_1) - h_{c1} \quad [\text{mm}] \quad (1.22)$$

Avec : D_{ext} - Diamètre extérieur du stator.

d) Section de l'encoche statorique

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

$$S_{enciso1} = 0.5 \cdot (d_{enc11} + d_{enc12}) \cdot \left(h_{enc1} - \frac{d_{enc12}}{2} \right) + \frac{\pi \cdot d_{enc12}^2}{4.2} \quad (1.23)$$

S_{iso} - Section occupée par l'isolation

$$S_{iso} = \left(2(h_{enc1} - \frac{d_{enc12}}{2} - e_{cal}) + \frac{d_{enc11} + d_{enc12}}{2} + \frac{\pi \cdot d_{enc12}}{2.2}\right) \cdot e_1 + d_{enc11} \cdot e_{cal} \quad (1.24)$$

Où: e_1 - Epaisseur de l'isolant.

$$S_{enc1} = S_{enciso} - S_{iso}$$

e) Coefficient de remplissage

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

$$K_{re1} = \frac{N_{el} \cdot U_{en1} \cdot d_{iso}^2}{S_{enc1}} \quad (1.25)$$

Avec : d_{iso} - Diamètre des conducteurs avec isolation en [mm], Sont donnés par le tableau de Section Normalisée (Annexe 1).

f) Vérification des charges électromagnétiques

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 , le flux Φ et l'induction B_δ .

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

• Charge linéaire

La charge linéaire est le courant total dans la partie d'encoche par unité de longueur de périmètre du stator.

$$A_1 = \frac{I_{n1} \cdot Z_1 \cdot U_{enc1}}{\pi \cdot D_1 \cdot a_1 \cdot 10^{-3}} \quad [\text{A/m}] \quad (1.26)$$

• Flux sous un pôle

$$\Phi = \frac{K_e \cdot U_{n1}}{4 \cdot K_f \cdot W_1 \cdot f_1 \cdot K_{en1}} \quad [\text{Weber}] \quad (1.27)$$

• Induction magnétique dans l'entrefer

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

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

g) Choix de l'entrefer

Pour obtenir de bonnes performances, le courant de magnétisation devrait être le plus petit possible afin d'avoir un facteur de puissance qui s'approche au maximum de l'unité, ce qui nécessite un entrefer aussi étroit que les contraintes mécaniques le permettent. Par contre, un entrefer trop étroit favorise les harmoniques supérieures produites par les pulsations du champ ce qui augmente les pertes supplémentaires dans le fer.

NB : L'épaisseur de l'entrefer est liée à la puissance de la machine

III.1.1.3. Dimensionnement du rotor**a) Choix du nombre d'encoches rotoriques**

Pour un moteur asynchrone, il est très important de bien choisir le nombre d'encoches du rotor afin d'éviter la présence de vibration, de bruit magnétique, de couple saccadé qu'est dû à la variation du couple au démarrage pour différentes positions du rotor ainsi que les plages de synchronisme qui sont les endroits sur la courbe du couple en fonction de la vitesse où le moteur garde une vitesse constante sur une bande de valeurs du couple qui forme ainsi un genre d'escalier dans la partie basse vitesse. Ces effets indésirables sont principalement causés par la présence d'harmoniques dans le flux de l'entrefer. L'ordre et l'amplitude de ces harmoniques sont fonction du rapport entre le nombre d'encoche du stator et le nombre d'encoche du rotor.

Le nombre d'encoche du rotor ne doit jamais être égal à celui du stator ; il peut être plus grand mais il est généralement plus petit dans les rotors à cage d'écureuil. On obtient habituellement des bons résultats pour un écart entre 15 et 30%.

b) Diamètre extérieur du rotor

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

$$D_2 = D_1 - 2\delta \quad [\text{mm}] \quad (1.29)$$

Où : δ - L'épaisseur de l'entrefer.

- **Pas dentaire rotorique**

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

$$t_2 = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} \quad [\text{mm}] \quad (1.30)$$

Avec : Z_2 - Le nombre d'encoches rotoriques.

D_2 - Le diamètre extérieur du rotor en [mm].

c) Courant dans la barre

En général, le courant dans la barre de l'enroulement du rotor est donné par :

$$I_2 = \frac{1.11.I_{n1}.6.W_1.\cos(\Phi_n).K_{en1}}{Z_2} \quad [\text{A}] \quad (1.31)$$

Avec : I_{n1} - Courant nominal statorique.

W_1 - Nombre de spires statoriques.

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

$\cos(\Phi_n)$ - Facteur de puissance nominal.

III.1.1.4. Dimensionnement de la feuille rotorique

La feuille rotorique est dimensionnée comme suit :

a) Hauteur de la culasse rotorique

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

$$h_{c2} = \frac{0.5.\alpha_i.\tau_{p2}.B_\delta}{K_{fer}.B_{c2}} \quad [\text{mm}] \quad (1.32)$$

Où : B_{c2} - Induction dans la culasse rotorique.

• Pas polaire rotorique

$$\tau_{p2} = \frac{\pi.D_2}{Z_2} \quad [\text{mm}] \quad (1.33)$$

b) Hauteur de la dent rotorique

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

$$h_{z2} = 0.5.(D_2 - D_{arr}) - h_{c2} \quad [\text{mm}] \quad (1.34)$$

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

D_{arr} - Diamètre intérieur du rotor en [mm]

c) Largeur de la dent

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

$$b_{z2} = (b_{z2c} + b_{z2r})/2 \quad [\text{mm}] \quad (1.35)$$

La largeur de la partie circulaire de la dent :

$$b_{z2c} = \frac{\pi \cdot (D_2 - \frac{2}{3} \cdot d_{bc} - 2h_{f2})}{Z_2} - 0.94d_{bc} \quad [\text{mm}] \quad (1.36)$$

La largeur de la partie rectangulaire de la dent :

$$b_{z2r} = \frac{\pi \cdot (D_2 + \frac{2}{3} \cdot h_m - 2h_{z2})}{Z_2} - b_{br} \quad [\text{mm}] \quad (1.37)$$

$$b_{z2} = \frac{b_{z2c} + b_{z2r}}{2} \quad [\text{mm}] \quad (1.38)$$

$$b_{z2} = \frac{t_2 \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot B_{z2max}} \quad [\text{mm}] \quad (1.39)$$

Où : h_m - La hauteur de la partie rectangulaire de l'encoche rotorique en [mm].

d_{bc} - Le diamètre de la partie circulaire de l'encoche rotorique en [mm].

b_{br} - La largeur de la partie rectangulaire de l'encoche rotorique en [mm].

h_{f2} - La hauteur de la fente de l'encoche rotorique en [mm].

B_{z2max} - Induction admissible dans la dent rotorique en [T].

d) Sections des barres rotoriques

Elles sont données en fonction des dimensions de l'encoche :

$$S_b = S_{bc} + S_{br} \quad [\text{mm}^2] \quad (1.40)$$

Avec :

- **Section de la barre circulaire**

$$S_{bc} = \pi \cdot \frac{d_{bc}^2}{4} \quad [\text{mm}^2] \quad (1.41)$$

- **Section de la barre rectangulaire**

$$S_{br} = h_m \cdot b_{br} \quad [\text{mm}^2] \quad (1.42)$$

e) Densité de courant

Elle est donnée par la formule suivante :

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

III.1.1.5. Dimensionnement des anneaux de court circuit

Les anneaux de court circuit sont dimensionnés comme suit :

a) Les hauteurs des anneaux

Les hauteurs des anneaux sont dimensionnées de la manière suivante :

- **Hauteur de l'anneau de la cage externe**

$$h_{anc} = (1.1 \div 1.25) \cdot h_{z2c} \quad [\text{mm}] \quad (1.44)$$

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

$$h_{anr} = (1.1 \div 1.25) \cdot h_{z2r} \quad [\text{mm}] \quad (1.45)$$

b) Les sections des anneaux

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

$$S_{an} = S_{anc} + S_{anr} \quad [\text{mm}^2] \quad (1.46)$$

- **La section de l'anneau de la cage externe**

$$S_{anc} = (0.35 \div 0.45) \cdot \frac{Z_2 \cdot S_{bc}}{2 \cdot p} \quad (1.47)$$

- **La section de l'anneau de la cage interne**

$$S_{anr} = (0.35 \div 0.45) \cdot \frac{Z_2 \cdot S_{br}}{2 \cdot p} \quad [\text{mm}^2] \quad (1.48)$$

c) Largeur de l'anneau

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

- **La largeur de l'anneau de la cage externe**

$$b_{anc} = \frac{S_{anc}}{h_{anc}} \quad [\text{mm}] \quad (1.49)$$

- **La largeur de l'anneau de la cage interne**

$$b_{anr} = \frac{S_{anr}}{h_{anr}} \quad [\text{mm}] \quad (1.50)$$

- d) **Diamètre moyen de l'anneau**

- **Diamètre de l'anneau de la cage externe**

$$D_{anc} = (D_2 - h_{anc}) \quad [\text{mm}] \quad (1.51)$$

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

$$D_{anr} = (D_2 - 16.3) - h_{anr} \quad [\text{mm}] \quad (1.52)$$

III.1.2. Calcul du circuit magnétique

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

L'objet de ce calcul consiste à déterminer les forces magnétomotrices (F_{mm}) 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 des $H_x \cdot l_x$ ($\sum H_x \cdot l_x$).

Où :

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

Connaissant les valeurs des inductions et les dimensions du moteur on peut calculer les F_{mm}.

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.1.2.1. Circuit magnétique statorique

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

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

Elle est donnée par l'expression suivante :

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

b) Force magnétomotrice dans la culasse statorique

Elle est donnée par :

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

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

c) Force magnétomotrice dans la dent du stator

Elle est exprimée par la relation suivante

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

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

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

III.1.2.2. Circuit magnétique rotorique

On tenant compte des données, le circuit magnétique rotorique est calculé comme suit :

a) Force magnétomotrice dans la culasse du rotor

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$F_{c2} = H_{c2} \cdot L_{c2} \cdot 10^{-3} \quad [\text{A}] \quad (2.4)$$

- **Longueur moyenne des lignes du champ magnétique dans la culasse du rotor**

Elle est donnée par la formule suivante :

$$L_{c2} = (D_2 - 2 \cdot h_{z2} - h_{c2}) \cdot \frac{\pi}{2 \cdot p} + h_{c2} \quad [\text{mm}] \quad (2.5)$$

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

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

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

b) Force magnétomotrice dans les dents du rotor

Pour le type d'encoche utilisé on a :

$$F_{z2} = F_{zc} + F_{zr} \quad [A] \quad (2.6)$$

• Fmm dans la partie circulaire de la dent

$$F_{zc} = H_{z2} \cdot h_{zc} \cdot 10^{-3} \quad [A] \quad (2.7)$$

• Fmm dans la partie rectangulaire de la dent

$$F_{zr} = H_{z2} \cdot h_{zr} \cdot 10^{-3} \quad [A] \quad (2.8)$$

Où : H_{z2} - Intensité du champ magnétique dans la dent rotorique qui correspond à l'induction B_{z2} .

III.1.2.3. Force magnétomotrice dans l'entrefer

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

$$F_{\delta} = 0,8 \cdot B_{\delta} \cdot K_{\delta} \cdot \delta \cdot 10^{-3} \quad [A] \quad (2.9)$$

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

$$K_{\delta} = K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2} \quad (2.10)$$

Avec :

$$K_{\delta 1} = 1 + \frac{b_{f1}}{t_1 - b_{f1} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_1}{b_{f1}}} \quad (2.11)$$

$$K_{\delta 2} = 1 + \frac{b_{f2}}{2 - b_{f2} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_2}{b_{f2}}} \quad (2.12)$$

Où : b_{f1} et b_{f2} - Sont respectivement les largeurs des fentes des dents statoriques et rotoriques en [mm]

III.1.2.4. Force magnétomotrice totale par paire de pôle

Elle est donnée par la formule suivante :

$$F = \sum F_i = 2 \cdot (F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2}) + F_{c1} + F_{c2} \quad [A] \quad (2.13)$$

NB : L'entrefer, les dents statoriques et rotoriques sont parcourus deux fois par les lignes du champ magnétique.

Les valeurs des champs magnétiques sont données en fonction des inductions par les tableaux de l'annexe 2 et l'annexe 3.

III.1.2.5. Coefficients de saturation

Ils sont donnés comme suit :

a) Coefficient de saturation des dents

Il est donnée par :

$$K_{\mu z} = \frac{F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2}}{F_{\delta}} \quad (2.15)$$

b) Coefficient de saturation de la machine

Il est donné par :

$$K_{\mu} = \frac{\sum F_i}{2.F_{\delta}} \quad (2.16)$$

III.1.2.6. Courant magnétisant

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

$$I_{\mu} = \frac{p \cdot \sum F_i}{0,9 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot K_{en1}} \quad [\text{A}] \quad (2.17)$$

III.1.2.7. Réactance de magnétisation

Elle est donnée par la formule suivante :

$$X_m = \frac{K_e \cdot U_{n1}}{I_{\mu}} \quad [\Omega] \quad (2.18)$$

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

III.1.2.8. Coefficient de dispersion magnétique du stator

Il est donné par la formule suivante :

$$\sigma_{\mu} = \frac{X_1}{X_m} \quad (2.19)$$

Avec : X_1 - Réactance inductive de dispersion d'une phase de l'enroulement statorique.

III.1.2.9. Force électromotrice à vide E_0

Elle est donnée par :

$$E_0 = \frac{U_{n1}}{(1 + \sigma_{\mu})} \quad [\text{V}] \quad (2.20)$$

III.1.3. Calcul des paramètres électriques des enroulements

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

III.1.3.1. Paramètres statoriques

Le calcul des paramètres statoriques s'effectue comme suit :

a) Résistance active d'une phase du stator

$$R_1 = \rho_{cu}(T) \frac{W_1 \cdot L_{w1} \cdot 10^{+3}}{a_1 \cdot N_{el} \cdot S_{elt1}} \quad [\Omega] \quad (3.1)$$

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

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

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

Où : L_i - Longueur virtuelle de l'induit.

