

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 ELECTRIQUES**

*Présenté par*  
**Kahina CHAIR**  
**Lynda SADI HADDAD**

Thème  
**Etudes et estimation des pertes fer dans une machine  
asynchrone à cage**

*Mémoire soutenu publiquement le 7/10/ 2015 devant le jury composé de :*

**M<sup>r</sup> Mohand Tahar BELASSEL**  
MCA, U.M.M.T.O, Président

**M<sup>r</sup> Rabah KHALDI**  
MACA, U.M.M.T.O, Rapporteur

**M<sup>r</sup> Azzouz MIOUAT**  
MCA, U.M.M.T.O, Examineur

**M<sup>r</sup> Abdelghani KIMOUCHE**  
MACA, U.M.M.T.O, Examineur

## *Remerciement*

*Au terme de ce mémoire, nous remercions dieu le tout de puissant de nous avoir donnée le courage et la patience pour mener à bout ce modeste travail.*

*Egalement, nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre prometteur Mr R. Khaldi qui nous a fait l'honneur de nous prendre sous sa responsabilité, ainsi que pour ces orientations et précieux conseils, qu'il trouve toutes les expressions de notre respect.*

*Nous remercions tous les gens de laboratoire (TEC 423)*

*Du département d'électrotechnique (Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou)*

*Nous remercions d'avance, les membres du jury d'avoir accepté d'examiner notre travail.*

*Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui ont contribués de près de loin à la réalisation de ce mémoire.*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

*Aux les plus chères au monde, ma mère et mon père source intarissable d'amour, de tendresse et de sacrifice, qui n'ont jamais cessé de témoigner leur affection, leur confiance et qui m'ont apporté leurs soutien et encouragements depuis toujours*

*A ma chère sœur : KAMILIA et ma petite AZIZA*

*A mes adorables frères KAMEL, SLIMANE, FATAH et ARAFE*

*A toute ma famille*

*A mon futur mars*

*A mon binôme et toute sa famille*

*A tous mes chers amis (es)*

*Kahina*

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A la mémoire de mon grand-père « que dieu l'accueil dans son vaste paradis »*

*A mes très chers parents que j'aime énormément, que dieu les protèges.*

*A mes chers grands-parents.*

*A mes chères sœurs Rachida, Samira, et Soraya, et leurs maris ainsi leurs enfants Massi, Yanis, Nina, Titti, Fetta, Achour et mon petit Hocine.*

*Ma petite sœur Ouissem.*

*Et mon unique chère frère Karim.*

*A mes tantes et oncles et leurs familles.*

*A tous mes chers amis (es) surtout Ghiles et Farid.*

*Et ma chers copine et binôme Kahina et sa famille.*

*Lynda*

# Sommaire

# Sommaire

## Nomenclature

## Liste des figures

## Liste des tableaux

## INTRODUCTION GENERALE ..... 1

## CHAPITRE I : DIFFERENTES PERTES DANS UN MOTEUR ASYNCHRONE A CAGE ALIMENTE PAR UNE SOURCE SINUSOÏDAL.

I-1 Introduction .....	2
I-2 Généralité sur la machine asynchrone .....	2
I-2-1 Définition .....	2
I-2-2 Constitution .....	3
I-2-2 a) Stator .....	3
I-2-2 b) Rotor .....	4
I-2-3 Principe de fonctionnement.....	6
I-2-4 Le champ tournant.....	8
I-2-5 Vitesse de synchronisme .....	8
I-2-6 Le glissement.....	8
I-2-7 Le couple $C_u$ .....	9
I-2-8 Bilan de puissance .....	9
I-2-8 a) la puissance absorbée .....	10
I-2-8 b) la puissance électromagnétique.....	10
I-2-8 c) la puissance mécanique .....	10
I-2-8 d) la puissance utile .....	11
I-2-8 e) le rendement .....	11
I-3 Des différentes pertes dans un moteur asynchrone.....	12
I-3-1 Les pertes fer .....	12
I-3-1 a) Les pertes par effet de Foucault .....	12
I-3-1 b) Les pertes par hystérésis .....	12
I-3-2 Les pertes joules .....	13
I-3-2 a) Les pertes joules statorique .....	13
I-3-2 b) Les pertes joules rotorique .....	14
I-3-3 Les pertes supplémentaires.....	14

## Sommaire

I-3-4 Les pertes mécaniques.....	16
I-4 conclusion.....	16

### **CHAPITER II : CALCUL DES PERTES D'UN MOTEUR ASYNCHRONE PAR LA METHODE DE DIMENSIONNEMENT ET PAR LE CIRCUIT ELECTRIQUE EQUIVALENT CLASSIQUE**

II-1 Introduction .....	17
II-2 Calcule des pertes de puissance par la méthode de dimensionnement .....	17
II-2-1 Pertes mécanique .....	17
II-2-2 Pertes magnétique .....	17
II-2-3 pertes électrique .....	19
II-2-4 Les pertes magnétique supplémentaire d'acier .....	19
II-2-5 Les pertes totales dans l'acier .....	21
II-2-6 Les pertes supplémentaire.....	21
II-2-7 Les pertes totales du moteur.....	21
II-2-8 Le rendement .....	21
II-3 commentaire du tableau .....	22
II-4 Calcul des pertes de puissance par la méthode du circuit électrique équivalent.....	23
II-5 Détermination des paramètres par la méthode classique .....	24
II-5-1) Le schéma électrique équivalent en T .....	25
II-5-2) Détermination de la résistance statorique $R_s$ .....	25
II-5-3) Essai à vide .....	27
II-5-4) Essai à rotor bloqué .....	31
II-5-5 Expression des différentes impédances du schéma équivalent.....	34
II-5-6 Expression du courant primaire .....	34
II-5-7 Expression du courant secondaire ramené au stator .....	34
II-5-8 Expression du courant magnétisant .....	34
II-5-9 Expression de la puissance absorbée .....	35
II-5-10 Expression de la puissance utile .....	35
II-5-11 Expression de couple utile .....	35
II-5-12 Expression de rendement .....	35
II-6 Conclusion .....	35

# Sommaire

## CHAPITRE III : CALCUL ANALYTIQUE DES PERTES FER

III-1 Introduction .....	36
III-2 Méthode analytique .....	36
II-2-1 Formulation analytique du calcul des pertes fer .....	36
II-2-1 1) Formulation analytique pour les pertes fer statorique .....	36
II-2-1-1 a) Les pertes par Hystérésis .....	36
II-2-1-1 b) Les pertes par le courant de Foucault.....	36
III-2-1-2) Les pertes fer globales .....	36
III-2-1-3 Interprétation des résultats .....	37
III-3 conclusion .....	38

## CHAPITRE IV : MESURE EXPERIMENTALE DES PERTES FER D'UN MOTEUR ASYNCHRONE A CAGE ET LA COMPRAISON DES RESULTATS

IV-1 Introduction.....	39
IV-2 Présentation du moteur étudié .....	39
IV-3 Description de banc d'essai .....	39
IV-3-1 Essai à vide .....	40
IV-3-2 Essai de synchronisme.....	40
IV-4 Comparaison des résultats .....	44
IV-5 Conclusion.....	45

## CONCLUSION GENERALE ..... 46

### Bibliographie

**Annexe A :** Calcul des contraintes électromagnétique et paramètres électriques de la machine.

**Annexe B :** Calcul des pertes d'une machine asynchrone à cage par la méthode de dimensionnement.

**Annexe C :** calcul des différents paramètres électriques par les essais classiques la méthode analytique en utilisant le logiciel Mathcad.

**Annexe D :** Programme qui donne les différents courants et pertes ainsi que la résistance en fonction de la température du circuit électrique équivalent avec Matlab.

**Annexe E :** Dimensions géométriques de la machine asynchrone étudiée et certain coefficients.

## Nomenclature

$\Omega_s$  : Vitesse mécanique synchrone du champ tournant en [rad /s].

$\omega_s$  : Pulsation électrique synchrone du champ tournant en [rad /s].

$\omega$  : Pulsation en [rad /s].

$p$  : Nombre de paires de pôles

$N_s$  : Vitesse synchronisme, en [tr /min].

$f$  : Fréquence de la source en [Hertz]

$\Phi$  : Flux de champ magnétique [web]

$g$  : Glissement

$N$  : Vitesse de rotation [tr/min].

$C_u$  : Couple [N.m]

$\Omega$  : Vitesse de rotations en [rad/s]

$P_u$  : Puissance utile [W]

$P_a$  : Puissance électrique active triphasée [W].

$U$  : Tension composée aux bornes du moteur [V]

$I$  : Courant de ligne [A]

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

$P_{tr}$  : Puissance transmis au rotor à travers l'entrefer [W]

$P_{em}$  : Puissance électromagnétique [W]

$P_{jr}$  : Pertes par effet Joule rotorique. [W]

$P_{ferR}$  : Pertes fer au rotor [W]

$P_m$  : Puissance mécanique [W]

$P_{mec}$  : Pertes mécaniques [W]

$P_{js}$  : Pertes joule au stator

$P_{fer}$  : Pertes dans le fer [W]

$P_f$  : Pertes fer par courant de Foucault [W/Kg]

$K_F$  : Coefficient caractéristique de la tôle.

$B_{max}$  : Induction maximale à la fréquence  $f$  [T]

$e_1$  : Épaisseur de la tôle [m]

$P_{hys}$  : Puissance perdue par hystérésis [W/Kg]

$K_H$  : Coefficient des pertes par hystérésis

$R$  : Valeur de la résistance du circuit [ $\Omega$ ]

$I$  : Courant qui parcourt l'enroulement de résistance [A]

## Nomenclature

$r$  : Résistance d'un enroulement statorique [ $\Omega$ ]

$m_2$  : Nombre de barre rotorique

$R_2$  : Résistance d'une phase rotorique [ $\Omega$ ]

$I_2$  : Courant dans la barre [A]

$m_1$  : Nombre de phase au stator

$I_1$  : Courant d'une phase au stator [A]

FMM : force magnétomotrice

$r'_2$  : Résistance d'une phase rotorique ramenée au stator, à la température de fonctionnement [ $\Omega$ ]

$K_i$  : Coefficient d'augmentation des pertes dues à l'effet de peau

$K_{di}$  : Coefficient de distribution de l'enroulement statorique.

$n_1$  : Vitesse de rotation synchrone [tr/min]

$D_{1ext}$  : Diamètre extérieur du stator [m]

$K_t$  : Facteur de majoration, il est donné en fonction de nombre de paires de pôles et de diamètre extérieur du rotor.

$P_{10(50Hz)}$  : Pertes spécifique dans les tôles d'acier pour un 1Tesla

$K_{dc}$  : Coefficient total de majoration des pertes tenant compte de l'imperfection de la technologie.  $K_{dc} = (1,3 \div 1,7)$

$G_{c1}$  : Poids total de la culasse

$l_i$  : Largueur virtuelle de l'induit

$h_{c1}$  : Hauteur du dos du stator [mm]

$\gamma_c$  : Masse volumique  $\text{kg/m}^3$ .

$\beta$  : Coefficient de dilatation des tôles.

$G_{z1}$  : Poids total des dents statorique [Kg]

$h_{z1}$  : Hauteur de la dent

$b_{z1}$  : Largeur de la dent

$K_{dz}$  : Coefficient de majoration des pertes (coefficient des pertes supplémentaires)

$B_{z1max}$  : Induction maximal dans la dent statorique

$R_1$  : Resistance d'une phase statorique

$t_2$  : Pas dentaire rotorique [mm]

$b_{f2}$  : Largeur de la fente rotorique [mm]

## Nomenclature

$t_1$  : Pas dentaire statorique [mm]

$K_{02}$  : Coefficient en fonction de diamètre extérieur

$\beta_{02}$  : Coefficient déterminé à partir de la figure 5 de l'annexe E

$Z_1$  : Nombre d'encoches statorique

$b_{z2}$  : Largeur de la dent du rotor [mm]

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

$G_{z2}$  : Le poids total des dents rotorique

$B_{z2max}$  : L'induction maximale de la dent du rotor

$\delta$ : l'entrefer

$P_{2nom}$  : Puissance nominale

$\eta_n$  : Rendement nominal

$V_s$  : Tension simple d'alimentation [V]

$I_s$  : Courant d'une phase statorique [A]

$R_s$  : Résistance statorique par phase [ $\Omega$ ]

$X_s$  : Réactance cyclique de fuite d'une phase statorique [ $\Omega$ ]

$E_s$  : f.e.m (force électromotrice) induite d'une phase statorique [V]

$E_r$  : f.e.m. Induite d'une phase rotorique [V]

$I'_r$  : Courant d'une phase rotorique [A]

$R_r$  : Résistance rotorique par phase [ $\Omega$ ]

$V_0$  : Tension d'alimentation [V].

