

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou
Faculté de Génie Electrique et de l'Informatique
Département d'Electrotechnique



Mémoire

de fin d'études

En vue de l'obtention

du diplôme de Master Professionnel

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Thème

*Dimensionnement d'un Moteur
Asynchrone Triphasé à Cage d'Ecureuil
d'une Puissance 5,5 kW en Utilisant Le
Logiciel Speed Pc-imd*

Proposé par :

M^r. Dj. BENTAHA
(Electro-Industries)

Dirigé par:

M^r. A. DICHE

Étudié par :

M^{elle}. Mansouri Khalida

M^{elle}. Belaid Lynda

Promotion : 2011/2012

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur les moteurs asynchrones triphasés	
I.1 Introduction	4
I.2 Constitution	4
I.2.1 Les circuits électriques	5
♦ Le stator est l'inducteur	5
♦ Le rotor à cage d'écureuil	6
I.3 Principe de fonctionnement	7
♦ Vitesse de synchronisme	8
♦ Glissement	8
I.4 Bilan des puissances et des pertes	9
I.4.1 Puissance électrique absorbée	10
I.4.2 Les pertes par effet joule au stator	10
I.4.3 Les pertes fer au stator	11
I.4.4 La puissance transmise dans l'entrefer	11

I.4.5 Les pertes joule au rotor	11
I.4.6 La puissance électromagnétique	12
I.4.7 Les pertes mécaniques	12
I.4.8 La puissance mécanique	12
I.4.9 La puissance utile	12
I.4.10 Détermination des pertes constantes	13
I.4.11 Les pertes par hystérésis	13
I.4.12 Les pertes par courant de Foucault	14

Chapitre II : Généralités sur les matériaux électrotechniques

II.1 Introduction	15
II.2 Classification des matériaux	15
II.3 Les matériaux conducteurs	15
II.3.1 Bons conducteurs	15
II.3.2 Formes des conducteurs	15
II.3.3 Propriétés	16
II.3.3.1 Propriétés physiques et chimiques	16
◆ Propriétés physiques	16
◆ Propriétés chimiques	16

II.3.3.2 Propriétés mécaniques	17
◆ La résistance à la traction	17
II.3.3.3 Propriétés électriques	18
◆ Résistance d'un conducteur	18
II.4 Matériaux magnétiques	19
II.4.1 Définition des matériaux magnétiques	19
II.4.2 Les différents matériaux magnétiques	20
a. Les ferromagnétiques	20
b. Les paramagnétiques	20
c. Les diamagnétiques	20
II.4.3 Les tôles FeSi à grain non orientés	20
II.4.3.1 Composition	20
A-Tôles semi- finies	21
B-Tôles finies	21
I.4.3.2 Fabrication des tôles à grains non orientés	21
II.5 Isolation	21
◆ Isolation des conducteurs	22
◆ Isolation des bobines par rapport à la masse	22
◆ Isolation entre phase	22
II.6 L'aluminium et ses alliages	22
II.6.1 Les atouts de l'aluminium	23
◆ Sa légèreté	23

◆ Sa conductivité électrique	23
◆ Sa conductivité thermique	23
◆ Résistance à la corrosion	23
◆ Sa solidité	23
◆ Un matériau recyclable	23
II.6.2 Caractéristique d'aluminium pur	24

Chapitre III : Dimensionnement et relation de base d'un moteur asynchrone

III.1 Introduction.....	25
III.2 Formule de dimensionnement Général	25
III.2.1 La puissance conventionnelle de calcul	25
◆ Force électromotrice de la phase statorique.....	25
◆ Puissance absorbée par le moteur.....	25
◆ Puissance apparente au stator.....	25
◆ Le rendement	27
◆ Courant nominale assigné par phase	27
◆ Vitesse de rotation du moteur	28
◆ Le facteur de puissance du moteur	28
◆ Glissement nominale	28

III.3 Facteur de géométrie λ	28
III.4 Dimensionnement de la feuille statorique	29
III.4.1 Choix du nombre d'encoches par pôles et par phase q	29
III.4.2 Nombre d'encoches au stator	29
III.4.3 Type d'enroulement au stator	29
III.4.4 Type d'encoche	30
III.4.5 Nombre de conducteur par encoches U_{enc}	30
III.4.6 Section du conducteur statorique S_2	30
III.4.7 Nombre de spires en série par phase N_1	31
III.4.8 Largeur de la dent statorique b_{z1}	31
III.4.9 Hauteur de la culasse statorique h_{c1}	31
III.4.10 Hauteur de la dent statorique h_{z1}	32
III.4.11 Largeur minimale de l'encoche	32
III.4.12 Largeur maximale de l'encoche	32
III.4.13 Hauteur de l'encoche statorique	32
III.4.14 Surface de l'encoche S_{en}	33
III.4.15 Surface prise par l'isolation en papier imprégné	33
III.4.16 Surface réservée aux conducteurs dans l'encoche	33

III.4.17 Coefficient de remplissage	33
III.4.18 Le choix de l'entrefer	34
III.5 Dimensionnement du rotor	34
III.5.1 Choix du nombre d'encoches rotoriques	34
III.5.2 Diamètre extérieur du rotor D_2	34
III.5.3 Forme d'encoches rotoriques	34
III.5.4 Le courant réduit du rotor	35
III.5.5 Densité de courant linéique du rotor	35
III.5.6 Courant dans l'anneau de court-circuit I_{an}	35
III.5.7 Section de l'anneau de court-circuit	36
III.5.8 Largeur de l'anneau	36
III.5.9 hauteur de l'anneau	36
III.5.10 Diamètre inférieur de l'encoche rotorique	37
III.5.11 Diamètre supérieur de l'encoche rotorique	37
III.5.12 Largeur de la dent rotorique	38
III.5.13 Hauteur de la culasse rotorique	38
III.5.14 Hauteur de la dent rotorique	39
III.5.15 Hauteur de la clavette h_{K2}	39

III.5.17 Largeur de la dent rotorique b_{z2}	39
--	----

III.6 La forme géométrique du circuit magnétique de moteur asynchrone.....	40
--	----

Chapitre IV :

Utilisation du logiciel Speed PC-IMD pour dimensionnement d'une machine asynchrone

IV.1 Introduction	43
IV.2 Définition de PC-IMD.....	43
IV.3. Utilisation de PC-imd.....	44
IV.4. Les différentes étapes de PC - imd	45
IV.4.1. Outline Editor.....	45
4.1.1. Dimensionnement du stator	45
IV. 4.1.2. Dimensionnement du rotor.....	46
IV.4.2. Template Editor, Ted	47
IV.4.3. Winding Editor.....	48
IV.4.4. Sélection de matériaux à partir de la banque de données	52
IV.4.5: Design sheet.....	53
Conclusion	57

Sommaire

Remerciements

Nous tenons à exprimer nos vifs et chaleureux remerciement et gratitude à notre Encadreur Mr BENTAHA et notre promoteur Mr DICHE ainsi que tous nos enseignants qui ont contribué à notre formation pendant tout le cursus universitaire.

Nous remercions vont à tout le personnel de l'E-I on particulière M^{elle} Abass Sadia pour l'aide qu'elle nous a fournie afin de mener ce travail à terme Nous remercions aussi le président et les membres du jury pour avoir accepté de juger ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer nos remerciement les plus chaleureux à nos familles pour leurs soutien et leur présence et à toute personne ayant participé de prés comme de loin à l'aboutissement de ce mémoire et nous remercions toute la promotion 2012.



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à

Mes très chers parents à qui je dois tous et je ne rendrais jamais

A mon cher frère AREZKI et sa femme NADIA

A mes sœurs TASSADIT, SONIA et SAMIA

A mon très cher SAMIR

*Mon binôme LYNDA, mes copines SAMIHA, DJOUHER, LYNDA,
FATHMA, ZAZIE, DJAMILA, NOURA, DRIFA, MADIHA, DHAHBBIA*

A tous la promotion ETH 2012.

Khalida





Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à

Mes très chers parents à qui je dois tous et je ne rendrais jamais

A mes chers frères LYES et MOURAD

*A mes sœurs DJEDJIGA, HAKIMA, DHAHBIA, AMMEL et son fiancé
BOUKHALFA et sa famille.*

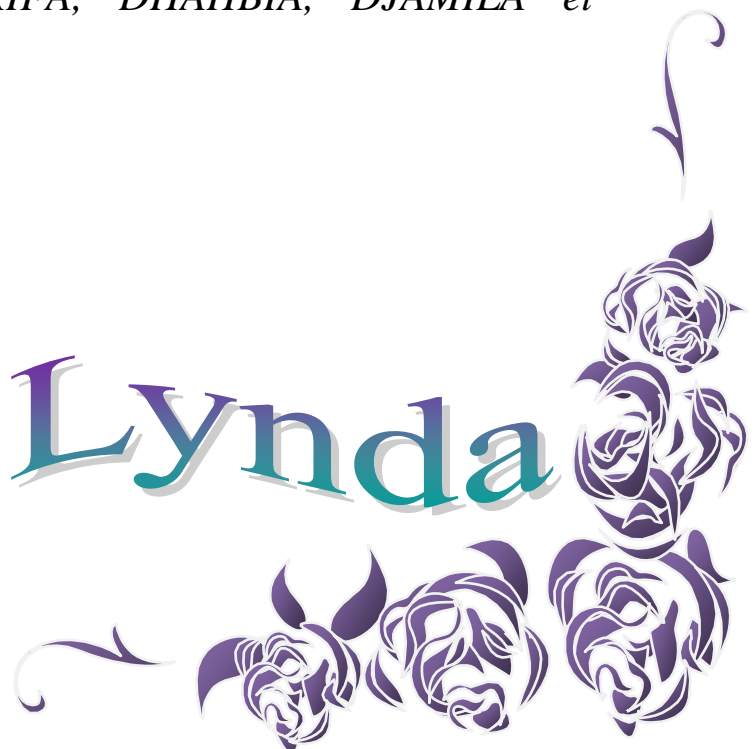
A mon très cher Malik et sa famille.

A mes cousine NABILA et leur marie.

*Mon binôme KHALIDA, mes copines SAMIHA, DJOUHER, LYNDA,
FATHMA, ZAZIE, NOURA, DRIFA, DHAHBIA, DJAMILA et
MADIHA.*

A toutes la promotion ETH 2012.

Lynda



Introduction générale

Introduction Générale

Les machines électriques tournantes sont des dispositifs qui transforment de l'énergie électrique en énergie mécanique (moteur électrique) ou qui fournissent de l'énergie électrique à partir d'une autre forme d'énergie (génératrice). Elles occupent une place importante dans la vie active et constituent l'élément essentiel de toute installation énergétique ou industrielle.

Parmi ces machines, le moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil est le plus répandu dans l'industrie, en raison de sa robustesse, sa fiabilité, son faible coût, son excellent rendement, sa simplicité d'utilisation et aussi il nécessite peu d'entretien.

Comme tous les moteurs électriques, le moteur asynchrone triphasé est composé d'un stator et d'un rotor séparés par un entrefer. Le stator et le rotor comportent des enroulements parcourus par des courants alternatifs qui produisent des champs magnétiques dans l'entrefer, l'interaction entre les champs produits par le stator et le rotor engendre le couple mécanique dans le moteur.

Dans ce contexte, notre projet de fin d'étude effectué au sein de l'entreprise ELECTRO-INDUSTRIE consiste en une étude et dimensionnement d'une machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil 5,5kW avec un logiciel SPEED (PC-IMD).

Le manuscrit est subdivisé en quatre chapitres, le premier chapitre sera consacré aux rappels et aux généralités sur les moteurs asynchrones triphasés, dans le deuxième chapitre nous donnerons un aperçu sur les différents matériaux utilisés dans un moteur asynchrone, le troisième chapitre s'intéressera au dimensionnement et relations de base d'un moteur asynchrone triphasé, et le dernier chapitre sera consacré à l'application du logiciel speed PC-imd pour dimensionner le moteur en question.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale.

Présentation de l'entreprise

1. Historique

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

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

2. Situation

L'entreprise (ELECTRO-INDUSTRIE) d'une superficie de 38 ha, est située sur la route nationale N°12 distante de 30 km du chef lieu de la wilaya TIZI-OUZOU de 8 km de la commune d'AZAZGA.

L'entreprise ELECTRO-INDUSTRIE est composée de deux unités, toutes situées sur un même site :

- ◆ Unité de fabrication de transformateurs de distribution MT/BT (UTR).
- ◆ Unité de fabrication des moteurs électriques et prestations techniques.

Les produits fabriqués par ELECTRO-INDUSTRIE sont conformes aux recommandations CEI et aux normes Allemandes DIN/VDE.

La production actuelle d'ELECTRO-INDUSTRIE 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.

Les ventes de moteurs représentent 30% environ de la capacité de production.

Il est signalé qu'ELECTRO-INDUSTRIE est le seul fabricant de ces produits en Algérie.

3. présentations de l'unité moteur

L'unité Moteur asynchrone s'occupe de la fabrication des moteurs asynchrones à différentes puissances et à différentes hauteurs d'axes.

Parmi les moteurs électriques fabriqués par ELECTRO-INDUSTRIES d'AZAZGA, on a le moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil. Pour assurer leur réalisation, l'unité moteur dispose de six ateliers de fabrication mécaniques disposant de postes des contrôles (mécanique et électrique) pour valider la conformité de chaque pièce fabriquée, rentrant dans la réalisation de chaque type de moteur.

4. les différents ateliers de fabrication des moteurs asynchrones de l'UMP

1. Atelier de découpage ;
2. Atelier de moulage sous pression ;
3. Atelier d'usinage ;
4. Atelier de bobinage ;
5. Atelier de montage.
6. Contrôle qualité.

Chapitre I

Généralités sur les moteurs asynchrones triphasés

1.1 Introduction

La machine asynchrone [1], connue également sous le terme « anglo-saxon » de machine à induction, est une machine électrique à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor. Les machines possédant un rotor « en cage d'écureuil » sont aussi connues sous le nom de machines à cage ou machines à cage d'écureuil. Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas forcément proportionnelle à la fréquence des courants qui les traversent.