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

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

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

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

y_{1moy} - 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 ferme autour des conducteurs :

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

- **Réactance de fuite différentielle**

C'est le résultat des flux suivants

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

Elle est donnée par :

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

- **Réactance de fuite frontale**

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

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

La réactance totale est donnée par :

$$X_1 = \frac{1,58 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot W_1^2}{q_1 \cdot p \cdot 10^8} \cdot \lambda_1 \quad [\Omega] \quad (3.8)$$

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

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

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

$$\lambda_{enc1} = \frac{h_1 \cdot K_{B1}}{3d_{enc11}} + \left(\frac{h_{11}}{d_{enc11}} + \frac{3 \cdot h_{K1}}{d_{enc11} + 2 \cdot b_{f1}} + \frac{h_{f1}}{b_{f1}} \right) K_{B2} \quad (3.10)$$

Où : K_{B1}, K_{B2} – Coefficients donnés suivant la fig. III-3. (Annexe 7), ils sont en fonction du rapport de raccourcissement β .

λ_{1d} - Perméance différentielle proportionnelle à la réactance de fuite différentielle, elle est donnée par la formule suivante :

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

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

Où : Q_1 - Coefficient qui dépend de la hauteur d'axe et du nombre de paires de pôles, tableau de l'annexe 5.

K_{rr1} - Coefficient qui dépend de Q_1 , tableau de l'annexe 6.

K_{dd1} - Coefficient de fuite différentielle donné en fonction de $\frac{Z_2}{p}$ et Q_1 , tableau de l'annexe 4.

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

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

III.1.3.2. Paramètres rotoriques

III.1.3.2.1. Résistances actives des cages

a) Résistance active de la cage externe

Elle est donnée par :

$$R_{c1} = R_{bc} + 2 \cdot \frac{R_{anc}}{K_{red}^2} \quad [\Omega] \quad (4.1)$$

Avec : K_{red} - coefficient de réduction.

- **Résistance active de la barre circulaire**

Pour $T=24^\circ\text{C}$ $\rho_{cusi6}(T) = 13 \cdot 10^{-9} \text{ } (\Omega \cdot \text{m})$

NB : La valeur de la résistivité du bronze est donnée par l'essai qu'on a effectué au laboratoire de l'entreprise d'Electro-Industrie.

$$R_{bc} = \rho_{cusi6}(T) \cdot \frac{K_{dep} \cdot L_2 \cdot 2 \cdot 10^3}{S_{bc}} \quad [\Omega] \quad (4.2)$$

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

$$R_{anc} = \rho_{cusi6}(T) \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot D_{anc} \cdot 10^3}{S_{anc}} \quad [\Omega] \quad (4.3)$$

b) Résistance active de la cage interne

Elle est donnée par :

$$R_{c2} = R_{br} + 2 \cdot \frac{R_{anr}}{K_{red}^2} \quad [\Omega] \quad (4.4)$$

- **Résistance active de la barre rectangulaire**

Pour $T=20^\circ\text{C}$ $\rho_{cu}(T) = 0,0172 \cdot 10^{-6} \text{ } (\Omega \cdot \text{m})$

$$R_{br} = \rho_{cu}(T) \cdot \frac{K_{dep} \cdot L_2 \cdot 2 \cdot 10^3}{S_{br}} \quad [\Omega] \quad (4.5)$$

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

$$R_{anr} = \rho_{cun} \frac{2 \cdot \pi \cdot D_{anr} \cdot 10^3}{S_{anr}} \quad [\Omega] \quad (4.6)$$

- c) **Résistance totale de l'anneau ramenée à la barre**

- **La cage externe**

$$R_{anrambc} = \frac{R_{anc}}{K_{red}^2} \quad [\Omega] \quad (4.7)$$

- **La cage interne**

$$R_{anrambr} = \frac{R_{anr}}{K_{red}^2} \quad [\Omega] \quad (4.8)$$

$$R_{anrambt} = \frac{R_{anrambc} \cdot R_{anrambr}}{R_{anrambc} + R_{anrambr}} \quad [\Omega] \quad (4.9)$$

- d) **Résistance de l'anneau ramenée au stator**

$$B_{ob} = \frac{t_1}{t_2} \quad (4.10)$$

$$\alpha_{ob} = \frac{2 \cdot \pi \cdot p \cdot B_{ob}}{Z_2} \quad (4.11)$$

$$K_{ob} = \frac{\sin\left(\frac{\alpha_{ob}}{2}\right)}{\frac{\alpha_{ob}}{2}} \quad (4.12)$$

$$M = \left(\frac{4 \cdot m_1}{Z_2}\right) \cdot \left(\frac{W_1 \cdot K_{en1}}{K_{ob}}\right)^2 \quad (4.13)$$

M- Coefficient de transformation

$$R_{anrams} = M \cdot R_{anrambt} \quad [\Omega] \quad (4.14)$$

III.1.3.2.2. Résistances rotoriques

- a) **Résistance active d'une phase rotorique**

$$R_2' = R_{bc} + R_{anrambc} \quad [\Omega] \quad (4.15)$$

$$R_2'' = R_{br} + R_{anrambr} \quad [\Omega] \quad (4.16)$$

- b) **Résistance d'une phase rotorique ramenée au stator**

$$R_{2ram} = M \cdot R_2 \quad [\Omega] \quad (4.17)$$

III.1.3.2.3. Résistance de dispersion, réactance et perméance du rotor

- a) **La cage externe**

$$I_{an} = \frac{I_2}{K_{red}} \quad [A] \quad (4.18)$$

$$J_{ANC} = \frac{I_{an}}{S_{anc}} \quad [\text{A/mm}^2] \quad (4.19)$$

- **Facteur de conductibilité magnétique**

On a :

$$K_c = K_r$$

$$K_c = 1$$

$$\lambda_{cm} = \left(0,785 - \frac{1}{2 \cdot d_{bc}}\right) \cdot K_c + \frac{h_{f2}}{b_{f2}} \quad (4.20)$$

- **Perméance frontale**

$$\lambda_{2fc} = \frac{2,3 \cdot D_{ancmoy}}{Z_2 \cdot L_i \cdot K_{red}^2} \cdot \log\left(\frac{4,7 \cdot D_{ancmoy}}{2 \cdot (h_{anc} + b_{anc})}\right) \quad (4.21)$$

- **Réactance de la cage extérieure**

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

$$X_{2ext} = 7,9 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot (\lambda_{cm} + \lambda_{2fc}) \cdot 10^{-6} \quad [\Omega] \quad (4.22)$$

b) La cage interne

$$J_{anr} = \frac{I_{an}}{S_{anr}} \quad [\text{A/mm}^2] \quad (4.23)$$

- **Facteur de dispersion d'encoche**

$$\lambda_{disenc} = \frac{h_m}{3 \cdot b_{br}} \cdot K_r + \frac{h_{f22}}{b_{f22}} \quad (4.24)$$

- **Perméance frontale**

$$\lambda_{2fr} = \frac{2,3 \cdot D_{anrmoy}}{Z_2 \cdot L_i \cdot K_{red}^2} \cdot \log\left(\frac{4,7 \cdot D_{anrmoy}}{2 \cdot (h_{anr} + b_{anr})}\right) \quad (4.25)$$

- **La réactance de la cage intérieure**

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

$$X_{2int} = 7,9 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot (\lambda_{disenc} + \lambda_{2fr}) \cdot 10^{-6} \quad [\Omega] \quad (4.26)$$

$$X_2 = \frac{X_{2int} \cdot X_{2ext}}{X_{2int} + X_{2ext}} \quad [\Omega] \quad (4.27)$$

III.1.3.2.4. Réactance du rotor ramenée au stator

$$X_{2ram} = M \cdot X_2 \quad [\Omega] \quad (4.28)$$

III.1.3.3. Paramètres au démarrage

Lors de l'alimentation du moteur à rotor immobile (démarrage), le courant est beaucoup plus grand qu'en charge nominale, il en résulte une saturation du circuit magnétique.

Les barres de la cage sont soumises à un champ tournant de fréquence d'alimentation ($f_s=50$ Hz) ; ce qui engendre une profondeur de pénétration du courant faible (effet de refoulement du courant) ; 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 ($f_r=g.f_s$), donc la profondeur de pénétration augmente et la résistance de la cage diminue.

a) Profondeur de pénétration

Elle est donnée par :

$$h_{pp} = \frac{h_b}{1+\varphi_1} \quad [\text{mm}] \quad (5.1)$$

Où : h_b - Hauteur de la barre.

φ_1 - Coefficient qui dépend de la valeur de ξ_1 , il est donné par la Fig. III-4.(Annexe 7).

$$\xi_1 = 0,064.h_b\sqrt{g_d} \quad (5.2)$$

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

Elle est donnée par :

$$S_{bdem} = S_{bc} \quad [\text{mm}^2] \quad (5.3)$$

c) Résistance de la barre au démarrage

Pour le type d'encoche donnée on a :

$$R_{bdem} = R_b.K_{dep} \quad [\Omega] \quad (5.4)$$

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.

$$K_{dep} = \frac{S_b}{S_{bdem}} \quad (5.5)$$

d) Résistance de la cage au démarrage

Elle est donnée par :

$$R_{2dem} = R_{anrambc} + R_{bdem} \quad [\Omega] \quad (5.6)$$

e) Résistance de la cage au démarrage ramenée au stator

Elle est donnée par :

$$R_{2dem-ram} = M. (R_{anrambc} + R_{bdem}) \quad [\Omega] \quad (5.7)$$

f) Résistance du rotor pour les bagues séparées

$$\alpha = \frac{R_{bc}}{R_{bc} + R_{br}} \quad (5.8)$$

$$\alpha = 1$$

$$\Delta_z = 0,05$$

$$\xi = 1 + \frac{1}{5} \left(\frac{\pi \cdot p}{Z_2} \right)^2 - \frac{\Delta_z}{1 - \left(\frac{p}{Z_2} \right)^2} \quad (5.9)$$

$$\lambda_{d1} = \frac{t_1}{12 \cdot \delta \cdot K_\delta} \cdot \xi \quad (5.10)$$

$$\lambda_{d2} = \frac{t_2}{12 \cdot \delta \cdot K_\delta} \cdot \xi \quad (5.11)$$

$$\beta' = \frac{X_{2int}}{R_{bc} + R_{br}} \quad (5.12)$$

$$r'_2 = R_{2ram} \frac{I_{n1}}{U_{n1}} \quad [\Omega] \quad (5.13)$$

$$x'_2 = X_{2ram} \frac{I_{n1}}{U_{n1}} \quad [\Omega] \quad (5.14)$$

$$K' = \frac{1}{1 + \beta'^2 \cdot g^2} \quad (5.15)$$

$$r_{2\xi} = R_{bc} \cdot (1 - \alpha \cdot K') \quad [\Omega] \quad (5.16)$$

g) Réactance du rotor pour les bagues séparées

$$x_{2\xi} = 7,9 \cdot f_1 \cdot L_2 \cdot (\lambda_{2fc} + \lambda_{2fr} \cdot \alpha^2 \cdot K' + \lambda_{disenc} + \lambda_{\pi 2}) \cdot 10^{-9} \quad [\Omega] \quad (5.17)$$

III.1.3.4. 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 :

a) Résistance du rotor pour les bagues séparées

$$r_2 = R_{bc} \cdot (1 - \alpha) \quad [\Omega] \quad (5.18)$$

b) Réactance du rotor pour des bagues séparées

$$x_2 = 7,9 \cdot f_1 \cdot L_2 \cdot (\lambda_{2fc} + \lambda_{2fr} \cdot \alpha^2 + \lambda_{disenc} + \lambda_{\pi 2}) \cdot 10^{-9} \quad [\Omega] \quad (5.19)$$

$$K_R = \frac{r_{2\xi}}{r_2} \quad (5.20)$$

K_R - Coefficient d'augmentation de la résistance dû à l'effet pelliculaire

$$r'_{2\xi} = K_R \cdot r'_2 \quad [\Omega] \quad (5.21)$$

III.1.4. Calcul des pertes et du rendement

Pour chaque norme, il existe plusieurs méthodes de détermination du rendement η dont :

1. **Méthode directe** : $\eta = \frac{\text{puissance de sortie}}{\text{puissance d'entrée}}$
2. **Méthode des pertes séparées** : $\eta = \frac{\text{puissance d'entrée} - \sum \text{pertes}}{\text{puissance d'entrée}}$

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

On peut distinguer quatre groupes de pertes :

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

III.1.4.1. Pertes principales dans le fer

Les pertes dans le fer incluent 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 induit par le flux fondamental dans les tôles magnétiques. Les dents et la culasse statoriques sont les parties les plus touchées par ces pertes.

