

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D' INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : **Machines électriques**

Présenté par

Abdellah ZERROUKI

Nabil HOCINI

Thème

Amélioration du rendement d'un moteur asynchrone à double cage 75 kW, 3000 tr/min

Mémoire soutenu publiquement le 29 /09/ 2015 devant le jury composé de :

M Youcef BOUTORA

MCA, UMMTO, Président

M Rabah KHALDI

MACA, UMMTO, Encadreur

M Nadia KICHOU

Ingenieure, E-I AZAZGA, Co-Encadreur

M Azzouz MIOUAT

MACA, UMMTO, Examineur

M A.G KIMOUCHE

MACA, UMMTO, Examineur

Remerciement

*Nous remercions Dieu qui nous a donné force
Et volonté
Pour réaliser ce modeste travail.*

*Nos vifs remerciements vont à notre promoteur
M. Khaldi Rabah qui a accepté de nous
Encadrer et de nous orienter.*

*Nous sommes aussi reconnaissants envers notre co-promotrice
M^{me} Kichou Nadia qui nous a encadrée tout au long
De notre stage.*

*Nos remerciements vont aux membres de jury qui
Nous feront l'honneur de juger notre travail.*

*Tous ceux et celles qui ont contribué de près et de
Loin à la réalisation de ce travail.*

Dédicaces

Pour que ma réussite soit complète, je la partage

Avec toutes les personnes que j'aime.

Je dédie ce modeste travail à :

*Mes très chers parents pour leur amour et pour
le courage et la volonté qu'ils m'ont inculqué ;*

A mes très chers frères ;

A tous mes amis et collègues.

N.HOCINI

Dédicaces

Pour que ma réussite soit complète, je la partage

Avec toutes les personnes que j'aime.

Je dédie ce modeste travail à :

*Mes très chers parents pour leur amour et pour
le courage et la volonté qu'ils m'ont inculqué ;*

A mes très chers frères et sœurs ;

A tous mes amis et collègues.

A.ZERROUKI

Sommaire

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I: Présentation de l'entreprise d'Electro-industries	
Introduction ..	2
I.1.Présentation de l'entreprise.....	2
I.1.1.Historique de l'entreprise :.....	5
I.1.2 Entrée en production :.....	5
I.1.3 Evolution à 1998 :.....	5
I.1.4 Présentation de l'unité Moteur Asynchrone et Générateurs Electriques (UMAGE) :.....	6
I.2.Description du processus de fabrication, Organisation des ateliers et leurs fonctions principales :	6
I.2.1.Découpage :.....	6
I.2.1.1.Fabrication des tôles statoriques et rotoriques :.....	6
I.2.1.2.Fabrication des capots de ventilateurs :.....	7
I.2.2.Moulage sous pression :.....	7
I.2.3.Bobinage :	7
I.2.3.1.Secteur préparation isolation :	8
I.2.3.2.Secteur préparation bobines :.....	8
I.2.3.3.Secteur préparation du stator bobiné :	8
I.2.4. Usinage :	10
I.2.4.1. Fabrication de l'arbre :.....	10
I.2.4.2. Usinage du rotor :.....	11
I.2.4.3. Usinage des différentes pièces : (carcasse, flasque, boîte à borne...)	
.....	11
I.2.5. Montage :	11
I.2.5.1. Secteur prés montage :.....	12

I.2.5.2. Secteur montage final :	12
I.2.6. Contrôle finale :	13
I.3. Normes :	13
Conclusion :	14

Chapitre II: Aperçu théorique sur la machines asynchrones

Introduction :	15
II.1. Historique :	15
II.2. Constitution de la machine asynchrone :	16
II.2.1. Stator :	17
II.2.2. Rotor :	18
II.2.2.1. Rotor à cage d'écureuil.....	18
II.2.2.2. Rotor bobiné :	18
II.2.3. Les organes mécaniques :	19
II.3. Bobinage de la machine asynchrone :	19
II.4. Isolation du bobinage :	20
II.5. Classes d'isolations thermiques :	20
II.6. Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone triphasée :	20
II.7. Classification des moteurs à cage d'écureuil selon les caractéristiques électriques et mécaniques :	21
II.8. Démarrage des moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil :	21
II.8.1. Les deux principes de démarrage d'un moteur asynchrone :	22
II.8.2. Procèdes de démarrage :	22
II.9. Freinage des moteurs asynchrones :	24
II.10. Inversion du sens de rotation :	25
II.11. Amélioration des performances au démarrage à la construction du moteur :	25
II.11.1. Moteur à double cage :	25
Conclusion :	28

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

Introduction :	29
III .1. Calcul électromagnétique :	29
III.1.1 Dimensionnement du moteur asynchrone a double cage :	29
III.1.1.1. dimensionnement du stator :	29
III.1.1.2. dimensionnement de l'enroulement :	31
III.1.1.3. dimensionnement du noyau statorique :	33
III.1.1.4. Dimensionnement du rotor et de la cage :	36
III.1.1.5. Dimensionnement de l'anneau :	38
III.2. Calcul du circuit magnétique :	40
III.2.1 La culasse statorique :	40
III.2.2. les dents statoriques :	41
III.2.3 L'entrefer :	41
III.2.4. la culasse rotorique :	42
III.2.5. les dents du rotor :	42
III.2.6 Force magnétomotrice totale :	43
III.2.7. Coefficient de saturation de la machine :	43
III.2.8. Courant magnétisant :	43
III.2.9 Coefficient de dispersion magnétique du stator :	44
III.2.10. Force électromotrice à vide :	44
Conclusion :	44

Chapitre IV: Résultats de calcul

Introduction :	45
IV.1. Résultats de calcul :	45
IV.2. Bilan des puissances.....	49
IV.3. Comparaison des résultats :	52
IV.3. Interprétation des résultats :	53

Conclusion :.....	53
Conclusion générale	54



Cahier de charge :

Puissance nominale :	$p_n = 75 \text{ KW}$
Tension nominale :	$U_{n1} = 400 \text{ V}$
Couplage :	\triangle
Nombre de paires de pôles :	$P = 1$
Fréquence du réseau d'alimentation :	$f = 50 \text{ Hz}$
Facteur de puissance :	$\cos \Phi_n = 0.88$
Rendement :	$\eta_n = 94.5 \%$
Hauteur d'axe :	$h = 280 \text{ mm}$
Nombre de phase :	$m = 3$
Classe d'isolation :	F
Degré de protection :	IP 44
Système de refroidissement :	IC

Introduction générale

Introduction générale

L'imagination d'un monde sans moteurs électriques s'avère quasiment impossible de nos jours. 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. Notamment leurs robustesses, leurs maintenances réduites et leurs faibles couts[3].

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

Le but de notre travail est d'effectuer un calcul électromagnétique d'un moteur asynchrone à double cage à partir d'un cahier de charge bien défini, afin d'améliorer son rendement, ensuite de comparer nos résultats de calcul à un moteur existant à l'Electro-Industrie.

Nous allons utiliser une méthode de calcul étudié dans le module de construction du Master 2 académique qui repose essentiellement sur des formules développées en associant les connaissances théoriques et les expériences pratiques des constructeurs.

Nous allons subdiviser notre travail en quatre chapitres :

- Le premier est consacré à la présentation de l'entreprise d'Electro-industries d'Azazga 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 aux relations de calcul électromagnétique d'un moteur asynchrone à double cages.
- Le quatrième est réservé aux résultats de calcul, et à la comparaison de ces derniers, à ceux du moteur standard.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I
Présentation de
l'entreprise
Électro-Industries
D'Azazga

Introduction générale

L'imagination d'un monde sans moteurs électriques s'avère quasiment impossible de nos jours. 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. Notamment leurs robustesses, leurs maintenances réduites et leurs faibles couts[3].

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

Le but de notre travail est d'effectuer un calcul électromagnétique d'un moteur asynchrone à double cage à partir d'un cahier de charge bien défini, afin d'améliorer son rendement, ensuite de comparer nos résultats de calcul à un moteur existant à l'Electro-Industrie.

Nous allons utiliser une méthode de calcul étudié dans le module de construction du Master 2 académique qui repose essentiellement sur des formules développées en associant les connaissances théoriques et les expériences pratiques des constructeurs.

Nous allons subdiviser notre travail en quatre chapitres :

- Le premier est consacré à la présentation de l'entreprise d'Electro-industries d'Azazga 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 aux relations de calcul électromagnétique d'un moteur asynchrone à double cages.
- Le quatrième est réservé aux résultats de calcul, et à la comparaison de ces derniers, à ceux du moteur standard.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale.

Introduction :

Dans ce chapitre nous allons présenter l'entreprise d'Electro-Industries de Azazga ou nous avons accomplis un stage sur le processus de fabrication d'un moteur asynchrone à double cage d'écureuil et nous avons été suivis par une ingénieure d'état en électrotechnique pendant toute la durée du stage.

En effet, nous avons suivis les différentes étapes de fabrication du moteur asynchrone à double cage d'écureuil 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.1.Présentation de l'entreprise :

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

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

La production actuelle d'Electro-Industries est écoulee sur la marche 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 matière de qualité, l'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.