La machine asynchrone a longtemps été fortement concurrencée par la machine synchrone dans les domaines de forte puissance, jusqu'à l'avènement de l'électronique de puissance. La machine asynchrone est utilisée aujourd'hui dans de nombreuses applications, notamment dans le transport (métro, trains, propulsion des navires), dans l'industrie (machines-outils), 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 dans les éoliennes.

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

1.2. Constitution

Les moteurs asynchrones [1] triphasés à rotor en court circuit (aussi appelés à « cage d'écureuil ») sont constitués d'une partie fixe appelée stator et d'une partie tournante appelée rotor.

Les éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil sont illustrés dans la Figure 1.

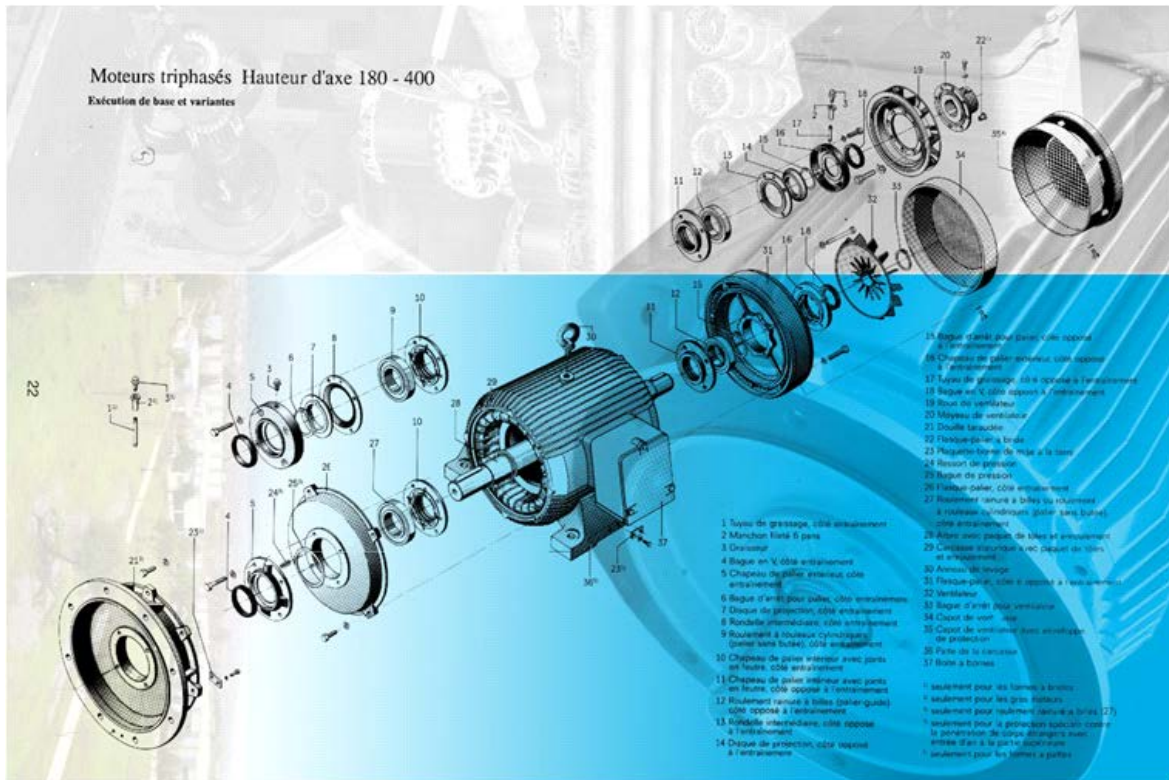


Fig I.1. Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.

1.2.1 Les circuits électriques

◆ *Le stator est l'inducteur*

Il est constitué [2] d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine. 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, quant à elles, 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.

◆ *Le rotor à cage d'écureuil*

Dans le rotor à cage [2], les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barre rotoriques) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor (figure I.2). Cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine analogue à celui du moteur à rotor bobiné.

Dans le cas de rotor à cage d'écureuil, les conducteurs sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre préformées et frettées dans les tôles du rotor. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite dans les tôles soient négligeables. Le moteur à cage d'écureuil est beaucoup plus simple à construire que le moteur à rotor bobiné et, de ce fait, son prix de revient est inférieur. De plus, il dispose d'une plus grande robustesse. Il constitue la plus grande partie du parc de 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).

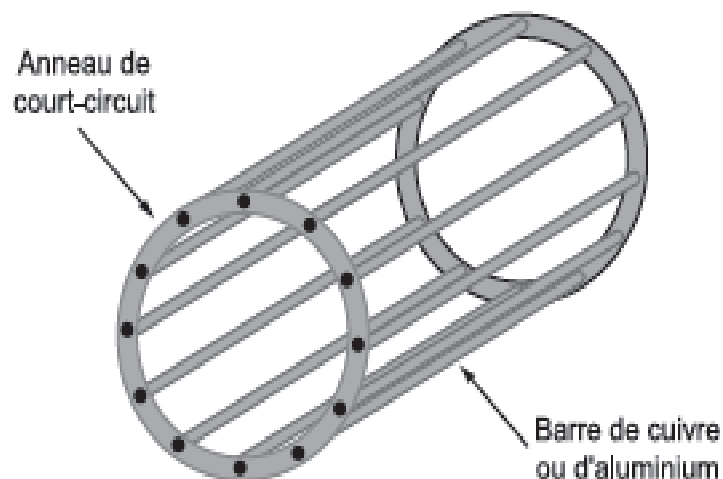


Fig. I.2 : Rotor en cage d'écureuil

I.3. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement [3] de la machine asynchrone est basé sur le principe d'interaction électromagnétique dus aux champs tournants.

Dès que le stator est alimenté par un réseau triphasé alternatif de pulsation (ω_s) et de fréquence (f_s), un courant traverse ses enroulements et crée une force magnétomotrice (E) variable, elle est donnée par la formule suivante :

$$E = n \cdot i \quad (\text{I-1})$$

Avec : E : Force magnétomotrice ;

n : Nombre de spires ;

i : Courant de réseau.

La loi d'Ampère stipule que, lorsqu' un conducteur est traversé par un courant, il produit un champ magnétique (H), ce dernier est donné par la formule suivante :

$$H = \frac{n \cdot i}{l} \quad (\text{I-2})$$

Avec : H : Champ magnétique ;

l : longueur moyenne des lignes de champ.

Ce champ magnétique (H), va créer à son tour une induction magnétique (B) au niveau de l'entrefer, elle est donnée par la relation suivante :

$$B = \mu_0 \cdot H \quad (\text{I-3})$$

Avec : μ_0 La perméabilité de l'air ;

B : induction magnétique [Tesla].

Cette quantité importante intervient dans l'étude des machines électriques. Le flux magnétique est donné en fonction de l'induction comme suit :

$$\phi = B \cdot S \quad (\text{I-4})$$

Avec : S : Surface de l'armature magnétique de l'induit ;

Φ : Le flux mutuel sous un pôle.

Selon la loi de Faraday, la f. e. m aux bornes d'un circuit est égale à la dérivée par rapport au temps du flux qui traverse chaque spire du circuit.

$$e = n \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{I-5})$$

t : le temps [s].

On met un signe (-) dans la formule pour rappeler que la f. e. m a un effet qui s'oppose à la cause qui lui donne naissance, cette effet d'opposition est précisé par la loi de LENZ.

Les deux lois sont très générales et sont valables quelle que soit la forme du circuit et la façon dont varie le flux.

Selon la loi de LAPLACE, la circulation du courant électrique (i) dans un fil provoque une force élémentaire (dF), exercée sur l'élément dL du fils par une induction B . Cette force élémentaire est donnée comme suit :

$$\vec{dF} = i \cdot \vec{dL} \wedge \vec{B} \quad (\text{I-6})$$

L'intensité de cette force est donnée par la relation suivante :

$$F = I \cdot B \cdot L \cdot \sin \alpha \quad (\text{I-7})$$

Avec : I : Courant induit [A] ;

L : La longueur du fil ;

α : Angle entre \vec{dL} et \vec{B}

Cette force crée un couple de démarrage, ce couple fera tourner le rotor à une vitesse proche de la vitesse du champ tournant du stator (w_s).

◆ Vitesse de synchronisme

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

$$N_s = \frac{60 \cdot f}{P} \quad (\text{I-8})$$

Avec : N_s : Vitesse de synchronisme [tr/min] ;

f : Fréquence [Hz] ;

P : Nombre de paires de pôles.

◆ Glissement [4]

Le couple moteur ne peut exister que si un courant induit circule dans la spire. Ce couple est déterminé par le courant qui circule dans la spire et qui ne peut être que s'il existe une variation de flux dans cette spire. Il faut donc qu'il y ait une différence de vitesse entre la spire et le champ tournant.

C'est la raison pour laquelle un moteur électrique fonctionnant suivant le principe que nous venons de décrire est appelé "moteur asynchrone". La différence entre la vitesse de synchronisme et celle de la spire est appelée "glissement" et s'exprime en % de la vitesse de synchronisme.

$$g = \frac{N_s - N_r}{N_s} \cdot 100 \quad (\text{I-9})$$

Avec : g : Le glissement [%] ;

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

I.4 Bilan des puissances et des pertes

Le bilan des puissances [4] et des pertes dans un moteur asynchrone est reporté sur la Fig.4. Le moteur asynchrone absorbe sur le réseau une puissance électrique active triphasée P_a .

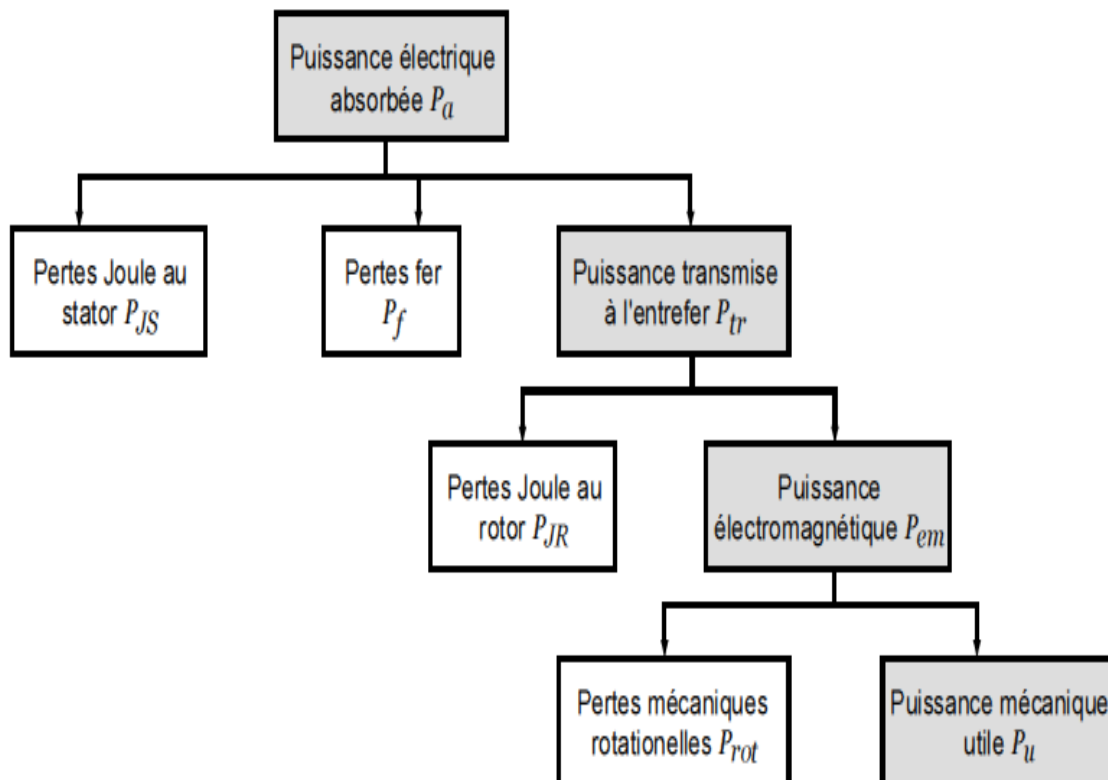


Fig. I.4 : Bilan des puissances et des pertes d'un moteur asynchrone 3~

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.

I.4.1 Puissance électrique absorbée

La puissance absorbée [5] par un moteur asynchrone est une puissance active électrique.

Lorsque le moteur est connecté à un réseau triphasé, P_a vérifie la relation :

$$P_a = \sqrt{3}.U.I.\cos\varphi \quad (\text{I-10})$$

Avec : P_a : Puissance électrique absorbée [W] ;

U : La tension d'alimentation [V] ;

I : Le courant absorbé [A].

$\cos\varphi$: Facteur de puissance.

I.4.2 Les pertes par effet Joule au stator

Le stator peut être câblé en étoile ou en triangle. Puisque le moteur constitue un récepteur triphasé équilibré, alors :

$$P_{js} = 3.r_1.I_1^2 \quad (\text{I-11})$$

Avec : P_{js} : Les pertes par effet Joule au stator [W] ;

r_1 : Résistance d'un enroulement statorique [Ω] ;

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

Ou bien :

$$P_{js} = \frac{3}{2} \cdot R_1 \cdot I_1^2 \quad (\text{I-12})$$

Avec : R_1 : La résistance entre deux bornes [Ω].

I.4.3 Les pertes fer au stator

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.

I.4.4 La puissance transmise dans l'entrefer

La puissance transmise au rotor à travers l'entrefer P_{tr} est la partie de puissance absorbée qui n'est pas perdue dans les enroulements du stator et dans le fer elle est donnée comme suit :

$$P_{tr} = P_a - (P_{js} + P_{fer}) \quad (\text{I-13})$$

Avec : P_{tr} : La puissance transmise dans l'entrefer [W].