$I_0$  : Courant absorbé à vide [A].

$P_0$  : Puissance absorbée à vide [W].

$X'_r$  : Réactance cyclique de fuite d'une phase rotorique [ $\Omega$ ]

$Z_m$  : L'impédance magnétisante

$R_m$  : Résistance magnétisante

$X_m$  : Réactance magnétisante

$T_{amb}$  : Température ambiante ( $^{\circ}\text{C}$ )

$R_{s(27^{\circ}\text{C})}$  : Résistance statorique à  $27^{\circ}\text{C}$ .

$T_2$  : Température finale.

$T_1$  : Température initiale.

## Nomenclature

$K$  : Constante pour l'aluminium. Elle est égale à  $225^{\circ}\text{C}$ , et pour le cuivre elle est égale à  $235^{\circ}\text{C}$  (dans notre cas  $K=235^{\circ}\text{C}$ )

$Z_{cc}$  : Impédance en court circuit

$V_{cc}$  : Tension nominale d'alimentation à rotor bloqué

$\cos \varphi_{cc}$  : Facteur de puissance en court circuit

$R_{cc}$  : Résistance en court circuit

$X_{cc}$  : Réactance en court circuit

$M_c$  : Masse totale de la culasse correspond  $G_{c1}$  dans l'annexe B

$M_d$  : Masse totale des dents correspond  $G_{z1}$  dans l'annexe B

$P_{fer1}$  : Pertes fer globales en [W], lorsque les tôles sont parfaites

$P_{fer2}$  : Pertes fer globales en [W], après le processus de fabrication

## Liste des figures

Figure I-1 Le moteur asynchrone triphasé.....	3
Figure I-2 Stator avec bobinage.....	3
Figure I-3 Stator dans une carcasse.....	3
Figure I-4 Le rotor bobiné.....	4
Figure I-5 La cage d'écureuil.....	5
Figure I-6 Rotor à cage d'écureuil.....	5
Figure I-7 Une vue éclatée de la machine asynchrone.....	5
Figure I-8 Le schéma de principe du fonctionnement du moteur asynchrone.....	7
Figure I-9 Diagramme énergétique d'un moteur asynchrone.....	9
Figure I-10 Les différents couplages du stator.....	13
Figure II-1 Le schéma équivalent de la machine asynchrone.....	23
Figure-II-2 Schéma équivalent ramené au stator de la machine asynchrone.....	25
Figure II-3 Le schéma mesure de la résistance statorique en continu.....	26
Figure II-4 Le schéma équivalent à vide.....	27
Figure II-5 Le Circuit de mesure de l'essai à vide.....	28
Figure II-6 Le graphe des pertes fer et la puissance mécanique	30
Figure II-7 Le montage de moteur asynchrone à rotor bloqué	31
Figure II-8 Le circuit équivalent à rotor bloqué.....	32
Figure IV-1 Le schéma de montage de la machine à vide.....	40

## Liste des figures

Figure IV-2 Le montage complet de l'essai au synchronisme (juin 2015).....	41
Figure IV-3 Circuit de mesure au synchronisme .....	42
Figure IV-4 Le schéma équivalent pour l'essai au synchronisme .....	42

## Liste des tableaux

Tableau II- a : Les résultats des calculs de la méthode de dimensionnement .....	22
Tableau II- b : Résultats de mesure de l'essai en courant continu.....	26
Tableau II- c : Représente les résultats obtenus à partir de l'essai à vide.....	29
Tableau II- d : Représente les résultats de mesure en essai en court-circuit .....	32
Tableau II- e : Représente les différents paramètres obtenus lorsque le programme Mathcad .....	34
Tableau III-a : Résultats de calcul des pertes fer globale « formulation de Steinmetz »....	37
Tableau III-b : Les résultats de calcul des pertes fer par hystérésis et par le courant de Foucault « formulation de Steinmetz ».....	37
Tableau IV- a : Résultats de mesure de l'essai à vide .....	40
Tableau IV- b : Résultats de mesure de l'essai au synchronisme .....	42
Tableau IV- c : Les résultats de calcul de l'essai au synchronisme.....	43
Tableau IV-d : Résultats des calculs des pertes fer avec des différentes méthodes .....	44

**INTRODUCTION**

**GENERALE**

# Introduction générale

Il existe dans l'industrie les machines à courant continu et les machines à courant alternatif. Ces dernières sont classées en deux grandes familles : les machines asynchrones et les machines synchrones.

Aujourd'hui, parmi les machines tournante à courant alternatif, on distingue les machines asynchrones qui sont les plus employés dans l'industrie, vue les différents avantages qu'elles présentent à savoir : la simplicité de construction, la facilité de mise en œuvre, la fiabilité, la robustesse et bon rendement.

La grande majorité de ces machines asynchrones fonctionnent en moteur, donc, elles transforment l'énergie électrique en énergie mécanique. Cette transformation d'énergie s'accompagne inévitablement de pertes, qui se produisent dans les différents matériaux qui les composent. Entre autres, des pertes Joule dans les conducteurs électriques réalisés en cuivre, et les pertes magnétiques (par hystérésis et par courants de Foucault) dans les tôles d'acier.

D'autre part, le mouvement de rotation du rotor de ces machines provoque des pertes mécaniques, par frottement dans les paliers et billes des roulements, auxquelles il faut ajouter les pertes par ventilation.

Le premier but des constructeurs et de réaliser des machines électriques, en général, performantes et ayant un très bon rendement même un haut rendement, en particulier les machines asynchrones. Afin d'atteindre ce but, la réduction des pertes qui se produisent dans ces machines est primordiale. Par conséquent, la connaissance et la répartition des pertes dans les différentes parties qui les constituent est indispensable. La difficulté principale réside dans la détermination et l'estimation des pertes fer et des pertes supplémentaires. Cette difficulté est accrue si l'alimentation de la machine n'est plus sinusoïdale, comme c'est le cas de la commande de vitesse de rotation par des convertisseurs de fréquence par exemple.

En effet, beaucoup de travaux de recherches s'attèlent à trouver une formulation théorique qui permette d'estimer les pertes fer avec une meilleure précision. Certaines, utilisent un modèle analytique ou semi-analytique. D'autres, utilisent un modèle basé sur la méthode des éléments finis. Et, enfin pour valider tous ces modèles la méthode la plus indiquée est purement expérimentale [8].

Cela, nous amène au cadre du travail qui nous a été assigné, entre autre l'estimation des pertes fer d'une machine asynchrone de faible puissance.

Pour bien mener ce travail nous l'avons organisé en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre nous présentons les différentes pertes dans un moteur asynchrone à cage alimenté par une source sinusoïdale.

Dans le deuxième chapitre nous calculons les pertes, entre autre les pertes fer, d'un moteur asynchrone par deux méthodes : la méthode de dimensionnement et la méthode du circuit électrique équivalent classique.

Dans le troisième chapitre, la méthode analytique proposer par la formulation de Steinmetz est appliquée à la machine d'étude pour estimée les pertes fer.

Enfin, dans le quatrième chapitre nous présentons les résultats des essais, réalisés au sein du laboratoire d'électrotechnique de l'UMMTO, pour les mesures expérimentales des pertes fer pour validation et enfin comparaison.

Et, nous terminons notre travail par une conclusion générale.

# CHAPITRE I

*Différentes pertes dans un moteur  
asynchrone à cage d'écureuil alimenté  
par une source sinusoïdale*

## I-1 Introduction

Pendant son fonctionnement, la machine asynchrone, transforme l'énergie électrique en énergie mécanique ou l'inverse. Cette transformation s'effectue inévitablement par une certaine perte d'énergie ou forme des pertes de puissance qui influe directement sur le rendement de la machine et, par suite, sur la puissance fournie.

Ces pertes se répartissent comme suit :

### Dans le circuit électrique

Les pertes par effet joule se retrouvent dans les enroulements d'induit et d'excitation [1].

### Dans le circuit magnétique

Elles sont appelées aussi pertes fer, du fait que les matériaux utilisés pour ce circuit sont habituellement à base de fer. Ces pertes regroupent les pertes par hystérésis et les pertes par courants de Foucault [1].

### Dans les parties mécaniques

Dans les parties mécaniques de la machine, ces pertes sont générées par tous les frottements qui se produisent dans les paliers, les billes des roulements et auxquels il faut ajouter les pertes par ventilation.

Dans ce qui suit, nous présentons des généralités sur la machine asynchrone, ensuite, nous donnons les définitions, la constitution ainsi les formules mathématiques, des différentes pertes qui résultent du fonctionnement de cette machine.

## I-2 Généralité sur la machine asynchrone

### I-2-1 Définition

Le moteur asynchrone triphasé appelé aussi « machine à induction » est un moteur à courant alternatif dans lequel la vitesse de rotation ( $N$ ) est inférieure à la vitesse de synchronisme ( $N_s$ ). Sa particularité est de fonctionner avec un induit en court-circuit, sur lequel il n'y a pas de connexion électrique. Comme elle peut fonctionner en mode moteur ou en mode génératrice. Dans notre cas on se base sur la machine asynchrone à cage d'écureuil.

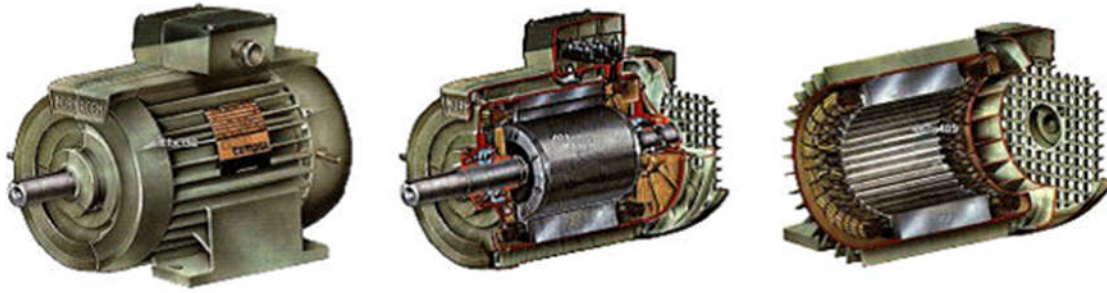


Figure I-1 Le moteur asynchrone triphasé.

### I-2-2 Constitution

Le moteur asynchrone se compose deux éléments principaux : Le stator (partie fixe) et le rotor (la partie tournante).

#### I-2-2-a) Le stator

C'est la partie fixe de la machine, il est caractérisé principalement par :

- Un paquet des tôles statorique sur lequel est bobiné qui caractérisé par trois enroulements reliée à la source. Ces derniers peuvent êtres couplés soit en étoile soit en triangle selon le réseau d'alimentation.
- Une carcasse ou l'on place le paquet statorique bobiné, celle qui protégé ce dernier.



Figure I-2 Stator bobinée



Figure I-3 stator dans une carcasse

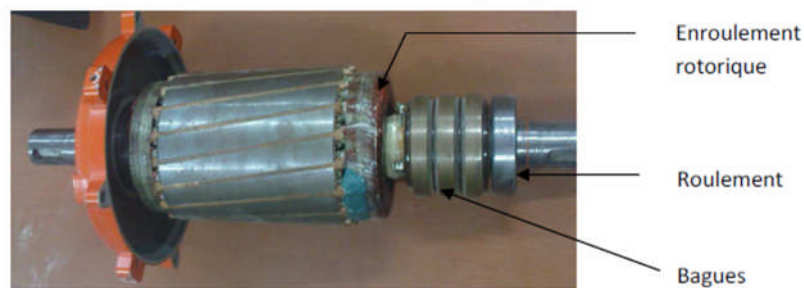
**I-2-2-b) Le rotor**

C'est la partie mobile dans la machine asynchrone, il est de forme cylindrique, sépare du stator par un entrefer d'épaisseur constante, il n'est fixé à aucune alimentation électrique. Il est constitué de conducteurs en court-circuit qui sont parcourus par des courants induits (les courants rotoriques). Le rotor tourne, alors, grâce à l'interaction du champ magnétique tournant statorique et le courant rotorique.