CHAPITRE I Présentation de l'entreprise d'Electro-industries D'Azazga

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

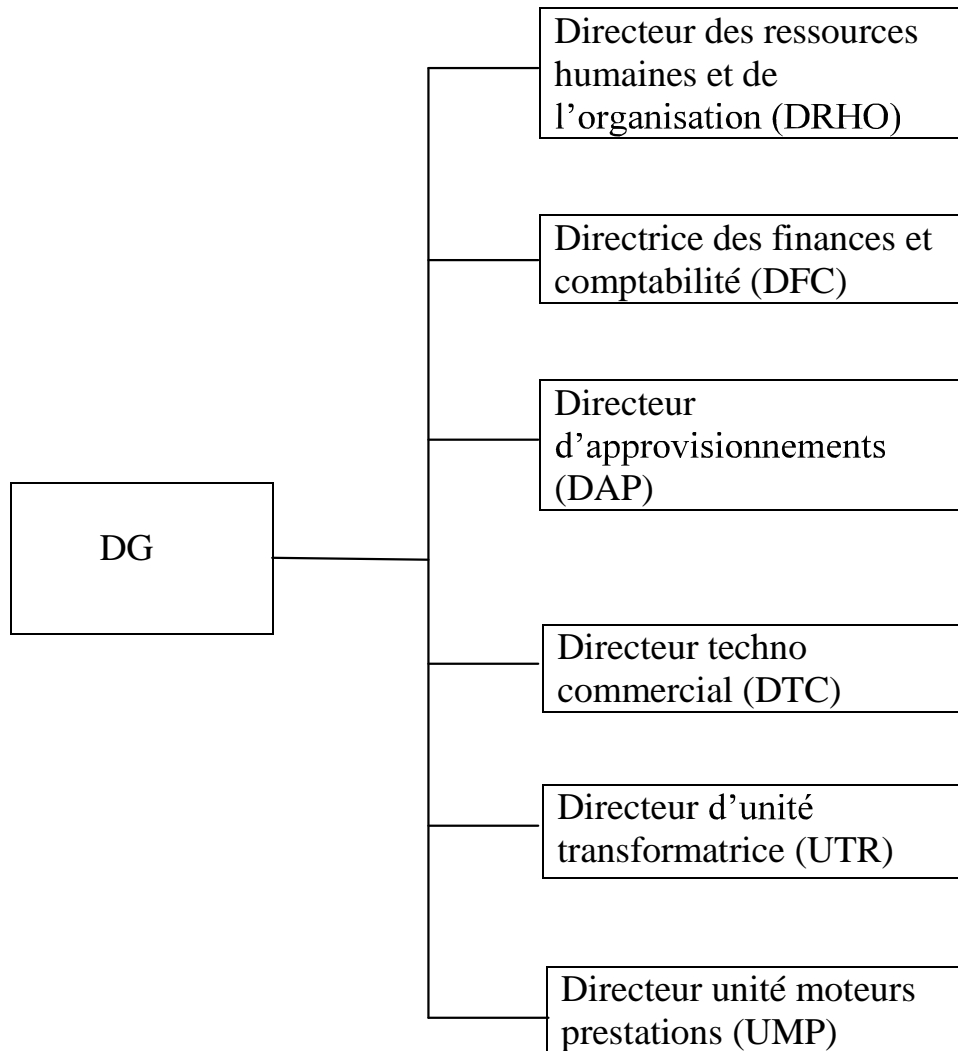
L'entreprise a procédé à la mise en place de son système de qualité en 2002 et a été certifiée par QMI CANADA le 24.07.2004, ISO 9001 VERSION 2000.

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

Les produits d'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 leurs qualité a été approuvé par la clientèle locale (SONELGAZ, ENMTP, ENIEM, KAHRIF) et étrangère (Russie, Sénégal, 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 (MEI) :



I.1.1. 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 national des industries Electrotechniques), en un certain nombre d'entreprises publiques économiques, société par action (EPE/SPA), parmi les quelles 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 des entreprises Algériennes (ECOTEC, COSIDER, 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.1.2 Entrée en production :

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

I.1.3 Evolution à 1998 :

- Extension des capacités de production de transformateurs de 1500 à 5000 unités/an.
- Développement de la gamme de moteurs monophasés.
- Développements de l'activité de groupe électrogène.
- Développement du moteur destiné a la climatisation.
- Extension verticale de la gamme de transformateurs (2000 KVA).

I.1.4 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 a différentes puissances et a différentes hauteurs d'axes et les générateurs.

I.2.Description du processus de fabrication, Organisation des ateliers et leurs fonctions principales :

L'allumage se compose de différents ateliers.

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

I.2.1.Découpage :

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

- Découpage et encochage des tôles statoriques et rotoriques puis leurs emballages.
- Repoussage des agrafes et fabrication des capots et roues de ventilateurs.

I.2.1.1.Fabrication des tôles statoriques et rotoriques :

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

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

a. Procède de découpage :

Le procédé le plus répandu dans cette 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'extérieure 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 aux mêmes résultats.

I.2.1.2.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.2.2.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), boites à bornes, couvercles de boites à bornes.

I.2.3.Bobinage :

L'atelier de bobinage se devise en trois secteurs :

- Secteur préparation isolation.
- Secteur préparation bobines.
- Secteur bobinage.

I.2.3.1.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.2.3.2.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 spires par faisceaux.

I.2.3.3.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 70mm à 130mm.
- Manuellement pour les moteurs à hauteur d'axe 132mm à 400mm.

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 entres les têtes :

Les bobines de chaque phases 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 pointes de connexion sont brasées 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 boite à borne.

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 une forme et les dimensions définitives des têtes de bobines coté AS et BS.

e- contrôle :

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

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

f- Imprégnation :

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

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

I.2.4. Usinage :

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

I.2.4.1. 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 l'état brut passe au centre d'usinage pour être centré, cette opération consiste à percer deux trous qui servent de référence pour pouvoir tourner notre rotor dans un axe bien précis.

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

I.2.4.2. Usinage du rotor :

Les opérations effectuées sur le rotor sont :

- a- Tournage du paquet :** Cette opération se fait avec un tour parallèle pour avoir 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.2.4.3. 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 les quelles 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- Boîtes à bornes :

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

I.2.5. Montage :

On recense deux secteurs essentiels dans cet atelier.

I.2.5.1. 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.2.5.2. Secteur montage final :

Dans ce secteur sont effectuées les opérations suivantes :

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

I.2.6. Contrôle finale :

Une fois ce 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 (coté 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.3. Normes :

Les moteurs sont conformes aux normes suivantes :

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

CEI 34-2 : méthode pour 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 : Caractéristiques de démarrage des moteurs à induction à cage, à une seule vitesse, pour des tensions d'alimentations inférieures ou égales à 660 V ; 50Hz.

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

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

VDE0530 : Règlements relatifs aux machines électriques tournantes.

Conclusion :

Ce chapitre résume l'entreprise d'Electro-Industrie de Azazga, ou nous avons fait notre stage, à savoir : sa structure, son fonctionnement, son historique, ainsi les étapes de fabrications du moteur asynchrone.

Chapitre II

Aperçu théorique sur les machines asynchrones

Introduction :

La machine asynchrone a longtemps été fortement concurrencée par la machine synchrone dans les domaines de forte puissance, jusqu'à l'avènement de l'électronique de puissance. La plus grande utilisation de cette machine est due à la standardisation, à sa grande robustesse et à son bas coût d'achat et d'entretien, et à sa simplicité de construction et d'utilisation. En fait, elle est omniprésente dans de nombreuses applications et en particulier dans les secteurs de pointe comme : l'aéronautique, le nucléaire, les industries chimiques, dans le transport (métro, trains, propulsion de véhicule et des navires, les ascenseurs), dans l'industrie (machines-outils, treuils), dans l'électroménager. Elle était à l'origine uniquement utilisée en moteur mais, toujours grâce à l'électronique de puissance, elle est de plus en plus souvent utilisée en génératrice. C'est par exemple le cas des éoliennes. Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas forcément proportionnelles à la fréquence des courants qui les traversent[2].

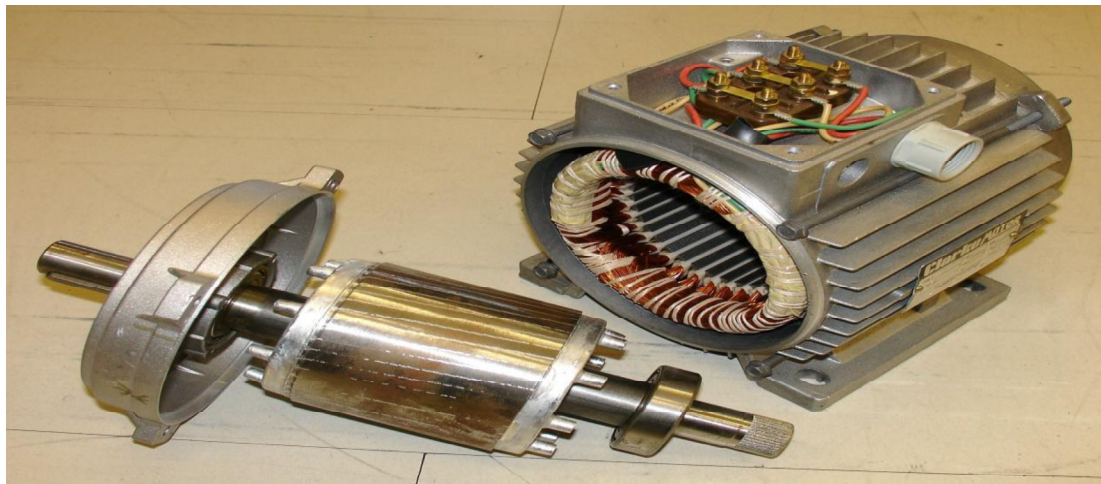


Figure II.1 : Machine asynchrone à cage.