I.4.5 Pertes Joule au rotor [1]

Les pertes Joule au rotor sont fonction de la puissance transmise à celui-ci. On peut par ailleurs montrer qu'elles sont aussi fonction du glissement. En effet, les grandeurs P_{jr} et P_{tr} sont liées par la relation :

$$P_{jr} = g \cdot P_{tr} \quad (\text{I-14})$$

Avec : P_{tr} : La puissance transmise dans l'entrefer [W].

Ou bien :

$$P_{jr} = 3 \cdot r_2 \cdot I_2^2 \quad (\text{I-15})$$

Avec: P_{jr} Pertes Joule au rotor [W] ;

r_2 : Résistance d'un enroulement rotorique [W] ;

I_2 : Le courant traversant l'enroulement rotorique [A].

I.4.6 Puissance électromagnétique

La puissance électromagnétique P_{em} transmise au rotor est égale à :

$$P_{em} = P_{tr} - P_{jr} = (1 - g) \cdot P_{tr} \quad (\text{I-16})$$

Avec : P_{em} : Puissance électromagnétique [W].

I.4.7 Les pertes mécaniques

Les pertes mécaniques sont proportionnelles à la vitesse de rotation, et regroupent les pertes par frottement et par ventilation. Ces pertes sont pratiquement constantes.

I.4.8 La puissance mécanique

La puissance mécanique développée par le rotor est égale à la puissance électromagnétique que le stator lui fournit diminuée des pertes fer et pertes Joule au rotor.

$$P_m = P_{em} - (P_{jr} + P_{fer} r) \quad (\text{I-17})$$

Et les pertes fer du rotor sont négligeables donc :

$$P_m = P_{em} - P_{jr} \quad (\text{I-18})$$

Avec : P_m : La puissance mécanique [W] ;

$P_{fer} r$: Les pertes fer au rotor [W].

I.4.9 La puissance utile

De la puissance mécanique on soustrait les pertes mécaniques $P_{méc}$ pour arriver à la puissance utile.

$$P_u = P_m - P_{méc} \quad (\text{I-19})$$

Ou bien aussi on a :

$$P_u = P_m - \sum \text{pertes} \quad (\text{I-20})$$

$$\text{Et} \quad \sum \text{pertes} = P_{js} + P_{fer} + P_{jr} + P_c \quad (\text{I-21})$$

Avec les pertes fer du rotor sont négligeables.

Où: P_u : La puissance utile [W] ;

P_c : Les pertes constantes [W].

I.4.10 Détermination des pertes constantes

Les pertes constantes P_c , aussi appelées pertes collectives, regroupent les pertes fer et les pertes mécaniques. Pour les déterminer, on réalise un essai à vide. En effet, si l'on regarde le bilan des pertes et des puissances, on voit que :

$$P_{u0} = P_{a0} + P_{js0} + P_c + P_{jr0} = \sqrt{3}U_0 I_0 \cos \varphi + P_{js0} + P_c + P_{jr0} \quad (\text{I-22})$$

À vide le glissement est nul : $g_0 = 0$ et donc $P_{js} = 0$. De plus, toujours à vide, le moteur ne délivre pas de puissance utile et donc $P_{u0} = 0$. En remplaçant ces valeurs dans l'équation (I-22), il vient que :

$$P_c = P_{a0} - P_{jr0} \quad (\text{I-23})$$

Et les pertes joules à vide $P_{js0} = \frac{3}{2} \cdot R_1 \cdot I_0^2$ sont négligeables, parce que le courant à vide I_0 absorbé est faible donc : $P_c = P_{a0}$.

Pour mesurer les pertes constantes dans un moteur asynchrone, il suffit de mesurer la puissance absorbée (à l'aide d'un wattmètre par exemple) et de retrancher les pertes Joule au stator (calculées après une mesure à l'ampèremètre). On peut dire que les pertes constantes à vide sont égales aux pertes constantes en charge P_c à vide $\approx P_c$ en charge et :

$$P_c = P_{a0} = P_{fer} + P_{méc} \quad (\text{I-24})$$

Avec : P_{u0} : La puissance utile à vide [W] ;

P_{a0} : La Puissance électrique absorbée à vide [W] ;

I_0 : Le courant absorbé à vide [A] ;

$\cos \varphi_{j0}$: Facteur de puissance à vide ;

P_{js0} : Les pertes par effet Joule au stator à vide [W] ;

P_{jr0} : Pertes Joule au rotor à vide [W].

I.4.11 Pertes par hystérésis

Les Pertes par hystérésis résultent de transformation de l'organisation de matière sous l'effet de la variation en intensité ou en direction du champ magnétique appliqué. Elles sont proportionnelles à la fréquence et à l'amplitude B_m de l'induction.

$$P_H = K_1 \cdot f \cdot B_M^2 \quad (\text{I-25})$$

P_H : Pertes par hystérésis [W/kg] ;

K : Une constante ;

f : La fréquence du réseau [Hz] ;

B_m : L'induction maximale [T].

I.4.12/Pertes par courant de Foucault

Les pertes par courant de Foucault résultent des variations temporelles des flux qui induisent des forces électromotrices (f.é.m.) dans leur masse. Ces f.é.m. donnent naissance à des courants qui se ferment dans la masse du fer, elles sont données comme suit :

$$P_F = K_1 \cdot f^2 \cdot B_M^2 \quad (\text{I-26})$$

Avec : P_F : Pertes par courant de Foucault [W/kg] ;

K_1 : Une constante.

Chapitre II

Généralités sur les matériaux électrotechniques

II.1 Introduction

Les machines électriques, connues depuis le siècle dernier, ainsi que l'ensemble du matériel électrique évoluent vers une plus grande compacité, grâce à l'amélioration des matériaux qui les constituent.

II.2 classification des matériaux

Les matériaux [3] d'électrotechniques sont classés suivant leurs applications. On les distingue comme suit :

- Matériaux conducteurs.
- Matériaux magnétiques.
- Matériaux isolants.
- Matériaux semi-conducteurs.

Dans le présent chapitre nous nous intéressons aux matériaux conducteurs, matériaux magnétiques et matériaux isolants.

II.3 Les matériaux conducteurs

II.3.1 Bons conducteurs

Certains matériaux offrent une faible résistance au passage du courant, ce sont des matériaux bons conducteurs.

De tous les solides, l'argent est le meilleur conducteur d'électricité mais, en raison de son coût prohibitif, son usage est très rare.

Dans les applications générales, le matériau le plus employé est le cuivre. On utilise les conducteurs d'aluminium dans les lignes de transport d'énergie.

II.3.2 formes des conducteurs

Suivant leurs applications, les conducteurs prennent une grande variété de formes. On les rencontre sous forme de fils de section ronde, carrée ou plate, sous forme de câbles toronnés et sous forme de barre.

Les conducteurs se présentent généralement sous forme de fil de section ronde obtenu directement par tréfilage.

Les fils bon conducteurs de section carrée et rectangulaire sont employés pour les enroulements à grande section des transformateurs et des machines tournantes. L'emploi de tels conducteurs dans les moteurs et génératrices permet une meilleure utilisation du volume des encoches.

II.3.3 propriétés

Nous ne retiendrons [3] que les propriétés plus particulièrement nécessaires en électrotechnique.

III.3.3.1 propriétés physiques et chimiques

◆ Propriétés physiques

- **La masse volumique** : C'est la masse de l'unité de volume d'un matériau, on l'exprime par kg/m^3 ou bien g/cm^3 .
- **Point de fusion** : un matériau à l'état liquide, toujours à la même température, il est exprimé en degré Celsius.
- **Dilatation** : une barre chauffée s'allonge d'autant qu'elle est portée à une température plus élevée.

On définit le coefficient de dilatation α pour chaque matériau comme suit.

Connaissant la longueur d'une barre à 0°C , on peut déterminer sa longueur à une température T° par la relation suivante :

$$L_T = l_0(1 + \alpha\Delta T) \quad (\text{II-1})$$

Δ_T Différence de température entre 0° et T°

l_0 : Longueur à 0°C

L_T : Longueur à $T^\circ \text{C}$

◆ Propriétés chimiques

La plupart [6] des métaux sont attaqués par des acides, alors que les matières plastiques sont insensibles aux agents chimiques.

II.3.3.2 propriétés mécaniques

La propriété mécanique [7] peut être distinguée par application d'un effort de traction progressif sur une éprouvette, qui a une longueur précise d et une section S avant l'exécution de l'effort.

◆ Résistance à la traction

La résistance des conducteurs à la traction joue un rôle important lors de la pose des lignes aérienne et du bobinage des enroulements. D'abord il ne faut pas que la tension subie par le conducteur dépasse la tension de la traction.

Si on augmente la force de traction F exercée sur un fil métallique tout en observant son allongement, on obtient une série de valeurs que l'on peut porter sur le graphe suivant (figure II-1).

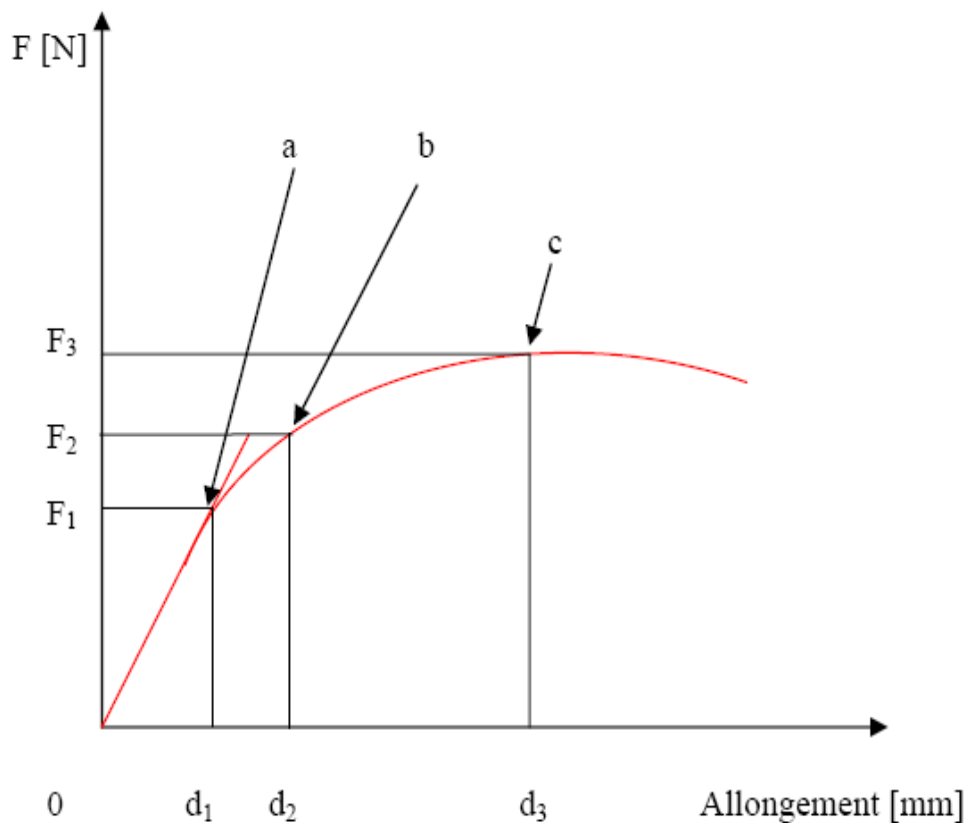


Fig. II.1 : Allongement d'un fil conducteur en fonction de la force de traction.

Sur cette courbe, on indique trois points importants a, b et c correspondant respectivement aux forces F_1 , F_2 et F_3 .

Au fur et à mesure que la force de traction croît de 0 à F_1 , le fil s'allonge d'une distance d_1 dans la partie 0a de la courbe, l'allongement d est proportionnel à la force de traction exercée et le fil se comporte comme un ressort, il prend sa forme originale dès que la traction cesse. C'est la zone élastique.

La force F_2 au point b correspond à la limite élastique, si l'on continue à augmenter la force de traction, le fil s'étire rapidement jusqu'au point c situé au sommet de la courbe, la tension F_3 correspondant est la tension de rupture et elle est sensiblement supérieure à la force F_2 . C'est la zone plastique.

On appelle résistance limite élastique, le rapport $\frac{F_2}{S}$ exprimé en Méga-pascal (MPa)

$$R_e = \frac{F_2}{S} \quad (\text{II-2})$$

Avec : R_e : Résistance limite élastique ;

S : Section du conducteur ;

F_2 : Force appliquée.

On appelle la contrainte de rupture, le rapport, $\frac{F_3}{S}$ exprimé en Méga-pascal(MPa).

II.3.3.3 propriétés électriques

◆ Résistance d'un conducteur

A une température donnée [7], la résistance d'un conducteur dépend :

- De sa longueur ;
- De sa section ;
- De la résistivité de la substance qui le constitue.

La formule qui donne la relation entre la résistance d'un conducteur et les trois facteurs énumérés est la suivante :

$$R = \rho \cdot \frac{l}{s} \quad (\text{II-3})$$

Avec : R : Résistance du conducteur en Ohms (Ω) ;

ρ : Résistivité de la substance en Ohms-mètres ($\Omega.m$) ;

l : Longueur du conducteur en mètre (m) ;

S : Section du conducteur en mètre carré (mm^2).

Le facteur ρ qu'on appelle résistivité est précisément ce qui caractérise l'opposition plus ou moins grande qu'offre un matériau au passage du courant, il varie suivant la température et la nature de la substance dont est constitué le conducteur.

II.4 Matériaux magnétiques

Le fonctionnement des machines électriques [6] est basé sur la production d'un champ magnétique, 50 % du poids de ces machines est due à des matériaux magnétiques. Ces derniers réagissent différemment lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique.

II.4.1 Définition des matériaux magnétiques

Chaque matériau est caractérisé par une excitation magnétique (H) et une induction magnétique (B), lorsqu'on augmente l'excitation H dans une bobine munie d'un noyau magnétique, l'induction B varie selon une courbe appelée courbe de première aimantation, représentée sur la figure II.2.