Le rotor caractérise aussi la machine asynchrone par ses différents types qui sont défini comme suit :

**I-2-2-b-1) Rotor bobinée**

Le rotor bobiné comporte un enroulement bobiné à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôle empilés sur l'arbre de la machine. Cet enroulement est obligatoirement polyphasé et est généralement couplé en étoile, ses extrémités sont réunies à trois bagues [3].



**Figure I-4 Le rotor bobiné**

**I-2-2-b-2) rotor à cage d'écureuil**

Le rotor à cage d'écureuil d'un moteur asynchrone est constitué par un cylindre de tôles empilées, percées à la périphérie pour former des encoches [5].

Les barres sont faites en cuivre, en bronze ou en aluminium qui sont collées sous pressions à une température voisine de 760°C, suivant les caractéristiques mécaniques et électriques recherchées par le constructeur [3].

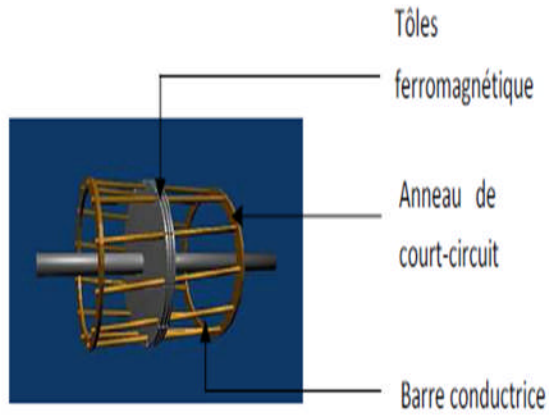


Figure I-5 La cage d'écureuil

Figure I-6 Rotor à cage d'écureuil

Une vue éclaté de la machine asynchrone :

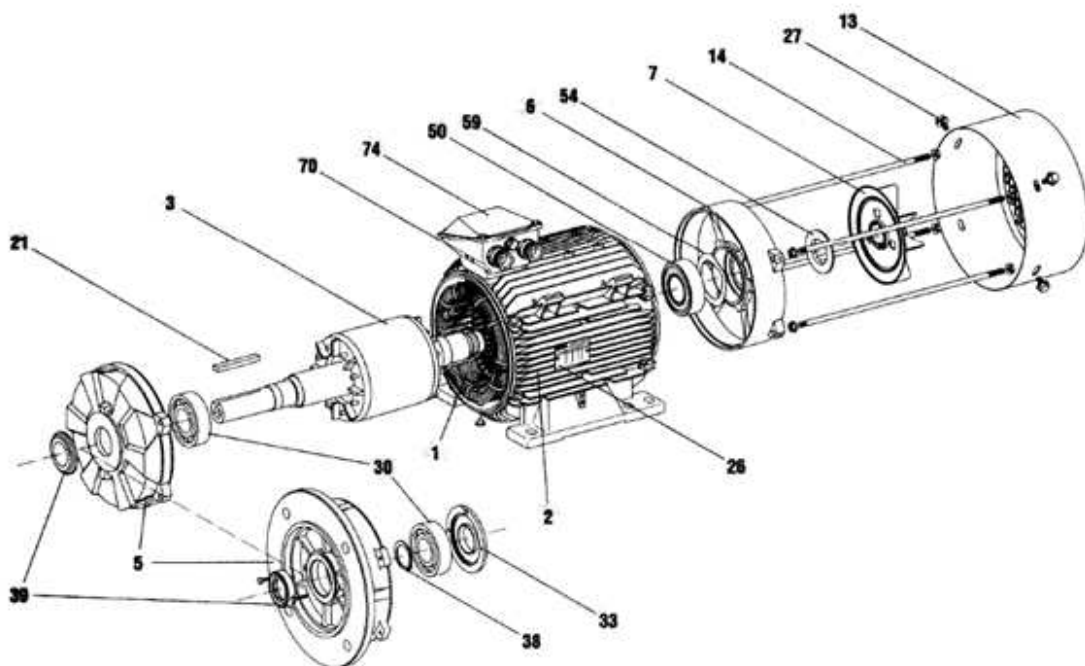


Figure I-7 une vue éclaté de la machine asynchrone

Nomenclature :

1 : Stator bobiné

- 2 : Carter
- 3: Rotor
- 5 : Flasque côté accouplement
- 6 : Flasque arrière
- 7 : Ventilateur
- 13 : Capot de ventilation
- 14 : Tiges de montage
- 21 : Clavette
- 26 : Plaque signalétique
- 27 : Vis de fixation du capot
- 30 : Roulement côté accouplement
- 33 : Chapeau intérieur côté accouplement
- 38 : Circlips de roulement côté accouplement
- 39 : Joint côté accouplement
- 50 : Roulement arrière
- 54 : Joint arrière
- 59 : Rondelle de pré charge
- 70 : Corps de boîte à bornes
- 74 : Couvercle de boîte à bornes

### I-2-3 Principe de fonctionnement

Dans le cas d'un alternateur synchrone qu'un champ magnétique tournant sur des bobines décalées  $120^\circ$  crée un système triphasé équilibré de force électromotrice. Dans le cas d'un moteur asynchrone utilise le phénomène inverse, c'est-à-dire l'injection d'un courant triphasé pour créer un champ tournant.

Nous avons reporté sur la Figure-I-8 le schéma de principe du fonctionnement du moteur asynchrone des courants sinusoïdaux de pulsation «  $\omega$  » sont injecté dans des bobines décalées de  $120^\circ$  dans l'espace, c'est-à-dire de  $\frac{2\pi}{3}$  rad, avec un déphasage  $\phi$  de  $\frac{2\pi}{3}$ . Ceci permet de créer trois composantes élémentaires du champ magnétique qui sont elles-mêmes sinusoïdales et de pulsation «  $\omega$  ». La variation alternative de ces trois composantes crée au sein des bobines un champ magnétique tournant. La vitesse de rotation de ce champ magnétique s'appelle la vitesse de synchronisme notée «  $N_s$  » (en tr/min).

$$N_s = \frac{60 \cdot f}{P} \quad (\text{I.1})$$

$p$  : nombre de paires de pôle de la machine.

Elle est fonction avec  $\omega$  ainsi que du nombre de paires des pôles utilisée pour créer le champ vitesse de rotation de ce champ.

Si l'on place au milieu des bobines un conducteur, celui-ci sera soumis à des variations de flux  $\Phi$  de champ magnétique, étant donné qu'il voit passer un champ tournant, donc il est variable.

Sous l'effet de la loi de Faraday, une force électromotrice induite apparaît alors, créant ainsi des courants induits. Remarquons que cette force électromotrice ne peut exister qu'à condition que  $\frac{d\Phi}{dt} \neq 0$  ces courants sont responsables de la l'apparition de couple de Laplace qui tend à mettre le conducteur en mouvement afin de s'opposer à la variation de flux, selon la loi de Lenz : celui-ci met alors à tourner pour tenter de suivre le champ magnétique. [2]

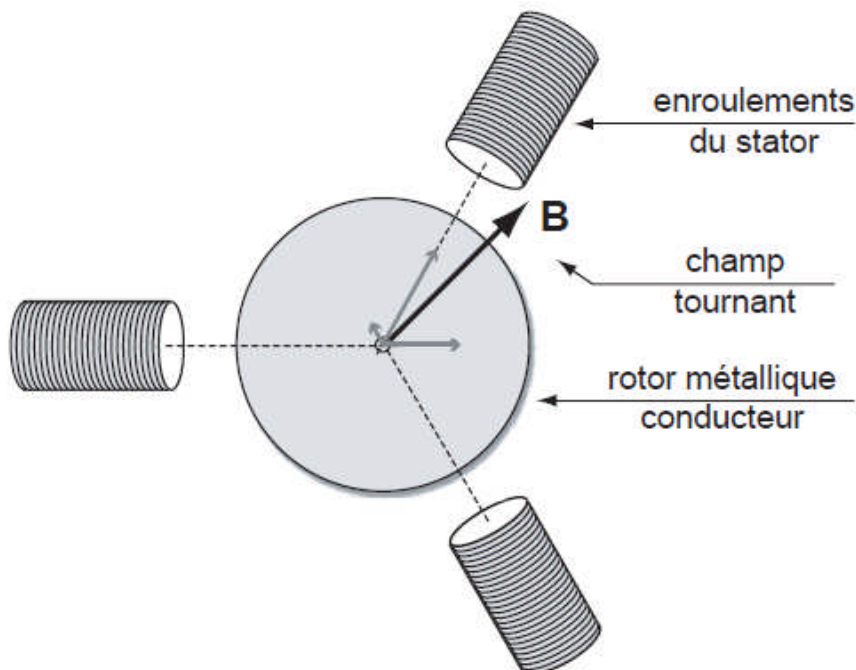


Figure I-8 Le schéma de principe du fonctionnement du moteur asynchrone.

**I-2-4 Le champ tournant**

C'est la variation du flux magnétique créée par les courants statoriques. Sa fréquence de rotation est imposée par la fréquence des courants statoriques. C'est-à-dire que sa vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence de l'alimentation électrique. La vitesse de ce champ tournant est appelée vitesse de synchronisme  $\Omega_s$  [rad/s].[4]

Elle s'exprime comme suit :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad (\text{I.2})$$

Ou bien 
$$\Omega_s = \frac{2\pi N_s}{60} \quad [\text{rad/s}] \quad (\text{I.3})$$

**Avec :**

$\Omega_s$  : Vitesse mécanique synchronisme du champ tournant en [rad /s].

$\omega_s$  : Pulsation électrique synchronisme du champ tournant en [rad /s].

$p$  : Nombre de paires de pôles

$N_s$  : Vitesse synchronisme, en [tr /min].

**I-2-5 La vitesse de synchronisme**

La vitesse du champ dépend de la fréquence de la source et du nombre de pôle de la machine, elle est exprimée comme suivante :

$$N_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad [\text{tr/min}] \quad (\text{I.4})$$

**Avec :**

$p$  : Nombre de paires de pôles

$N_s$  : Vitesse synchronisme, en [tr /min]

$f$  : La fréquence de la source en hertz [Hertz]

**Remarque :**

Cette expression indique que chaque fois on augmente la fréquence la vitesse synchronisme augmente mais diminue avec le nombre de pôles.

**I-2-6 Le glissement**

Le glissement qu'on le note «  $g$  » est le rapport de la vitesse du glissement «  $N_s - N$  » du rotor par rapport au champ tournant du stator à la vitesse de synchronisme  $N_s$ .

On peut l'exprimer comme suit :

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} \quad (\text{I.5})$$

**Avec :**

$g$  : Le glissement

$N_s$  : La vitesse de synchronisme [tr/min]

$N$  : la vitesse de rotation [tr/min].