II.1. Historique :

La paternité de la machine asynchrone est contre versée. Elle pourrait être attribuée à trois inventeurs: en 1887, Nicola Tesla dépose un brevet sur la machine asynchrone, puis en mai de l'année suivante cinq autres brevets. Pendant la même période Galion Ferrais publie des traités sur les machines

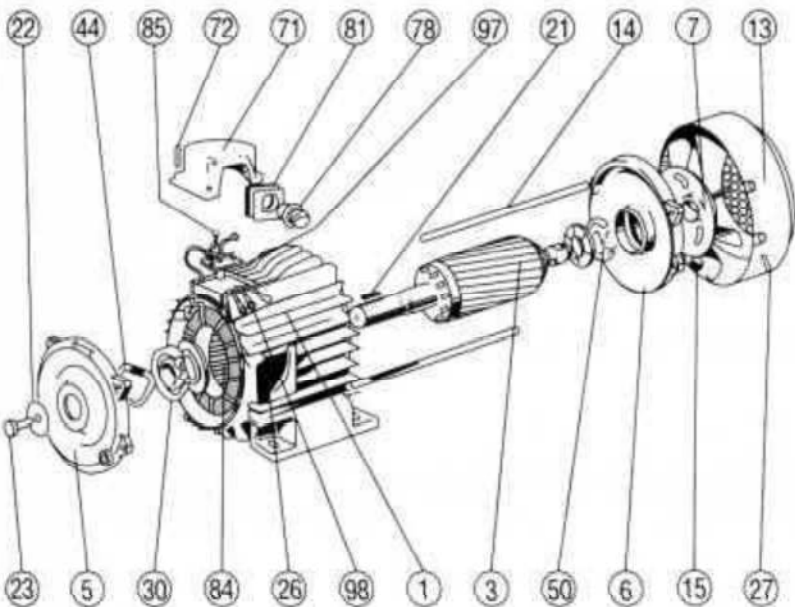
tournantes, avec une expérimentation en 1885, puis une théorie sur le moteur asynchrone en avril 1888. En 1889 Michel Ossipowitsch Dolivo-Dobrowolsk, électricien allemand d'origine russe, invente le premier moteur asynchrone à courant triphasé qui sera construit industriellement à partir de 1891 [4].

La machine asynchrone est alimentée par un réseau à fréquence fixe, il est difficile de faire varier sa vitesse.

En outre, au démarrage, le couple est faible et le courant appelé est très relevé. Deux solutions historiques ont résolu ce problème: le rotor à encoches profondes et le rotor à double cage, mis au point par Paul Boucherot en 1912.

II.2. Constitution de la machine asynchrone :

elle comprend :

	n°	Désignation
	1	Carter et stator bobiné
	3	Rotor
	5	Flasque côté accouplement
	6	Flasque côté ventilation
	7	Ventilateur
	13	Capot de ventilateur
	14	Tige d'assemblage
	15	Erou de tige d'assemblage
	21	Clavette de bout d'arbre
	22	Rondelle de bout d'arbre
	23	Vis de serrage rondelle
	26	Plaque signalétique

	27	Vis fixation capot
	30	Roulement côté accouplement
	44	Rondelle élastique
	50	Roulement côté ventilateur
	71	Boîte à bornes
	72	Vis fixation boîte à bornes
	78	Presse-étoupe
	81	Plaque support presse-étoupe
	84	Planchette à bornes
	85	Vis de fixation planchette à bornes
	97	Vis bornes de masse
	98	Barrettes de connexion

Figure II.2 : Constitution du moteur asynchrone.

II.2.1.Stator :

Il est composé de trois enroulements alimenté par un système de tensions triphasés, leurs axes magnétiques sont déphasés l'un par rapport à l'autre de 120 degrés.



Figure II.3 : Stator d'une machine asynchrone triphasé.



Figure II.4 : Stator feuilleté sans le bobinage.

II.2.2.Rotor :

Constitué de conducteurs mis en circuit fermé. On distingue deux types de rotor :

II.2.2.1.Rotor à cage d'écureuil :

Il possède des barres conductrices le plus souvent en aluminium, logés dans un empilement de tôles. Les extrémités sont liées par deux couronnes conductrices[5].

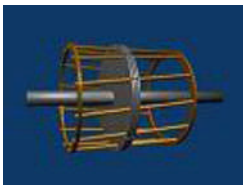


Figure II.5 : Structure du rotor



Figure II.6 : rotor à cage d'écureuil.

à cage d'écureuil.

II.2.2.2.Rotor bobiné :

Les tôles du rotor sont munies d'encoches où sont placés des conducteurs formant un bobinage triphasé de structure semblable à celles des enroulements statoriques, pour cela trois bagues et trois balais sont prévus afin d'accéder aux enroulements rotoriques pour y insérer le rhéostat du démarrage.

La machine asynchrone triphasée peut être représentée par son symbole normalisé général qui précise si elle fonctionne en moteur ou en générateur. Le symbole peut apporter des précisions sur la nature de la machine, mais les symboles sont également valables pour les générateurs en remplaçant le M par le G. le symbole peut indiquer s'il s'agit d'un moteur à cage ou d'un moteur à rotor bobiné[7].

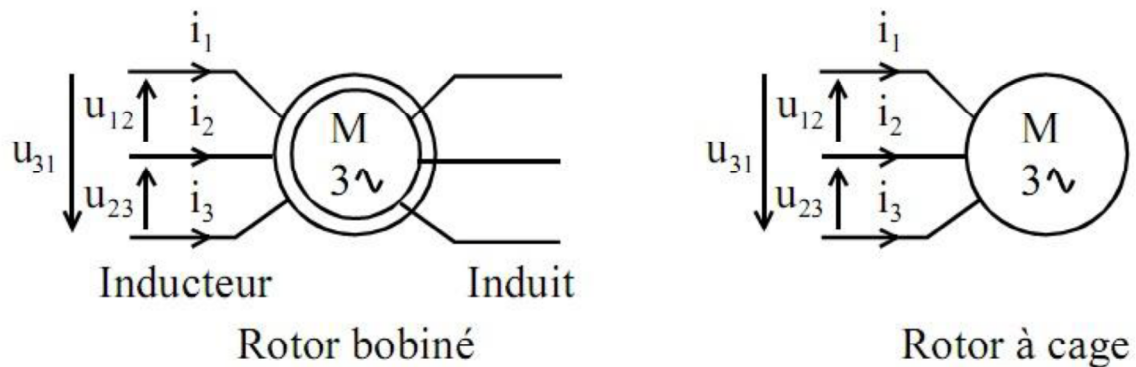


Figure II.8 : Symbole normalisé de la machine asynchrone.

II.2.3. Les organes mécaniques :

Le moteur comporte une carcasse qui reçoit de chaque côté un flasque sur laquelle 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 :

Pour effectuer le bobinage d'une machine asynchrone peut se faire 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 selon la disposition[4].

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.

II.5. Classes d'isolations thermiques :

La tâche la plus difficile et la plus importante est d'assurer la bonne tenue d'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 d'une machine asynchrone triphasée :

Lors de l'alimentation du stator par un réseau de tensions triphasées, les courants statoriques créent un champ magnétique tournant de vitesse n_s , le rotor balayé par ce champ il en résulte l'apparition de forces électromotrices (FEM) induites dans les conducteurs. Les circuits rotoriques étant fermés des courants rotoriques induits prennent naissance. Les conducteurs rotoriques ou barres qui portent un courant et situés dans un champ magnétique, sont soumis à des forces électromagnétiques qui tendent à entraîner le rotor dans le sens de rotation de champ tournant statorique. Le rotor tourne à une vitesse n inférieure à la vitesse de rotation n_s , ils ne peuvent pas tourner à la même vitesse autrement la cage ne sera plus balayé par le champ magnétique tournant et les courants rotoriques induit ainsi que les forces électromagnétiques et le couple moteur disparaîtra et c'est de là que vient l'appellation <asynchrone>[7].

Comme dans toutes les machines électriques tournantes, la production d'un couple est la conséquence de l'interaction entre deux forces magnétomotrices (en négligeant les couples réductants), l'une produite par le stator et l'autre par le

rotor. Dans la machine à courant continue ou synchrone ces deux forces magnétomotrices peuvent être indépendantes et réglables sans trop d'effort mais la machine asynchrones à cage d'écureuil possède une force magnétomotrice au rotor qui dépend de celle au stator, et d'une grandeur qui exprime la vitesse relative du rotor par rapport a la vitesse du champ tournant, le glissement $\langle g \rangle$:

Le glissement : il exprime l'écart entre la vitesse de synchronisme et la vitesse de rotation de l'arbre du moteur, son symbole est g .

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

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

- Classe A : Moteurs à couple normal et à courant de démarrage normal.
- Classe B : Moteur à couple normal et à faible courant de démarrage.
- Classe C : Moteur à fort couple et à faible courant de démarrage.
- Classe D : Moteurs à fort glissement.
- Classe F : Moteur 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 stator.

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 supérieure au couple résistant sur l'arbre crée 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 usagés branchés sur la même dérivation[1].