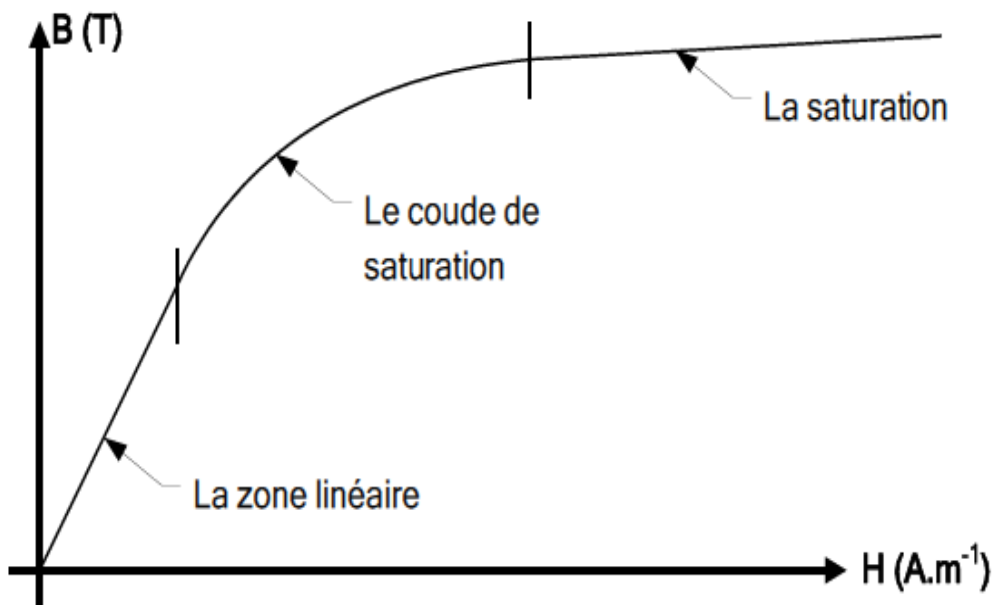


Fig. II.2 : courbe de première aimantation.

II.4.2 les différents matériaux magnétiques

a. Les ferromagnétiques

Ces matériaux [7] canalisent les lignes de champ. Ces corps s'aimantent fortement en présence d'une excitation magnétique. Une saturation du champ magnétique (augmentation plus faiblement) apparaît pour de fortes excitations magnétiques.

Les métaux ferromagnétiques sont très utilisés en électrotechnique, principalement le Fer et ses alliages, pour la construction des circuits magnétiques des machines électriques (générateurs, moteur et transformateurs).

b. Les paramagnétiques

Ce sont des métaux qui s'aimantent dans le sens du champ comme les métaux ferromagnétiques, mais leur induction reste faible par rapport au champ, leurs perméabilité relative est constante et très légèrement supérieur à 1.

Ce groupe comprend quelque gaz, l'oxygène par exemple, un certain nombre de métaux : Aluminium, Chrome, Manganèse, Sodium et grand nombre de sel.

c. Les diamagnétiques

Ce sont des substances qui s'aimantent très faiblement en sens inverse du champ magnétique. Ce groupe, comprend de nombreux métaux : Cuivre, Plomb, Or, Argent...

II.4.3 Les tôles FeSi à grain non orientés

Dans ces tôles [8] les cristaux qui sont très gros et bien visible à l'œil nu ne présentent pas la même orientation.

II-4.3.1 Composition

Les alliages FeSi actuels en tôles à grain non orientés contiennent de 0,1% à 3,2% de silicium. L'ensemble des considérations techniques (niveau des pertes, facilité de découpage...) ou économiques a conduit à proposer, suivant l'application, deux classes de tôles de composition voisines, mais de présentation sensiblement différente.

A- Tôles semi-finies

Elles sont livrées à l'utilisateur à l'état non traité. Ces tôles correspondent souvent à des nuances moins chargées en silicium et dans des épaisseurs plus fortes. Elles sont utilisées principalement dans les petits moteurs à fonctionnement intermittent (électroménager et accessoires d'automobile).

Ces tôles après découpage en pièces doivent être recuites par l'utilisateur dans des chaudières à 720°C - 800°C pendant 5 à 10 minutes. Ce recuit se termine sous atmosphère oxydante qui développe un film d'oxyde suffisant pour isoler les tôles entre elles.

B- Tôles finies

Elles sont livrées à l'utilisateur prêt à l'emploi. Elles possèdent toutes leurs caractéristiques magnétiques et il n'est pas nécessaire de les soumettre à un traitement thermique après découpage chez le constructeur de machines électriques. Elles ont été également revêtues d'une fine couche isolante sur chaque face.

Le type d'isolant et son épaisseur dépendent de la machine à construire, qui sont données par le tableau II.1 (voir annexe).

Les caractéristiques normalisées et généralisées de ces tôles sont données dans les tableaux II.2 et II.3 (voir annexe).

I.4.3.2 Fabrication des tôles à grains non orientés

Le laminage à froid permet d'avoir des tôles avec une grande régularité au niveau de l'épaisseur, et un excellent état de surface qui permet d'obtenir un bon coefficient de remplissage des circuits magnétiques.

II.5 Isolation

La qualité, de l'isolement des machines détermine leur fiabilité et pour cette raison on prête une sérieuse attention au choix de l'isolation et à sa fabrication [3]. Le rôle de l'isolation ne se limite pas à sa rigidité diélectrique. Vu que les pertes dans le cuivre sont évacuées par l'isolation dans le milieu ambiant, il faut penser non seulement à la rigidité diélectrique et à la résistance à la chaleur de l'isolation, mais aussi à sa conductibilité thermique ce qui est obtenu en grande partie par imprégnation et compoundage [8]. La résistance mécanique, l'étanchéité à l'humidité, et d'autres propriétés jouent un rôle important.

A l'heure actuelle, on utilise plusieurs types de matériaux isolants, organiques tels que le coton, la soie, le papier et autre matériaux similaires parfois imprégnés d'huile. On utilise aussi des matières inorganiques comme le mica, la fibre de verre,...

Pour assurer une bonne isolation des machines il faut réaliser les isolations suivantes :

◆ Isolation des conducteurs

Pour les machines [3] de faible tension et de petite puissance on utilise des conducteurs filaires « émaillés » ; pour les machines de haute tension de moyenne et de grande puissance, on utilise des barres conductrices isolées par du papier, mica, verre, bakélite, résine (enrobage ou imprégnation).

◆ Isolation des bobines par rapport à la masse

Elle est réalisée en plaçant dans les encoches, avant toute opération d'insertion du bobinage, une feuille de matériau isolant en forme de U qui épouse tout le périmètre utile de l'encoche.

◆ Isolation entre phase

Dans le cas des encoches à une seule couche l'isolation entre spire a lieu dans la région des têtes de bobines et connexions d'entrée/sortie. Les isolations entre bobines sont réalisées par l'interposition d'isolant en feuille semblable à celui qui a servi à isoler les encoches. Dans le cas des encoches, si le pas d'enroulement est inférieur à $2/3$, toutes les encoches contiennent des conducteurs appartenant à des phases différentes. Il est alors évidemment indispensable d'isoler, dans les encoches elles-mêmes ces bobines. Cela est en général réalisé par l'interposition, entre les deux plans de bobinage, d'une feuille d'isolant en forme de U , de dimensions bien sur réduite par rapport à la forme U .

II.6 L'aluminium et ses alliages

L'aluminium [9] est un métal relativement jeune par rapport à des métaux comme le fer et le cuivre. Le chimiste français Henri Sainte-Claire Deville, qui a présenté les premiers lingots d'aluminium pur à l'Exposition universelle de Paris, en 1855, le décrit comme « un métal blanc, inaltérable comme l'argent... et qui présente la singulière propriété d'être plus léger que le verre ».

II.6.1 Les atouts de l'aluminium**◆ Sa légèreté**

L'aluminium est le plus léger de tous les métaux usuels, sa masse spécifique est de 2700 kg.m^{-3} , soit presque 3 fois moindre que celle des aciers.

◆ Sa conductivité électrique

La conductivité électrique de l'aluminium est de l'ordre des 2/3 de celle du cuivre. C'est pourquoi l'aluminium non allié et certains alliages sont utilisés comme conducteurs sous forme de tubes et de barres dans de nombreuses applications électriques : postes de connexion, barres de distribution, machine asynchrone...

◆ Sa conductivité thermique

L'aluminium non allié a une excellente conductivité thermique, de l'ordre de 60% de celle du cuivre. La conductivité des alliages dépend de leur composition et de leur état métallurgique.

◆ Résistance à la corrosion

L'aluminium est utilisé de façon courante par les architectes, aussi bien dans les édifices publics que pour les habitations individuelles. Tout en offrant de nombreuses possibilités de formes et de couleurs, les structures de bâtiments en aluminium demandent peu d'entretien et résistent bien au temps, aux ambiances marines, à la pollution urbaine et industrielle..

◆ Sa solidité

L'aluminium, allié à d'autres métaux ou traité à froid, se révèle aussi résistant que l'acier. Nous le retrouvons, par exemple, aujourd'hui dans les blocs moteurs, les trains d'atterrissage, les ponts...

◆ Un matériau recyclable

L'aluminium peut être recyclé de nombreuses fois sans être altéré. Le recyclage des produits en aluminium contribue à la protection de l'environnement : préservation des réserves naturelles de bauxite, et contribution à la diminution des dépenses énergétiques puisque le recyclage utilise 20 fois moins d'énergie que pour la production d'aluminium primaire.

II.6.2 Caractéristique d'aluminium pur

Désignation	Conductivité électrique $m / \Omega \cdot mm^2$	Caractéristique mécaniques			Composition chimique en %				
		Résistance à la rupture $da N/mm^2$	Allongement à la rupture % min.	Dureté BRINELL HB	Al	Fe	Si	Zn	Cu
Aluminium Al 99,5H	30 - 34	14- 18	4 - 5	75	99,5	0,35	0,25	0,05	0,02

Chapitre III
Dimensionnement et relation de
base d'un moteur asynchrone

III.1 Introduction

Dans ce chapitre [10], nous déterminons toutes les dimensions géométriques, magnétiques et électriques du stator et du rotor ainsi que l'épaisseur de l'entrefer d'une machine asynchrone triphasée. Tout en respectant les critères liés à sa construction, à son exploitation économique, ainsi qu'à sa maniabilité.

III.2 Formule de dimensionnement Général

III.2.1 La puissance conventionnelle de calcul

C'est la puissance [10] transmise du stator vers le rotor à travers l'entrefer lors du fonctionnement du moteur. Elle est définie comme suit :

◆ Force électromotrice de la phase statorique

$$E_1 = K_e \cdot V_1 \quad (\text{III-1})$$

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

◆ Puissance absorbée par le moteur

$$P'_n = m_1 \cdot E_1 \cdot I_{1Na} \cdot 10^{-3} \quad (\text{III-3})$$

$$P'_n = K_e \cdot P_s \quad (\text{III-4})$$

$$P'_n = \frac{K_e \cdot P_u}{\eta_{Na} \cdot \cos \varphi_{Na}} \quad (\text{III-5})$$

◆ Puissance apparente au stator

$$P_s = \frac{P_u}{\eta_{Na} \cdot \cos \varphi_{Na}} \quad (\text{III-6})$$

Avec : E_1 : Force électromotrice de la phase statorique donné en volt [V]

K_e : Coefficient tenant compte de la chute de tension dans la phase statorique.

V_1 : Tension d'alimentation par phase [V].

I_{1Na} : Courant nominal assigné par phase [A].

m_1 : Nombre de phase statorique.

P_s : Puissance apparente au stator [kVA].

P_u : Puissance utile nominal assignée [kW].

η_{Na} : Rendement nominal assigné.

$$E_1 = 4K_{f1} \cdot N_1 \cdot K_{w1} \cdot f_1 \cdot \phi_\delta \quad (\text{III-7})$$

$$\phi_\delta = \alpha_i \cdot \tau \cdot I_i \cdot B_\delta \cdot 10^{-6} \quad (\text{III-8})$$

$$E_1 = \frac{4\alpha_i \cdot K_{f1} \cdot K_{w1} \cdot \pi \cdot D_l}{2P \cdot N_1 \cdot f_1 \cdot l_i \cdot B_\delta \cdot 10^{-6}} \quad (\text{III-9})$$

Avec : τ : Pas polaire [mm].

K_{f1} : Coefficient de forme de l'enroulement statorique.

α_i : Coefficient de recouvrement polaire.

K_{w1} : Coefficient de bobinage de l'enroulement statorique.

N_1 : Nombre de spires par phase au stator.

f_1 : Fréquence des grandeurs électriques statorique.

l_i : Longueur du paquet statorique [mm].

B_δ : Induction maximale dans l'entrefer [T].

Φ_δ : Flux magnétique sous un pôle [weber].

L'induction maximale dans l'entrefer B_δ caractérise l'utilisation magnétique de la machine. Car c'est elle qui détermine la f.e.m, le couple et la puissance de la machine ce qui nous amène à choisir une valeur de l'induction aussi élevée que possible, mais la saturation du fer limite notre choix.