**I-2-7 Le couple**

On appelle le couple électromagnétique la résultante de l'interaction des deux flux rotoriques et statoriques. La conversion d'énergie électrique en énergie mécanique permet de développer un couple utile sur l'arbre du moteur. [4]

On étudie le principe de l'obtention d'un couple par interaction du champ magnétique et par effet reculant, ces deux phénomènes découlent de l'étude de l'induction dans l'entrefer du moteur.[2]

$$C_u = \frac{P_u}{\Omega} \quad \text{[N.m]} \quad \text{(I.6)}$$

**Avec :**

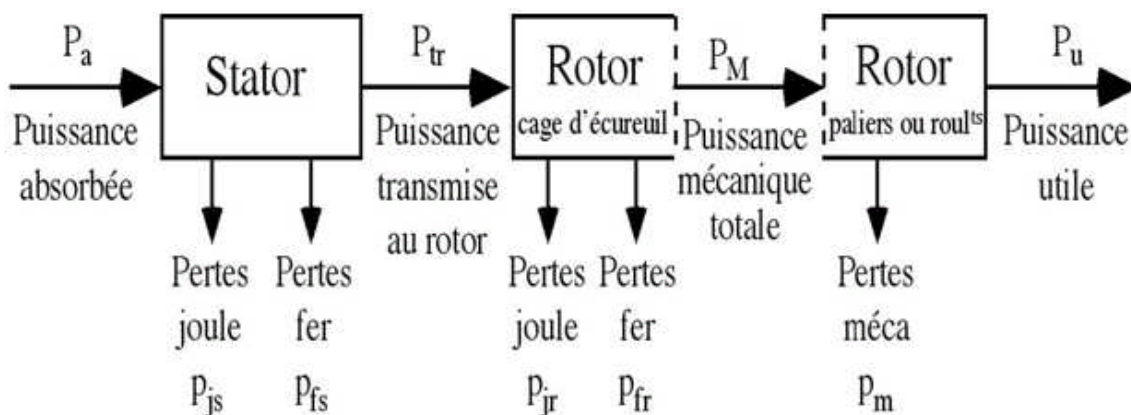
$C_u$ : Le couple [N.m]

$\Omega$  : La vitesse de rotations [rad/s]

$P_u$ : La puissance utile [W]

**I-2-8 Le bilan de puissance**

Le bilan des puissances et des pertes dans un moteur asynchrone est reporté sur la figure I-9 :



**Figure I-9 diagramme énergétique d'un moteur asynchrone**

Par la suite on donne les différentes relations permettant de calculer les pertes et les puissances de moteur asynchrone, lorsqu'elles sont calculables.

### I-2-8-a) Puissance absorbé Pa

C'est la puissance active électrique, est ça lorsque le moteur est connecté un réseau triphasé, Pa vérifie la relation suivante [2] :

$$P_a = \sqrt{3} U I \cos \varphi \quad (\text{I.7})$$

Avec :

$P_a$  : Une puissance électrique active triphasée [W].

$U$  : La tension composée aux bornes du moteur [V]

$I$  : Le courant de ligne [A]

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

### I-2-8-b) La puissance électromagnétique

C'est la puissance transmise au rotor par le champ tournant. Elle est représentée sous la forme suivante [7] :

$$P_{em} = P_{tr} - P_{jr} = (1 - g) * P_{tr} \quad (\text{I.8})$$

Avec :

$P_{tr}$  : La puissance transmis au rotor à travers l'entrefer [W]

$P_{em}$  : Une puissance électromagnétique [W]

$P_{jr}$  : Des pertes par effet Joule rotorique. [W]

$g$  : Le glissement

### I-2-8-c) La puissance mécanique

Les pertes mécaniques prennent en compte tous les frottements dus à la relation de la partie de la machine. Elles apparaissent sous forme d'échauffement ou d'énergie cinétique fournie au fluide. [8].

Comme elle est développée par le rotor.

$$P_m = P_{em} - P_{ferR} \quad [\text{W}] \quad (\text{I.9})$$

Avec:

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

$P_{em}$  : Une puissance électromagnétique [W]

$P_m$  : La puissance mécanique [W]

#### I-2-8-d) La puissance utile

On arrive à cette dernière à partir des pertes mécaniques, elle est comme suit :

$$P_u = P_m - P_{mec} \quad [W] \quad (I.10)$$

**Avec:**

$P_{mec}$  : Les pertes mécaniques [W]

$P_m$  : La puissance mécanique [W]

$P_u$  : La puissance utile [W]

#### I-2-8-e) Le rendement

C'est le rapport entre la puissance utile mécanique qu'il fournit et la puissance électrique qu'il absorbe. [2]

De tel sorte que :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \quad (I.11)$$

**Avec :**

$P_u$  : La puissance utile [W]

$P_a$  : Une puissance électrique active triphasée [W].

Comme on peut le déterminé à partir de la chaine des pertes, selon cette formole :

$$\eta = \frac{P_a - \Sigma \text{pertes}}{P_a} = \frac{P_a - P_{js} - P_{fer} - P_{jr} - P_m}{P_a} \quad (I.12)$$

$$\eta = \frac{P_m(1-g) - P_{mec}}{P_a} 100[\%] \quad (I.13)$$

**Avec :**

$P_a$ : Une puissance électrique active triphasée [W].

$P_{js}$ : Pertes joule au stator

$P_{fer}$  : Les pertes dans le fer [W]

$P_{jr}$  : Des pertes par effet Joule rotorique. [W]

$P_{em}$  : Une puissance électromagnétique [W]

$P_m$  : La puissance mécanique [W]

### I-3 Les différents types des pertes dans un moteur asynchrone

Dans ce chapitre on représente les différentes pertes dans un moteur asynchrone :

#### I-3-1 Les pertes fer

Les pertes fer sont en fonctions du flux magnétique. Elles ne dépendent que de la tension d'alimentation et de la fréquence des courants statorique. 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 [9]

Elles sont constituées deux types des pertes dans la machine asynchrone les pertes par Foucault et les pertes par Hystérésis.

#### I-3-1 a) Les pertes par courant de Foucault

Les pertes par courant de Foucault résultent des variations temporelles des flux qui induisent dans la masse du fer des forces électromotrices (f.é.m.). Ces dernières donnent naissance à des courants qui se referment dans la masse du fer [1]

On peut calculée les pertes par effet de Foucault on utilisant la relation suivant :

$$P_f = K_F(e_1 \cdot f \cdot B_{max})^2 \quad (\text{I.14})$$

**Avec :**

$P_f$  : Pertes fer par courant de Foucault [W/kg]

$K_F$  : Coefficient caractéristique de la tôle.

$B_{max}$  : Induction maximale à la fréquence  $f$  [T]

$f$  : La fréquence de la source [Hertz]

$e_1$  : Épaisseur de la tôle [m]

#### I-3-1 b) Les pertes par hystérésis

Les pertes par hystérésis sont des pertes qui transforme en chaleur, et qui résultent des transformations de l'organisation de la matière sous l'effet de la variation en intensité et ou en direction du champ magnétique appliqué.

Elles sont données par la relation suivante [1] :

$$P_{hys} = K_H * f * B_{max}^2 \quad (\text{I.15})$$

**Avec :**

$P_{hys}$  : Puissance perdue par hystérésis [W/Kg]

$K_H$  : Coefficient des pertes par hystérésis

$B_{max}$  : Induction maximale à la fréquence  $f$  [T]

**I-3-2 Les pertes joules**

Ces sont des pertes électriques dissipées par effet joule dans les enroulements statorique et rotorique, elles varient en fonction du carrée des courants circulants dans ces enroulements sous la formule suivante :  $RI^2$

Ces pertes varient en fonction de la chaleur qui dégage par les conducteurs.

On distingue deux types :

**I-3-2-a) Les pertes par effet joule statorique**

C'est les pertes dissipées par effet joules dans l'enroulement statorique, et comme le stator peut être câblé en étoile ou en triangle (voir la figure I.10). Puisque le moteur constitue un récepteur triphasé équilibré [9], alors les pertes joule au stator dans le cas indépendante de couplage est donnée par l'équation suivante :

$$P_{js} = \frac{3}{2} RI^2 \tag{I.16}$$

Avec :

$R$  : La valeur de la résistance du circuit [ $\Omega$ ]

$I$  : Le courant qui parcourt l'enroulement de résistance [A]

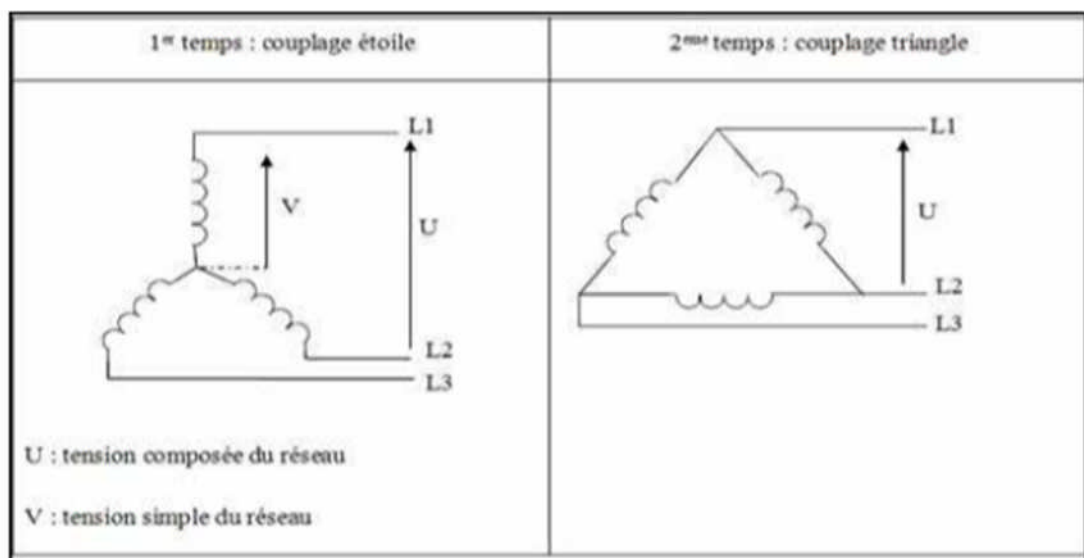


Figure I-10 Les différents couplages du stator

❖ **Le cas au le couplage en étoile**

Quand le moteur couple en étoile les pertes joules au stator représente par l'équation suivant :

$$P_{js} = 3 r I^2 \quad (\text{I.17})$$

**Avec :**

$I$  : Le courant qui parcourt l'enroulement de résistance [A]

$r$  : la résistance d'un enroulement statorique [ $\Omega$ ]

❖ **Le cas au le couplage en triangle**

Quand le moteur couple en triangle les pertes joules au stator représente par l'équation suivant :

$$P_{js} = r I^2 \quad (\text{I.18})$$

**I-3-2-b) Les pertes par effet joule rotorique**

Ce sont les pertes dissipées dans l'enroulement rotorique par effet joule. Sont en fonctions de la puissance transmise à celui-ci. On peut par ailleurs montrer qu'elles sont aussi en fonctions du glissement. En effet, les grandeurs  $P_{jr}$  et  $P_{tr}$  sont liées par la relation [9] :

$$P_{jr} = g P_{tr} \quad (\text{I.19})$$

**Avec :**

$g$  : Le glissement

$P_{tr}$  : La puissance transmis au rotor à travers l'entrefer [W]

$P_{jr}$  : Des pertes par effet Joule rotorique. [W]

**Ou bien avec la relation :**

$$P_{jr} = m_2 R_2 I_2^2 \quad (\text{I.20})$$

**Avec :**

$m_2$  : Nombre de barre rotorique

$R_2$  : Resistance d'une phase rotorique [ $\Omega$ ]

$I_2$  : Le courant dans la barre [A]

**I-3-3 Les pertes supplémentaire**

Ces sont des pertes qui dues au champ principal dans l'encoche. Comme elles dépendent de la forme et de la taille du conducteur ainsi que de la variation de l'intensité du

champ dans l'espace de l'encoche. et certains de ces pertes sont liés aux harmoniques d'espace due aux discontinuités géométriques des machines. [8]

On distingue deux types des pertes fer supplémentaires ; pertes supplémentaires dans le circuit électrique et les pertes supplémentaires dans le circuit magnétique.

### I-3-3 a) les pertes fer supplémentaire

Ces pertes on le explique par :

#### ❖ Pertes fer supplémentaire à la surface d'un couronne

Ces pertes sont dues aux variations locales de l'induction provoquées à la surface d'un pôle par son déplacement relatif vis-à-vis des dents de l'induit [10].

#### ❖ Pertes fer supplémentaire dues aux pulsations les dents

Ces pertes sont créées dans les dents du rotor par la variation périodique d'induction dues au passage des dents statorique .Il s'agit aussi des pertes analogues qui sont créées dans les dents du stator par le passage des dents rotorique. Ces pertes n'existent que dans les machines à rotor et à stator denté [10].

### I-3-3 b) les pertes supplémentaire dans le circuit électrique

Ces des pertes qui son créés dans les encoches et qui peut modifier la densité du courant en charge par création des courants de Foucault et provoqué l'augmentation des pertes par effet joule (augmentation de la résistance des conducteurs.