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

a) Pertes dans les dents

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

$$P_{fz1} = 1,7 \cdot P_{1/50} \cdot B_{z1max}^2 \cdot G_{z1} \quad [\text{W}] \quad (6.1)$$

$$P_{1/50} = 2 \quad [\text{W} \cdot \text{Kg}^{-1}] \text{ pour 1T et 50 Hz (l'acier allié 2013)}$$

$$G_{z1} = 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot L_i \cdot K_{fer} \cdot [h_{z1} \cdot \pi \cdot (D_1 + h_{z1}) - S_{enc1} \cdot Z_1] \quad (6.2)$$

G_{z1} - Poids des dents statorique en [kg].

b) Pertes dans la culasse statorique

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

$$P_{fc1} = 1,7 \cdot P_{1/50} \cdot B_{c1}^2 \cdot G_{c1} \quad [\text{W}] \quad (6.3)$$

$$G_{c1} = 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot L_i \cdot K_{fer} \cdot h_{c1} \cdot \pi \cdot (D_{ext} + h_{c1}) \quad [\text{Kg}] \quad (6.4)$$

G_{c1} - Poids de la culasse statorique

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

$$P_{fer} = P_{c1} + P_{fz1} \quad [\text{W}] \quad (6.5)$$

III.1.4.2. Pertes électriques dans le cuivre et dans le bronze

Ce sont les pertes par effet joules dans les enroulements statoriques et rotoriques, elles sont proportionnelles au carré des courants qui circulent dans ces enroulements.

a) Pertes joules statoriques

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

$$P_{j1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_{n1}^2 \quad [\text{W}] \quad (6.6)$$

Avec : R_1 - Résistance d'une phase d'un enroulement statorique.

I_{n1} - courant dans une phase statorique.

b) Pertes joules rotoriques

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

$$P_{j2} = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 \quad [\text{W}] \quad (6.7)$$

Avec : m_2 - Nombre de phases rotoriques ($m_2=Z_2$).

I_2 - Courant dans la barre.

R_2 - Résistance d'une phase rotorique.

III.1.4.3. Pertes mécaniques

Les pertes mécaniques comprennent :

- Les pertes par frottement sur les paliers : ils ont un comportement compliqué qui dépend de nombreux paramètres tel que la qualité d'usinage, lubrification, etc. il est impossible de donner une formule les chiffrant précisément.
- Les pertes par ventilation et frottement avec l'air: dues au déplacement de l'air par les parties mobiles, elles sont également difficile à calculer.

Pour un moteur donné, les pertes mécaniques ne dépendent que de la vitesse.

Elles sont exprimées par :

$$P_{mec} = K_t \cdot (N \cdot 10^{-3})^2 \cdot (D_{ext} \cdot 10^{-2})^4 \quad [\text{W}] \quad (6.8)$$

Avec : K_t - Facteur de majoration.

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

III.1.4.4. Pertes supplémentaires

Il existe néanmoins des pertes dites supplémentaires, dont l'identification est beaucoup plus complexe.

Ces pertes ont pour origine le champ de fuite dans les encoches et dans les têtes de bobines, ainsi que les pertes liées au contact entre les barres et les tôles du rotor, on les estime à 0,5% de la puissance absorbée par le moteur. Elles sont données par la formule suivante :

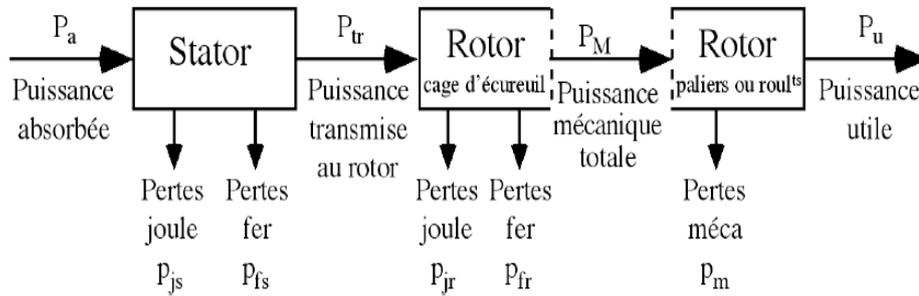
$$P_{sup} = \frac{P_n \cdot 10^3}{\eta_n} \quad [\text{W}] \quad (6.9)$$

III.1.4.5. Pertes totales

Elles sont données par la relation suivante :

$$P_{tot} = P_{fer} + P_{j1} + P_{j2} + P_{mec} + P_{sup} \quad [\text{W}] \quad (6.10)$$

- **Schéma de bilan de puissance et les pertes dans le moteur**



III.1.4.6. Rendement de la machine

Le rendement est donné par la relation suivante :

$$\eta = \frac{P_n \cdot 10^3}{P_n \cdot 10^3 + P_{tot}} \quad (6.11)$$

III.1.4.7. Calcul de la résistance de magnétisation

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

$$I_{0a} = \frac{P_{fer} + P_{mec} + P_{a10}}{m_1 \cdot U_{n1}} = \frac{P_{fer} + P_{mec} + R_1 \cdot m_1 \cdot I_\mu^2}{m_1 \cdot U_{n1}} \quad [A] \quad (6.12)$$

D'où :

$$R_m = \frac{X_m \cdot I_\mu}{I_{0a}} \quad [\Omega] \quad (6.13)$$

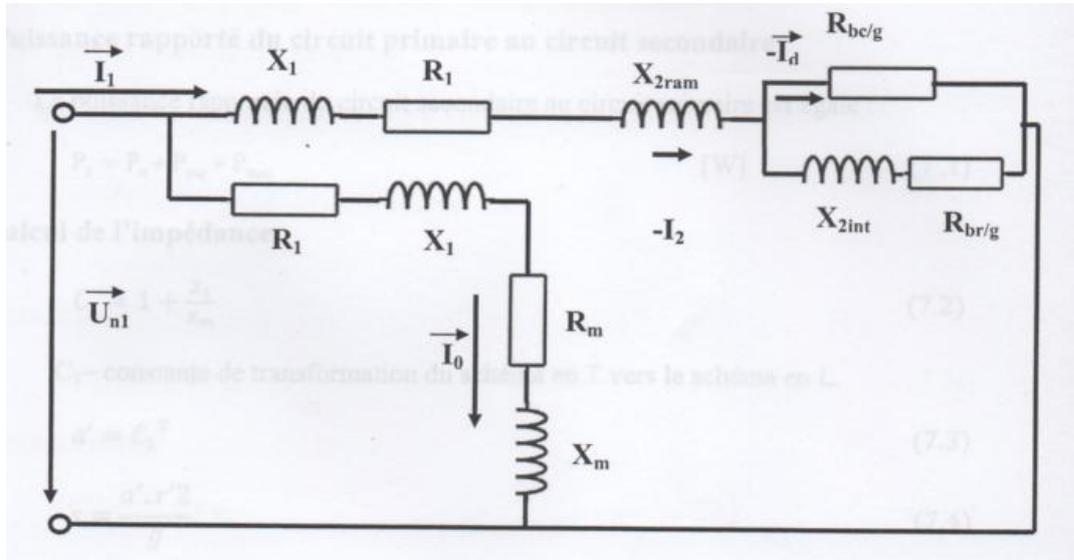
Avec : I_μ - Courant magnétisant.

X_m - Réactance magnétisante.

III.1.5. 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 à double cage.

III.1.5.1. Schéma équivalent en L d'un moteur à double cages



C'est un schéma conventionnel monophasé ramené au stator

R_1 - Résistance statorique en [Ω]

X_1 - Réactance de fuite du stator en [Ω]

X_{2ram} - Réactance de fuite du rotor ramenée au stator en [Ω]

R_{bc} - Résistance rotorique de la barre circulaire en [Ω]

R_{br} - Résistance rotorique de la barre rectangulaire en [Ω]

X_{2int} - Réactance de la cage interne du rotor en [Ω]

R_m - Résistance de magnétisante en [Ω]

X_m - Réactance magnétique en [Ω]

III.1.5.2. Caractéristiques de fonctionnement du moteur

Les caractéristiques de fonctionnement d'un moteur asynchrone sont :

a) Puissance rapportée du circuit secondaire au circuit primaire

$$P_2 = P_n + P_{sup} + P_{mec} \quad [W] \quad (7.1)$$

b) Calcul de l'impédance

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad [\Omega] \quad (7.2)$$

$$R = a + (a' \cdot r_2')/g \quad [\Omega] \quad (7.3)$$

$$a = C_1 \cdot R_{1T75} \quad (7.4)$$

$$a' = C_1^2 \quad (7.5)$$

$$C_1 = (t_{z1} - b_{f1}) \cdot (1 - \chi) \quad (7.6)$$

Avec : C_1 - constante de transformation du schéma en T vers le schéma en L.

χ - constante donnée par la figure Fig. III-5. (Annexe 7).

$$S = \frac{a' \cdot r_2'}{g} \quad (7.7)$$

$$X = b + \frac{b' \cdot r_2'}{g} \quad [\Omega] \quad (7.8)$$

$$b = C_1 \cdot (X_1 + C_1 \cdot x_2') \quad (7.9)$$

$$x_2' = x_2 \cdot \frac{4 \cdot m_1 \cdot (W_1^2 \cdot K_{en1}^2)}{Z_2 \cdot K_{ob}^2} \quad [\Omega] \quad (7.10)$$

c) Calcul du courant secondaire

Le courant secondaire est donné par :

$$I_2'' = \frac{U_{n1}}{Z} \quad [A] \quad (7.11)$$

$$I_2' = C_1 \cdot I_2'' \quad [A] \quad (7.12)$$

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

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

d) Facteur de puissance rotorique

Le facteur de puissance rotorique est donnée par :

$$\cos \Phi_2 = \frac{R}{Z} \quad (7.13)$$

D'où :

- **Courant actif**

$$I_{2a}'' = I_2'' \cdot \cos \Phi_2 \quad [A] \quad (7.14)$$

- **Courant réactif**

$$I_{2r}'' = I_2'' \cdot \sin \Phi_2 \quad [A] \quad (7.15)$$

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

$$I_{0a} = \frac{P_{a10} + P_{f1}}{m_1 \cdot U_{n1}} \quad [A] \quad (7.16)$$

- **Courant magnétisant**

$$I_{0r} = \frac{P \cdot \sum F_i}{0,9 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot K_{en1}} \quad [\text{A}] \quad (7.17)$$

- **Courant total à vide**

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2} \quad [\text{A}] \quad (7.18)$$

- **Courant absorbé**

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1r}^2} \quad [\text{A}] \quad (7.19)$$

Avec :

$$I_{1a} = I_{0a} + I_{2a}'' \quad [\text{A}] \quad (7.20)$$

$$I_{1r} = I_{0r} + I_{2r}'' \quad [\text{A}] \quad (7.21)$$

e) **Le facteur de puissance de la machine**

$$\cos \Phi_1 = \frac{I_{1a}}{I_1} \quad (7.22)$$

f) **Puissance absorbée par le moteur**

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$P_1 = m_1 \cdot U_{n1} \cdot I_{a1} \quad [\text{W}] \quad (7.23)$$

g) **Vitesse de rotation du moteur**

Elle est donnée par la relation suivante :

$$N_2 = N (1-g) \quad [\text{tr/min}] \quad (7.24)$$

Avec : N- Vitesse du synchronisme.

g- Glissement.

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

h) **Couple utile sur l'arbre du moteur**

Il est donné par :

$$C_u = 9,55 \frac{P_n}{N_2} \quad [\text{N.m}] \quad (7.25)$$

III.1.5.3. 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 :

$$R_{dm} = R_{1T20} + C_{1nm} \frac{r'_{2\xi m}}{g} \quad [\Omega] \quad (8.1)$$

$$X_{dm} = x_{1m} + C_{1nm} \cdot x'_{2\xi m} \quad [\Omega] \quad (8.2)$$

$$C_{1nm} = 1 + \frac{x_{1m}}{x_{12n}} \quad (8.3)$$

$$\gamma_1 = \frac{\frac{b_{f1}^2}{\delta^2}}{5 + \frac{b_{f1}}{\delta}} \quad (8.4)$$

$$K'_\delta = \frac{t_1}{t_1 - \gamma_1 \cdot \delta} \quad (8.5)$$

$$x_{12n} = K_\mu \cdot X_m \quad [\Omega] \quad (8.6)$$

b) Courant de démarrage

Au démarrage le moteur asynchrone

$$I_d = I''_{2m} \cdot \frac{\sqrt{R_{\pi m}^2 + (X_{\pi m} + X_m)^2}}{C_{1nm} \cdot X_m} \quad [A] \quad (8.7)$$

Avec :

$$I''_{2m} = \frac{U_{n1}}{\sqrt{R_{\pi m}^2 + X_{\pi m}^2}} \quad [A] \quad (8.8)$$

c) Couple de démarrage

$$C_d = C_u \cdot C_{darp} \quad [N.m] \quad (8.9)$$

Avec :

$$C_{darp} = \left(\frac{I'_{2m}}{I_2} \right)^2 \cdot K_R \cdot \frac{g_n}{g} \quad (8.10)$$

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

$$I'_{2m} = C_{1nm} \cdot I''_{2m} \quad [\text{A}] \quad (8.11)$$

d) Couple maximal

$$C_{max} = \frac{m_1 \cdot I_2'^2 \cdot r_2'^2}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot g_n} \quad [\text{N.m}] \quad (8.12)$$

Chapitre IV

Elaboration d'un programme de calcul

IV.1.Elaboration d'un programme de calcul

Dimensionnement du moteur à double cage

Données initiales

La puissance nominale	$P_n := 132$	Kw
Nombre de phase	$m_1 := 3$	
La fréquence	$f_1 := 50$	Hz
Tension nominale par phase	$u_n := 220$	V
Vitesse de rotation de synchronisme	$N := 1500$	$\frac{tr}{min}$
Facteur de majoration	$K_e := 0.98$	
Facteur de puissance	$\cos(\varphi_n) := 0.87$	
Le rendement	$\eta_n := 0.95$	
Coefficient de recouvrement polaire	$\alpha_i := 0.64$	
Coefficient de forme de la courbe d'induction	$K_f := 1.11$	
Diamètre extérieur	$D_1 := 460$	mm
Diamètre intérieur	$D_2 := 310$	mm
La hauteur d'axe	$h := 313$	mm
Nombre de paire de pole	$p := 2$	

Dimensions principales

La puissance électromagnétique

$$P_e := \frac{K_e \cdot P_n}{\eta_n \cdot \cos(\varphi_n)} \quad P_e = 156.515 \text{ Kw}$$