◆ **Le rendement**

Est donnée par l'expression :

$$\eta = \frac{P_u}{P_n} \quad [\%] \quad (\text{III-10})$$

◆ **Courant nominale assigné par phase**

$$I_{1Na} = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot A_1}{2m_1 \cdot N_1} \cdot 10^{-3} \quad [\text{A}] \quad (\text{III-11})$$

A_1 représente la densité linéique de courant ou le nombre d'ampère-tour/m de périphérie d'induit. Il traduit aussi l'utilisation électrique de la machine qui ne doit pas être excessive pour ne pas dépasser l'échauffement admissible.

$$P_n' = 4\alpha_i K f_1 K_{w1} \frac{\pi D_1}{2P} N_1 f_1 l_i B_\delta \cdot 10^{-6} \frac{\pi D_1 A_1}{2m_1 N_1} 10^{-3} \cdot 10^{-3} \quad (\text{III-12})$$

$$P_n' = \pi^2 \cdot \alpha_i \cdot K f_1 K_{w1} f_1 / P \cdot D_1^2 \cdot A_1 \cdot B_\delta \cdot l_i \cdot 10^{-2} \quad (\text{III-13})$$

$$l_i = \frac{1}{\pi^2} \cdot \frac{P_n' \cdot 10^{12}}{\alpha_i \cdot K \cdot f_1 \cdot K_{w1} f_1 / P \cdot D_1^2 \cdot A_1 \cdot B_\delta} \quad (\text{III-14})$$

$$f_1 = \frac{P n_1}{60} \quad (\text{III-15})$$

n_1 : Vitesse de rotation au synchronisme en tours/min.

$$l_i = \frac{60}{\pi^2} \cdot \frac{P_n' \cdot 10^{12}}{\alpha_i \cdot K \cdot f_1 \cdot K_{w1} \cdot n_1 D_1^2 \cdot A_1 \cdot B_\delta} \quad (\text{III-16})$$

$$l_i = 6,1 \frac{P_n' \cdot 10^{12}}{\alpha_i \cdot K \cdot f_1 \cdot K_{w1} \cdot n_1 D_1^2 \cdot A_1 \cdot B_\delta} \quad (\text{III-17})$$

On remarque à travers la formule de dimensionnement générale que les dimensions de la machine, sont d'autant plus petites que les valeurs B_δ et A_1 sont plus élevées ; mais

cela ne peut se faire sans saturer le circuit magnétique et chauffer la machine puis la détruire parfois.

Néanmoins, on peut envisager, avec l'amélioration des systèmes de refroidissement et de la tenue en température des isolants, des valeurs élevées de la densité linéique de courant A_1 et des valeurs modérées de l'induction B_δ et cela sans endommager la machine.

◆ *Vitesse de rotation du moteur*

Est donnée par l'expression :

$$N_2 = N \cdot (1 - g) \quad (\text{III-18})$$

◆ *Le facteur de puissance du moteur*

Est donnée par l'expression :

$$\cos \varphi_2' = \frac{I_{1Na}}{I_1} \quad (\text{III-19})$$

Avec : I_1 : Courant absorbé par le moteur.

◆ *Glissement nominale*

Est donnée par l'expression :

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} \quad [\%] \quad (\text{III-20})$$

Avec : N_s : Vitesse de rotation de champ tournant ;

N : Vitesse de rotation de rotor.

III.3 Facteur de géométrie λ

λ : Décrit la géométrie de la machine et il est exprimé par la formule suivante : $\lambda = \frac{l_i}{\tau}$

Lorsque λ est petit la machine aura un bon refroidissement et le montage des enroulements plus facile mais aura un grand diamètre donc un grand flux par rapport à la longueur, et cela conduit à une consommation très élevée du cuivre [11].

Lorsqu'il est élevé le moment d'inertie de la machine est plus petit et la quantité de cuivre pour les parties frontales est plus faible. En résumé, les considérations qui président à la détermination des dimensions principales d'une machine asynchrone sont d'ordre économique (prix de revient, rendement), d'ordre mécanique (moment d'inertie) et surtout d'ordre thermique : les restrictions les plus substantielles sont imposées par la stabilité thermique des isolants. λ doit être dans l'intervalle [0,5 – 0,8].

III.4 Dimensionnement de la feuille statorique

III.4.1 Choix du nombre d'encoches par pôles et par phase q

Pour une machine asynchrone de puissance 5,5 kW et de pas polaire τ proche de 6 cm, il est préférable de prendre $q=3$ et $q=4$ [10].

Pour savoir le nombre d'encoches par pôles et par phases qui répond mieux à notre cahier de charge, il est utile de faire le calcul avec $q=3$ et $q=4$, mais cela exigerait un temps considérable lors de l'exécution du programme sur micro ordinateur.

C'est pour quoi on s'entient à $q=3$ qui est le nombre d'encoches par pôle et par phases pris par Electro-Industrie.

III.4.2 Nombre d'encoches au stator

Il est donné par l'expression :

$$Z_1 = 2Pq m_1 = 4 \times 3 \times 3 \quad (\text{III-21})$$

$$Z_1 = 36 \text{ encoches.}$$

III.4.3 Type d'enroulement au stator

Pour les machines asynchrone de puissance inférieure à 100 kW, l'enroulement statorique est du type concentrique à une seule couche [10].

Il existe deux types d'enroulements concentriques :

Enroulement concentrique à une seule couche.

Enroulement concentrique à double couches.

III.4.4 Type d'encoche

Pour les machines asynchrones de puissance inférieure à 100 kW et de tension par phase inférieure à 1000 V, on utilise les encoches demis- fermées [10].

III.4.5 Nombre de conducteur par encoches U_{enc}

Il est défini comme étant le nombre de conducteur occupant une encoche. Il est donné par :

$$U_{enc} = \frac{A_1 \cdot t_1 \cdot a_1}{I_{1Na}} \cdot 10^{-3} \quad (\text{III-22})$$

a_1 : Nombre de voies d'enroulement, dans notre cas $a_1 = 2$.

t_1 : Pas dentaire [mm].

I_{1Na} : Courant nominal assigné par phase.

U_{enc} doit être arrondi s'il n'est pas entier puis recalculé.

$$A_1 = \frac{I_{1Na} \cdot U_{enc}}{t_1} \cdot 10^3 \quad (\text{III-23})$$

$$l_i = 6,1 \frac{P_N' \cdot 10^{12}}{\alpha_i \cdot K \cdot f_1 \cdot K_{w1} \cdot n_1 \cdot D_1^2 \cdot A_1 \cdot B_\delta} \quad (\text{III-24})$$

III.4.6 Section du conducteur statorique S_2

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$S_2 = I_{1Na} / J_1 \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{III-25})$$

Et: $4 < J_1 < 14 \text{ A/mm}^2$

Si la section S_2 calculée est supérieure à $1,8 \text{ mm}^2$ on doit deviser celle-ci en section élémentaire, et comme la section des conducteurs est normalisée ; on choisira la section standard la plus proche de celle calculée :

$$J_1 = \frac{I_{1Na}}{S_2} \quad (\text{III-26})$$

J_1 : Densité de courant statorique. Elle est donnée en fonction du diamètre extérieur.

I_{1Na} : Courant nominal assigné [A].

Les sections standard sont données dans le tableau III.1 (Voir annexe).

III.4.7 Nombre de spires en série par phase N_1

$$N_1 = P.q.U_{enc} \quad (\text{III-27})$$

III.4.8 Largeur de la dent statorique b_{z1}

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 comme suit :

$$b_{z1} = \frac{t_1}{K_{fer} \cdot B_{z1}} \cdot B_\delta \quad [\text{mm}] \quad (\text{III-28})$$

Et : $1,75 < B_{z1} < 1,95 \text{ T}$.

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

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

$= 0,97$ pour l'isolation en vernie.

B_{z1} : Induction maximale dans la dent statorique en [T], elle est donnée par le tableau III.2 (voir annexe).

III.4.9 Hauteur de la culasse statorique h_{c1}

Elle est donnée par la formule suivante :

$$h_{c1} = \frac{\alpha_i \cdot \tau}{2K_{fer} \cdot l_i \cdot B_{C1}} \cdot B_\delta \quad [\text{mm}] \quad (\text{III-29})$$

Et : $1,5 < B_{C1} < 1,65 \text{ T}$.

Avec : B_{C1} : Induction magnétique dans la culasse du stator en [T], donnée par le tableau III.2 (voir annexe).

III.4.10 Hauteur de la dent statorique h_{z1}

Elle est donnée par la formule suivante :

$$h_{z1} = 0,5(D_{ext} - D_1) - h_{c1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III-30})$$

D_{ext} : Diamètre extérieur du stator [mm] ;

D_1 : Diamètre intérieur du stator [mm] ;

h_{c1} : Hauteur de la culasse statorique.

III.4.11 Largeur minimale de l'encoche

Elle est donnée par la formule suivante :

$$b'_{n1} = \pi \cdot \frac{(D_1 + 0,2h_{z1})}{Z_1} - b_{z1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III-31})$$

III.4.12 Largeur maximale de l'encoche

Elle est donnée par la formule suivante :

$$b_{n1} = \pi \cdot \frac{(D_1 + 2h_{z1})}{Z_1} - b_{z1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III-32})$$

III.4.13 Hauteur de l'encoche statorique

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

$$h_{n1} = h_{z1} - h_{f1} - h_{K1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III-33})$$

Et : h_{f1} : La hauteur de la fente d'encoche statorique, elle varie entre (1,2 – 1,8) [mm].

h_{k1} : La largeur de la clavette, elle est donnée par l'expression suivante :

$$h_{k1} = 0,5 (b'_{n1} - b_{f1}) \quad [\text{mm}] \quad (\text{III-34})$$

Et : b_{f1} : La largeur de la fente d'encoche statorique, $b_{f1} \leq 4$.

III.4.14 Surface de l'encoche S_{en}

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

$$S_{en} = 0,5(b_{n1} + b'_{n1}) \cdot h_{n1} \quad (\text{III-35})$$

III.4.15 Surface prise par l'isolation en papier imprégné

Elle est donnée par la relation suivante :

$$S_{isolant} = (b_{n1} + b'_{n1} + 2h_{n1}) \cdot e \quad (\text{III-36})$$

Avec : e : Epaisseur du papier imprégné.

III.4.16 Surface réservée aux conducteurs dans l'encoche

Elle est donnée par la formule suivante :

$$S_n = S_{en} - S_{isolant} \quad (\text{III-37})$$

III.4.17 Coefficient de remplissage

C'est le rapport entre la section des conducteurs occupant l'encoche et la section utile de l'encoche, il est donné par :

$$K_r = \frac{U_{enc} \cdot d_{is}^2}{S_n} \quad (\text{III-38})$$

Et : $0,65 < K_r < 0,75$.

Avec : U_{en} : Le nombre de conducteurs dans l'encoche.

d_{is} : Diamètre du conducteur avec l'isolation en [mm]

III.4.18 Le choix de l'entrefer

Pour des raisons mécaniques, on choisit l'entrefer aussi grand que possible, un entrefer assez grand est également avantageux pour réduire les pertes supplémentaires dans le fer [11] produites par les pulsations du champ, et de la dispersion provoquée par les champs harmoniques supérieurs. Comme il doit être aussi petit que possible afin d'avoir un facteur de puissance qui s'approche au maximum de l'unité, et un courant magnétisant minimal.

L'épaisseur de l'entrefer est liée à la puissance de la machine. Elle est donnée en fonction de la hauteur d'axe et le nombre de paires de pôles.

III.5 Dimensionnement du rotor

III.5.1 Choix du nombre d'encoches rotoriques

Pour éviter [10] ; [11], les couples parasites et les couples de vibration créés par les harmoniques des forces magnétomotrices, et le bruit magnétique qui est créé par l'attraction entre les dents du stator et les dents du rotor, ainsi que la pulsation périodique du flux, on doit choisir le nombre d'encoches du rotor différent de celui du stator [10], [11] tel que :

$(Z_1 \neq Z_2)$, $(Z_1 - Z_2 \neq \pm 2P)$ et $(Z_1 - Z_2 \neq \pm 1 + 2P)$.

III.5.2 Diamètre extérieur du rotor D_2

Elle est donnée par la formule suivante :

$$D_2 = D_1 - 2\delta \quad [\text{mm}] \quad (\text{III-39})$$

Avec : δ : Est l'épaisseur de l'entrefer [mm] ;

D_1 : Diamètre intérieur du stator [mm].

III.5.3 Forme d'encoches rotoriques

Il existe quatre types d'encoches rotoriques de formes différentes :

- 1- Encoche ovale semi-ouverte ;
- 2- Encoche ovale fermée ;
- 3- Encoche ovale fermée inversée ;
- 4- Encoche bouteille.

III.5.4 Le courant réduit du rotor

Il est donné par la formule suivante :

$$I_2' = \frac{P_u}{3.V_{n1}.\eta_{Na}} . 10^3 \quad [A] \quad (III-40)$$

Avec : P_u : Puissance utile nominale assignée [kW] ;

V_{n1} : Tension d'alimentation par phase [V] ;

η_{Na} : Rendement nominal assigné.

III.5.5 Densité de courant linéique du rotor

Elle est donnée par la formule suivante :

$$A_2 = \frac{I_2'}{I_{1Na}} . A_1 \quad (III-41)$$

Avec : A_1 : Densité linéique de courant statorique [A/m] ;

I_{1Na} : Courant nominal assigné par phase statorique [A] ;

I_2' : Courant réduit du rotor [A].