Il existe aussi des pertes qui sont apparaissent à cause des discontinuités géométrique de la machine au niveau de l'entrefer. On trouve ces pertes :

#### ❖ Pertes dues au flux de fuite de phase

Lorsque le nombre de phase est fini entraîne une distribution non sinusoïdale de la force magnétomotrice (FMM) dans l'entrefer [1], alors on engendre des pertes non négligeables.

#### ❖ Les pertes dues au flux de fuite d'encoches

Le fait que le nombre d'encoches par phase soit fini, entraîne une distribution non sinusoïdale de la FMM dans l'entrefer [1].

Le flux de fuite d'encoche ou flux différentiel d'encoches ou encore flux zigzag apparaît et engendre des pertes qui sont déterminées par l'expression suivant [10] :

$$P_{du} = m_1 I_1^2 r_2' K_i K_{di} \quad (I.21)$$

Avec :

$m_1$  : Nombre de phase au stator

$I_1$  : Courant d'une phase au stator [A]

$r_2'$  : Résistance d'une phase rotorique ramenée au stator, à la température de fonctionnement [Ω]

$K_i$  : Coefficient d'augmentation des pertes dues à l'effet de peau

$K_{ai}$  : Coefficient de distribution de l'enroulement statorique.

### I-3-3 c) pertes supplémentaire dans le circuit magnétique

Ces des pertes qui sont produites par les discontinuités de la machine [10], et les encoche dans l'entrefer implique une distribution discontinue de la FMM ce qui entraîne des pertes par pulsation dans les dents et des pertes à la surface des pôles [1]

### I-3-4 Les pertes mécaniques $P_{mec}$

Les pertes mécaniques sont dues aux frottements des supports ou des enroulements à billes qu'au déplacement de l'acier par la partie mobile, ainsi que les pertes par ventilation [1].

Elles sont donnes par la relation suivante :

$$P_{mec} = K_t (n_1/10)^2 (D_{1ext} \cdot 10^{-3})^4 \quad (I.22)$$

**Avec :**

$n_1$  : Vitesse de rotation synchrone [tr/min]

$D_{1ext}$ : Diamètre extérieur du stator [m]

$K_t$  : Facteur de majoration, il est donné en fonction de nombre de paires de pôles et de diamètre extérieur du rotor.

$2P \geq 4$ :  $K_t = 1,3(1 - D_{1ext})$  Pour  $0,1 \leq D_{1ext} \leq 0,5m$

$2P = 2$ :  $K_t = 2$

## I-4 Conclusion

Après avoir rappelé la base du fonctionnement d'une machine asynchrone, nous nous sommes intéressés aux différentes pertes dans cette machine.

# CHAPITRE II

*Calcul des pertes d'un moteur asynchrone  
par méthode de dimensionnement et par  
le circuit électrique équivalent*

## II-1 Introduction

Comme toutes les machines, la machine asynchrone perd une certaine quantité d'énergie ou forme de pertes de puissance pendant leur fonctionnement. Ces pertes peuvent être calculées avec deux méthodes différentes. Entre autre, la méthode de dimensionnement et la méthode de circuit électrique équivalent classique. Ceci fera l'objet de ce qui suit.

## II-2 Calcul des pertes de puissance par la méthode de dimensionnement

Cette méthode est théorique utilisant souvent une formulation semi empirique basé sur des abaques expérimentaux.

### II-2-1 Pertes mécaniques

Ces pertes sont dues aux frottements des supports ou le déplacement de l'acier par la partie mobile. Elles sont données par l'expression suivante [1] :

$$P_{mec} = K_t (n_1/10)^2 \cdot (D_{1ext} \cdot 10^{-3})^4 \quad [\text{W}] \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$n_1$  : Vitesse de rotation synchrone [tr/min]

$D_{1ext}$ : Diamètre extérieur du stator [m]

$K_t$  : Facteur de majoration, il est donné en fonction de nombre de paires de pôles et de diamètre extérieur du stator.

$2P \geq 4$ :  $K_t = 1,3(1 - D_{1ext})$  Pour  $0,1 \leq D_{1ext} \leq 0,5\text{m}$

$2P = 2$ :  $K_t = 2$

### II-2-2 Pertes magnétiques

Ce sont les pertes par hystérésis et par courant de Foucault dues aux flux principal, une grande partie de ces pertes se dissipent au niveau des dents et la culasse statorique. Dans le rotor ces pertes sont négligeables à cause de la faible fréquence de la variation du flux au régime nominal [10].

#### II-2-2 a) les pertes dans la culasse statorique

Pour évaluer les pertes dans la culasse statorique on multiplie les pertes spécifiques calculées, pour une induction  $B_{clmax}$  (induction maximale dans la culasse), par la masse d'acier de la culasse [10], et on introduisant le coefficient de majoration.

Elles sont données par la relation suivante :

$$P_{fcl} = P_{10(50HZ)} * (f/50)^\beta * K_{dc} * G_{c1} * B_{c1max}^2 \quad [W] \quad (II.2)$$

**Avec :**

$K_{dc}$  : Coefficient total de majoration des pertes tenant compte de l'imperfection de la technologie.  $K_{dc} = (1,3 \div 1.7)$  on le prend égale à 1.7.

$P_{10(50HZ)}$  : Pertes spécifique dans les tôles d'acier à un 1 Tesla.  $P_{10(50HZ)} = 2.5 \text{ w/kg}$  (d'après le tableau 1 de l'annexe E)

$G_{c1}$  : Le poids total de la culasse, il est donné par la formule suivant :

$$G_{c1} = \pi(D_{1ext} - h_{c1}) * K_{fer} * l_i * h_{c1} * \gamma_c * 10^{-9} \quad [Kg]$$

$l_i$  : Longueur virtuelle de l'induit

$h_{c1}$  : Hauteur du dos du stator [mm]

$\gamma_c$  : La masse volumique  $\gamma_c = 7.8 * 10^3 \text{ kg/m}^3$

$\beta$  : Coefficient de dilatation des tôles, il est donné par le tableau 1 de l'annexe A

$$\beta = 3/2$$

### II-2-2 b) pertes dans les dents statorique

Les pertes dans les dents statorique sont données avec la formule suivant :

$$P_{fz1} = K_{dz} * B_{z1max}^2 * G_{z1} * P_{10(50hz)} * (f/50)^\beta \quad [W] \quad (II.3)$$

**Avec :**

$G_{z1}$  : Poids total des dents statorique il donne par l'équation suivant (elle est calcul dans l'annexe B) :

$$G_{z1} = h_{z1} * b_{z1} * l_i * Z_1 * K_{fer} * \gamma_c * 10^{-9} \quad [Kg]$$

**Avec:**

$h_{z1}$  : Hauteur de la dent

$l_i$  : Largueur virtuelle de l'induit

$b_{z1}$  : Largeur de la dent

$K_{dz}$  : Coefficient de majoration des pertes (coefficient des pertes supplémentaires)

$K_{dz}(1.7- 1.8)$  dans notre cas on a choisi la valeur de  $K_{dz} = 1.8$

$B_{z1max}$  : Induction maximale dans la dent statorique et rotorique (calculée dans l'annexe A page 52).

Alors, les pertes principales sont données par la formule suivant :

$$P_{acp} = P_{fc1} + P_{fz1} \quad [\text{W}] \quad (\text{II.4})$$

### II-2-3 pertes électrique

#### II-2-3-a) les pertes joule statorique

Elles sont donne avec la formule suivant :

$$P_{js} = m_1 * R_1 * I_1^2 \quad [\text{W}] \quad (\text{II.5})$$

**Avec :**

$m_1$ : Nombre de phase statorique.

$P_{js}$ : Les pertes par effet Joule au stator [W].

$R_1$ : Resistance d'une phase statorique (calculée dans l'annexe A page 52) [ $\Omega$ ].

$I_1$ : Le courant dans la phase statorique (calculé dans l'annexe A page 49) [A].

#### II-2-3-b) Pertes Joules rotorique

Ils sont donne par la fonction suivant :

$$P_{jr} = m_2 * R_2 * I_2^2 \quad [\text{W}] \quad (\text{II.6})$$

**Avec :**

$P_{jr}$  : Les pertes par effet Joule au rotor [W].

$m_2$  : Nombre de phase rotorique.

$R_2$ : Resistance d'une phase rotorique (calculée dans l'annexe A) [ $\Omega$ ].

$I_2$ : Le courant de la barre rotorique (calculé dans l'annexe A) [A].

### II-2-4 Les pertes magnétique supplémentaire d'acier

#### II-2-4-a) les pertes à la surface du rotor (pertes superficielles)

Les pertes superficielles sont des pertes qui apparaissent à la surface du rotor par la présence d'encoche ouverte du stator [1] elle est donné par la relation suivant :

$$P_{sr} = P_{sr2} (t_2 - b_{f2}) * l_i * Z_2 * 10^{-6} \quad [\text{W}] \quad (\text{II.7})$$

**Avec :**

$l_i$  : Largueur virtuelle de l'induit [mm]

$t_2$  : Pas dentaire rotorique [mm]

$b_{f2}$  : La largeur de la fente rotorique [mm]

$P_{sr2}$  Elle est donne avec la formule suivant :

$$P_{sr2} = 0.5K_{02} \left( \frac{Z_1 * N_s}{10^4} \right)^{3/2} * (B_{02} * t_1)^2$$

**Avec :**

$t_1$  : Pas dentaire statorique [mm]

$K_{02}$  : Coefficient en fonction de diamètre extérieur avec  $K_{02} = 2$

$\beta_{02}$  : Coefficient déterminé à partir de l'annexe B,  $\beta_{02} = 0.275$

$Z_1$  : Nombre d'encoches statorique

$N_s$  : La vitesse de synchronisme [t/min]

#### II-2-4-b) Les pertes par pulsation du flux dans les dents

L'induction dans les dents varie avec la position des encoches statorique et rotorique qui crient à la fin des pertes supplémentaires ou pertes par pulsation du flux qui sont données par l'expression suivante :

$$P_{pul2} = 0.11 * \left( \left( \frac{Z_1 * n_1}{10^3} \right) B_{pul2} \right)^2 G_{z2} \quad [W] \quad (II.8)$$

**Avec:**

$$G_{z2} = Z_2 * h_{c2} * b_{z2} * l_i * K_{fer} * \gamma_c * 10^{-9}$$

**Avec :**

$b_{z2}$  : Largeur de la dent du rotor [mm]

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

$G_{z2}$  : Le poids total des dents rotorique (Il est calcul dans l'annexe B)

$Z_1$  : Nombre d'encoches statorique

$n_1$  : La vitesse de synchronisme [tr/min]

$$B_{pul2} = \left[ \frac{\gamma_1 * \delta * B_{z2max}}{2 t_2} \right] \quad [T]$$

$B_{pul2}$  (Il est calcul dans l'annexe B)

**Avec :**

$B_{z2max}$  : L'induction maximale de la dent du rotor

$\delta$ : l'entrefer ( $\delta=0.25mm$ )

**II-2-4-c) les pertes magnétique supplémentaires totale dans l'acier**

Les pertes magnétiques supplémentaires totales dans l'acier sont données par la somme des pertes à la surface du rotor (pertes superficielles) et les pertes par harmonique du flux dans les dents, elles sont calculées par la relation suivante :

$$P_{acsup} = P_{sr} + P_{pul2} \quad [W] \quad (II.9)$$

**II-2-5 Les pertes totales dans l'acier**

Ce sont des pertes qui représentent la somme des pertes principales et les pertes magnétiques supplémentaires totales dans l'acier, est calculées par la relation suivante :

$$P_{ac\Sigma} = P_{acp} + P_{acsup} \quad [W] \quad (II.10)$$

**II-2-6 Les pertes supplémentaire**

L'origine de ces pertes, c'est le champ de fuite qui existe dans les encoches et dans les têtes de bobines, elles sont difficiles à mesurer et à calculer mathématiquement a cause de la complexité des lignes de champ dû à la fuite des bobines [1].