Nombre d'encoche

Nombre d'encoche statorique $Z_1 = 48$

Nombre d'encoche rotorique $Z_2 = 40$

Nombre d'encoche par pôle et par phase

$$q_1 := \frac{Z_1}{2p \cdot m_1} \quad q_1 = 4$$

Le pas dentaire statorique

$$t_1 := \frac{\pi \cdot D_1}{Z_1} \quad t_1 = 20.289 \text{ mm}$$

Angle électrique entre deux encoches voisines

$$\gamma := \frac{p \cdot 360}{Z_1} \quad \gamma = 30 \text{ degré}$$

Zone de phase

$$\alpha := q_1 \cdot \gamma \quad \alpha = 120 \text{ degré}$$

Pas polaire statorique en nombre d'encoche

$$\tau_p := \frac{Z_1}{2 \cdot p} \quad \tau_p = 12 \text{ encoches}$$

Pas polaire statorique en millimètre

$$\tau_{p1} := \frac{\pi \cdot D_1}{2 \cdot p} \quad \tau_{p1} = 243.473 \text{ mm}$$

Le raccourcissement

$$\varepsilon = 2 \text{ encoches}$$

Le pas d'enroulement

$$y_1 := \frac{Z_1}{2p} - \varepsilon \quad y_1 = 10 \text{ encoches}$$

Le rapport de raccourcissement

$$\beta := \frac{y_1}{\tau_p} \quad \beta = 0.833$$

Coefficient de distribution

$$K_{d1} := \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2.m_1}\right)}{q_1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2.m_1.q_1}\right)} \quad K_{d1} = 0.958$$

Coefficient de raccourcissement polaire

$$K_{r1} := \text{Sin}\left(\frac{\beta \cdot \pi}{2}\right) \quad K_{r1} = 0.966$$

Facteur de bobinage de l'enroulement statorique

$$k_{en1} := K_{d1} \cdot K_{r1} \quad K_{en1} = 0.925$$

Nombre de voies parallèles

$$a_1 = 4$$

La charge linéaire

$$A_1 = 38100 \quad \text{A.m}$$

L'induction dans l'entrefer

$$\beta_\delta = 0.66 \quad \text{T}$$

Longueur virtuelle de l'induit

$$L_i := \frac{6.1 \cdot 10^{12} \cdot P_e}{\alpha_i K_f \cdot N \cdot D_1^2 \cdot A_1 \cdot B_\delta \cdot K_{en1}} \quad L_i = 400.815 \quad \text{mm}$$

Coefficient de longueur

$$\lambda_i := \frac{L_i}{D_1} \quad \lambda_i = 1.293$$

Courant nominale dans une phase

$$I_{n1} := \frac{P_n \cdot 10^3}{m_1 \cdot \eta_n \cdot \cos(\Phi_n) \cdot U_{n1}} \quad I_{n1} = 242.654 \quad \text{A}$$

Nombre de conducteurs effectifs dans une encoche

$$U_{en1} := \frac{a_1 \cdot t_1 \cdot A_1 \cdot 10^3}{I_{n1}} \quad U_{en1} = 12.743$$

$$\text{Round}(U_{en1}) = 10$$

Nombre de spires d'une voie parallèle

$$W_1 := \frac{p \cdot q_1 \cdot U_{n1}}{a_1} \quad W_1 = 20$$

La densité du courant

$$J_1 = 3 \quad \text{A/mm}^2$$

Section effective transversale d'un conducteur de l'enroulement

$$S_{eff1} := \frac{I_{n1}}{a_1 \cdot J_1} \quad S_{eff1} = 20.221 \quad \text{mm}^2$$

Nombre de conducteurs élémentaires

$$N_{elt} = 10$$

La section élémentaire d'un conducteur

$$S_{el1} := \frac{S_{eff1}}{N_{el}} \quad S_{el1} = 2.022 \quad \text{mm}^2$$

La section normalisée d'un conducteur $S_{nor} = 2.01 \quad \text{mm}^2$

Le diamètre nu d'un conducteur $d_{nu} = 1.6 \quad \text{mm}$

Le diamètre isolé d'un conducteur $d_{iso} = 1.685 \quad \text{mm}$

Dimensionnement de la feuille statorique

Coefficient de remplissage du paquet statorique et rotorique

$$K_{fer} = 0.97$$

La largeur de la dent statorique $b_{z1} = 9.5 \quad \text{mm}$

L'induction dans la dent statorique

$$B_{z1} := \frac{t_1 \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot b_{z1}} \quad B_{z1} = 1.453 \quad \text{T}$$

La hauteur du dos statorique $h_{c1} = 38.87 \quad \text{mm}$

L'induction dans le dos statorique

$$B_{c1} = \frac{0.5 \cdot \alpha_i \cdot \tau_{p1} \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot h_{c1}} \quad B_{c1} = 1.364 \quad \text{T}$$

La hauteur de la dent statorique $h_{z1} = 36.13 \quad \text{mm}$

La largeur maximale de l'encoche $b_{en2} = 14.5 \quad \text{mm}$

La largeur minimale de l'encoche $b_{en1} = 10.84 \quad \text{mm}$

La hauteur de clavette $h_k = 0 \quad \text{mm}$

La hauteur de fente $h_f = 2.13 \quad \text{mm}$

La hauteur d'encoche $h_{en1} = 34 \quad \text{mm}$

Section de l'encoche statorique avec isolation

$$S_{enciso1} := 0.5 (d_{enc11} + d_{enc12}) \cdot \left(h_{enc1} - \frac{d_{enc12}}{2} \right) + \frac{\pi \cdot d_{enc12}^2}{4.2}$$

$$S_{enciso1} = 421.487 \quad \text{mm}^2$$

Epaisseur de l'isolant $e_1 = 0.3 \quad \text{mm}$

Epaisseur de la cale $e_{cal} = 2 \text{ mm}$

Section occupée par l'isolation

$$S_{iso} := \left(2 \left(h_{enc1} - \frac{d_{enc12}}{2} - e_{cal} \right) + \frac{d_{enc11} + d_{enc12}}{2} + \frac{\pi \cdot d_{enc12}}{2.2} \right) \cdot e_1 + d_{enc11} \cdot e_{cal}$$

$$S_{iso} = 43.747 \text{ mm}^2$$

Section de l'encoche statorique

$$S_{enc1} := S_{enciso} - S_{iso}$$

$$S_{enc1} = 377.74 \text{ mm}^2$$

Coefficient de remplissage

$$K_{re1} := \frac{N_{el} \cdot U_{en1} \cdot d_{iso}^2}{S_{enc1}}$$

$$K_{re1} = 0.747$$

Les vérifications

La charge linéaire

$$A_1 := \frac{I_{n1} \cdot Z_1 \cdot U_{enc1}}{\pi \cdot D_1 \cdot a_1 \cdot 10^{-3}}$$

$$A_1 = 381.19 \cdot 10^2 \text{ A.m}$$

Le flux sous un pôle

$$\Phi := \frac{K_e \cdot U_{n1}}{4 \cdot K_f \cdot W_1 \cdot f_1 \cdot K_{en1}}$$

$$\Phi = 0.043 \text{ weber}$$

L'induction magnétique

$$B_\delta := \frac{\Phi}{\alpha_i \cdot \tau_{p1} \cdot L_i \cdot 10^{-6}}$$

$$B_\delta = 0.68 \text{ T}$$

Dimensionnement du rotor

L'épaisseur de l'entrefer

$$\delta = 0.8 \text{ mm}$$

Diamètre intérieur du rotor

$$d_{arr} = 110 \text{ mm}$$

Diamètre extérieur du rotor

$$D_2 := D_1 - 2\delta$$

$$D_2 = 308.4 \text{ mm}$$

Pas polaire rotorique

$$t_2 := \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2}$$

$$t_2 = 24.222 \text{ mm}$$

Courant dans la barre

$$I_2 := \frac{1.11 \cdot I_{n1} \cdot 6 \cdot W_1 \cdot \cos(\Phi_n) \cdot K_{en1}}{Z_2}$$

$$I_2 = 650.289 \text{ A}$$

Dimensionnement de la feuille rotorique

Hauteur de la culasse rotorique $h_{c2} = 44.9$ mm

Le pas polaire rotorique en millimètre

$$\tau_{p2} := \frac{\pi \cdot D_2}{2p} \quad \tau_{p2} = 242.217 \text{ mm}$$

L'induction dans la culasse rotorique

$$B_{c2} := \frac{0.5 \cdot \alpha_i \cdot \tau_{p2} \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot h_{c2}} \quad B_{c2} = 1.175 \text{ T}$$

La hauteur de la dent rotorique

$$h_{z2} := 0.5 \cdot (D_2 - D_{arr}) - h_{c2} \quad h_{z2} = 54.3 \text{ mm}$$

La hauteur de la fente rotorique

$$h_{f2} = 4 \text{ mm}$$

Le diamètre de la barre circulaire

$$d_{bc} = 12.8 \text{ mm}$$

La largeur de la partie circulaire de la dent

$$b_{z2c} := \frac{\pi \cdot (D_2 - \frac{2}{3} \cdot d_{bc} - 2h_{f2})}{Z_2} - 0.94d_{bc} \quad b_{z2c} = 10.891 \text{ mm}$$

La hauteur de la partie rectangulaire de l'encoche rotorique

$$h_m = 30.5 \text{ mm}$$

La largeur de la partie rectangulaire de l'encoche rotorique

$$b_{br} = 6.5 \text{ mm}$$

La largeur de la partie rectangulaire de la dent

$$b_{z2r} := \frac{\pi \cdot (D_2 + \frac{2}{3} \cdot h_m - 2h_{z2})}{Z_2} - b_{br} \quad b_{z2r} = 10.789 \text{ mm}$$

La largeur de la dent

$$b_{z2} := \frac{b_{z2c} + b_{z2r}}{2} \quad b_{z2} = 10.84 \text{ mm}$$

L'induction dans la dent rotorique

$$B_{z2} := \frac{t_2 \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot b_{z2}} \quad B_{z2} = 1.52 \text{ T}$$

Dimensionnement de la cage rotorique

La section de la barre circulaire

$$S_{bc} := \pi \cdot \frac{d_{bc}^2}{4} \quad S_{bc} = 128.68 \quad \text{mm}^2$$

La section de la barre rectangulaire

$$S_{br} := h_m \cdot b_{br} \quad S_{br} = 198.25 \quad \text{mm}^2$$

La section totale

$$S_b := S_{bc} + S_{br} \quad S_b = 326.93 \quad \text{mm}^2$$

La densité de courant

$$J_b := \frac{I_2}{S_b} \quad J_b = 1.989 \quad \text{A/mm}^2$$

Dimensionnement des anneaux de court-circuit

La hauteur de la partie circulaire de la dent $h_{z2c} = 16.8 \quad \text{mm}$

La hauteur de la partie rectangulaire de la dent $h_{z2r} = 37.5 \quad \text{mm}$

La hauteur de l'anneau de la cage externe

$$h_{anc} := (1.1 \div 1.25) \cdot h_{z2c}$$

$$h_{anc} := 1.1 \cdot h_{z2c} \quad h_{anc} = 20 \quad \text{mm}$$

La hauteur de l'anneau de la cage interne

$$h_{anr} := (1.1 \div 1.25) \cdot h_{z2r}$$

$$h_{anr} := 1.1 \cdot h_{z2r} \quad h_{anr} = 15 \quad \text{mm}$$

Les sections des anneaux

La section de l'anneau de la cage externe

$$S_{anc} := (0.35 \div 0.45) \cdot \frac{Z_2 \cdot S_{bc}}{2 \cdot p}$$

$$S_{anc} = 0.45 \cdot \frac{Z_2 \cdot S_{bc}}{2 \cdot p} \quad S_{anc} = 579.058 \quad \text{mm}^2$$

La section de l'anneau de la cage interne

$$S_{anr} := (0.35 \div 0.45) \cdot \frac{Z_2 \cdot S_{br}}{2 \cdot p}$$

$$S_{anr} := 0.378 \cdot \frac{Z_2 \cdot S_{br}}{2 \cdot p} \quad S_{anr} = 749.385 \text{ mm}^2$$

La section de l'anneau

$$S_{an} := S_{anc} + S_{anr} \quad S_{an} = 1.328 \cdot 10^3 \text{ mm}^2$$

La largeur de l'anneau de la cage externe

$$b_{anc} := \frac{S_{anc}}{h_{anc}} \quad b_{anc} = 28.953 \text{ mm}^2$$

La largeur de l'anneau de la cage interne

$$b_{anr} := \frac{S_{anr}}{h_{anr}} \quad b_{anr} = 49.959 \text{ mm}^2$$

Le diamètre de l'anneau de la cage externe

$$D_{anc} := (D_2 - h_{anc}) \quad D_{anc} = 277 \text{ mm}$$

Le diamètre de l'anneau de la cage interne

$$D_{anr} := (D_2 - 16.8) - h_{anr} \quad D_{anr} = 216 \text{ mm}^2$$

Calcul du circuit magnétique

Circuit magnétique statorique

Force magnétomotrice dans la dent du stator

$$B_{z1} = 1.453 \text{ T} \quad H_{z1} = 646 \text{ A/m}$$

$$F_{z1} := H_{z1} \cdot h_{z1} \cdot 10^{-3} \quad F_{z1} = 23.34 \text{ A}$$

Longueur moyenne des lignes du champ dans la culasse statorique

$$L_{c1} := \frac{\pi}{2p} (D_{ext} - h_{c1}) \quad L_{c1} = 330.755 \text{ mm}$$