III.5.6 Courant dans l'anneau de court-circuit I_{an}

Il est donné par la relation suivante :

$$I_{an} = \frac{I_2}{K_{red}} \quad [A] \quad (III-42)$$

Avec : I_2 : courant dans la barre rotorique [A]

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

$$K_{red} = 2 \sin\left(\frac{\pi P}{Z_2}\right) \quad (\text{III-43})$$

III.5.7 Section de l'anneau de court-circuit

Elle est donnée par l'expression :

$$S_{an} = \frac{I_{an}}{j_{an}} \quad j_{an} = (0,58 \div 0,8)j_2 \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{III-44})$$

$$S_{an} = b_{an} \cdot h_{an} \quad (\text{Voir figure III-1}) \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{III-45})$$

j_{an} : Densité de courant dans l'anneau de court-circuit [A/mm^2]

III.5.8 Largeur de l'anneau

Elle est donnée par l'expression :

$$b_{an} = (0,75 \div 0,8)h_{an} \quad (\text{III-46})$$

h_{an} : Hauteur de l'anneau de court-circuit [mm]

b_{an} : La largeur de l'anneau de court-circuit [mm]

III.5.9 hauteur de l'anneau

Elle est donnée par l'expression :

$$h_{an} = (1,1 \div 1,8)h_{z1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III-47})$$

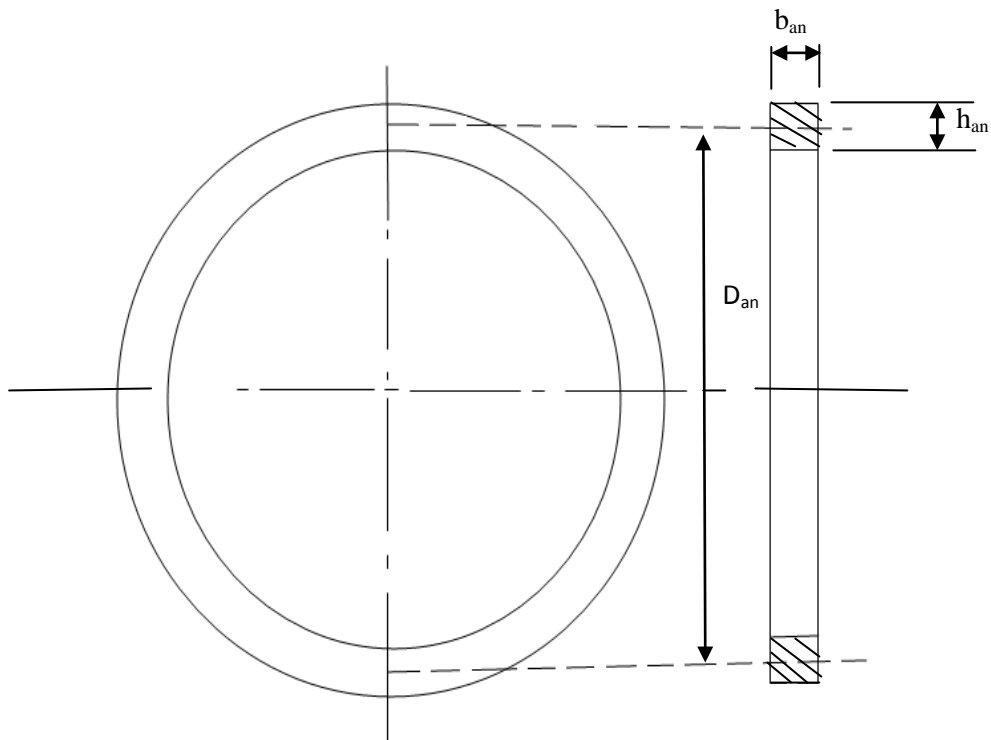


Figure : Dimensionnement de l'anneau de court-circuit

III.5.10 Diamètre inférieur de l'encoche rotorique

Il dépend du type d'encoche choisi :

- Pour les encoches de type ovale :

$$d_{21} = \frac{[\pi(D_2 - 2h_{z2}) - Z_2 b_{z2}]}{Z_2 - \pi} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III-48})$$

- Pour l'encoche de type ovale fermée :

$$d_{21} = (0,06 \div 0,80).d_{22} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III-49})$$

III.5.11 Diamètre supérieur de l'encoche rotorique

Il dépend du type d'encoche choisi :

- Pour les encoches de type ovale :

$$d_{z2} = \frac{[\pi(D_2 - 2h_{f2}) - Z_2 b_{z2}]}{Z_2 + \pi} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III-50})$$

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

$$h_{f2} = (0,5 \div 0,7) \quad [\text{mm}]$$

- Pour l'encoche en bouteille :

$$d_{z2} = \frac{[\pi(D_2 - 2h_{z2} - 2h_{f2}) - Z_2 b_{z2}]}{Z_2 + \pi} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III-51})$$

III.5.12 Largeur de la dent rotorique

Elle est donnée par la formule suivante :

$$b_{z2} = \frac{t_2}{K_{fer} \cdot B_{z2}} B_{\delta} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III-52})$$

Avec : $1,75 < B_{z2} < 1,95T$

$$t_2 = \frac{\pi D_2}{Z_2} \quad (\text{III-53})$$

t_2 : Pas dentaire rotorique [mm]

K_{fer} : Coefficient d'empilage.

B_{z2} : induction dans la dent rotorique [T]

III.5.13 Hauteur de la culasse rotorique

Elle est donnée par la formule suivante :

$$h_{c2} = \frac{\alpha_i \tau}{2B_{c2}} B_{\delta} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III-54})$$

Et : $1,35 < B_{c2} < 1,45 T$.

Avec : B_{c2} : Induction dans la culasse rotorique [T];

τ : Pas polaire [mm] ;

B_{δ} : Induction dans l'entrefer [T] ;

α_i : Coefficient de recouvrement.

III.5.14 Hauteur de la dent rotorique

Elle est donnée par l'expression :

$$H_{z2} = 0,5(D_2 - D_{axe}) - h_{c2} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III-55})$$

$$D_{axe} = 20 \sqrt[3]{\frac{P_u}{n}} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III-56})$$

Avec : D_2 :Diamètre extérieur du rotor [mm] ;

D_{axe} : Diamètre de l'arbre du rotor [mm] ;

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

P_u : Puissance utile nominale [W] ;

n :Vitesse de rotation au synchronisme [tr /mn].

III.5.15 Hauteur de la clavette h_{K2}

On prend généralement $h_{K2} = 0,6$ m [11].

III.5.17 Largeur de la dent rotorique b_{z2}

Elle est donnée par l'expression :

$$b_{z2} = 2 \sqrt{\left(\frac{D_2 - d_2 - 2h_{k2}}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_2}{2}\right)^2} * \sin\left(\frac{\pi}{Z_2} - \arcsin \frac{d_2}{D_2 - d_2 - 2h_{k2}}\right) \quad (\text{III-57})$$

Avec :

D_2 : Diamètre extérieur du rotor [mm] ;

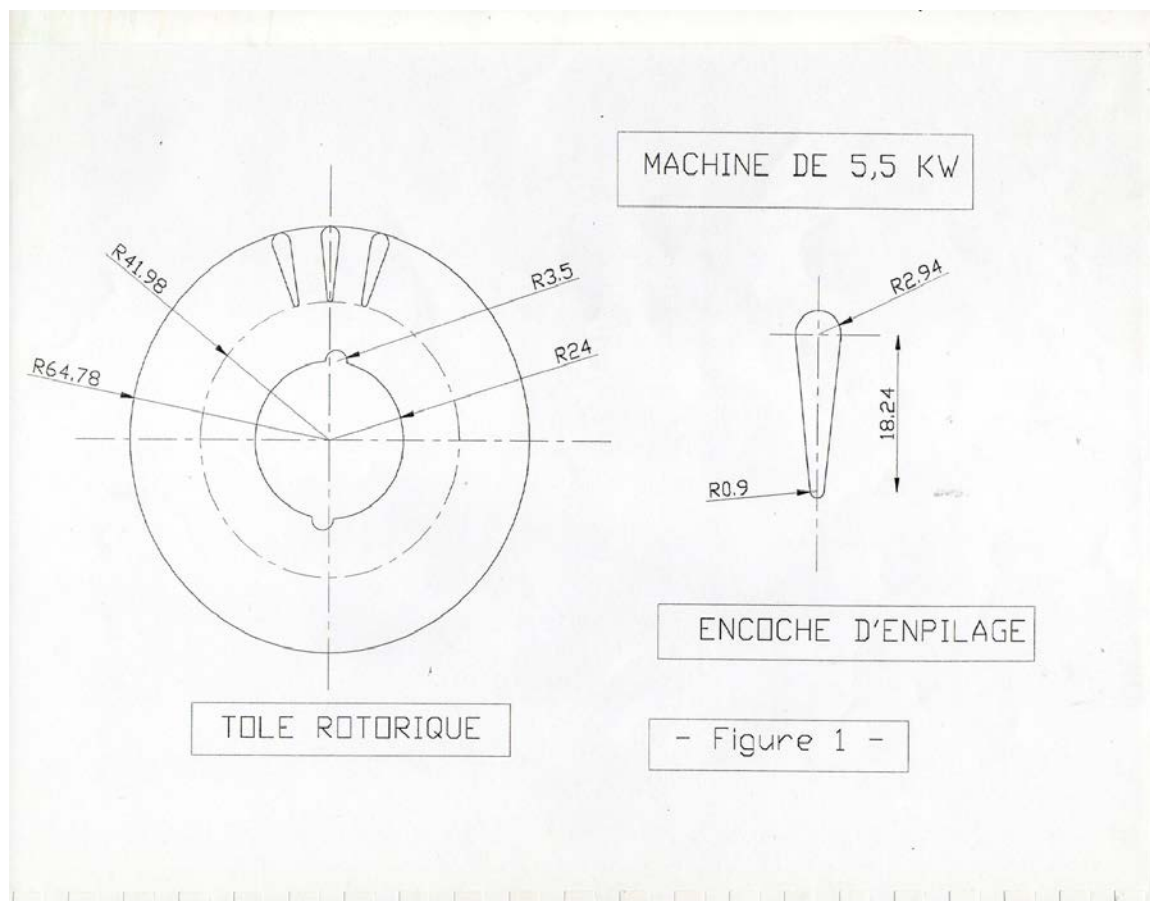
d_2 : Diamètre de la barre rotorique [mm] ;

h_{K2} : Hauteur de la clavette [mm] ;

Z_2 : Nombre de barre rotorique.

III.6 La forme géométrique du circuit magnétique de moteur asynchrone

Les schémas de construction de circuit magnétique de moteur asynchrone sont comme suit :



FigIII.1.1 : la forme géométrique de la feuille rotorique

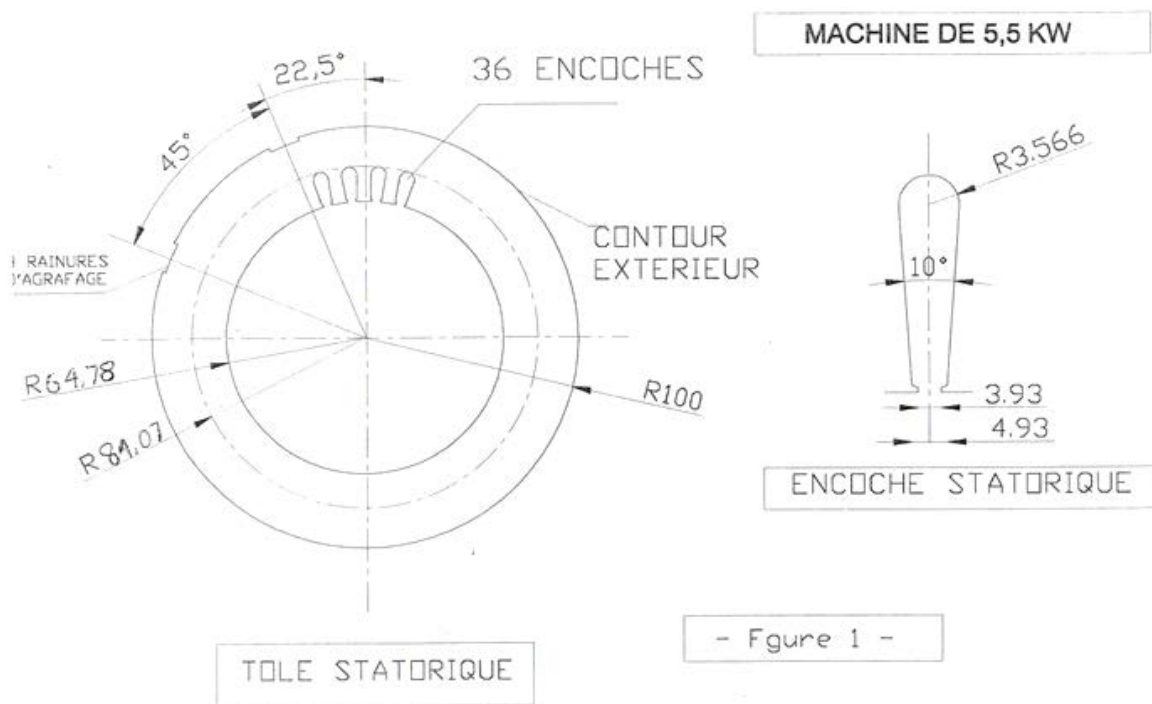


Fig III.1.2 : Forme géométrique de la feuille statorique

Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons cité les différentes équations de base pour dimensionner la feuille statorique et rotorique pour calculer une machine asynchrone triphasée.

Le prochain chapitre sera consacré à la présentation ainsi qu'à l'utilisation du logiciel SPEED PC-imd pour le dimensionnement d'une machine asynchrone.

Cahier de charge

- Puissance nominal : $P_n = 5,5 \text{ kW}$.
- Facteur de puissance : $\cos\varphi = 0,85$.
- Rendement nominal : $\eta = 84\%$.
- Tension nominal : $U_n = 380 \text{ V}$.
- Nombre d'encoche : $Z = 36$ encoches.
- Courant nominal : $I_n = 11,7 \text{ A}$.
- Couple nominal : $C_n = 36 \text{ Nm}$.
- Nombre de phase : $m = 3$.
- Nombre de paires de pôle : $2P = 4$.
- Hauteur d'axe : $h = 130 \text{ mm}$.
- Fréquence de courant du l'enroulement : $f = 50 \text{ Hz}$.
- La vitesse de synchronisme : $n = 1500 \text{ tr/mn}$.
- Classe d'isolation : (F).
- Indice de protection : IP54.
- Type d'enroulement : enroulement concentrique à double coches.
- Diamètre intérieur $D_1 = 64,78 \text{ mm}$.
- Diamètre extérieur $D_{\text{ext}} = 100 \text{ mm}$.
- Épaisseur d'isolation pour le stator : est entre (0,3 ÷ 0,5).
- Épaisseur d'isolation pour le rotor : est entre (0,3 ÷ 0,5).

Chapitre IV
Utilisation du logiciel Speed PC-IMD
pour dimensionnement d'une machine asynchrone

IV.1 Introduction

SPEED est l'outil de dimensionnement de moteurs électriques le plus avancé sur le marché, il dispose de nombreux éditeurs permettant à l'utilisateur de définir la géométrie, le bobinage ainsi que la commande de la machine à modéliser [12]. De plus, il lui permet de visualiser les grandeurs caractéristiques telles que le couple, la vitesse, les courants et tensions, les pertes, les diagrammes équivalents ...