Elles peuvent êtres évalué approximativement par la formule suivante :

$$P_{sup} = 0.005 \frac{P_{2nom} * 10^3}{\eta_n} \quad [W] \quad (II.11)$$

Avec :

$P_{2nom}$  : La puissance nominale [W]

$\eta_n$  : Le rendement nominal

**II-2-7 Les pertes totales du moteur**

C'est la somme de tous les pertes [1], sont calculées avec l'expression suivante :

$$P_{tot} = P_{js} + P_{jr} + P_{mec} + P_{ac\Sigma} + P_{sup} \quad [W] \quad (II.12)$$

**II-2-8 Le rendement**

Le rendement et donné par le rapport entre la puissance utile et la puissance absorbée :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{tot}} \quad [W] \quad (II.13)$$

Le calcul des paramètres et les pertes est fait on utilisant un programme informatique (langage de programmation Mathcad 14).

Le tableau suivant présent les résultats des calculs de la méthode de dimensionnement :

Les pertes de la machine	Le symbole	Les résultats du calcul	L'unité
Pertes mécanique	$P_{mec}$	11.055	W
les pertes dans la culasse statorique	$P_{fc1}$	49.712	W
Les pertes dans les dents statorique	$P_{fz1}$	28.39	W
les pertes principales dans le fer	$P_{acp}$	78.103	W
Les pertes à la surface du rotor	$P_{sr}$	2.473	W
les pertes joule statorique	$P_{js}$	306.1	W
Pertes Joules rotorique	$P_{jr}$	176.614	W
Les pertes magnétiques supplémentaires d'acier	$P_{acsup}$	22.231	W
Les pertes totales dans l'acier	$P_{ac\Sigma}$	100.334	W
Les pertes supplémentaires	$P_{sup}$	14.103	W
Les pertes totales du moteur	$P_{tot}$	608.205	W
Le rendement	$\eta$	78.3	%

**Tableur II- a : Les résultats des calculs de la méthode de dimensionnement**

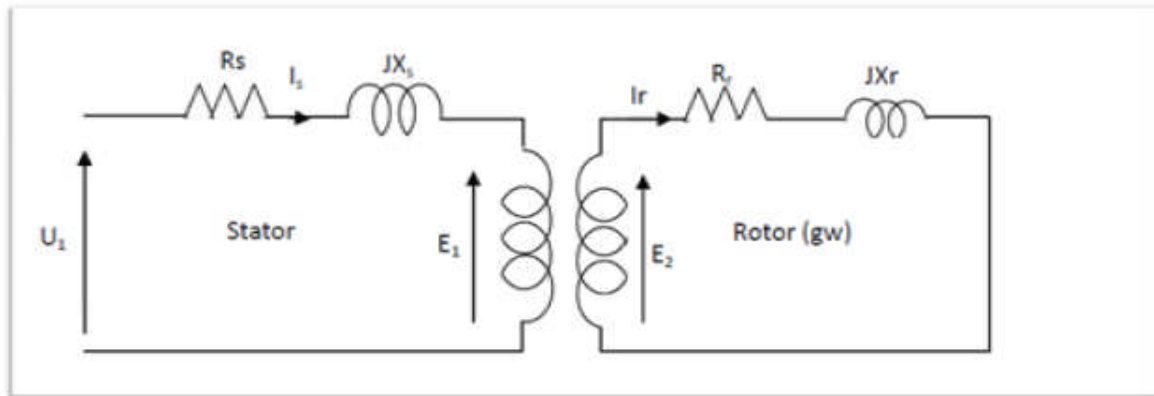
**II-3 Commentaire du tableau**

Le tableau représente les résultats de calcul des pertes de puissance et du rendement dans les différentes parties de la machine asynchrone par la méthode de dimensionnement.

- On remarque que la majorité des pertes sont localisées dans le circuit électrique ; dans les enroulements statoriques suivit par celles du rotor.
- Les pertes dans l'acier sont réparties premièrement dans la culasse statorique suivie par celles des dents statoriques puis par les pertes supplémentaires dans l'acier avec des valeurs moindres, et les pertes principales dans le fer sont très importantes.
- Et enfin de calcul on à déduit le rendement de la machine.

**II-4 Calcul des pertes de puissance par la méthode du circuit électrique équivalent**

Plusieurs méthodes ont été développées pour la détermination des paramètres d'un moteur asynchrone, dans notre travail on s'intéresse à la méthode classique, on utilisant le schéma électrique équivalent suivant.



**Figure II-1 Le schéma équivalent de la machine asynchrone.**

D'après la figure II-1 on distingue que le schéma équivalent contient deux parties : la partie statorique qui est alimentée par des tensions triphasée. Elle comprend des résistances de ces enroulements ainsi que des réactances des fuites. Une partie rotorique qui doit son FEM au champ magnétique présent dans l'entrefer. Cette partie comporte aussi des résistances de ces bobinages et des réactances de fuite.

**II-4-1- Les équations du schéma électrique équivalent**

À partir du schéma équivalent de la figure (II-1) on peut tirer les équations générales du stator et du rotor comme suit

**II-4-1-a) Equations du stator**

$$\bar{V}_s = \bar{E}_s + (R_s + jX_s) \cdot \bar{I}_s \quad \text{[V]} \tag{II.14}$$

**Avec :**

$V_s$  : Tension simple d'alimentation [V]

$I_s$  : Le courant d'une phase statorique [A]

$R_s$  : Résistance statorique par phase [ $\Omega$ ]

$X_s$  : La réactance cyclique de fuite d'une phase statorique [ $\Omega$ ]

$E_s$  : La f.e.m (force électromotrice) induite d'une phase statorique [V]

#### II-4-1-b) Equations du rotor

$$\overline{E}_r = (R_r + jgX'_r) \cdot \overline{I}'_r \quad \text{(II.15)}$$

Avec :

$E_r$  : La f.e.m. Induite d'une phase rotorique [V]

$I}'_r$  : Le courant d'une phase rotorique [A]

$R_r$  : La résistance rotorique par phase [ $\Omega$ ]

$X'_r$  : La réactance cyclique de fuite d'une phase rotorique [ $\Omega$ ]

On divise l'équation du rotor par le glissement g on aura :

$$\frac{\overline{E}_r}{g} = \left( \frac{R_r}{g} + jX'_r \right) \cdot \overline{I}'_r \quad \text{(II.16)}$$

#### II-5 Détermination des paramètres par la méthode classique

La méthode classique est l'une des méthodes qui permet de calculer les paramètres d'une machine asynchrone en utilisant le circuit équivalent, et elle se base sur deux essais [6].

1-Essai à vide.

2-Essai à rotor bloqué.

Et on aura besoin aussi d'un essai à courant continu pour déterminer la résistance statorique. Tous les essais de notre travail sont effectués sur un moteur asynchrone à cage d'écureuil au sein de laboratoire **TEC 423** de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou [6].

II-5-1) Le schéma électrique en T

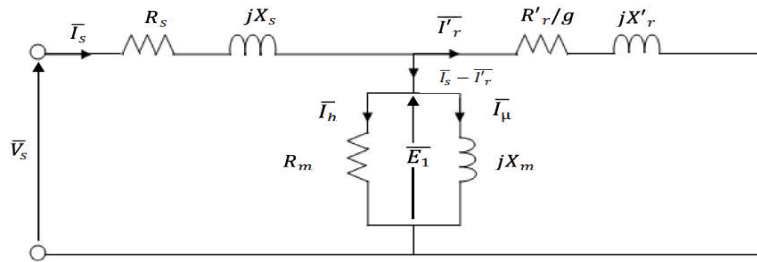


Figure II-2 Schéma équivalent ramenée au stator de la machine asynchrone

À partir de ce schéma on déduit les équations électriques suivantes :

$$\begin{cases} \bar{V}_s = (R_s + jX_s) \cdot \bar{I}_s + \bar{E}_1 \\ \bar{E}_1 = \left(\frac{R'_r}{g} + jX'_r\right) \cdot \bar{I}'_r \\ \bar{I}_s - \bar{I}'_r = \bar{I}_m = \frac{\bar{E}_1}{Z_m} \end{cases}$$

Avec :

$$Z_m = \frac{R_m * X_m}{R_m + X_m}$$

$$\bar{I}_m = \bar{I}_h + I_\mu$$

Avec :

$Z_m$  : L'impédance magnétisante

$R_m$  : La résistance magnétisante

$X_m$  : La réactance magnétisante

II-5-2) Détermination de la résistance statorique  $R_s$

Pour mesuré la résistance  $R_s$  on utilise la méthode volt-ampérométrique, réalisée sur le une phase du moteur. Cet essai nécessite une source d'alimentation en continu, un voltmètre, et un ampèremètre afin de mesurer respectivement la tension et le courant qui caractérisent la résistance suivant la loi d'ohme [6] :

$$U = I * R_s \quad \text{implique que} \quad R_s = \frac{U}{I} \quad \text{elle s'exprime en } [\Omega]. \quad \text{(II-17)}$$

Il faut prendre plusieurs mesures pour des différentes valeurs de la tension. La résistance statorique sera la moyenne de ces résistances mesurées.

En tenant compte de l'écart entre la valeur de ces résistances mesurées et la valeur moyenne, qui ne doit pas dépasser une erreur supérieur à 5%.

Cette mesure est faite à une température ambiante de 27°C [6].

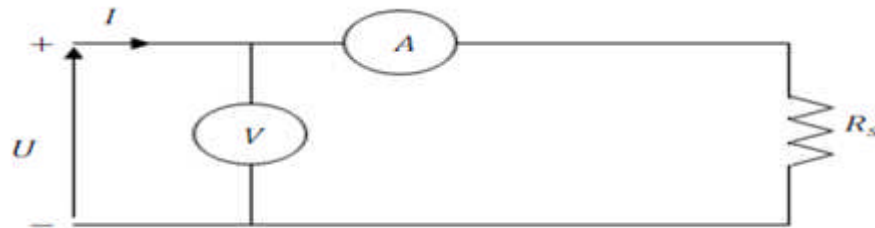


Figure II-3 Le schéma mesure de la résistance statorique en continu.

Les résultats de mesure de la résistance sont résumés dans le tableau suivant II-b [6].

II-5-2-1 Résultat de mesure

Phase [U <sub>1</sub> U <sub>2</sub> ]			Phase [V <sub>1</sub> V <sub>2</sub> ]			Phase [W <sub>1</sub> W <sub>2</sub> ]		
I <sub>sy</sub> (A)	U (V)	R <sub>s</sub> (Ω)	I <sub>sy</sub> (A)	U(V)	R <sub>s</sub> (Ω)	I <sub>sy</sub> (A)	U(V)	R <sub>s</sub> (Ω)
1	8.25	8.25	1	8,5	8.5	1	8,6	8.6
2	16.6	8.30	2	16,5	8.25	2	17	8.5
3	25	8.33	3	25	8.33	3	25	8.33

Tableau II-b: Résultats de mesure de l'essai en courant continu.

Donc la valeur moyenne de la résistance statorique à froid Tamb= 27°C.

Et la résistance moyenne est comme suite : R<sub>smoy</sub>=8.37Ω.

On a aussi mesuré la résistance avec un ohmmètre dans les différentes phases sont comme suite :

U<sub>1</sub>U<sub>2</sub>=8.2Ω

V<sub>1</sub>V<sub>2</sub>=8.2Ω

W<sub>1</sub>W<sub>2</sub>=8.4Ω

Tel que cité au début de cette section la méthode classique est basée sur deux essais (à vide et à rotor bloqué).

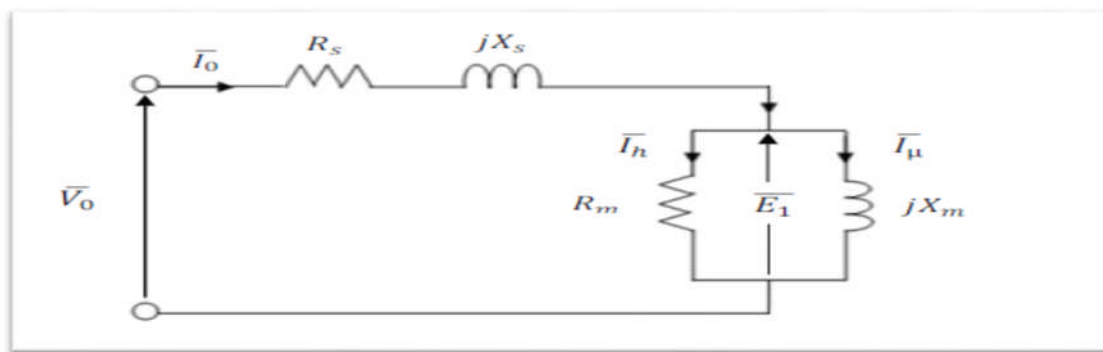
**II-5-3) Essai à vide**

Dans ce cas la charge est nulle, on alimente le moteur accouplé à la génératrice à courant continu, sous différentes tensions. Puis on relève les grandeurs suivantes :

- La tension d'alimentation  $V_0$  [V].
- Le courant absorbé à vide  $I_0$  [A].
- La puissance absorbée à vide  $P_0$  [W].
- La vitesse de rotation  $N_0$  [tr/min]
- La température des enroulements [°C]

Le glissement  $g_0$  à vide est très faible, surtout pour les moteurs de grande puissance et pour le couple n'est pas réellement nul car le moteur doit vaincre ses propres frottements, c'est pour cette raison que le glissement n'est pas vraiment nul.