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 du 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. Procèdes 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 procèdes particuliers de démarrage.

- **Démarrage étoile – triangle :**

Il nécessite la sortie de 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 branche 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 divise par 3. Le couple étant proportionnel au carré de la tension, il est également réduit dans un rapport 3. C'est un procède 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'coût voisin, d'un volume moindre et d'un rendement bien meilleur.

- **Insertion d'inductances statoriques :**

Le procédé est similaires au précédent, mais les résistances sont remplacées par les 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 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 la Valeur maximale désirée. Cette solution est également abandonnée au profit de solutions électroniques d'un coût inférieure[6].

- **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 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 la variation de vitesse, l'onduleur de tension peut permettre de faire un démarrage souple avec limitation du courant dans les situations où aucune baisse de couple n'est possible.

- **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 asynchrones :

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 hyper synchrone :**

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'hyper synchrone, 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 $(-\Omega_s)$. Ce qui conduit à avoir 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 dot 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 alimenté 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 en 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 à une grande perméance pour les flux de dispersion et la cage supérieure à une perméance relativement petite par suite de quoi la réactance de dispersion de la cage inférieure est plus élevée 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.

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 et celle du réseau et la cage interne est très faiblement résistante, dotée au contraire d'une forte réactance d'induction $L\omega$, joue le rôle d'écran électrodynamique, de telle sorte que le flux qui la traverse

est un 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 du 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 :

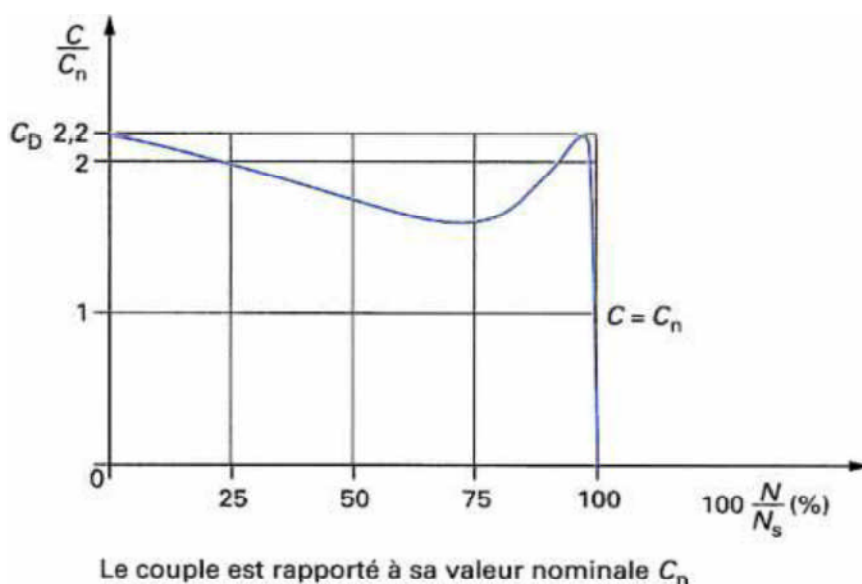
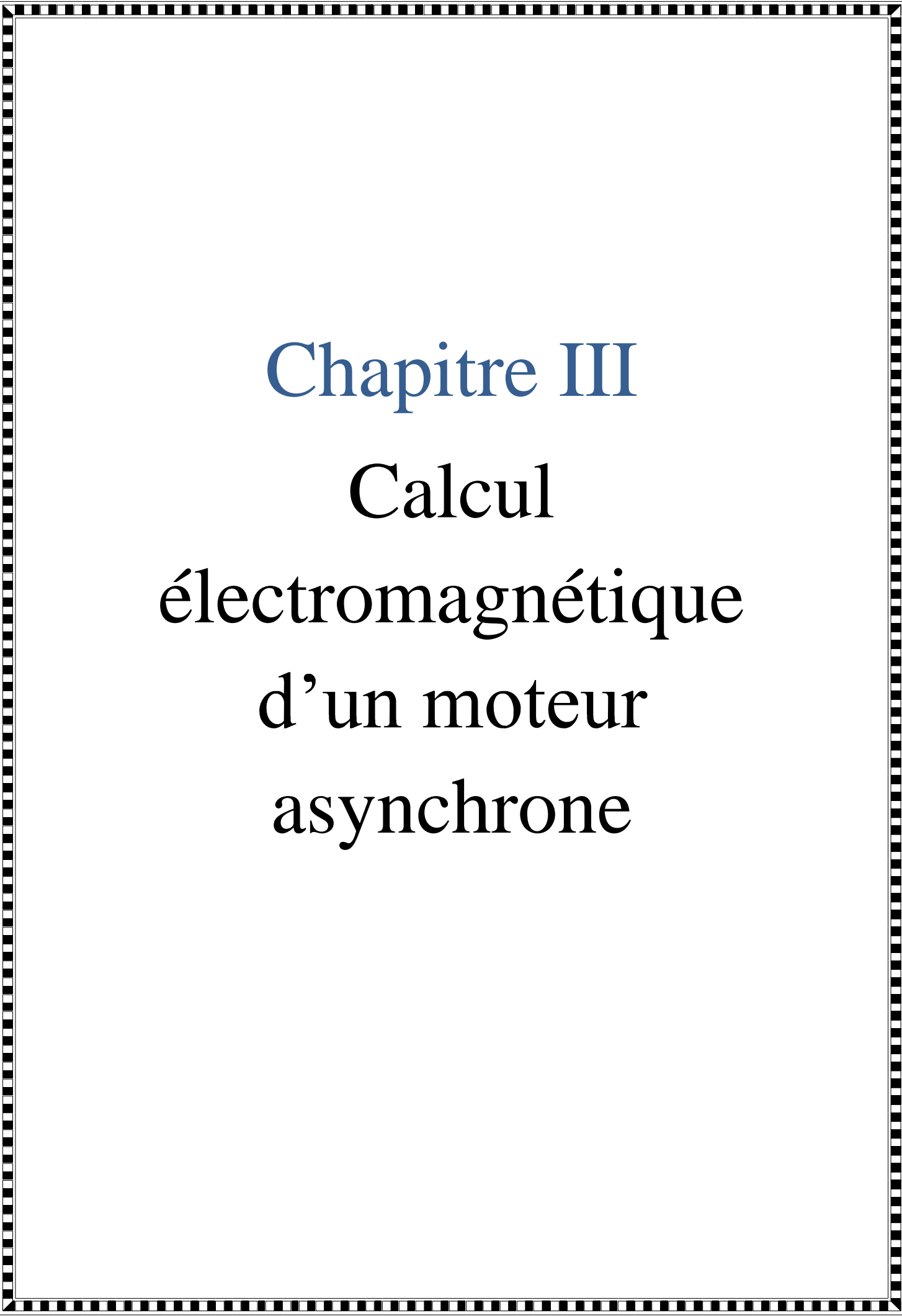


Figure II.9 : Caractéristique du moteur à double cage.

Conclusion :

Ce chapitre résume quelques généralités sur le moteur asynchrone, à savoir : sa constitution, son principe de fonctionnement, ses différents démarrages ainsi sa classification selon les caractéristiques électriques et mécaniques.

La maîtrise de ces notions de base nous aiderons pour faire un calcul sur l'enroulement d'un moteur à cage et ce dernier fera l'objet du prochain chapitre.



Chapitre III

Calcul électromagnétique d'un moteur asynchrone

Introduction :

Les principaux paramètres du dimensionnement sont géométriques (les différents diamètres, longueurs utiles, dimensions des encoches), électriques (densité du courant et charge linéique...), magnétiques (induction dans l'entrefer et dans les différents tronçons de la machine) et mécaniques (entrefer et vitesse de rotation). Chacun de ces paramètres a une importance lors du dimensionnement. Cependant, du fait de leurs dépendances, nous sommes contraints de faire des compromis suivant les exigences prioritaires de fonctionnement et du cahier des charges.

III .1. Calcul électromagnétique :

III.1.1 Dimensionnement du moteur asynchrone a double cage :

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

III.1.1.1. dimensionnement du stator :

a) Puissance électromagnétique :

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

$$P_e = K_e \cdot \frac{P_n \cdot 10^3}{\eta_n \cdot \cos\varphi_n} \quad [\text{KVA}] \quad (1)$$

Avec : P_n - La puissance nominale de la machine [kW].

$\cos\varphi_n$ - Facteur de puissance nominale de la machine.

η_n - Le rendement nominal de la machine.

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

$$K_e = 0,985 - 5 \cdot P \cdot 10^{-3} \quad (2)$$

Avec : p (Nombre de paire de pôle).

b) Longueur virtuelle de l'induit :

La longueur virtuelle de la machine L_i est déterminée en fonction du facteur de géométrie λ . Tel que $L_i = \lambda \cdot L_i$;

Comme elle est donnée par la formule suivante :

$$L_i = \frac{6,1 \cdot 10^{12} \cdot p_e}{\alpha_i \cdot K_f \cdot A_1 \cdot K_{enr1} \cdot B_\delta \cdot n \cdot D_1^2} \quad [\text{mm}] \quad (3)$$

Avec : α_i – Coefficient de recouvrement polaire.

K_f – Facteur de la courbe d'induction.

A_1 – Charge linéaire.

N – Vitesse de rotation de synchronismes.

D_1 – Diamètre intérieure du stator.