Grâce à une bibliothèque complète (types de moteurs, d'encoches, de barres, schéma de bobinage, commande, ...), un moteur peut être facilement et rapidement dimensionné à partir de ses paramètres caractéristiques [12].

Actuellement des interfaces d'automation sont fournies dans PC-imd, PC-bdc, PC-srd, PC-dcm, PC-wfc, PC-lpm et à un moindre degré dans les bases de données d'acier et d'aimant. Dans notre cas nous nous intéressons à PC- imd.

▪

Fig IV.1 : Dimensionnement des moteurs électriques.

IV.2 Définition de PC-IMD

PC-imd [12] est destiné à la conception et le calcul de moteurs à induction. Il est basé sur la théorie classique du moteur à induction, avec quelques extensions de cette théorie développée par le Laboratoire SPEED et ses associés. La conception à base de PC- imd est interactive et rapide.

Cependant, PC- imd ne fournit pas les dimensions optimisées de la machine, par lui-même. PC-imd est conçu comme un outil de calcul plutôt qu'un programme spécialisé.

IV.3. Utilisation de PC-imd

On peut [12] utiliser PC-imd dans les cas suivants:

1. Conception et étude des performances des machines à induction et leur commande;
2. Conception préliminaire ;
3. Effectuer des calculs de conception pour des gammes entières de produits de moteur à induction.

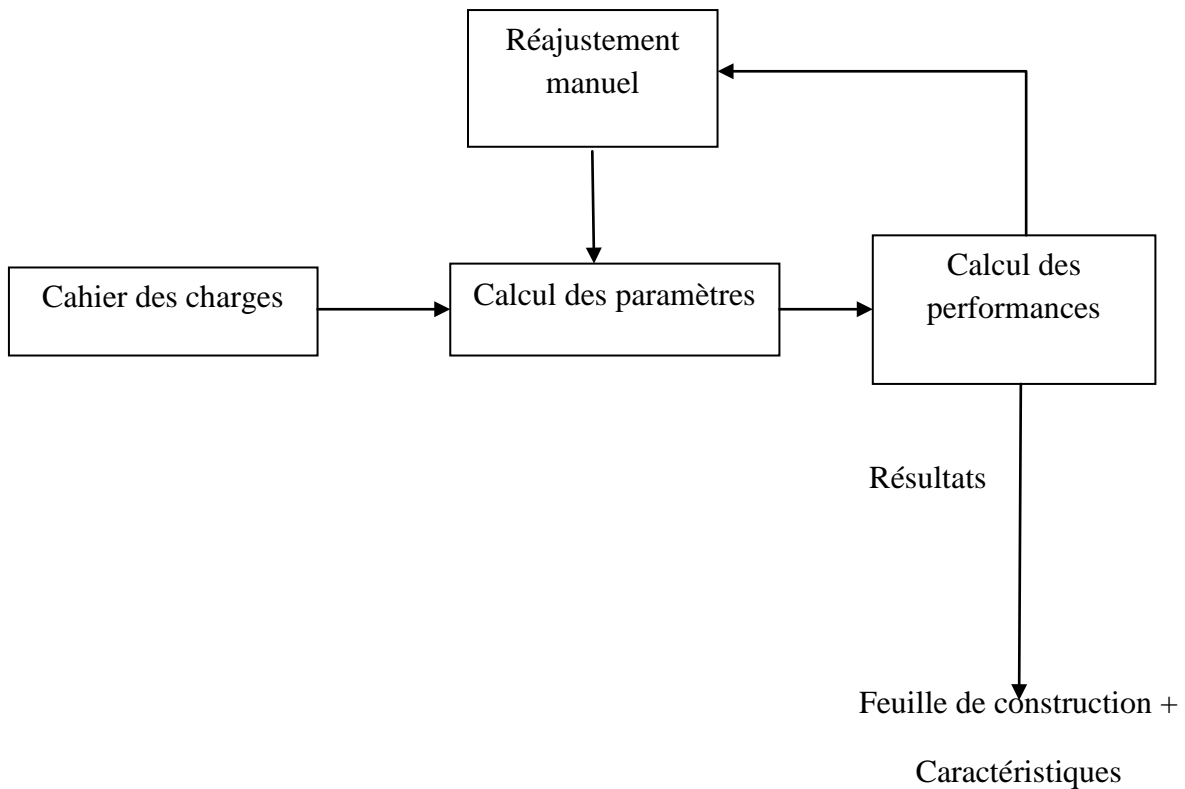


Fig IV.2 : Processus de conception en boucle.

IV.4. Les différentes étapes de PC - imd

IV.4.1. Outline Editor

Cette phase est dédiée au dimensionnement géométrique du moteur, en particulier la section transversale et les dimensions axiales. Dans cette partie, nous nous intéresserons au dimensionnement des feuilles statorique et rotorique.

4.1.1. Dimensionnement du stator

Pour dimensionner la feuille statorique, il suffit de cliquer sur n'importe quel paramètre pour introduire sa valeur. Cette dernière est calculée en utilisant la méthode classique ; par exemple, pour la largeur de la dent statorique (TW-S), il suffit d'appliquer la formule (III-28) et le rayon extérieur du stator(Rad3). Le résultat est alors, tel que donné par la figure suivante :

»

Fig IV.3 : Forme géométrique de la feuille statorique.

IV. 4.1.2. Dimensionnement du rotor

Après avoir terminé la partie précédente, on clique sur le « **rotor only** » pour dimensionner la feuille rotorique, une interface graphique apparaît. On procède de la même manière que pour le stator. Voir la figure suivante :

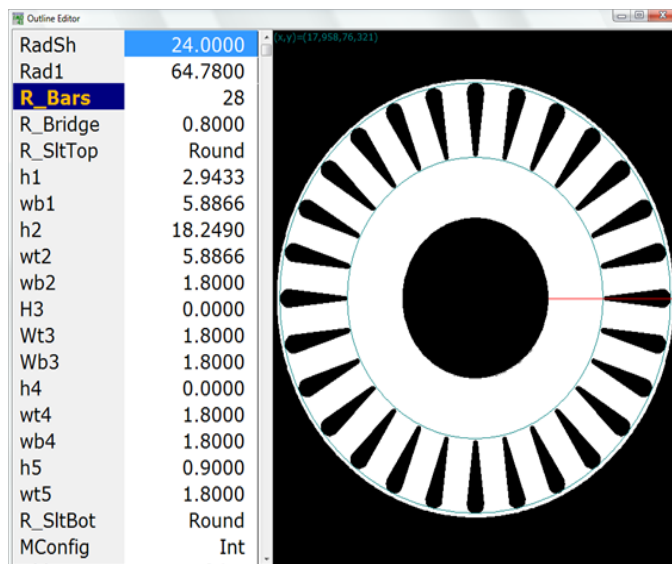


Fig IV.4 : Forme géométrique de la feuille rotorique.

A la fin de ces deux étapes, on peut visualiser les deux feuilles statorique et rotorique simultanément, en cliquant sur **Full moteur**, comme le montre la figure suivante :

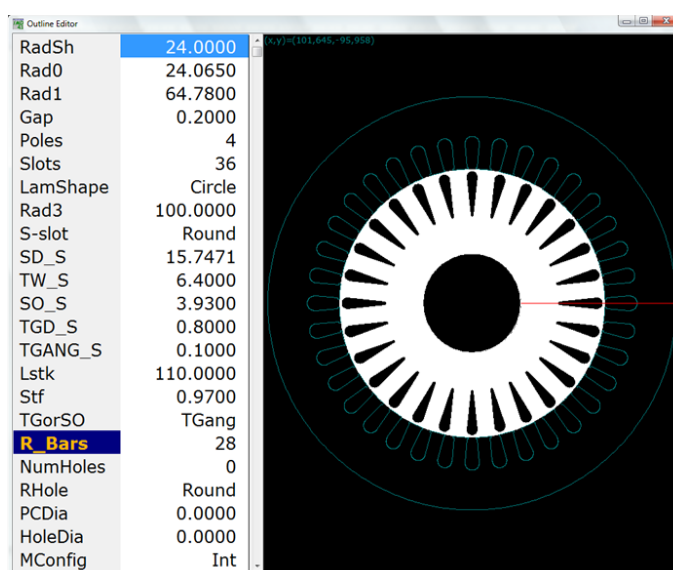


Fig IV.5 : Forme géométrique du moteur.

IV.4.2. Template Editor, Ted

Dans le PC – imd, on a de nombreux paramètres d'entrée, comme l'éditeur plan affiche uniquement les paramètres géométriques (dimension), nous avons besoin alors, d'un éditeur modèle (*Template Editor*) pour afficher les paramètres non géométriques.

Cette étape est composée de plusieurs parties : **Main, Winding, Rotor, Losses, Thermal, Test data, Simulation** et **settings** ; chaque partie a ses propres paramètres.

Toutefois, on ne peut pas vérifier la validité des paramètres définis jusqu'à ce qu'une analyse complète soit effectuée. Cela est fait dans le module *Analysis*. Dans la figure suivante est illustré le menu principal du Template editor.

Fig IV.6 : Interface principale de Template editor.

Cette interface est composée de plusieurs sous-interfaces, on prend quelques exemples :

- Winding parameters (paramètres d'enroulement) : est donnée par la figure suivante :

r

Fig IV.7 : Interface de paramètre d'enroulement.

- Rotors parameters : est données par la figure suivante :

r

Fig IV.8 : Interface de paramètre du rotor.

IV.4.3. Winding Editor

PC-imd possède un éditeur spécialisé pour la visualisation et la configuration d'un enroulement du stator, cette partie est composée de plusieurs sous-interfaces : **ONE PHASE**, **ALL PHASES**, **MMF**, **HARMONICS**, **WDG FACTORS** et **GORGE**.

- **ONE PHASE** : dans cette partie, on détermine le schéma de bobinage d'une seule phase. Il est représenté sur la figure suivante :

Fig IV.9 : Schéma de bobinage d'une phase.

- **ALL PHASES** : cette figure représente le schéma du bobinage des trois phases.

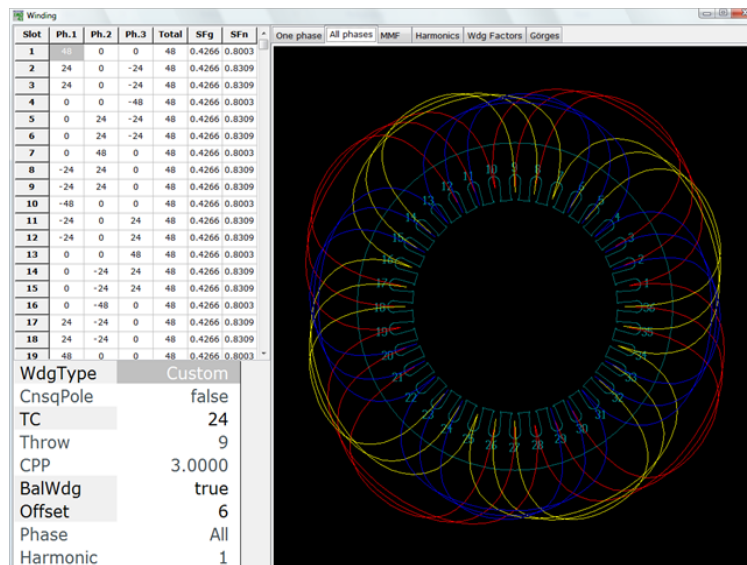


Fig IV.10 : Schéma de bobinage des trois phases.

- **MMF** : Cette figure montre la force magnétomotrice à travers l'entrefer. Cette dernière est déterminée en considérant que l'acier est infiniment perméable. De plus, on suppose que le l'enroulement est composé de courants filamenteux.

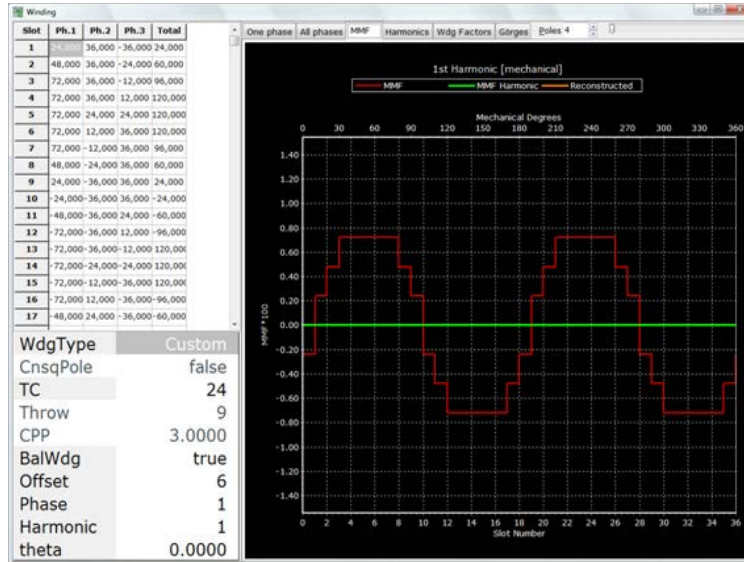


Fig IV.11 : Schéma de la force magnétomotrice.

- **HARMONICS** : Dans le menu Harmonic, le contenu harmonique de la fmm est déterminé. Les harmoniques peuvent être déterminés suivant les fréquences électriques ou mécaniques. La figure suivante donne les harmoniques mécaniques :

■

Fig IV.12 : Interface des harmoniques mécaniques.

- **WDG FACTORS** : Les facteurs d'enroulement sont donnés en fonction des harmoniques.