Force magnétomotrice dans la culasse statorique

$$B_{c1} = 1.364 \text{ T} \quad H_{c1} = 365 \text{ A/m}$$

$$F_{c1} := H_{c1} \cdot L_{c1} \cdot 10^{-3} \quad F_{c1} = 120.725 \text{ A}$$

La largeur de la fente statorique

$$b_{f1} = 5 \text{ mm}$$

La largeur de la fente rotorique

$$b_{f2} = 3.7 \text{ mm}$$

Coefficient de CARTER

$$K_{\delta 1} := 1 + \frac{b_{f1}}{t_1 - b_{f1} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_1}{b_{f1}}} \quad K_{\delta 1} = 1.159$$

$$K_{\delta 2} := 1 + \frac{b_{f2}}{2 - b_{f2} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_2}{b_{f2}}} \quad K_{\delta 2} = 1.079$$

$$K_{\delta} := K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2} \quad K_{\delta} = 1.25$$

Force magnétomotrice dans l'entrefer

$$F_{\delta} := 0,8 \cdot B_{\delta} \cdot K_{\delta} \cdot \delta \cdot 10^{-3} \quad F_{\delta} = 528.172 \text{ A}$$

Circuit magnétique rotorique

Longueur moyenne des lignes du champ magnétique dans la culasse du rotor

$$L_{c2} := (D_2 - 2 \cdot h_{z2} - h_{c2}) \cdot \frac{\pi}{2 \cdot p} + h_{c2} \quad L_{c2} = 166.558 \text{ mm}$$

Force magnétomotrice dans la culasse du rotor

$$B_{c2} = 1,175 \text{ T} \quad H_{c2} = 240 \text{ A/m}$$

$$F_{c2} := H_{c2} \cdot L_{c2} \cdot 10^{-3} \quad F_{c2} = 39.974 \text{ mm}$$

Fmm dans la partie circulaire de la dent

$$B_{z2} := 1,52 \text{ T} \quad H_{z2} = 735 \text{ A/m}$$

Hauteur de la partie circulaire de la dent sans fente

$$h_{zc} := (1 - 0,1) \cdot d_{bc} \quad h_{zc} = 11.52 \text{ mm}$$

Hauteur de la partie circulaire de la dent sans fente

$$h_{zr} := h_m \quad h_{zr} = 30.5 \text{ mm}$$

$$F_{zc} := H_{z2} \cdot h_{zc} \cdot 10^{-3} \quad F_{zc} = 8.467 \text{ A}$$

Fmm dans la partie rectangulaire de la dent

$$F_{zr} := H_{z2} \cdot h_{zr} \cdot 10^{-3} \quad F_{zr} = 22.418 \text{ A}$$

Force magnétomotrice dans les dents du rotor

$$F_{z2} := F_{zc} + F_{zr} \quad F_{z2} = 30.885 \text{ A}$$

Force magnétomotrice totale par paire de pôle

$$F := \sum F_i := 2. (F_\delta + F_{z1} + F_{z2}) + F_{c1} + F_{c2}$$

$$F = 1.325 \quad \text{A}$$

Calcul des paramètres électriques des enroulements**Paramètres statoriques****Resistance active d'une phase du stator**

Le pas moyen d'un groupe de section

$$y_{1\text{moy}} := y_1 \quad y_{1\text{moy}} = 10$$

Largeur moyenne d'une section

$$b_{1\text{moy}} := \frac{\pi \cdot (D_1 + h_{z1}) \cdot y_{1\text{moy}}}{Z_1} \quad b_{1\text{moy}} = 226.542 \text{ mm}$$

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

$$L_{f1} := (1,16 + 0,14 \cdot p) \cdot b_{1\text{moy}} + 15 \quad L_{f1} = 341.22 \text{ mm}$$

Longueur virtuelle de l'induit

$$L_i = 400.815 \text{ mm}$$

Longueur moyenne d'une spire de l'enroulement statorique

$$L_{w1} := 2 \cdot (L_i + L_{f1}) \quad L_{w1} = 1.484 \cdot 10^3 \text{ mm}$$

$$T = 20^\circ\text{C} \quad \rho_{\text{cu}} = 17.2 \cdot 10^{-9} [\Omega \cdot \text{m}]$$

$$R_{1T20} := \rho_{\text{cu}} (20) \frac{W_1 \cdot L_{w1} \cdot 10^3}{a_1 \cdot N_{el} \cdot S_{elt1}} \quad R_{1T20} = 6.312 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$T = 75^\circ\text{C} \quad \rho_{\text{cu}} = 21.3 \cdot 10^{-9} [\Omega \cdot \text{m}]$$

$$R_{1T75} := \rho_{\text{cu}} (75) \frac{W_1 \cdot L_{w1} \cdot 10^3}{a_1 \cdot N_{el} \cdot S_{elt1}} \quad R_{1T75} = 7.816 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$T = 115^\circ\text{C} \quad \rho_{\text{cu}} = 24.4 \cdot 10^{-9} [\Omega \cdot \text{m}]$$

$$R_{1T115} := \rho_{\text{cu}} (115) \frac{W_1 \cdot L_{w1} \cdot 10^3}{a_1 \cdot N_{el} \cdot S_{elt1}} \quad R_{1T115} = 8.954 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Réactances de fuites et perméances de fuites du stator**Perméance d'encoche**

$$Q_1 := \frac{Z_2}{p}$$

$$Q_1 = 20$$

$$K_{B1} = 0.88$$

$$K_{B2} = 0.86$$

$$h_1 = h_{en1}$$

$$h_1 = 34 \quad \text{mm}$$

Epaisseur de l'isolation

$$h_{11} = 2 \quad \text{mm}$$

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

$$\lambda_{enc1} = 1.445$$

Réactance de fuite d'encoche

$$X_{enc1} := \frac{1,58 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot W_1^2}{q_1 \cdot p \cdot 10^8} \cdot \lambda_{enc1}$$

$$X_{enc1} = 0.023 \quad \Omega$$

Perméance différentielle proportionnelle à la réactance de fuite différentielle

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

$$K_{r1} = 0.949$$

$$K_{rr1} = 0.0052$$

$$K_{dd1} = 0.66$$

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

$$\lambda_{d1} = 0.949$$

Réactance de fuite différentielle

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

$$X_{1d} = 0.013 \quad \Omega$$

Perméance frontale proportionnelle à la réactance de fuite frontale

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

$$\lambda_{1f} = 0.717$$

Réactance de fuite frontale

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

$$X_{1f} = 0.034 \quad \Omega$$

Perméance de dispersion de l'enroulement statorique

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

$$\lambda_1 = 2.976$$

Réactance totale

$$X_1 := \frac{1,58 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot W_1^2}{q_1 \cdot p \cdot 10^8} \cdot \lambda_1 \quad X_1 = 0.134 \quad \Omega$$

Coefficient de saturation des dents

$$K_{\mu z} := \frac{F_\delta + F_{z1} + F_{z2}}{F_\delta} \quad K_{\mu z} = 1.103$$

Coefficient de saturation de la machine

$$K_\mu := \frac{\sum F_i}{2 \cdot F_\delta} \quad K_\mu = 1.255$$

Courant magnétisant

$$I_\mu := \frac{p \cdot \sum F_i}{0,9 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot K_{en1}} \quad I_\mu = 53.071 \quad A$$

Réactance de magnétisation

$$X_m := \frac{K_e \cdot U_{n1}}{I_\mu} \quad X_m = 7.017 \quad \Omega$$

Coefficient de dispersion magnétique du stator

$$\sigma_\mu := \frac{X_1}{X_m} \quad \sigma_\mu = 0.019$$

Force électromotrice à vide E_0

$$E_0 := \frac{U_{n1}}{(1 + \sigma_\mu)} \quad E_0 = 372.879 \quad V$$

Paramètres rotoriques**Résistances actives des cages**

$$K_{red} := 2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot p}{Z_2}\right) \quad K_{red} = 0.313$$

$$B_{ob} := \frac{t_1}{t_2} \quad B_{ob} = 0.838$$

$$\alpha_{ob} := \frac{2 \cdot \pi \cdot p \cdot B_{ob}}{Z_2} \quad \alpha_{ob} = 0.263$$

$$K_{ob} := \frac{\sin\left(\frac{\alpha_{ob}}{2}\right)}{\frac{\alpha_{ob}}{2}} \quad K_{ob} = 0.997$$

Coefficient de transformation

$$M := \left(\frac{4.m_1}{Z_2}\right) \cdot \left(\frac{W_1.K_{en1}}{K_{ob}}\right)^2 \quad M=103.276$$

Résistance active de la barre circulaire

$$T=24^\circ\text{C} \quad \rho_{cusi6}(T) = 13.21 \cdot 10^{-9} (\Omega.m)$$

$$K_{dep} = 1 \quad L_i = L_2$$

$$R_{bc} := \rho_{cu}(T) \cdot \frac{K_{dep} \cdot L_2 \cdot 2 \cdot 10^3}{S_{bc}} \quad R_{bc} = 4.115 \cdot 10^{-5} \Omega$$

Résistance de l'anneau de la cage externe

$$R_{anc} := \rho_{cusi6}(T) \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot D_{anc} \cdot 10^3}{S_{anc}} \quad R_{anc} = 1.224 \cdot 10^{-6} \Omega$$

Résistance active de la cage externe

$$R_{c1} := R_{bc} + 2 \cdot \frac{R_{anc}}{K_{red}^2} \quad R_{c1} = 6.616 \cdot 10^{-5} \Omega$$

Résistance active de la barre rectangulaire

$$T=20^\circ\text{C} \quad \rho_{cu}(T) = 0.0172 \cdot 10^{-6} (\Omega.m)$$

$$R_{br} := \rho_{cu}(T) \cdot \frac{K_{dep} \cdot L_2 \cdot 2 \cdot 10^3}{S_{br}} \quad R_{bc} = 3.477 \cdot 10^{-5} \Omega$$

Résistance de l'anneau de la cage interne

$$R_{anr} := \rho_{cusi6}(T) \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot D_{anr} \cdot 10^3}{S_{anr}} \quad R_{anr} = 7.378 \cdot 10^{-7} \Omega$$

Résistance active de la cage interne

$$R_{c2} := R_{br} + 2 \cdot \frac{R_{anr}}{K_{red}^2} \quad R_{c2} = 4.985 \cdot 10^{-5} \Omega$$

Résistance de l'anneau ramené à la barre circulaire

$$R_{anrambc} := \frac{R_{anc}}{K_{red}^2} \quad R_{anrambr} = 1.251 \cdot 10^{-5} \Omega$$

Résistance de l'anneau ramené à la barre rectangulaire

$$R_{anrambr} := \frac{R_{anr}}{K_{red}^2} \quad R_{anrambr} = 7.537 \cdot 10^{-6} \Omega$$

Résistance totale de l'anneau ramenée à la barre

$$R_{anrambt} := \frac{R_{anrambc} \cdot R_{anrambr}}{R_{anrambc} + R_{anrambr}} \quad R_{anrambt} = 1.463 \cdot 10^{-5} \Omega$$

Résistance de l'anneau ramenée au stator

$$R_{anrams} := M \cdot R_{anrambt} \quad R_{anrams} = 1.511 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Résistances rotoriques**Résistance active d'une phase rotorique**

$$R'_2 := R_{bc} + R_{anrambc} \quad R'_2 = 5.366 \cdot 10^{-5} \Omega$$

$$R''_2 := R_{br} + R_{anrambr} \quad R''_2 = 4.231 \cdot 10^{-5} \Omega$$

$$R_2 := \frac{R'_2 \cdot R''_2}{R'_2 + R''_2} \quad R_2 = 6.41 \cdot 10^{-5} \Omega$$

Résistance d'une phase rotorique ramenée au stator

$$R_{2ram} := M \cdot R_2 \quad R_{2ram} = 6.621 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Résistance de dispersion, réactance et perméance du rotor**La cage externe**

$$I_{an} := \frac{I_2}{K_{red}} \quad I_{an} = 2.078 \cdot 10^3 \Omega$$

$$J_{ANC} := \frac{I_{an}}{S_{anc}} \quad J_{ANC} = 3.589 \text{ A/mm}^2$$

Facteur de conductibilité magnétique

$$K_c = K_r \quad K_c = 1$$

$$\lambda_{cm} := \left(0,785 - \frac{1}{2 \cdot d_{bc}}\right) \cdot K_c + \frac{h_{f2}}{b_{f2}} \quad \lambda_{cm} = 1.827$$

Perméance frontale

$$\lambda_{2fc} := \frac{2.3 \cdot D_{ancmoy}}{Z_2 \cdot L_i \cdot K_{red}^2} \cdot \log\left(\frac{4.7 \cdot D_{ancmoy}}{2 \cdot (h_{anc} + b_{anc})}\right) \quad \lambda_{2fc} = 0.456$$

Réactance de la cage extérieure

$$X_{2ext} := 7,9 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot (\lambda_{cm} + \lambda_{2fc}) \cdot 10^{-6} \quad X_{2ext} = 1.025 \Omega$$

La cage interne

$$J_{anr} := \frac{I_{an}}{S_{anr}} \quad J_{anr} = 2.774 \text{ A/mm}^2$$

Facteur de dispersion d'encoche

$$h_{f22} = 7 \text{ mm}$$

$$b_{f22} = 1.8 \text{ mm}$$

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

$$\lambda_{disenc} = 5.453$$

Perméance frontale

$$\lambda_{2fr} := \frac{2,3 \cdot D_{anrmoy}}{Z_2 \cdot L_i \cdot K_{red}^2} \cdot \log\left(\frac{4,7 \cdot D_{anrmoy}}{2 \cdot (h_{anr} + b_{anr})}\right) \quad \lambda_{2fr} = 0.283$$

La réactance de la cage intérieure

$$X_{2int} := 7,9 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot (\lambda_{disenc} + \lambda_{2fr}) \cdot 10^{-6} \quad X_{2int} = 2.548 \ \Omega$$