Ce pendant la résistance fictive  $\frac{R_r'}{g}$  est très grande devant les autres impédances et donc le courant  $I_r$  est négligeable devant le courant  $I_0$ . D'où le schéma équivalent à vide il est présenté sur la figure II-4 [8]



**Figure II-4 Présente le schéma équivalent à vide.**

**II-5-3-1 Détermination des pertes fer et des pertes mécaniques**

La puissance électrique absorbée à vide  $P_0$  correspond à la somme des pertes : les pertes dans le fer du stator  $P_{fer}$ , les pertes par effet Joule dans le stator  $P_{js}$  et les pertes mécaniques  $P_{mec}$ .

$$P_0 = 3R_s I_0^2 + P_{fer} + P_{mec} \tag{II.18}$$

$$P_0 - 3R_s I_0^2 = P_{fer} + P_{mec} \tag{II.19}$$

Les valeurs de  $I_0$  et  $P_0$  peuvent être mesurées respectivement à l'aide d'un ampèremètre et d'un wattmètre; On relève aussi, la température et la vitesse de rotation pour chaque valeur de la tension d'alimentation.

Ainsi, dans le calcul des pertes Joule à vide, on tient compte de la variation de la résistance en fonction de la température par la relation suivante :

$$R_s = R_{s(27^\circ c)} * \frac{T_2 + K}{T_1 + K} \tag{II.20}$$

Avec :

$R_{s(27^\circ c)}$  : La résistance statorique à 27°C.

$T_2$  : température finale.

$T_1$  : température initiale.

$K$  : une constante pour l'aluminium. Elle est égale à 225°C, et pour le cuivre elle est égale à 235°C (donne nous cas  $K=235^\circ C$ )

On peut déduire alors la courbe des pertes à vide donnée par l'équation suivante :

$$P_{fer} + P_{mec} = P_0 - 3R_s I_0^2 = f(U^2) \tag{II.21}$$

Cet essai est fait sans entrainement, et à une température ambiante de 27°C. [6]

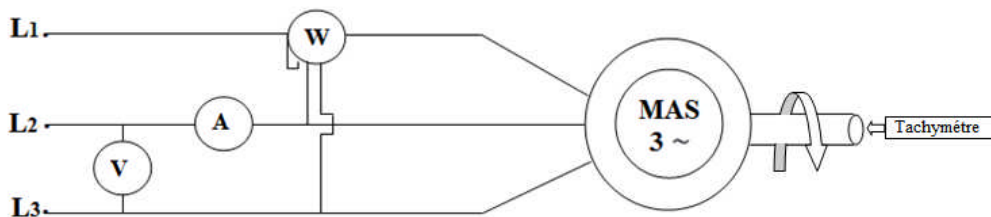


Figure II-5 Le Circuit de mesure de l'essai à vide.

On voit que Le circuit de mesure comporte les éléments suivants :

- Un voltmètre.
- Un wattmètre.
- Un ampèremètre pour la mesure de courant à vide.

➤ Un tachymètre.

### II-5-3-1-a Les résultats de mesure

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau II- c:

$V_0$ (v)	$I_{0y}$ (A)	$P_0$ (w)	T (°c)	N (tr/min)	$R_s$ ( $\Omega$ )
420	2.71	444	42.9	1499	8.87
400	2.31	332	48.7	1497	9.06
380	1.87	245	47.0	1498	9.00
360	1.31	181	46.5	1493	8.99
340	1.28	147	45.8	1495	8.97
320	1.15	139	45.2	1496	8.95
300	1.09	124	44.4	1497	8.92
280	0.98	118	43.3	1496	8.89
260	0.86	103	42.9	1496	8.87
240	0.80	94	42.5	1496	8.86
220	0.75	91	41.9	1494	8.84
200	0.68	94	41.9	1494	8.84
180	0.57	84	41.4	1493	8.83
160	0.52	74	40.3	1492	8.79
140	0.43	72	39.8	1489	8.77
120	0.34	64	39.4	1488	8.67
100	0.31	65	38.8	1482	8.74
80	0.32	61	38.5	1473	8.73
60	0.28	56	38.3	1451	8.73
40	0.46	62	38.0	1385	8.72
20	0.75	44	38.0	0	8.72

**Tableau II- c: Représente les résultats obtenus à partir de l'essai à vide**

Ces résultats nous permettent de déterminer les pertes fer et la puissance mécanique à partir du graphe suivant :

II-5-3-b Le graphe des pertes fer et la puissance mécanique

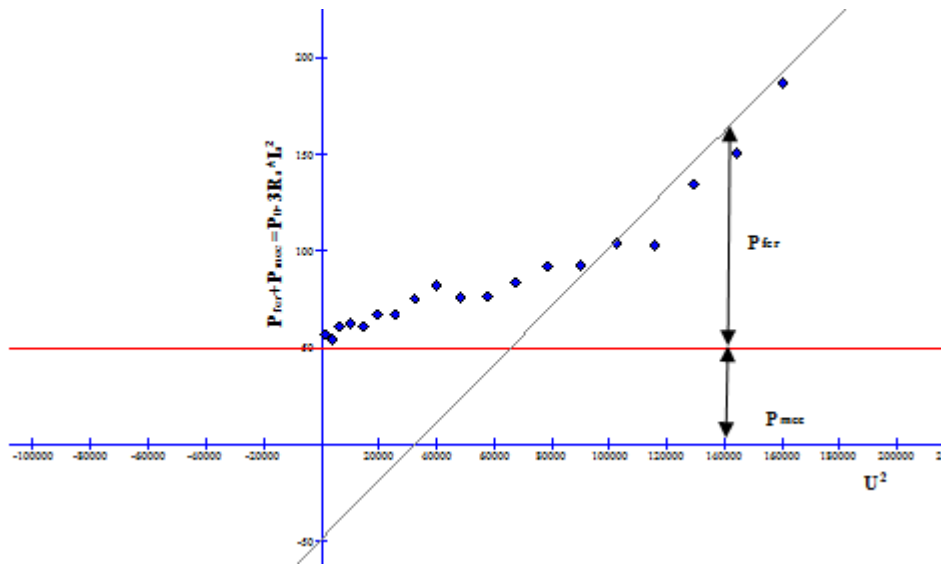


Figure II-6 Le graphe des pertes fer et la puissance mécanique.

II-5-3-c Détermination de  $R_m$  et  $X_m$

L'équation électrique simplifiée qui régit le schéma équivalent à vide est donnée par :

$$\bar{V}_0 = (R_s + jX_s) \cdot \bar{I}_0 + \bar{E}_1 \tag{II.22}$$

D'où :

$$\bar{E}_1 = \bar{V}_0 - (R_s + jX_s) \cdot \bar{I}_0 \tag{II.23}$$

Avec :

$$\bar{E}_1 = R_m \cdot \bar{I}_h = X_m \cdot \bar{I}_\mu \tag{II.24}$$

$$\begin{cases} I_h = I_0 \cos \varphi_0 \\ I_\mu = I_0 \sin \varphi_0 \end{cases}$$

II-5-3-d Le facteur de puissance à vide

$$P_0 = \sqrt{3} \cdot V_0 \cdot I_0 \cdot \cos \varphi_0$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot V_0 \cdot I_0} \tag{II.25}$$

II-5-3-c-1 La résistance magnétisante  $R_m$

A vide :

$$\begin{cases} P_{fer} = 3 \cdot R_m \cdot I_h^2 \\ E_1 = R_m \cdot I_h \end{cases}$$

D'où 
$$R_m = \frac{3 \cdot E_1^2}{P_{fer}} \quad [\Omega] \quad (II.26)$$

II-5-3-c-2 La réactance magnétisante  $X_m$

$$\bar{E}_1 = X_m \cdot \bar{I}_\mu$$

$$X_m = \frac{\bar{E}_1}{\bar{I}_\mu} = \frac{E_1}{I_\mu}$$

D'où 
$$X_m = \frac{E_1}{I_0 \cdot \sin \varphi_0} \quad [\Omega] \quad (II.27)$$

II-5-4 Essai à rotor bloqué (g=1)

Dans cet essai, on bloque le rotor afin d'empêcher sa rotation ( $\Omega=0, g=1$ ). On alimente le moteur sous tension réduite de façon à ne pas dépasser le courant nominal, ce là nous permet de déterminer les grandeurs suivantes :

- La tension nominale d'alimentation [V]
- Le courant nominal statorique de cc [A].
- La puissance nominale absorbée de cc [W].

Comme on le schématisé dans un bloc de montage:

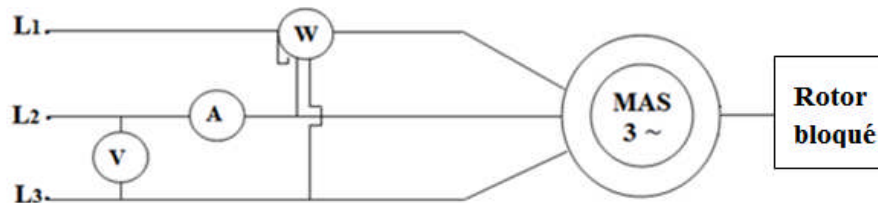


Figure II-7 Le montage de moteur asynchrone à rotor bloqué

Il s'appelle aussi essai en court-circuit car le courant absorbé par le moteur est très élevé, et le courant magnétisant est négligeable par rapport au courant de cc. On peut le présenté sous forme d'un circuit équivalent en court-circuit comme suite :

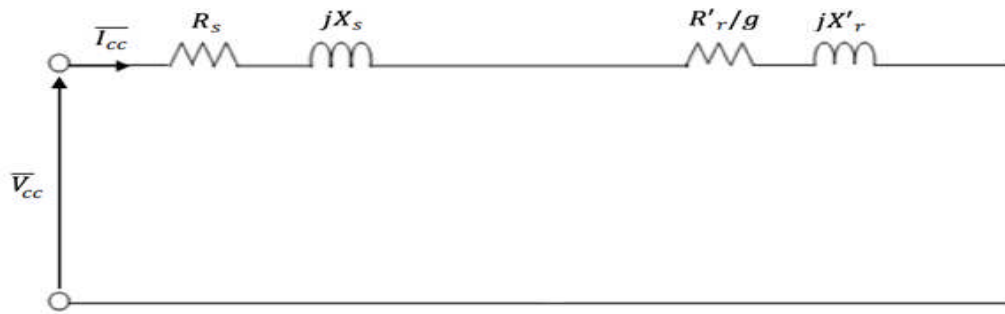


Figure II-8 le circuit équivalent à rotor bloqué

II-5-4-1 Résultat de mesure

Les valeurs mesurées à rotor bloqué sont représentée dans le tableau II- d :

V <sub>cc</sub> (V)	I <sub>cc</sub> Δ(A)	P <sub>cc</sub> (W)
45	3	28.9
31	2	72
15	1	23

Tableau II-d : Représente les résultats de mesure en essai en court-circuit

II-5-4-2 Expression de la résistance R'\_r

La puissance électrique absorbée à rotor bloqué P<sub>cc</sub> correspond à la somme des pertes par effet Joule dans le stator P<sub>J<sub>s</sub></sub> et les pertes par effet Joule dans le rotor P<sub>J<sub>r</sub></sub> elle présenté sous la forme suivante [6] : P<sub>cc</sub> = 3(R<sub>s</sub> + R'<sub>r</sub>).I<sub>cc</sub><sup>2</sup>

D'où :

$$R'_r = \frac{P_{cc}}{3.I_{cc}^2} - R_s \quad [\Omega] \tag{II.28}$$

II-5-4-3 Expression des réactances de fuites X<sub>s</sub> et X'\_r

L'impédance vue aux bornes de la tension d'alimentation est la suivante [6] :

$$Z_{cc} = \frac{\overline{V_{cc}}}{I_{cc}} \quad [\Omega]$$

Avec :

$$Z_{cc} = (R_s + R'_r) + j(X_s + X'_r)$$

On notera

$$R_{cc} = R_s + R'_r \quad [\Omega]$$

$$X_{cc} = X_s + X'_r \quad [\Omega]$$

**II-5-4-4 Le facteur de puissance en court-circuit**

$$P_{cc} = \sqrt{3} \cdot V_{cc} \cdot I_{cc} \cdot \cos \varphi_{cc}$$

D'où :

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{\sqrt{3} \cdot V_{cc} \cdot I_{cc}} \quad (\text{II.29})$$

On peut écrire

$$R_{cc} = Z_{cc} \cdot \cos \varphi_{cc}$$

$$X_{cc} = Z_{cc} \cdot \sin \varphi_{cc}$$

Puisque

$$Z_{cc} = \sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2}$$

**Donc :**

$$X_{cc} = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_{cc}^2} \quad (\text{II.30})$$

Pour les moteurs bobinés et les moteurs à cage de petite puissance, la réactance de fuite statorique est égale à la réactance de fuite rotorique, mais pour les moteurs de grande puissance le rapport  $X_s/X'_r$  est donné par le constructeur.