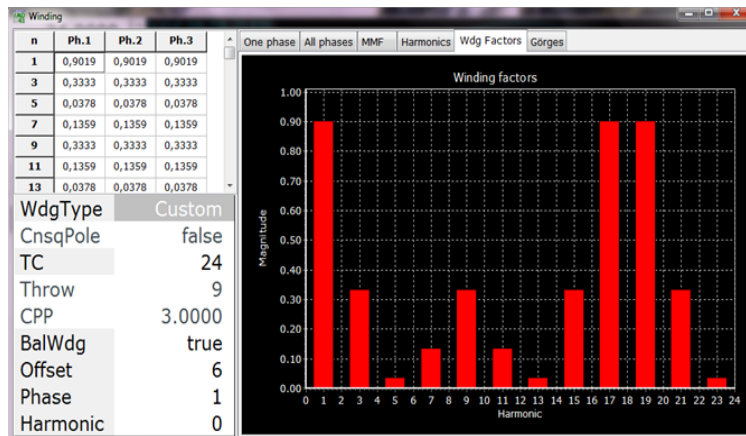


Fig IV.13 : interface de facteur d'enroulement.

- **GÖRGES** : Pour vérifier la séquence de phase, il est primordial de construire le diagramme de Görges (diagramme de phase). Celui-ci est affiché en exploitant le menu Görges. On peut afficher soit les vecteurs de f.m.m ou bien les f.é.m de phase.

Lorsque l'on exploite les f.é.m, celles-ci tournent dans le sens anti-horaire, elles sont affichées dans l'ordre suivant : rouge, jaune et bleu.

Si, par contre, ce sont les f.m.m qui sont exploitées, les vecteurs sont fixés dans l'espace. Ils sont positionnés de sorte que le flux tournant dans le sens positif (sens anti-horaire) doit traverser les repères fixes dans l'ordre : rouge – jaune – bleu.

Par ailleurs, d'autres options sont disponibles : composantes symétriques...

Fig IV.14: Système triphasé équilibré.

IV.4.4. Sélection de matériaux à partir de la banque de données

Le moteur que nous proposons de dimensionner présente une hauteur d'axe de 130 mm avec 4 pôles, il est réalisé à base d'une tôle magnétique (M800-50 A). Les caractéristiques de cette dernière doivent être insérées dans la banque de données du logiciel. Cette insertion se fait à travers différentes interfaces : **DESCRIPTION**, **MAGNETIZATION**, **LOSSES**, **MECHANICAL**, **ELECTRICAL**, **THERMAL**. Un résumé est alors fourni automatiquement dans **DATASHEET**. Notons que Speed possède une bibliothèque de matériaux prédéfinie que l'utilisateur peut directement exploiter.

- **DESCRIPTION**

Fig IV.14 : interface de description du matériau utilisé.

- **MAGNETIZATION** : La courbe $B = f(H)$ caractéristique du matériau et montre son comportement en présence d'une excitation magnétique. La courbe présente trois zones :

La zone linéaire : Pour les faibles valeurs de H, le champ magnétique augmente proportionnellement par rapport à l'excitation ;

Le coude de saturation : Pour des valeurs moyennes de H, le champ magnétique augmente plus faiblement avec l'excitation ;

- **La saturation** : Au dessus d'une certaine excitation, le champ magnétique n'augmente pratiquement pas. Le matériau est saturé.
Cette caractéristique est donnée par la figure suivante :

Fig IV.15. Courbe de première aimantation $B = f(H)$.

- **DATASHEET :**

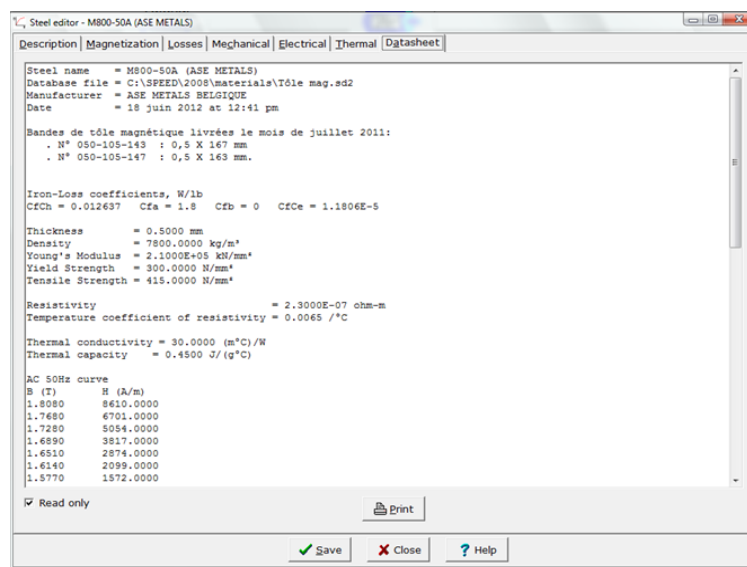


Fig IV.16. Résumé de la partie matériau.

IV.4.5: Design sheet

La feuille de conception montre tous les paramètres de conception d'entrée et de rendement, et leurs unités appropriées. Cette partie est composée de plusieurs interfaces. -

DIMENSIONS : cette figure représente les dimensionnements de la feuille statorique et rotorique :

■

Fig IV.17 : Interface de dimensionnement.

- **CONTROL** : Une récapitulation des caractéristiques globales est donnée dans l'interface représentée sur la figure suivante.

■

Fig IV.18 : Interface de contrôle.

- **EQ.CCT** : les résultats de circuit équivalent sont représentés dans la figure suivante :

■

Fig IV.19 : Interface du circuit équivalent.

- **PERFORMANCE** : dans cette figure, on a les différentes performances de la machine :

■

Fig IV.20 : Interface des performances.

- **CORE LOSS** : Dans ce menu, on affiche les différentes pertes de la machine.

Fig IV.21 : Interface des pertes.

- **THERMAL** : les résultats thermique de la machine sont représentés dans la figure suivante :

Fig IV.22 : interface thermique.

- *Caractéristique mécanique*

Fig. IV.23 : Caractéristique mécanique le couple en fonction de la vitesse.

Nous avons reporté sur la Fig. IV.23 l'allure de la caractéristique du couple utile d'un moteur asynchrone en fonction de la vitesse de rotation. Cette allure peut être subdivisée en deux parties [1] :

- Couple de démarrage du moteur. On constate que ce couple est fort : la machine peut démarrer en charge.
- Zone de fonctionnement du moteur. On constate qu'elle est presque linéaire. Cette partie de l'allure est très verticale : la vitesse varie peu avec la charge. Elle peut être modélisée par une droite.

Pour déterminer la droite qui modélise la partie utile de la caractéristique mécanique. On utilise l'équation suivante : $T_u = an + b$.

♦ ***Conclusion***

Dans le présent chapitre, un calcul de dimensionnement d'un moteur asynchrone d'une puissance 5.5 kW, a été effectué en exploitant le logiciel Speed PC-imd.

Après analyse, on remarque que les résultats obtenus par le logiciel SPEED sont conformes à ceux du cahier de charge.

Annexe

Tableau II.1 : Principales couches isolantes déposées sur les tôles FeSi non orientées

<i>Nature</i>	<i>Epaisseur (μm)</i>	<i>Fonction principale</i>
Vernis synthétique	1 à 2	Isolation + amélioration de la découpe
Phosphatation	1 à 2	Isolation + tenue en Température
Vernis synthétique + charge minérales	4 à 7	Haute isolation

Tableau II.2 : Caractéristiques magnétiques normalisées de quelques tôles électriques non orientées

Qualité	Epaisseur	Pertes garanties W⁵⁰ 1.5 (w.kg⁻¹)	Induction minimale pour		Application principale
			2500 A.m⁻¹	10000 A.m⁻¹	
Tôles livrées à l'état fini	0,35	2,5	1,49	1,71	Grosses machines tournantes
	0,50	2,70	1,49	1,71	Moteur de grosse Et moyenne puissance
	0,65	6,00	1,54	1,75	Moteurs de grosse et moyenne puissance
Tôles livrées à l'état semi-fini	0,50	3,90	1,54	1,75	Moteurs de moyenne puissance
	0,65	10,00	1,58		Petits moteurs, Electroménagers

Tableau II.3 : Caractéristiques générales des tôles FeSi non orientées

Teneur en silicium ou (Si+Al)	Polarisation à saturation	Champ coercitif	Polarisation pour H=250 A.m⁻¹	Pertes pour d=0.5mm		Propriétés mécaniques		Application
				(W.kg ⁻¹)	(W.kg ⁻¹)	RMP _a	A(%)	
1	2.12	60 à 100	1.51	2.60	6.00	340	35	Petites moteurs, relais, etc.
2	2.04	40 à 80	1.49	1.70	4.00	420	30	Moteurs appareillage divers, etc.
3	2.02	20 à 50	1.48	1.35	3.10	500	23	Grosses machines tournantes, transformateurs, etc.

R : résistance mécanique à la traction ; A : allongement à la rupture.

Tableau III.1 : les sections standard

Diamètre sans isolant [mm]	Diamètre avec isolant [mm]	Section sans isolant [mm²]
0,75	0,815	0,442
0,80	0,865	0,503
0,85	0,915	0,567
0,90	0,965	0,636
0,95	1,015	0,709
1,00	1,080	0,785
1,06	1,140	0,883
1,12	1,200	0,985
1,18	1,260	1,094
1,25	1,330	1,227
1,32	1,405	1,368
1,40	1,485	1,539
1,50	1,585	1,767
1,60	1,685	2,011
1,70	1,785	2,270
1,80	1,885	2,540
1,90	1,995	2,830

Tableau III.2 : Induction maximale

Stator				Rotor			
h [mm]	2p	B _{Z1} Max [Tesla]	B _{C1} [Tesla]	h [mm]	2p	B _{Z2} Max [Tesla]	B _{C2} [Tesla]
50-132	1	1,75 ÷ 1,95	1,50 ÷ 1,65	50 - 132	2	1,75 ÷ 1,95	1,35 ÷ 1,45
	4	1,75 ÷ 1,95	1,50 ÷ 1,65		4	1,75 ÷ 1,95	1,35 ÷ 1,25
	6	1,75 ÷ 1,95	1,50 ÷ 1,60		6	1,75 ÷ 1,95	1,05 ÷ 1,15
160	2	1,75 ÷ 2,00	1,45 ÷ 1,70	160-225	2	1,75 ÷ 1,95	1,35 ÷ 1,45
	4	1,75 ÷ 2,00	1,45 ÷ 1,70		4	1,55 ÷ 1,80	1,20 ÷ 1,30
	6	1,75 ÷ 1,85	1,35 ÷ 1,50		6	1,65 ÷ 1,90	1,05 ÷ 1,15
180-250	2	1,70 ÷ 1,90	1,45 ÷ 1,65	250	2	1,70 ÷ 1,95	1,35 ÷ 1,45
	4	1,70 ÷ 1,90	1,45 ÷ 1,65		4	1,65 ÷ 1,90	1,15 ÷ 1,25
	6	1,70 ÷ 1,90	1,45 ÷ 1,65		6	1,65 ÷ 1,90	1,05 ÷ 1,15
280- 355	2	1,70 ÷ 1,90	1,40 ÷ 1,60	280-355	2	1,60 ÷ 1,85	1,35 ÷ 1,45
	4	1,60 ÷ 1,80	1,30 ÷ 1,45		4	1,80 ÷ 2,00	1,15 ÷ 1,25
	6	1,60 ÷ 1,80	1,15 ÷ 1,30		6	1,65 ÷ 1,90	1,05 ÷ 1,15

Conclusion Générale

Conclusion générale

Notre stage effectué au niveau de l'entreprise ELECTRO-INDUSTRIE d'AZAZGA a été une occasion pour nous d'acquérir de nouvelles connaissances concernant le moteur asynchrone triphasé, comme il nous a donné l'opportunité de nous intégrer dans le milieu industriel et de côtoyer de près le monde de travail.

Notre travail consiste en l'étude et dimensionnement d'une machine asynchrone triphasée en exploitant le logiciel SPEED PC-imd. Ce dernier offre une possibilité de calcul des moteurs de manière interactive.

Un dimensionnement d'un moteur de puissance 5.5 kW a été fait. Les résultats obtenus sont conformes au cahier de charge.

Comme perspective au présent travail, il serait intéressant d'exploiter les différentes fonctionnalités qu'offre ce logiciel. A titre d'exemple, ses parties : commande, analyse basée sur la méthode des éléments finis ...

Bibliographie

bibliographie

[1] C. DIVOX : « Moteur asynchrone triphasé », Université Montpellier 2, 2009.

[2] E. SCHAFFER : « Diagnostic des machines asynchrones ». Modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection des défauts. Thèse de doctorat, Ecole centrale de Nantes, 1999.

[3] S.BETTAHAR, L.ASSELGOU, L.AIDER : « Les différents matériaux électrotechniques utilisés dans la construction du moteur asynchrone (E-I) et leurs contrôles ». Mémoire de fin d'étude DEUA ; Université Mouloud Mammeri de Tizi ousou, 2009.

[4] E. GAUCHERON : « Les moteurs électriques pour mieux les piloter et les protéger », Cahier technique, N°207 ,2004.

[5] M. Lemaire, "Notions fondamentales d'utilisation des moteurs triphasés", Sprecher + Schuh AG Rockwell Automation, Aarau, 1996.

[6] H. NEY; N.MOREL : « Installation électrique ». Editions Patrick Gonidou, Paris, 2001.

[7] T. Wildi, "Electrotechnique", Institut de recherche d'Hydro-Québec, 2003.

[8] P.BRISSOUNEU : « Magnétisme et matériaux magnétiques ».Edition Hermès, Paris, 1997.

[9] [www.Électrotechnique - fr. com](http://www.Électrotechnique-fr.com)

[10] S. BOUFERGUENE : « Etude et calcul d'une machine asynchrone triphasé, application à une machine de 4kW » .Mémoire de fin d'étude d'ingénieur d'état en électrotechnique ; Université Mouloud Mammeri Tizi ousou ,1997.

[11] N .KELLAS ; T. RABAHI : « Calcul des paramètres d'une machine asynchrone à deux vitesses ». Mémoire de fin d'étude de DEUA ; Université Mouloud Mammeri Tizi ousou, 2008/2009.

[12] D.STATON: Speed PC- IMD User's Guide. UNIVERSITY OF GLASGOW. 2004.