Réactance d'une phase rotorique

$$X_2 := \frac{X_{2int} \cdot X_{2ext}}{X_{2int} + X_{2ext}}$$

$$X_2 = 0.731 \ \Omega$$

Réactance du rotor ramenée au stator

$$X_{2ram} := M \cdot X_2$$

$$X_{2ram} = 75.515 \ \Omega$$

Paramètres au démarrage

$$g_d = 1$$

$$h_b = 12.8 \text{ mm}$$

$$\xi_1 := 0,064 \cdot h_b \sqrt{g_d}$$

$$\xi_1 = 0.819$$

Profondeur de pénétration

Coefficient qui dépend de la valeur de ξ_1

$$\varphi_1 = 0$$

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

$$h_{pp} = 12.8 \text{ mm}$$

Section de la barre pénétrée par le courant de démarrage

$$S_{bdem} := S_{bc}$$

$$S_{bdem} = 128.68 \text{ mm}^2$$

Coefficient de déplacement du courant

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

$$K_{dep} = 1$$

Résistance de la barre au démarrage

$$R_{bdem} := R_b \cdot K_{dep}$$

$$R_{bdem} = 4.115 \cdot 10^{-5} \ \Omega$$

Résistance de la cage au démarrage

$$R_{2dem} := R_{anrambc} + R_{bdem} \quad R_{2dem} = 5.366 \cdot 10^{-5} \Omega$$

Résistance de la cage au démarrage ramenée au stator

$$R_{2dem-ram} := M \cdot (R_{anrambc} + R_{bdem})$$

$$R_{2dem-ram} = 5.541 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Résistance du rotor pour les bagues séparées

$$\alpha := \frac{R_{bc}}{R_{bc} + R_{br}} \quad \alpha = 0.542$$

$$\Delta_Z := 0,05$$

$$\xi := 1 + \frac{1}{5} \left(\frac{\pi \cdot p}{Z_2} \right)^2 - \frac{\Delta_Z}{1 - \left(\frac{p^2}{Z_2^2} \right)} \quad \xi = 0.955$$

$$\lambda_{d1} := \frac{t_1}{12 \cdot \delta \cdot K_\delta} \cdot \xi \quad \lambda_{d1} = 1.614$$

$$\lambda_{d2} := \frac{t_2}{12 \cdot \delta \cdot K_\delta} \cdot \xi \quad \lambda_{d2} = 1.927$$

$$\beta' := \frac{X_{2int}}{R_{bc} + R_{br}} \quad \beta' = 3.356 \cdot 10^4$$

$$r'_2 := R_{2ram} \frac{I_{n1}}{U_{n1}} \quad r'_2 = 4.228 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$x'_2 := X_{2ram} \frac{I_{n1}}{U_{n1}} \quad x'_2 = 48.221 \Omega$$

$$K' := \frac{1}{1 + \beta'^2 \cdot g^2} \quad K' = 1.274 \cdot 10^{-5} \Omega$$

$$r_{2\xi} := R_{bc} \cdot (1 - \alpha \cdot K') \quad r_{2\xi} = 1.15 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Réactance du rotor pour les bagues séparées

$$x_{2\xi} := 7,9 \cdot f_1 \cdot L_2 \cdot (\lambda_{2fc} + \lambda_{2fr} \cdot \alpha^2 \cdot K' + \lambda_{disenc} + \lambda_{\pi 2}) \cdot 10^{-9}$$

$$x_{2\xi} = 3.483 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Paramètres du rotor au régime à vide et au fonctionnement nominal

$$\alpha := \frac{R_{bc}}{R_{bc} + R_{br}} \quad \alpha = 0.538$$

Resistance du rotor pour les bagues séparées

$$r_2 := R_{bc} \cdot (1-\alpha) \quad r_2 = 5.27 \cdot 10^{-5} \Omega$$

Réactance du rotor pour des bagues séparées

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

$$x_2 = 3.602 \Omega$$

Coefficient d'augmentation de la résistance dû à l'effet pelliculaire

$$K_R := \frac{r_{2\xi}}{r_2} \quad K_R = 2.183$$

Resistance du rotor pour les bagues séparées qui tient compte de l'effet pelliculaire

$$r'_{2\xi} := K_R \cdot r_2 \quad r'_{2\xi} = 0.012 \Omega$$

Réactance du rotor pour les bagues séparées qui tient compte de l'effet pelliculaire

$$x'_{2\xi} := K_R \cdot x_2 \quad x'_{2\xi} = 0.358 \Omega$$

Calcul des pertes et du rendement

Poids des dents statorique

$$G_{z1} := 7.8 \cdot 10^{-6} \cdot L_i \cdot K_{fer} \cdot [h_{z1} \cdot \pi \cdot (D_1 + h_{z1}) - S_{enc1} \cdot Z_1]$$

$$G_{z1} = 64.158 \text{ Kg} \quad P_{1/50} = 2 \text{ [W.Kg}^{-1}\text{]}$$

Pertes dans les dents

$$P_{fz1} := 1.7 \cdot P_{1/50} \cdot B_{z1max}^2 \cdot G_{z1} \quad P_{fz1} = 529.741 \text{ W}$$

Poids de la culasse statorique

$$G_{c1} := 7.8 \cdot 10^{-6} \cdot L_i \cdot K_{fer} \cdot h_{c1} \cdot \pi \cdot (D_{ext} + h_{c1})$$

$$G_{c1} = 155.952 \text{ Kg}$$

Pertes dans la culasse statorique

$$P_{fc1} := 1,7 \cdot P_{1/50} \cdot B_{c1}^2 \cdot G_{c1} \quad P_{fc1} = 1.134 \cdot 10^3 \text{ W}$$

Pertes principales dans le fer

$$P_{fer} := P_{c1} + P_{fz1} \quad P_{fer} = 1.664 \cdot 10^3 \text{ W}$$

Pertes électriques dans le cuivre et dans le bronze**Pertes joules statoriques**

$$P_{j1} := m_1 \cdot R_1 \cdot I_{n1}^2 \quad P_{j1} = 1.381 \cdot 10^3 \text{ W}$$

Pertes joules rotoriques

$$P_{j2} := m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 \quad P_{j2} = 1.084 \cdot 10^3 \text{ W}$$

Pertes mécaniques

Facteur de majoration

$$K_t = 1 \text{ pour } 2p > 2$$

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

$$P_{mec} = 1.007 \cdot 10^3 \text{ W}$$

Pertes supplémentaires

$$P_{sup} := \frac{P_n \cdot 10^3}{\eta_n} \quad P_{sup} = 694.737 \text{ W}$$

Pertes totales

$$P_{tot} := P_{fer} + P_{j1} + P_{j2} + P_{mec} + P_{sup} \quad P_{tot} = 5.831 \cdot 10^3 \text{ W}$$

Rendement de la machine

$$\eta := \frac{P_n \cdot 10^3}{P_n \cdot 10^3 + P_{tot}} \quad \eta = 0.958$$

La puissance absorbée à vide

$$P_{a10} := R_1 \cdot m_1 \cdot I_\mu^2 \quad P_{a10} = 53.331 \text{ W}$$

Le courant actif à vide

$$I_{0a} := \frac{P_{fer} + P_{mec} + P_{a10}}{m_1 \cdot U_{n1}} \quad I_{0a} = 2.39 \text{ A}$$

La résistance de magnétisation

$$R_m := \frac{X_m \cdot I_\mu}{I_{0a}} \quad R_m = 155.811 \ \Omega$$

Calcul des performances du moteur

Caractéristiques de fonctionnement du moteur

Puissance rapportée du circuit secondaire au circuit primaire

$$P_2 := P_n + P_{sup} + P_{mec} \quad P_2 = 1.337 \cdot 10^5 \text{ W}$$

Calcul de l'impédance

$$C_1 \approx 1 + \frac{X_1}{X_m} \quad C_1 = 1.019$$

$$a := C_1 \cdot R_{1T75} \quad a = 6.432 \cdot 10^{-3}$$

$$a' := C_1^2 \quad a' = 1.039$$

$$S := \frac{a' \cdot r_2'}{g} \quad S = 1.039$$

$$x_2' := x_2 \cdot \frac{4 \cdot m_1 \cdot (W_1^2 \cdot K_{en1}^2)}{Z_2 \cdot K_{ob}^2} \quad x_2' = 0.372 \quad \Omega$$

$$b := C_1 \cdot (X_1 + C_1 \cdot x_2') \quad b = 0.523$$

$$b' := 0$$

$$R := a + (a' \cdot r_2')/g \quad R = 1.045 \quad \Omega$$

$$X := b + \frac{b' \cdot r_2'}{g} \quad X = 0.523 \quad \Omega$$

$$Z := \sqrt{R^2 + X^2} \quad Z = 1.169 \quad \Omega$$

Calcul du courant secondaire

Le courant dans le circuit secondaire transformé en L

$$I_2'' := \frac{U_{n1}}{Z} \quad I_2'' = 325.183 \text{ A}$$

Le courant dans le circuit secondaire ramené au primaire

$$I_2' := C_1 \cdot I_2'' \quad I_2' = 331.396 \text{ A}$$

Facteur de puissance rotorique

$$\cos\Phi_2 := \frac{R}{Z} \quad \cos\Phi_2 = 0.894$$

Courant actif

$$I''_{2a} := I''_2 \cdot \cos\Phi_2 \quad I''_{2a} = 739.269 \text{ A}$$

Courant réactif

$$I''_{2r} := I''_2 \cdot \sin\Phi_2 \quad I''_{2r} = 493.831 \text{ A}$$

Courant actif qui correspond aux pertes fer et aux pertes joule statorique à vide

$$I_{0a} := \frac{P_{a10} + P_{f1}}{m_1 \cdot U_{n1}} \quad I_{0a} = 1.506 \text{ A}$$

Courant actif qui correspond aux pertes fer et aux pertes joule statorique à vide

$$I_{0r} := I_{0a} \cdot \sqrt{3} \quad I_{0r} = 91.922 \text{ A}$$

Courant total à vide

$$I_0 := \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2} \quad I_0 = 91.934 \text{ A}$$

Courant absorbé

$$I_{1a} := I_{0a} + I''_{2a} \quad I_{1a} = 874.02 \text{ A}$$

$$I_{1r} := I_{0r} + I''_{2r} \quad I_{1r} = 528.681 \text{ A}$$

$$I_1 := \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1r}^2} \quad I_1 = 1.021 \cdot 10^3 \text{ A}$$

Le facteur de puissance de la machine

$$\cos\Phi_1 := \frac{I_{1a}}{I_1} \quad \cos\Phi_1 = 0.856$$

Puissance absorbée par le moteur

$$P_1 := m_1 \cdot U_{n1} \cdot I_{1a} \quad P_1 = 9.964 \cdot 10^5 \text{ W}$$

Vitesse de rotation du moteur

$$N_2 := N (1-g) \quad N_2 = 1494 \text{ tr/mn}$$

Couple utile sur l'arbre du moteur

$$C_u := 9,55 \frac{P_n}{N_2} \quad C_u = 843.968 \text{ N.m}$$

Caractéristiques de démarrage

$$\gamma_1 := \frac{\frac{b_{f1}^2}{\delta^2}}{5 + \frac{b_{f1}}{\delta}} \quad \gamma_1 = 3.472$$

$$C_{v1} := 0.64 + 2.5 \sqrt{\frac{\delta}{t_1 + t_2}} \quad C_{v1} = 0.975$$

$$K_h = 1.25$$

$$x_{k\xi} := X_1 + x'_{2\xi} \quad x_{k\xi} = 0.503 \quad \Omega$$

$$r_{k\xi} := R_{1T20} + r_{k\xi} \quad r_{k\xi} = 0.018 \quad \Omega$$

$$Z_{k\xi} := \sqrt{r_{k\xi}^2 + x_{k\xi}^2} \quad Z_{k\xi} = 0.503 \quad \Omega$$

$$I_k := \frac{u_n}{Z_{k\xi}} \quad I_k = 772.218 \quad A$$

$$I_{kh} := k_h \cdot I_k \quad I_{kh} = 965.273 \quad A$$

$$F_{dmoy} := 0.7 (k_{r1} + k_{en1} \cdot k_{ob} \cdot \frac{Z_1}{Z_2}) \cdot \frac{I_{kh} \cdot u_n}{a_1} \quad F_{dmoy} = 1.333 \cdot 10^5$$

$$B_\phi := \frac{F_{dmoy}}{1.6 \cdot \delta \cdot C_{v1}} \quad B_\phi = 1.068 \cdot 10^5$$