B_δ – Induction dans l'entrefer.

c) Coefficient de recouvrement polaire virtuel :

$$\alpha_i = \frac{2}{\pi} \quad (4)$$

d) Facteur de la forme de la courbe de l'induction magnétique dans l'entre fer :

$$K_f = 1,11$$

e) Facteur de bobinage de l'enroulement statorique :

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

$$K_{enr1} = K_{d1} \cdot K_{r1} \quad (5)$$

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

$$K_{d1} = \frac{\sin(\alpha/2)}{q_1 \cdot \sin(\alpha/2q_1)} \quad (6)$$

f) Coefficient de raccourcissement polaire :

$$K_{r1} = \sin\left(\frac{\beta\pi}{2}\right) \quad (7)$$

Avec : $\beta = y/\tau p$: rapport de raccourcissement.

g) Diamètre intérieure du stator D_1 :

$$D_1 = K_d \cdot D_{ext1} \quad (8)$$

III.1.1.2. dimensionnement de l'enroulement :

a) Courant nominale dans une phase statorique :

$$I_{1n} = \frac{P_n \cdot 10^3}{m_1 \cdot U_{n1} \cdot \eta_n \cdot \cos\varphi_n} \quad [\text{A}] \quad (9)$$

Avec : P_n – C'est la puissance nominale [W]

U_n – C'est la tension simple [V]

η_n – Rendement nominal

$\cos\varphi_n$ – Facteur de puissance nominal

m- Nombre de phases statoriques.

b) Nombre de conducteurs effectifs dans l'encoche :

Le nombre de conducteurs effectifs dans l'encoche est donné par la formule suivante

$$U_{enc1} = \frac{a_1 \cdot t_1 \cdot A_1 \cdot 10^{-3}}{I_{1n}} \quad [\text{conducteurs/encoches}] \quad (10)$$

Avec : a_1 – Nombre de voies parallèles ($a_1=2$).

A_1 – Charge linéaire, en [A /m].

Le pas dentaire est défini comme étant la distance séparant deux axes d'encoches voisines, il est donné par la relation suivante :

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D_1}{Z_1} \quad [\text{mm}] \quad (11)$$

Avec D_1 – Le diamètre intérieur du stator en [mm].

Z_1 – Nombre d'encoches statorique.

c) Nombre de spire par phase connecte en série:

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

$$W_1 = \frac{U_{enc1} \cdot Z_1}{2a_1 \cdot m_1} \quad (12)$$

d) Section effective d'un conducteur :

La section effective du conducteur de la phase statorique est calculée par l'expression suivante :

$$S_{eff1} = \frac{I_{1n}}{a_1 \cdot J_1} \quad [\text{mm}^2] \quad (13)$$

Avec : J_1 – Densité du courant dans l'enroulement statorique. Elle est donnée en fonction de diamètre extérieur, [A/mm²]

Si la section effective calculée est supérieur à 1,8 mm² on doit diviser celle-ci en sections élémentaires et comme la section des conducteurs étant normalisée on choisira la section standard la plus proche de celle calculée.

$$S_{elt1} = \frac{S_{eff1}}{N_{elt1}} \quad [\text{mm}^2] \quad (14)$$

Où : N_{elt1} – Est défini comme étant un nombre des conducteurs élémentaires.

III.1.1.3. dimensionnement du noyau statorique :

a) Largeur de la dent :

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

$$b_{z1} = \frac{t_1 \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot B_{z1}} \quad [\text{mm}] \quad (15)$$

Avec : t_1 – Pas dentaire statorique [mm]

K_{fer} – Coefficient de forme, tel que :

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

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

B_{z1} – Induction dans la dent statorique en [T].

b) Hauteur du dos du stator :

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

$$h_{c1} = \frac{0,5 \cdot \alpha_i \cdot \tau_p \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot B_{c1}} \quad [\text{mm}] \quad (16)$$

Avec : B_{c1} – L'induction magnétique dans le dos du stator.

K_{fer} – Coefficient de forme, telle que :

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

$K_{fer} = 0,97$ Pour l'isolant en vernis

c) Hauteur de la dent :

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

$$h_{z1} = 0.5 \cdot (D_{ext} - D_1) - h_{c1} \quad [\text{mm}] \quad (17)$$

d) Largeur minimale de l'encoche :

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

$$b_2 = \frac{\pi(D_1 + 0,2 \cdot h_{z1})}{z_1} - b_{z1} \quad [\text{mm}] \quad (18)$$

e) Largeur maximale de l'encoche :

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

$$b_1 = \frac{\pi(D_1 + 2 \cdot h_{z1})}{z_1} - b_{z1} \quad [\text{mm}] \quad (19)$$

f) Hauteur de l'encoche :

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

$$h_{enc1} = h_{z1} - (h_{k1} + h_{f1}) \quad [\text{mm}] \quad (20)$$

Avec : h_{f1} —La hauteur de la fente d'encoche statorique

$$h_{f1} = 1 \text{ mm}$$

h_{k1} — La largeur de la clavette

$$h_{k1} = 1 \text{ mm}$$

b_{f1} — La largeur de la fente d'encoche statorique.

g) Section occupée par les conducteurs :

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

$$S_{enc1} = 0,5 \cdot (b_1 + b_2) \cdot h_{enc1} - S_{iso} \quad [\text{mm}^2] \quad (30)$$

h) La section occupée par l'isolation :

$$S_{iso} = e_1 \cdot (b_1 + b_2 + 2 \cdot h_{enc1}) + e_2 \cdot \frac{(b_1 + b_2)}{2} + e_3 \cdot h_1 \quad [\text{mm}^2] \quad (31)$$

i) Coefficient de remplissage :

Le coefficient d remplissage calculé avec cette approche doit appartenir à l'intervalle : $[0,7 \div 0,75]$.

$$K_{rem} = \frac{U_{enc1} * N_{el} * (d_{is})^2}{S_{enc1}} \quad (32)$$

Avec : d_{iso} –diamètre des conducteurs avec l'isolation en [mm], sont donnés par le tableau de section normalisée (annexe2).

j) Vérification A_1, B_δ et ϕ :

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

La différence entre les valeurs calculée et la valeur préliminaire ne doit pas dépasse 10%.

1- Charge linaire :

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

$$A_1 = \frac{U_{enc1} * I_{1n} * Z_1}{\pi * D_1 * a_1 * 10^{-3}} \quad [A/m] \quad (33)$$

2- l'induction magnétique dans l'entrefer :

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

$$B_\delta = \frac{\phi}{\alpha_i * l_i * \tau * 10^{-6}} \quad [T] \quad (34)$$

3- Flux sous un pôle :

$$\Phi = \frac{K_e \cdot U}{4 \cdot K_f \cdot f_1 \cdot K_{en1} \cdot \omega_1} \quad [\text{Weber}] \quad (35)$$

III.1.1.4. Dimensionnement du rotor et de la cage :

a) Choix de l'entrefer :

Dans les moteurs asynchrones l'entrefer doit être aussi petite que possible afin d'avoir un bon facteur de puissance, un courant magnétique minimale et bon rendement. Comme il doit être grand que possible afin de réduire les pertes supplémentaires et d'augmenter la fiabilité de fonctionnement des moteurs

b) Diamètre extérieur du rotor :

$$D_2 = D_1 - 2 * \delta \quad [\text{mm}] \quad (36)$$

Avec : δ l'épaisseur de l'entrefer

c) Pas dentaire :

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

d) Courant dans la barre :

$$I_b = 1.11 * \frac{6 * I_{1n} * W_1 * K_{en1} * \cos \varphi}{Z_2} \quad [\text{A}] \quad (38)$$

Avec : I_{1n} - Courant nominal statorique.

W_1 - Nombres de spires statoriques.

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

$\cos(\varphi)$ - Facteur de puissance.

e) Hauteur de la culasse rotorique :

La hauteur de la culasse est donnée par la relation suivante :

$$h_{c2} = 0.5 \cdot \frac{\alpha_i \cdot \tau_p \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot B_{c2}} \quad [\text{mm}] \quad (39)$$

Avec : B_{c2} - induction dans la culasse rotorique.

f) Hauteur de la dent :

$$h_{z2} = 0.5 \cdot (D_2 - D_{2int}) - h_{c2} \quad [\text{mm}] \quad (40)$$

Avec : D_{2int} - Diamètre intérieur du rotor (diamètre de l'arbre du moteur), pour un calcul préliminaire on peut utiliser l'expression suivante :

$$D_{2int} = (0.3 \div 0.35) \cdot D_2$$

h_{c2} - Hauteur de la culasse rotorique.

g) Largeur de la dent :

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

$$b_{z2} = \frac{t_2 \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot b_{z2max}} \quad [\text{mm}] \quad (41)$$

Avec :

$$t_2 = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} \quad [\text{mm}] \quad (42)$$

h) Diamètre supérieure de l'encoche :

$$d_{en21} = \frac{[\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h_{f2}) - Z_2 \cdot b_{z2}]}{(Z_2 + \pi)} \quad [\text{mm}] \quad (43)$$

Avec : h_{f2} - Hauteur de la fente de l'encoche rotorique.

i) Diamètre inférieure de l'encoche :

$$d_{en22} = \frac{[\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h_{z2}) - Z_2 \cdot b_{z2}]}{(Z_2 - \pi)} \quad [\text{mm}] \quad (43)$$

j) Hauteur de l'encoche :