La courbe de la Fig. III-5. qui donne χ en fonction de B_ϕ (Annexe 7)

$$\chi = 0.3$$

$$c_1 := (t_1 - b_{f1}) (1 - \chi) \quad c_1 = 10.703$$

$$\Delta\lambda_{n1m} := \left(\frac{h_{f1} + 0.58 \cdot h_{k1}}{b_{f1}} \right) \left(\frac{c_1}{c_1 + 1.5 \cdot b_{f1}} \right) \quad \Delta\lambda_{n1m} = 0.25$$

$$\lambda_{encs1} := \lambda_{enc1} - \Delta\lambda_{n1m} \quad \lambda_{encs1} = 1.195$$

$$\lambda_{ds1} := \lambda_{1d} \cdot \chi \quad \lambda_{ds1} = 0.244$$

$$X_{1m} := X_1 \cdot \frac{\lambda_{enc1} + \lambda_{ds1} + \lambda_{1f}}{\lambda_{enc1} + \lambda_{1d} + \lambda_{1f}} \quad X_{1m} = 0.097 \quad \Omega$$

$$X_{12} := \frac{u_n - I_\mu \cdot X_1}{I_\mu} \quad X_{12} = 7.026 \quad \Omega$$

$$X_{12n} := k_{\mu} \cdot X_m \quad X_{12n} = 8.805 \quad \Omega$$

$$C_{1nm} := 1 + \frac{X_{1m}}{X_{12m}} \quad C_{1nm} = 1.011$$

$$c_2 := (t_2 - b_{f2}) (1 - \chi) \quad c_2 = 14.365$$

$$\Delta\lambda_{n2m} := \left(\frac{h_{f2}}{b_{f2}}\right) \cdot \left(\frac{c_2}{c_2 + b_{f2}}\right) \quad \Delta\lambda_{n2m} = 0.86$$

$$K_{\chi} := \left(\frac{3}{2\xi}\right) \cdot \left(\frac{\sinh(2\xi) - \sin(2\xi)}{\cosh(2\xi) - \cos(2\xi)}\right) \quad K_{\chi} = 1.428$$

$$\lambda'_{n2} := \left(\frac{h_{f22}}{3 \cdot d_{bc}}\right) \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot d_{bc}^2}{8 \cdot s_b}\right)^2 + 0.66 \cdot \frac{b_{f2}}{2 \cdot d_{bc}} \quad \lambda'_{n2} = 0.633$$

$$\Delta\lambda_{n2\xi} := \lambda'_{n2} \cdot (1 - K_{\chi}) \quad \Delta\lambda_{n2\xi} = -0.271$$

$$\lambda_{n2\xi} := \lambda_{disenc} - \Delta\lambda_{n2\xi} \quad \lambda_{n2\xi} = 5.724$$

$$\lambda_{n2\xi m} := \lambda_{n2\xi} - \Delta\lambda_{n2m} \quad \lambda_{n2\xi m} = 4.864$$

$$X'_{2\xi m} := x'_2 \cdot \frac{\lambda_{n2\xi m} + \lambda_{2fc} \cdot \chi + \lambda_{\chi 2}}{\lambda_{disenc} + \lambda_{2fc} + \lambda_{\chi 2}} \quad X'_{2\xi m} = 0.329 \quad \Omega$$

$$R_{\chi m} := R_{1T20} + C_{1m} \cdot \frac{r_{2\xi}}{g} \quad R_{\chi m} = 0.085 \quad \Omega$$

$$X_{\chi m} := X_{1m} + C_{1m} \cdot X'_{2\xi m} \quad X_{\chi m} = 1.092 \quad \Omega$$

$$I''_{2m} := \frac{u_n}{\sqrt{R_{\chi m}^2 + X_{\chi m}^2}} \quad I''_{2m} = 346.977 \quad \Omega$$

Le courant de démarrage

$$I_d := I''_{2m} \cdot \frac{\sqrt{R_{\chi m}^2 + (X_{\chi m} + x_m)^2}}{C_{1nm} \cdot x_m} \quad I_d = 1.189 \cdot 10^3 \quad A$$

$$\frac{I_d}{I_1} := 4.901$$

Le couple de démarrage

$$I'_{2m} := C_{1nm} \cdot I''_{2m} \quad I'_{2m} = 1.052 \cdot 10^3 \quad A$$

$$P_1 := 0.005 \cdot P_2 \quad P_1 = 668.511 \quad W$$

$$g_n := \frac{n-n_2}{n}$$

$$g_n = 4.228 \cdot 10^{-3}$$

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

$$C_{drp} = 1.863 \text{ N.m}$$

$$C_d := C_u \cdot C_{drp}$$

$$C_d = 1.572 \cdot 10^3 \text{ N.m}$$

$$\frac{C_d}{C_u} = 1.863$$

Couple maximal

$$C_{max} = \frac{m_1 \cdot I_2'^2 \cdot r_2'^2}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot g_n}$$

$$C_{max} = 3.317 \text{ N.m}$$

$$\frac{C_{max}}{C_u} = 3.931$$

IV.2.Comparaison et interprétation des résultats

IV.2.1.Comparaison des résultats

Dans cette partie du travail on a à faire une comparaison entre les deux moteurs ; le premier existant à l'entreprise Electro-Industrie d'Azazga et l'autre calculé par la méthode élaboré au chapitre III, sachant que les deux moteurs sont de la même hauteur d'axe.

Les différentes valeurs des caractéristiques mécaniques, électriques ainsi que les performances des deux moteurs existant et calculé sont données par le tableau suivant :

Caractéristiques et performances	Moteur existant h=313 mm	Moteur calculé h=313 mm
Puissance nominale, KW	132	132
L'induction dans l'entrefer, T	0.67	0.66
La charge linéaire, A/m	358.10^2	381.10^2
La longueur virtuelle, mm	420	400.815
Courant nominal, A	245	242.654
La densité du courant, A	4	3
Rapport du courant de démarrage et le courant nominal	6.5	4.901
Couple nominal, N.m	850	843.968
Rapport du couple de démarrage et le couple nominal	2.4	1.863
Rapport du couple maximal et le couple nominal	2.4	3.931
Vitesse de rotation, tr/mn	1485	1494
Facteur de puissance	0.87	0.856
Rendement	0.95	0.958

IV.2.2. Interprétation des résultats

La méthode de calcul utilisée nous a permis d'apporter des modifications au moteur existant, en réduisant le volume de 10%.

Vu les résultats obtenus par les calculs et ceux du moteur existant, on peut dire qu'ils sont similaires.

Mais la réduction du volume a engendré des légères diminutions pour certaines caractéristiques de la machine et augmentations pour d'autres ainsi que les performances par exemple :

-diminution de la longueur virtuelle du moteur de 20 mm par rapport au moteur existant.

-une légère diminution du courant nominale et de la densité de courant.

-diminution du rapport de courant de démarrage et le courant nominal.

-diminution du Couple nominal.

- diminution du rapport de couple de démarrage et le couple nominal.

-augmentation du rapport de couple maximal et le couple nominal.

-une légère diminution de facteur de puissance.

-une légère augmentation du rendement.

Les résultats trouvés au calcul sont dans les marges admissibles, et confirment les caractéristiques pratiques, donc la méthode de calcul et le programme sont de bonne précision.

Conclusion générale

Conclusion générale

A partir des données préliminaires exprimées dans le cahier de charge ; nous avons traité un exemple de calcul. Les résultats obtenus de dimensionnement du circuit magnétique statorique et rotorique (induction magnétique, densité de courant et densité de flux) s'avèrent être dans les marges admissibles. Vu les pertes, le rendement de la machine s'avèrent être un bon résultat.

Vu les résultats obtenus, on constate que l'inconvénient majeur du moteur à double cage est la diminution du facteur de puissance ce qui nécessite l'utilisation d'une autre tôle magnétique à grain non orienté, qui supportera une induction maximale de 1.85 T à 10000 A/m et qui est défini comme une tôle à haute perméabilité.

La comparaison de moteur calculé et le moteur réalisé nous permettra de sophistication notre outil de conception et qui sera probablement utilisé pour la conception d'autres types de machines asynchrones.

La difficulté des calculs de la machine asynchrone réside dans le nombre élevé de formules qui sont liées entre elles par des paramètres, l'imposition des marges d'admissibilité liée à la matière utilisée accroît d'avantage cette difficulté, ce qui nous amène à chercher une solution optimale.

On constate également que le domaine de la construction s'avère réservé est secret, ce qui explique le manque de la documentation aux bibliothèques.

Le calcul des moteurs asynchrones est un domaine très vaste, nous souhaitons que d'autres études sur ce sujet prennent en considération d'autres paramètres comme amélioration du facteur de puissance.

L'unité moteur de l'entreprise Electro-Industrie s'engage à réaliser au cours de cette année 2012 un prototype pour essai et homologation du moteur calculé.

Annexes

Annexe 1: Section Normalisée

<i>Section nominale (Snom) en mm</i>	<i>Diamètre nu (dnu) en mm</i>	<i>Diamètre avec isolation (diso) en mm</i>
0.00785	0.1	0.125
0.00882	0.106	0.131
0.00985	0.112	0.139
0.01094	0.118	0.145
0.01227	0.125	0.153
0.01368	0.132	0.161
0.01539	0.14	0.170
0.01767	0.15	0.181
0.02011	0.16	0.192
0.02270	0.17	0.203
0.02545	0.18	0.215
0.02835	0.19	0.225
0.03142	0.2	0.236
0.03530	0.217	0.250
0.03941	0.224	0.262
0.04374	0.236	0.276
0.04909	0.25	0.290
0.05515	0.265	0.307
0.06158	0.28	0.322
0.07069	0.30	0.344
0.07793	0.315	0.360
0.08814	0.335	0.381
0.09898	0.355	0.403
0.1104	0.375	0.424
0.1257	0.4	0.450
0.1419	0.425	0.478
0.1590	0.45	0.503
0.1772	0.475	0.531
0.1964	0.5	0.556
0.2124	0.52	0.576
0.2206	0.53	0.587
0.2463	0.56	0.619
0.2642	0.58	0.640
0.2827	0.6	0.661
0.3117	0.63	0.692
0.3318	0.65	0.713
0.3526	0.67	0.735
0.3959	0.71	0.776
0.4418	0.75	0.817
0.4778	0.78	0.848
0.5027	0.8	0.869
0.5281	0.82	0.890
0.5674	0.85	0.921
0.6082	0.88	0.952
0.6362	0.9	0.973
0.7088	0.95	1.0.24
0.7854	1.00	1.076
0.8825	1.06	1.137
0.9852	1.12	1.199
1.095	1.18	1.260
1.227	1.25	1.332
1.368	1.32	1.404

<i>Section nominale (Snom) en mm</i>	<i>Diamètre nu (dnu) en mm</i>	<i>Diamètre avec isolation (diso) en mm</i>
1.539	1.4	1.485
1.767	1.5	1.585
2.011	1.6	1.685
2.27	1.7	1.785
2.54	1.8	1.895
2.83	1.9	1.995
3.14	2	2.095
3.53	2.12	2.22
3.94	2.24	2.34
4.36	2.36	2.46

Annexe 2: représente l'intensité du champ magnétique dans la culasse statorique et rotorique qui correspond à Bc1 et Bc2.

B(H)	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.4	52	53	54	55	56	57	58	59	60	62
0.5	64	65	66	67	69	71	72	74	76	79
0.6	80	81	83	85	87	89	91	93	95	97
0.7	100	102	104	106	108	111	113	115	118	121
0.8	124	126	129	132	135	138	140	143	146	149
0.9	152	155	158	161	164	168	171	174	177	181
1.0	185	188	191	195	199	203	206	209	213	217
1.1	221	225	229	233	237	241	245	249	253	257
1.2	262	267	272	277	283	289	295	301	307	313
1.3	320	327	334	341	349	359	365	373	382	391
1.4	400	410	420	430	440	450	464	478	492	506
1.5	520	542	564	586	608	630	654	678	702	726
1.6	750	788	826	864	902	946	982	1020	1070	1110
1.7	1150	1220	1290	1360	1430	1500	1600	1700	1800	1900
1.8	2000	2160	2320	2490	2650	2810	2960	3110	3270	3420
1.9	3570	3800	4030	4260	4490	4720	4930	5140	5350	5560
2.0	5770	6000	6300	6600	7000	7400	7900	8409	9000	9700

Annexe 3: représente l'intensité du champ magnétique dans la dent statorique et rotorique qui correspond à Bz1 et Bz2

B(H)	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,4	124	127	130	133	136	138	141	144	147	150
0,5	154	157	160	164	167	171	174	177	180	184
0,6	188	191	194	198	201	205	208	212	216	220
0,7	223	226	229	233	236	240	243	247	250	253
0,8	256	259	262	265	268	271	274	277	280	283
0,9	286	290	293	297	301	304	308	312	316	320
1,0	324	329	333	338	342	346	350	355	360	365
1,1	370	375	380	385	391	396	401	406	411	417
1,2	424	430	436	442	448	455	461	467	473	479
1,3	486	495	504	514	524	533	563	574	585	585
1,4	586	595	610	622	634	646	658	670	683	696
1,5	706	722	735	749	763	777	791	805	820	835
1,6	850	878	906	934	962	990	1020	1050	1080	1110
1,7	1150	1180	1220	1250	1290	1330	1360	1400	1440	1480
1,8	1520	1570	1620	1670	1720	1770	1830	1890	1950	2010
1,9	2070	2160	2250	2320	2480	2520	2640	2760	2890	3020
2,0	3150	3320	3500	3500	3860	4040	4260	4480	4700	4920
2,1	5110	5440	5740	5740	6360	6670	7120	7570	8020	8470
2,2	8920	9430	9940	9940	10980	11500	12000	12600	13200	13800
2,3	14400	15100	15800	16500	17200	18000	18800	19600	20500	21400

Annexe 4: représente Kdd1 en fonction de Z2/p.