La hauteur de l'encoche est donnée comme suit :

$$h_{enc2} = h_2 + 0,5 \cdot (d_{enc21} + d_{enc22}) \quad [\text{mm}] \quad (44)$$

Avec : h_2 - distance entre les centres des diamètres de l'encoche du rotor est :

$$h_2 = h_{z2} - h_{f2} - 0,5 \cdot (d_{enc21} + d_{enc22}) \quad [\text{mm}] \quad (45)$$

k) Section de la barre (encoche) :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$s_b = 0,125 \cdot (d_{enc21}^2 + d_{enc22}^2) \cdot \pi + 0,5 \cdot (d_{enc21} + d_{enc22}) \cdot h_2 \quad [\text{mm}] \quad (46)$$

l) Densité du courant :

$$j_b = \frac{I_b}{S_b} \quad [\text{A/m}^2] \quad (47)$$

III.1.1.5. Dimensionnement de l'anneau :**a) La section de l'anneau est donnée par :**

$$S_{an} = (0,35 \div 0,45) \cdot \frac{Z_2 \cdot S_b}{2 \cdot p} \quad [\text{mm}^2] \quad (48)$$

b) La hauteur de l'anneau :

$$h_{an} = (1.1 \div 1.25)h_{z2} \quad [\text{mm}] \quad (49)$$

c) Largeur de l'anneau :

$$b_{an} = \frac{S_{an}}{h_{an}} \quad [\text{mm}] \quad (50)$$

d) Diamètre moyen de l'anneau :

$$D_{an,moy} = D_2 - h_{an} \quad [\text{mm}] \quad (51)$$

e) Densité de courant dans l'anneau :

$$j_{an} = \frac{I_{an}}{S_{an}} \quad [\text{A}/\text{mm}^2] \quad (52)$$

Avec : I_{an} -courant dans l'anneau, il est donné par la relation :

$$I_{an} = \frac{I_b}{K_{red}} \quad [\text{A}] \quad (53)$$

Avec : K_{red} -coefficient de réduction du courant de l'anneau au courant de la barre qui est donné par :

$$K_{red} = 2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot p}{Z_2}\right) \quad (54)$$

III.2. Calcul du circuit magnétique :

Le principe de ce calcul est basé sur la loi de circulation du champ magnétique.

$$F = \oint H \cdot dl \quad (55)$$

Pour faciliter le calcul, on subdivise le circuit magnétique en tronçons élémentaires de sorte que la valeur du champ dans chaque élément soit constante, l'intégral se ramène à la somme suivante :

$$F = \sum_i^n H_i L_i \quad (56)$$

D'où : H_i – Intensité du champ magnétique dans ce tronçon.

L_i – Représente la longueur moyenne des lignes du champ magnétique du tronçon choisi.

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

III.2.1. La culasse statorique :

a) Induction dans la culasse du stator est :

$$B_{c1} = \frac{0.5 \cdot \alpha_i \cdot B_{\delta} \cdot \tau}{K_{fer} \cdot h_{c1}} \quad [T] \quad (57)$$

Avec : h_{c1} – hauteur de la culasse statorique en [mm].

b) La longueur moyenne :

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$L_{c1} = \frac{\pi \cdot (D_{ext1} - h_{c1})}{2 \cdot P} \quad (58)$$

c) La force magnétomotrice dans la culasse :

Est donnée par l'expression suivante :

$$F_{c1} = L_{c1} \cdot H_{c1} \cdot 10^{-3} \quad (59)$$

Avec : H_{c1} – Intensité du champ magnétique correspondant à l'induction dans la culasse B_{c1} . Elle est donnée par un tableau de magnétisation de l'acier utilisé.

III.2.2. les dents statoriques :

a) Induction dans la dent du stator :

L'induction dans la dent du stator est déterminée par la conservation du flux à travers le pas polaire. Elle est donnée par la formule suivante :

$$B_{z1} = \frac{t_1 \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot b_{z1}} \quad [T] \quad (60)$$

Avec : b_{z1} – La largeur de la dent statorique en [mm].

b) Force magnétomotrice dans la dent du stator :

Elle est exprimée comme suit :

$$F_{z1} = h_{z1} \cdot H_{z1} \cdot 10^{-3} \quad (61)$$

Avec : H_{z1} – Intensité du champ magnétique dans la dent qui correspond à B_{z1} , voire le tableau de magnétisation pour les dents.

h_{z1} – Hauteur de l'encoche.

III.2.3 L'entrefer :

a) Force magnétomotrice dans l'entrefer :

Elle est exprimée comme suit :

$$F_\delta = 0.8 B_\delta \cdot \delta \cdot K_\delta \cdot 10^{-3} \quad (62)$$

Avec : δ - Epaisseur de l'entrefer ; B_δ - Induction dans l'entrefer.

K_δ - Coefficient de CARTER (d'entrefer), ce coefficient tient compte de l'influence de la denture du stator et rotor sur la résistance magnétique de l'entrefer, est donné par la relation suivante :

$$K_\delta = K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2} \quad (63)$$

Les coefficients $K_{\delta 1}$ et $K_{\delta 2}$ pour les encoches semi fermées et semi ouvertes du stator et du rotor respectivement sont données par les formules suivantes :

$$K_{\delta 1} = 1 + \frac{b_{f1}}{(t_1 - b_{f1} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_1}{b_{f1}})} \quad (64)$$

$$K_{\delta 2} = 1 + \frac{b_{f2}}{(t_2 - b_{f2} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_2}{b_{f2}})} \quad (65)$$

III.2.4. la culasse rotorique :

a) Induction dans la culasse rotorique :

Est donne par l'expression suivante :

$$B_{c2} = \frac{0.5 \cdot \alpha_1 \cdot B_{\delta} \cdot \tau}{K_{fer} \cdot h_{c2}} \quad [T] \quad (66)$$

b) Longueur moyenne des lignes du champ :

Est donnée par la formule suivante :

$$L_{c2} = \frac{\pi}{2P} (D_2 - 2 \cdot h_{c2} - h_{c2}) + h_{c2} \quad (67)$$

c) La force magnétomotrice dans la culasse :

Est donne par l'expression suivante :

$$F_{c2} = L_{c2} \cdot H_{c2} \cdot 10^{-3} \quad (68)$$

Avec : H_{c2} – Intensité du champ magnétique correspondant à B_{c2} . Elle est donnée par un tableau de magnétisation pour les culasses.

III.2.5. les dents du rotor :

a) Induction magnétique au rotor :

Elle est exprimée comme:

$$B_{z2} = \frac{t_2 \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot b_{z2}} \quad [T] \quad (69)$$

b) Force magnétomotrice dans la dent du rotor :

Elle est exprimée comme suit :

$$F_{z2} = H_{z2} \cdot (h_{z2} - 0.4 d_{en22}) \cdot 10^{-3} \quad (70)$$

Avec : H_{z2} – Intensité du champ magnétique dans la dent rotorique, qui correspond à B_{z2} , voire le tableau de magnétisation pour les dents.

III.2.6 Force magnétomotrice totale :

La force magnétomotrice totale est la somme des forces magnétomotrices partielles du circuit, elle donnée par la relation suivante :

$$F = \sum F_i = 2.F_\delta + 2.F_{z1} + 2.F_{z2} + F_{c1} + F_{c2} \quad (71)$$

III.2.7. Coefficient de saturation de la machine :

Il est exprimé comme suit :

$$K_\mu = \frac{\sum F_i}{2.F_\delta} = \frac{2.(F_\delta + F_{z1} + F_{z2}) + F_{c1} + F_{c2}}{2.F_\delta} \quad (72)$$

III.2.8. Courant magnétisant :

Le courant magnétisant représente la partie réactive du courant à vide. Il est donné par la relation suivante :

$$I_\mu = \frac{P.F}{0.9.m_1.W_1.K_{enr1}} \quad (73)$$

Avec : P – Nombre de paires de pôles.

m_1 – Nombre de phase de stator.

W_1 – Nombre de spires d'une phase statorique.

K_{enr1} – Coefficient d'enroulement statorique.