Q1	10	15	20	25	30	35	40
2	0,99	0,94	-	-	-	-	-
3	0,98	0,93	0,88	0,85	-	-	-
4	-	0,90	0,84	0,80	0,77	-	-
5	-	-	-	0,75	0,72	0,70	-
6	-	-	-	0,70	0,60	0,62	-
8	-	-	-	-	-	0,53	0,51

Annexe 5: représente Q en fonction de 2p

hauteur d'axe [mm]	2P=2	2P=4	2P=6
63	4	2	2
71	4	2	2
80-100	4	3	2
112-132	4	3	3
160	6	4	3
180-225	6	4	4
250	8	5	4
280-355	8	5	4

Annexe 6: représente Krr1 en fonction de Q1

Q1	1,5	2	2,5	3	4	5	6	8
Krr1	-	0,0285	-	0,0141	0,0065	0,0052	-	-

ANNEXE 7:

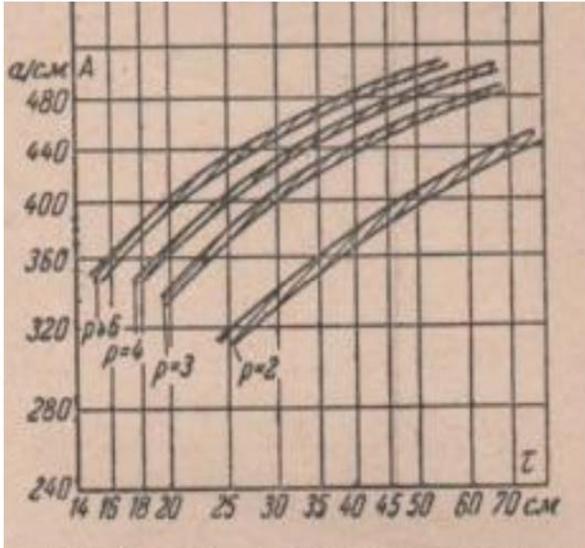


Fig. III-1. La charge linéaire en fonction du nombre de pôles et le pas polaire

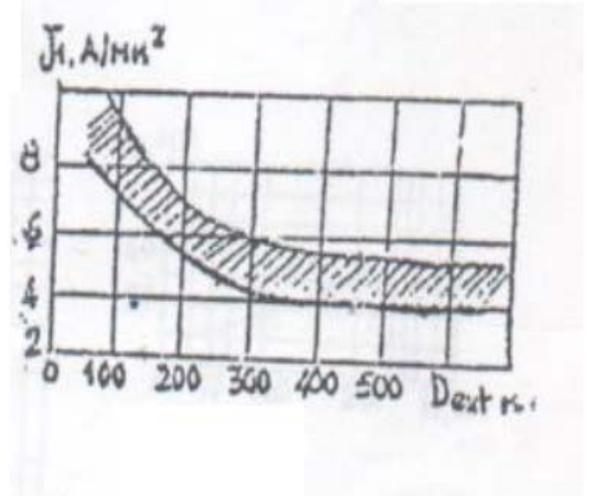


Fig. III-2. La densité de courant en fonction de diamètre extérieur

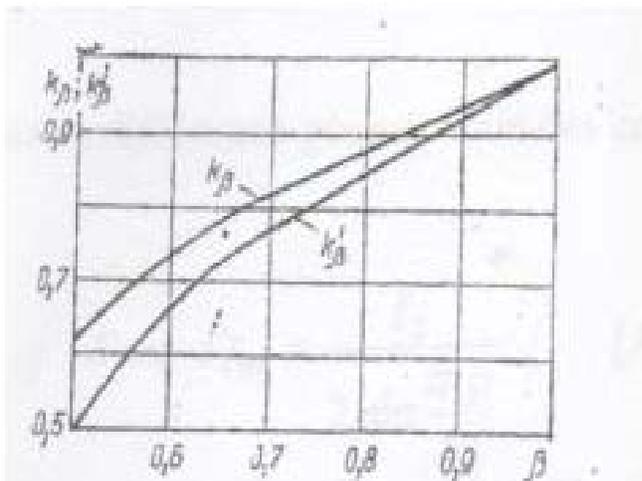


Fig. III-3. K_{B1} , K_{B2} en fonction du rapport de raccourcissement β

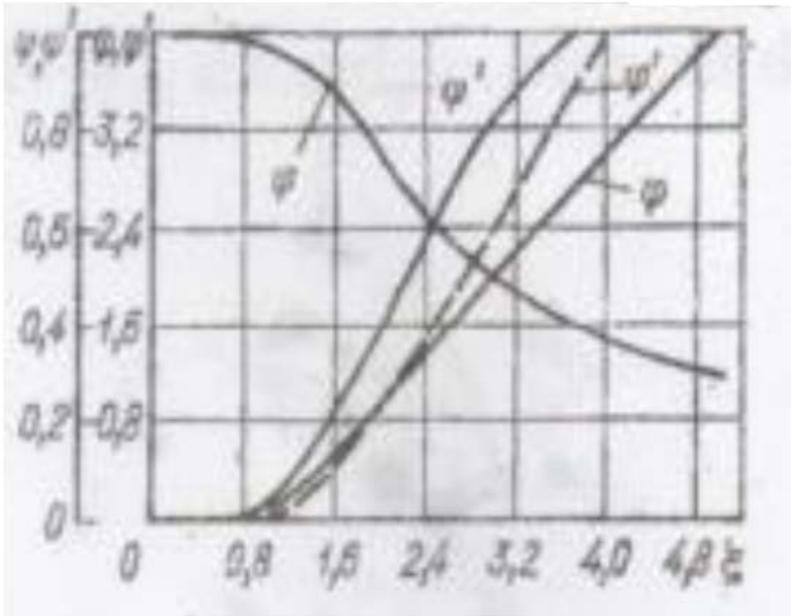


Fig. III-4. Les coefficients φ, φ' en fonction de ξ

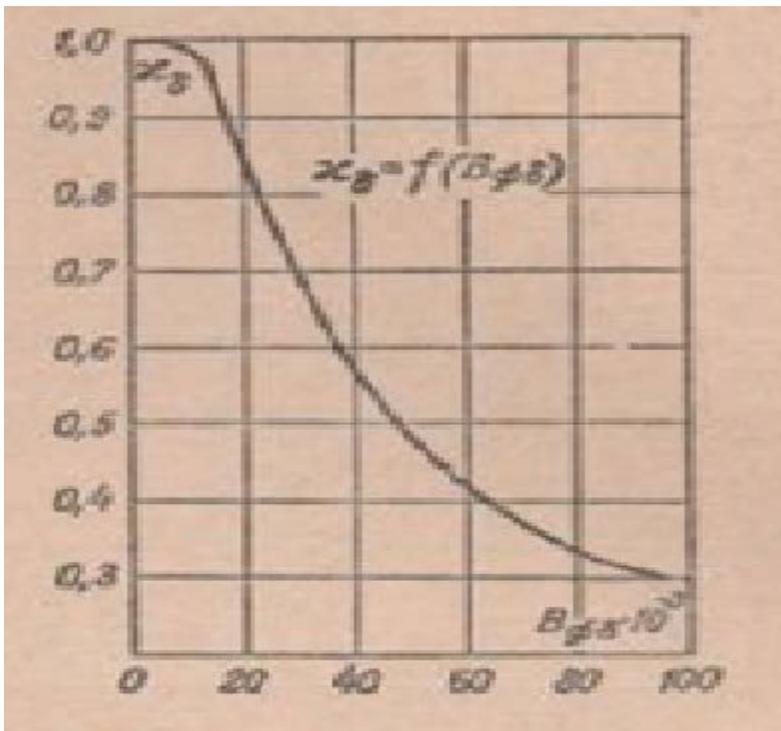
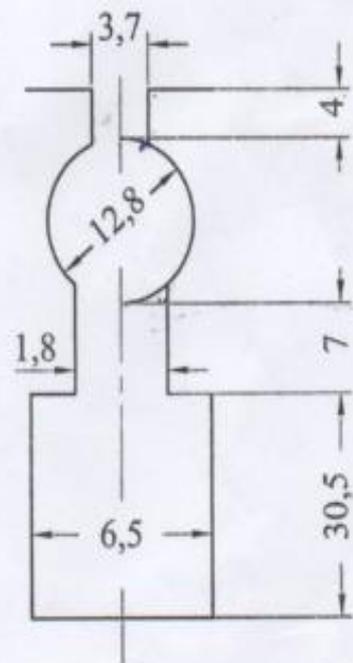
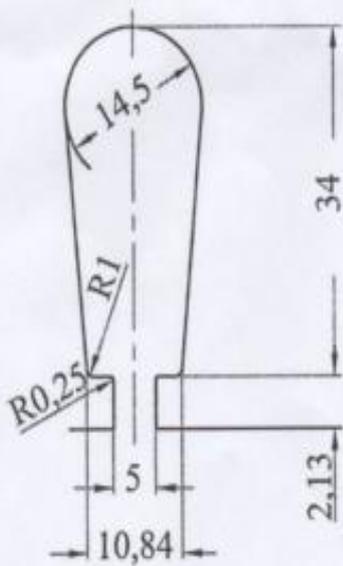
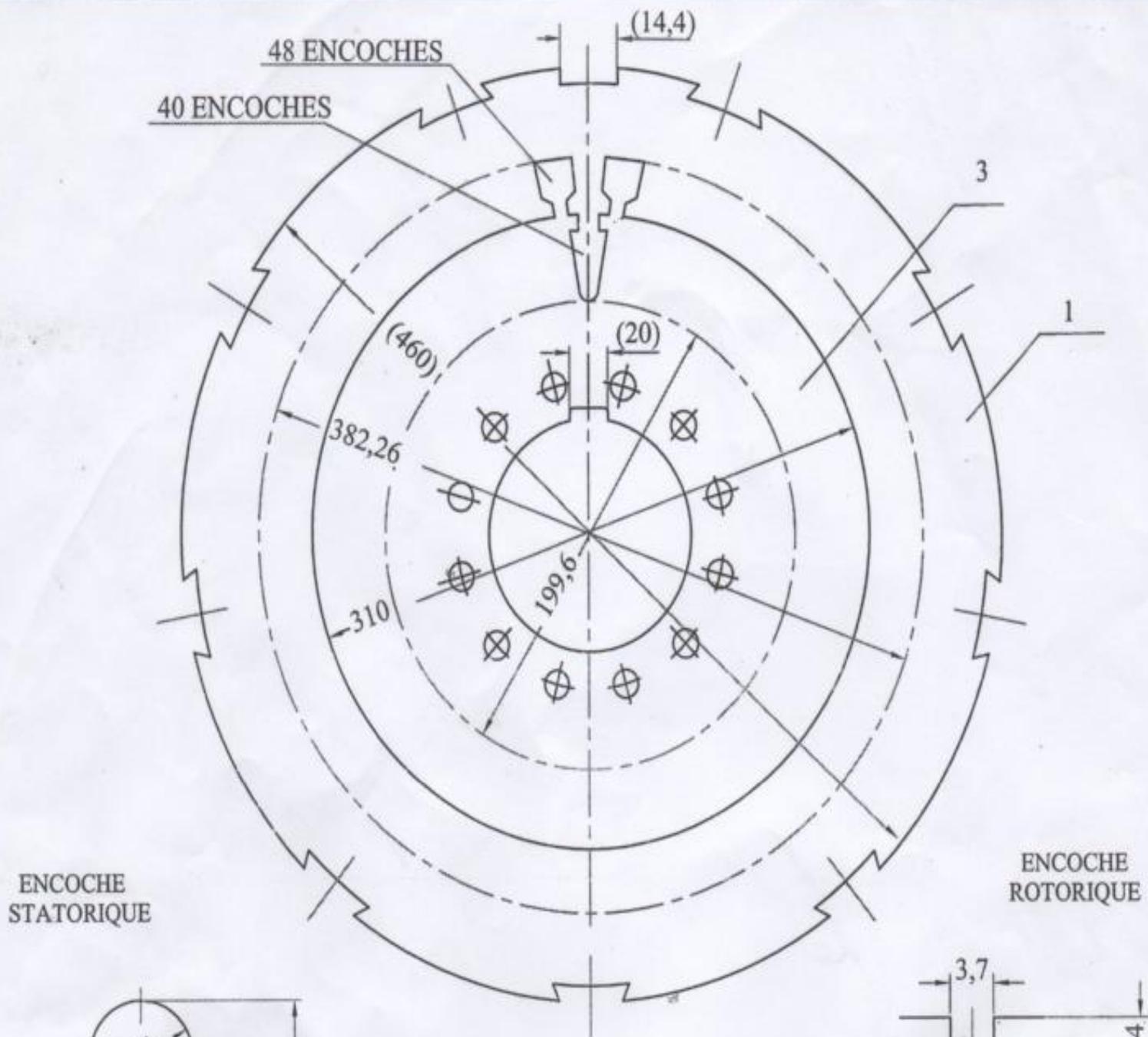


Fig. III-5. La constante χ en fonction de B_ϕ



- 1: Tole statorique
- 3: Tole rotorique

TOL.COTE.LIBRE
NV 351.05

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

[1] GUY Oliver et Real-Paul Bouchard, «Conception des moteurs asynchrones triphasés ». Edition corrigée : Presses internationales polytechniques.

[2] FAVI S.A, « Normes utilisées pour la caractérisation des machines asynchrones ». Laboratoire recherche et développement compte rendu d'essai.

[3] MAYE Pierre, « Moteurs électriques industriels ». Edition Dunod ; Paris 2005, isBN210 048729 9.

[4] REBBAH REDJEM, « Calcul et conception assistée par ordinateur des machines électriques Application aux moteurs asynchrones ». Thèse de magister Université Mentouri Constantine.

[5] DESSOUDE Maxime, « Moteurs asynchrones », L'école Nationale Supérieure d'électricité et de mécanique de NANCY, Technique de l'ingénieur.

[6] R.MERAT, R.MOREAU, L.ALLAY, J-P.DUBOIS, J.AFARGUE, R.LEGOLF, « Manuel de cours et d'exercices corrigés », SEJER/Edition NATHAN ; Paris 2004, BERTI Editions ; Alger 2008.

[7] WILDI Théodore et SYBILLE Gilbert, « Electrotechnique », quatrième édition, Imprimé au Canada.

Dépôt légal : Bibliothèque Nationale, Paris : Juin 2005.

Bibliothèque royale de Belgique, Bruscelles2005/0074/151.

[8] A.Fouillé, « Electrotechnique à l'usage des ingénieurs », Tome 2 machines électriques à courant alternatifs, 10^e édition Dunod. Paris 1980.

[9] A.Ivanov-Smolenski, « Machines électriques », Volume II, édition Mir, Moscou 1983.

[10] M.Kostenko et L.Piotrovski, « Machines électriques », Tome II, 3^{eme} édition Mir, Moscou 1979.

[11] N.M.Katman, « Calcul et construction des machines électriques », édition atomique, Moscou 1984.

[12] P.C.Cergeev, « Projection des machines électriques », édition energie, Moscou 1969.