La réactance de magnétisation est exprimée par :

$$X_m = \frac{K_e \cdot U_n}{I_\mu} \quad (74)$$

III.2.9 Coefficient de dispersion magnétique du stator :

$$\sigma_\mu = \frac{X_1}{X_m} \quad (75)$$

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

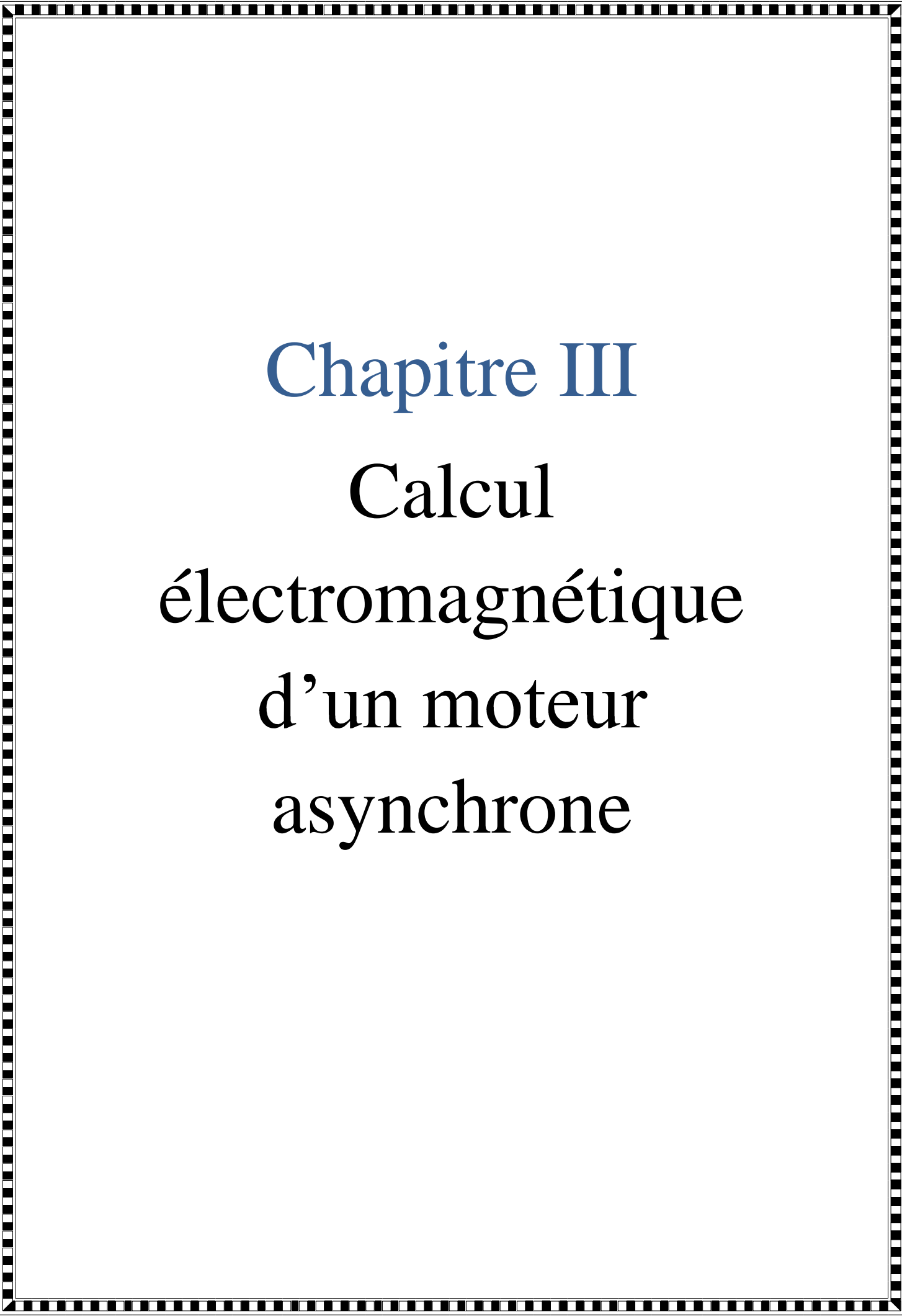
III.2.10. Force électromotrice à vide :

$$E_0 = \frac{U_n}{(1 + \sigma_\mu)} \quad (76)$$

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons donné une vue d'ensemble des différentes relations théoriques destinées au dimensionnement du moteur asynchrone.

Dans ce qui suit nous allons calculer les différents paramètres de ce moteur, en respectant les exigences du constructeur, à savoir l'entreprise d'Electro-Industrie.



Chapitre III

Calcul
électromagnétique
d'un moteur
asynchrone

Introduction :

On respectant les exigences prioritaires de l'entreprise d'électro-Industrie et du cahier de charge, nos calculs seront limités sur le circuit magnétique statorique.

Après avoir fait les calculs, on constatera les paramètres sur lesquels on peut agir afin d'améliorer le rendement de ce moteur asynchrone, et de comparer ce dernier avec le moteur existant à l'entreprise.

IV.1. Résultats de calcul :**Dimensionnement du moteur à double cage.****Données initiales**

Puissance nominale :	$p_n = 75 \text{ KW}$
Tension nominale :	$U_{n1} = 400 \text{ V}$
Courant nominale :	$I_n = 130 \text{ A}$
Nombre de paires de pôles :	$P = 1$
Fréquence du réseau d'alimentation :	$f = 50 \text{ Hz}$
Facteur de puissance :	$\cos \Phi_n = 0.88$
Rendement :	$\eta_n = 94.5 \%$
Hauteur d'axe :	$h = 280 \text{ mm}$
Nombre de phase :	$m = 3$
Vitesse de rotation :	$N_s = 3000 \text{ tr/min}$
Diamètre extérieure :	$D_1 = 410 \text{ mm}$
Diamètre intérieure :	$D_2 = 230 \text{ mm}$

Dimensions principales**-La puissance électromagnétique :**

$$P_e = K_e \cdot \frac{P_n \cdot 10^3}{\eta_n \cdot \cos \varphi_n} \quad [\text{KVA}] \quad P_e = 88.834 \text{ KVA}$$

Avec : $K_e = 0,985 - 5 \cdot P \cdot 10^{-3}$ $K_e = 0.98$

p (Nombre de paire de pôle). $P = 1$

-longueur virtuelle de l'induit :

$$L_i = \frac{6,1 \cdot 10^{12} \cdot p_e}{\alpha_i \cdot K_f \cdot A_1 \cdot K_{enr1} \cdot B_\delta \cdot n \cdot D_1^2} \quad [\text{mm}] \quad L_i = 270 \text{ mm}$$

-Coefficient de recouvrement polaire virtuel :

$$\alpha_i = \frac{2}{\pi} \quad \alpha_i = 0.63$$

-Facteur de la forme de la courbe de l'induction magnétique dans l'entre fer :

$$K_f = 1,11$$

-Facteur de bobinage de l'enroulement statorique :

$$K_{enr1} = K_{d1} \cdot K_{r1} \quad K_{enr1} = 0.921$$

Avec : K_{d1} : Coefficient de distribution

$$K_{d1} = \frac{\sin(\alpha/2)}{q_1 \cdot \sin(\alpha/2q_1)} \quad K_{d1} = 0.956$$

$$\alpha = q \cdot \gamma \quad ; \quad \gamma = \frac{p \cdot 360^\circ}{Z} = \frac{1 \cdot 360^\circ}{36} \quad \gamma = 10^\circ \text{ électrique}$$

$$q = \frac{Z}{2Pm} = \frac{36}{2 \cdot 1 \cdot 3} \quad q = 6 \text{ enc/pole/phase}$$

K_{r1} : Coefficient de raccourcissement polaire :

$$K_{r1} = \sin\left(\frac{\beta\pi}{2}\right) \quad K_{r1}=0.964$$

Avec : β : rapport de raccourcissement,

$$\beta = y / \tau_p \quad \beta = 0.83$$

$$y = 15$$

$$\tau_p = \frac{Z_1}{2p} = \frac{36}{2} \quad \tau_p = 18 \text{ enc}$$

-Diamètre intérieure du stator D_1 :

$$D_1 = K_d \cdot D_{ext1} \quad D_1=230\text{mm}$$

Avec : D_{ext1} : diamètre extérieure. $D_{ext1}=410\text{mm}$

K_d : coefficient en fonction du nombre de pôles, (tableau1).

$$K_d = 0.56$$

-Charge linéaire A_1 :

$$A_1 = 30208 \text{ A /m}$$

- Induction dans l'entrefer B_δ :

$$B_\delta = 0.65 \text{ T}$$

-Courant nominale dans une phase statorique :

$$I_{1n} = \frac{P_n \cdot 10^3}{m_1 \cdot U_{n1} \cdot \eta_n \cdot \cos\varphi_n} \quad [\text{A}] \quad I_{1n} = 75.15 \text{ A}$$

-Nombre de conducteurs effectifs dans l'encoche :

$$U_{enc1} = \frac{a_1 \cdot t_1 \cdot A_1 \cdot 10^{-3}}{I_{1n}} \quad U_{enc1} = 24 \text{ encoches/phase}$$

Avec : t_1 – pas dentaire :

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D_1}{Z_1} \quad t_1 = 20.07 \text{ mm}$$

-Nombre de spire par phase connecte en série:

$$W_1 = \frac{U_{enc1} \cdot Z_1}{2a_1 \cdot m_1} \quad W_1 = 72 \text{ spire/phase}$$

-Section effective d'un conducteur

$$S_{eff1} = \frac{I_{1n}}{a_1 \cdot J_1} \quad S_{eff1} = 12.52 \text{ mm}^2$$

Avec : J_1 - densité du courant

$$J_1 = 3.1 \text{ A/mm}^2$$

a_1 - nombre de voix parallèles

$$a_1 = 2$$

N_{elt1} – nombre des conducteurs élémentaires

$$N_{elt1} = 6 \text{ conducteurs}$$

-La section élémentaire d'un conducteur :

$$S_{elt1} = \frac{S_{eff1}}{N_{elt1}} \quad S_{elt1} = 2.08 \text{ mm}^2$$

-la section normalisée d'un conducteur :

$$S_{nor} = 2.27 \text{ mm}^2$$

-Diamètre nu d'un conducteur :

$$d_{nu} = 1.70 \text{ mm}$$

-Le diamètre isolé d'conducteur :

$$d_{iso} = 1.785 \text{ mm}$$

-section effective d'un conducteur avec isolation :

$$S_{effiso} = 15.01 \text{ mm}^2$$

-Section occupée par les conducteurs :

$$S_{enc1} = U_{enc1} * S_{effiso} \quad S_{enc1} = 360.24 \text{ mm}^2$$

-Section de l'encoche :

$$S_{en} = 448.89 \text{ mm}^2$$

Voir annexe (encoche statorique).

-Section des isolants :

$$S_{iso}=54.51 \text{ mm}^2$$

Voir annexe (caniveau d'encoche, isolation d'encoche).

-Coefficient de remplissage :

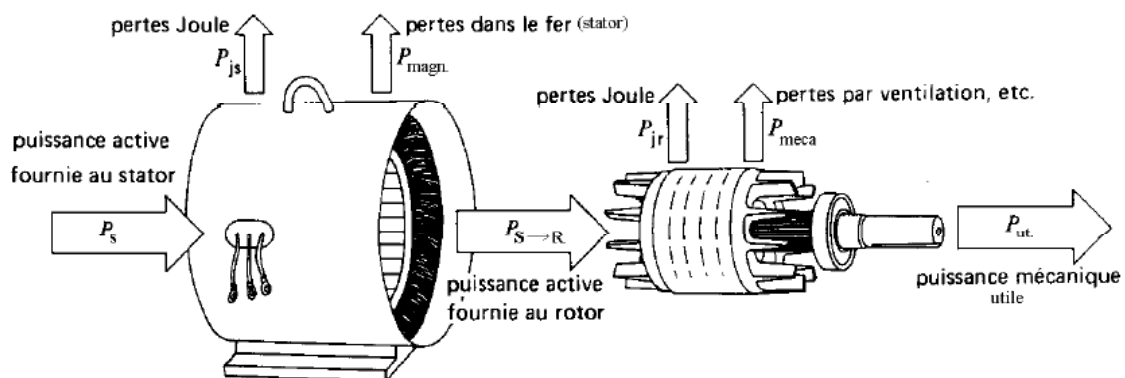
$$K_{rem}= 0.75$$

-Section de l'encoche libre :

$$S_{enc_{libre}} = (S_{en} - S_{iso}) * K_{rem}$$

$$S_{enc_{libre}}= 295.78 \text{ mm}^2$$

IV.2 Bilan des puissances:



Une partie P_{js} de cette puissance est dissipée par effet Joule dans les enroulements du stator. Par la suite, le champ magnétique inducteur entraîne des pertes dans le fer P_f , par hystérésis et par courant de Foucault. Le reste de la puissance P_{tr} est transmis au rotor à travers l'entrefer. La majeure partie de cette puissance est alors utilisée pour produire une puissance électromagnétique P_{em} , tandis que la présence d'un courant induit dans le rotor provoque des pertes par effet Joule P_{jr} .

La puissance électromagnétique fournie par le stator est responsable de la mise en mouvement du rotor, qui produit la puissance mécanique utile P_u qui sera par la suite transmise à la charge par le biais d'un arbre de transmission ou d'une courroie de distribution.

Toutefois, dans le mouvement du rotor, une partie de la puissance est perdue par divers mécanismes de frottements, c'est ce que l'on appelle les pertes rotationnelles P_{rot} .

Nous donnons par la suite les différentes relations permettant de calculer les pertes et les puissances impliquées dans le moteur asynchrone, lorsqu'elles sont calculables.

-Puissance absorbée:

$$P_a = \sqrt{3}.U.I.\cos \varphi$$

-Puissance transmise dans l'entrefer :

$$P_{tr} = P_a - (P_{js} + P_f)$$

-Perte par effet joule au stator :

$$P_{js} = 3.R.I^2$$

-Perte fer :

Les pertes fer sont fonctions du flux magnétique. Elles ne dépendent donc que de la tension d'alimentation et de la fréquence des courants statoriques. Or, en régime de fonctionnement, ces grandeurs ne varient pas et, par conséquent, les pertes fer peuvent être considérées comme constantes quelle que soit la charge du moteur.

Dans la pratique, les pertes fer sont mesurées lors d'un essai à vide, en même temps que les pertes rotationnelles.

-Perte joule au rotor :

$$P_{jr} = g.P_{tr}$$

-Glissement :

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

-Puissance électromagnétique transmise au rotor :

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

-Couple électromagnétique :

$$P_{em} = C_{em} \cdot \Omega \rightarrow C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{P_{tr}}{\Omega_s}$$

-Vitesse de rotation en (rad/s) :

$$\Omega = \frac{2\pi \cdot N}{60}$$

-Puissance mécanique utile :

$$P_u = C_u \cdot \Omega$$

-Rendement :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

Résultats :

Caractéristiques et performances	Moteur existant	Moteur calculé
Puissance nominal, KW	75	75
Puissance absorbé, KW	82.009	79.258
Puissance transmise dans l'entrefer, KW	80.387	78.17
Pertes par effet joule au stator, W	932.96	806.46
Pertes fer, W	689.04	281.54
Perte joule au rotor, W	803.87	651.41
Glissement	0.01	0.008
Puissance électromagnétique transmise au rotor, KW	79.583	77.521

Couple électromagnétique, Nm	249.25	248.83
Puissance mécanique utile, KW	74.996	74.997
Rendement	0.914	0.945

IV.3. Comparaison des résultats :

Caractéristiques et performances	Moteur existant h= 280 mm	Moteur calculé h= 280 mm
Tension nominal, V	380	400
Puissance nominal, KW	75	75
Courant nominal, A	140	130
Longueur virtuelle, mm	270	270
Rendement	0,915	0,945
Vitesse de rotation	2970	2975
Facteur de puissance	0,89	0,88
Induction dans l'entrefer, T	0,652	0,65
Charge linéaire, A/m	$301,9 \cdot 10^2$	$302,08 \cdot 10^2$
La densité du courant, A/mm ²	3	3,1
Nombre de conducteurs	15	24
Nombre de conducteurs effectifs	8	6
Sections des conducteurs, mm ²	221,35	360,24
Coefficient de remplissage	0,74	0,75
Puissance électromagnétique, KW	90,256	88,834
Couple nominale, N.m	241,14	240,73

IV.4. Interprétation des résultats :

La méthode utilisée nous a permis d'apporter des modifications au moteur existant, or d'après nos calculs sur le bobinage on constate que la section occupée par l'ensemble des conducteurs ($S_{enc1} = 360.24 \text{ mm}^2$) est supérieure à la section libre de l'encoche du moteur existant ($S_{enc_{libre}} = 295.78 \text{ mm}^2$), ce qui a engendré la modification de l'encoche pour pouvoir faire rentrer les conducteurs.

Conclusion :

Dans cette partie du travail on a fait une comparaison entre 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, on constate que pour améliorer le rendement d'un moteur asynchrone on peut agir sur plusieurs facteurs comme ; la longueur virtuelle, l'induction magnétique, la charge linéaire, et la dimension de l'encoche, or cette dernière dépend du nombre des conducteurs et leurs sections.

Or d'après nos calculs les sections des conducteurs du moteur calculé diffèrent de celles du moteur existant, ce qui nous amène à modifier les dimensions de l'encoche statorique.

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, du dimensionnement du bobinage statorique, s'avèrent être dans les marges admissibles.

Dans notre travail, on a calculé les dimensions du stator d'un moteur asynchrone à double cage, en utilisant une méthode de calcul plus ou moins précise et à l'aide d'un logiciel de calcul (mathcad), cette méthode de calcul nous a permis d'agir sur certains paramètres de la machine comme la longueur virtuelle, l'induction magnétique, et la densité du courant pour faire varier d'autres paramètres comme la charge linéaire et la section des conducteurs.

Etant donné que notre travail est basé sur l'amélioration du rendement d'un moteur. Le respect des exigences de l'entreprise E-I, de ne pas agir sur le rotor et la carcasse, nous a conduit à agir juste sur le bobinage du stator.

On a constaté, après nos calculs que, l'amélioration du rendement a engendré la modification de la section et le nombre du conducteur par phase, ce qui impose l'augmentation de la section de l'encoche, tout en préservant la même qualité de tôle magnétique utilisée dans le moteur existant.

Enfin, on peut dire que le domaine de calcul d'un moteur électrique s'avère très vaste et que l'amélioration d'une méthode de calcul est un sujet d'actualité.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] : Théodore WILDI. Electrotechnique troisième édition, 2000.
- [2] : D. AKKOU ; M. BOUMEDIENE « Optimisation d'une série de moteur asynchrone triphasés à cage d'écureuil ».Mémoire d'ingénieur ; UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI OUZOU, 2004.
- [3] : R. ADJOUND ; D. ALLILI « Amélioration du rendement du moteur asynchrone triphasé de type 96-2 fabriqué par électro-industries » ; UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI OUZOU, 2014.
- [4] : D. SALAH ; F. AHCENE « Calcul d'un moteur asynchrone à double cage » ; UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI OUZOU, 2012.
- [5] : DESSOUDE Maxime « Moteurs asynchrones » L'école Nationale Supérieure d'électricité et mécanique de NANCY, Technique de l'ingénieur, 2010.
- [6] : MAYE Pierre « Moteurs électriques industriels » Edition Dunod ; Paris 2005, isBN210048729 9.
- [7] : M. Lemaire « Notion fondamentales d'utilisation des moteurs triphasés » schuh AG Rockwell automation, Arau, 1996.

Annexes

Annexe 2 : Coefficient K_D en fonction du nombre de pôle :

2P	2	4	6	8	10-12
K_D	0.52-0.6	0.62-0.68	0.7-0.72	0.72-0.75	0.75-0.77