Donc :

$$X_s = X'_r = \frac{1}{2} X_{cc}$$

$$X_s = X'_r = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{Z_{cc}^2 - (R_s + R'_r)^2} \quad [\Omega]$$

Le calcul des paramètres est fait on utilisant un programme Mathcad, et les résultats obtenue sont présentés dans le tableau II-d comme suit à une tension d'alimentation  $U=380V$ .

$P_{fer}(W)$	$P_{mec}(W)$	$X_s(\Omega)$	$X_r'(\Omega)$	$R_m(\Omega)$	$X_m(\Omega)$	$R_s(\Omega)$	$R_r'(\Omega)$
120	50	20.114	20.114	$3.61 * 10^3$	117.698	8.37	8.074

**Tableau II- e : Représente les différents paramètres obtenus par le programme Mathcad.**

**II-5-5 Expression des différentes impédances du schéma équivalent :**

L'expression de l'impédance globale ou l'impédance d'entrée du schéma équivalent est :

$$\bar{Z}_e = \bar{Z}_1 + \frac{\bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_m}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_m} \quad [\Omega] \quad (II.31)$$

**Avec :**

$$\bar{Z}_1 = R_s + jX_s : \text{ Impédance d'une phase de l'enroulement statorique } [\Omega].$$

$$\bar{Z}_2 = \frac{R_r'}{g} + jX_r' : \text{ Impédance d'une phase de l'enroulement rotorique } [\Omega].$$

$$\bar{Z}_m = \frac{jR_m \cdot X_m}{R_m + jX_m} : \text{ Impédance équivalente de la branche magnétisante } [\Omega].$$

**II-5-6 Expression du courant primaire**

$$\bar{I}_s = \frac{\bar{V}_s}{\bar{Z}_1 + \frac{\bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_m}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_m}} = \frac{\bar{V}_s}{\bar{Z}_e} [A] \quad (II.32)$$

**II-5-7 Expression du courant secondaire ramené au stator**

On appliquant le diviseur de courant on trouve :

$$\bar{I}_r = \frac{\bar{Z}_m}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_m} * \bar{I}_s$$

On remplace  $\bar{I}_s$  par son expression trouvée précédemment on trouve:

$$\bar{I}_r = \frac{\bar{Z}_m}{(\bar{Z}_2 + \bar{Z}_m) \left( \bar{Z}_1 + \frac{\bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_m}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_m} \right)} * \bar{V}_s [A] \quad (II.33)$$

### II-5-8 Expression du courant magnétisant

On appliquant le diviseur de courant on trouve :  $\bar{I}_m = \frac{\bar{Z}_2}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_m} * \bar{I}_s$

On remplace  $\bar{I}_s$  par son expression trouvée précédemment on trouve:

$$\bar{I}_m = \frac{\bar{Z}_2}{(\bar{Z}_2 + \bar{Z}_m) \left( \bar{Z}_1 + \frac{\bar{Z}_2 \bar{Z}_m}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_m} \right)} * \bar{V}_s [A] \quad (II.34)$$

### II-5-9 Expression de la puissance absorbée

$$P_a = 3. |\bar{V}_s|. |\bar{I}_s|. \cos \varphi \quad [W] \quad (II.35)$$

### II-5-10 Expression de la puissance utile

$$P_u = P_a - (P_{Js} + P_{Jr} + P_{fer} + P_{mec}) \quad [W]$$

$$P_u = P_a - (3. R_s. I_s^2 + 3. R'_r. I_r'^2 + P_{fer} + P_{mec}) \quad [W] \quad (II.36)$$

### II-5-11 Expression de couple utile

$$C_u = \frac{P_u}{\Omega} \quad (II.37)$$

### II-5-12 Expression de rendement

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} * 100 \quad [\%] \quad (II.38)$$

Le calcul des paramètres est fait on utilisant un programme informatique (langage de programmation Matlab).

## II-6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre deux méthodes de calcul des pertes dans un moteur asynchrone à cage d'écureuil. La méthode de circuit électrique équivalent nécessite des essais expérimentaux pour déterminer les paramètres de ce dernier ensuite déduire les pertes, par contre la méthode de dimensionnement est basé premièrement sur les données fournis par le cahier de charge ensuite sur les dimensions géométrique et électrique de la machine.

# CHAPITRE III

*Calcul analytique des pertes fer*

### III-1 Introduction

Dans ce chapitre la formulation analytique la plus classique des pertes fer, proposée par Steinmetz, est exploitée pour calculer les pertes fer dans une machine asynchrone à cage d'écureuil.

### III-2 Méthode analytique

La méthode analytique est une méthode numérique, qui consiste à faire une analyse des formules analytiquement, jusqu'à atteindre l'exploitation des résultats.

#### II-2-1 Formulation analytique du calcul des pertes fer

Les formules analytiques, sont considérées comme des méthodes théoriques car elles utilisent des équations mathématiques qui facilitent le calcul des pertes fer.

##### II-2-1 1) Formulation analytique pour les pertes fer statorique

Les pertes fer statoriques sont représentées par une formulation de Steinmetz. Cette formule utilise la décomposition en trois termes selon l'origine des pertes : les pertes fer par hystérésis, les pertes fer par courant de Foucault, et les pertes fer supplémentaires [8].

##### II-2-1-1 a) les pertes par Hystérésis

La formulation analytique la plus classique a été établie par Steinmetz. Ainsi on définit les pertes massiques par hystérésis (W/kg) en onde sinusoïdale pour un matériau homogène, isotrope et à champ uniforme comme suit :

$$P_{hys} = K_H * f * B_{max}^2 \quad (\text{III.1})$$

**Avec :**

$K_H$  : Coefficient de pertes par hystérésis, spécifique du matériau (fourni ou non par le fabricant de tôle). Il est donné d'après la figure 2 de l'annexe E.

$f$  : La fréquence de l'induction [Hz].

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

##### II-2-1-1 b) les pertes par courant de Foucault

Les pertes massiques par courant de Foucault (en W/kg), et cette formule peuvent être calculées par la relation approchée :

$$P_f = K_F * (f * e_1 * B_{max})^2 \quad (\text{III.2})$$

**Avec :**

$e_1$  : l'épaisseur de la tôle [m].

$f$  : La fréquence de l'induction [Hz].

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

$K_F$  : Le coefficient des pertes par courant de Foucault et caractéristique de la tôle. Il est donné d'après la figure 3 de l'annexe E.

### III-2-1-2) les pertes fer globales

Les pertes fer se situent dans les parties magnétiques du moteur. On distingue deux composantes principales : les pertes par hystérésis et les pertes par courant de Foucault [8].

On peut exprimer en (W/Kg), elle est représentée sous la forme suivante:

$$P_{fer} = (P_f + P_{hys}) \quad \text{(III.3)}$$

Alors :

$$P_{fer} = (K_H * f + K_F * (e_1 * f)^2) * B_{max}^2 \quad \text{(III.4)}$$

Comme on peut exprimer les pertes fer en W on introduisant les masses du fer des dents et de la culasse (ou bien la couronne) respectivement  $M_d$  et  $M_c$  par l'expression suivante :

$$P_{fer1} = \{(K_H * f + K_F * (e_1 * f)^2) * B_{max}^2\} * [M_c + M_d] \quad \text{(III.5)}$$

Dans l'équation(III.5) les tôles sont parfaites.

Après le processus de fabrication des tôles on affecte les pertes par des coefficients d'ordre 3 et 1.5 respectivement dans les dents et la culasse [11]. Donc l'équation (III.5) devient comme suit :

$$P_{fer2} = \{(K_H * f + K_F * (e_1 * f)^2) * B_{max}^2\} [3M_d + 1.5M_c] \quad \text{(III.6)}$$

**Avec :**

$M_c$  : La masse totale de la culasse correspond à Gc1 dans l'annexe B

$M_d$  : La masse totale des dents correspond à Gz1 dans l'annexe B

- Les résultats de calcul sont présentés dans le tableau suivant :

Les pertes fer globale	En W/Kg	Lorsque les tôles sont parfaites (W)	Après le processus de fabrication (W)
Les résultats de calcul	144.789	897.696	1737.042

**Tableau III-a : Résultats de calcul des pertes fer globale « formulation de Steinmetz »**

- Les résultats de calcul des pertes fer par hystérésis et par le courant de Foucault « formulation de Steinmetz »

Les pertes fer	Par hystérésis en W/Kg	Par le courant de Foucault en W/Kg
Les résultats de calcul	144.789	$9.028 \cdot 10^{-4}$

**Tableau III-b : Les résultats de calcul des pertes fer par hystérésis et par le courant de Foucault « formulation de Steinmetz »**

### III-2-1-3 Interprétation des résultats

On remarque que les pertes fer globale dans les tôles qui ne sont pas parfaite sont plus grandes par rapport à celle qui est parfaite, et cette différence est due au processus de fabrication (a cause de : l'assemblage, la pression, etc...).

On constate que les pertes fer dans le cas de la machine d'étude sont constituées majoritairement par les pertes par hystérésis.

### III-3 conclusion

Cette partie est consacrée à la description et l'application directe de la méthode analytique. Celle-ci permet d'utiliser la formule établie par Steinmetz pour calculer les pertes fer.

D'après les résultats de calcul obtenus, à partir de cette méthode, que les pertes sont surestimées. Cela est certainement dû à l'influence du choix de la valeur de l'induction maximale  $B_{max}$  et surtout aux coefficients des pertes par courant de Foucault  $K_F$  et de pertes par hystérésis  $K_H$ . Ce résultat, montre que l'application directe de cette formulation donne des résultats éloignés de la réalité dans le cas de la machine étudiée.

Cette méthode a surtout l'avantage de séparer les pertes par hystérésis et par courant de courant de Foucault.



# CHAPITRE IV

*Mesure expérimentale des pertes fer d'un  
moteur asynchrone à cage*

### IV-1 Introduction

Dans ce chapitre on s'intéresse à la détermination des pertes fer d'un moteur asynchrone par la méthode expérimental. Pour ce faire, on commence par la présentation de la machine asynchrone étudiée, du banc d'essai, suivi par représentation et de l'interprétation des différents essais effectués et réalisés au sein du laboratoire de machine électrique (TEC 432) du département d'électrotechnique (Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou). Par la suite, on fera une comparaison avec les résultats obtenus par les méthodes théoriques exploitées dans les chapitres précédents.

### IV-2 Présentation du moteur étudié

Le moteur qui fait l'objet des différents essais, est un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil ayant les caractéristiques suivantes :

- Type 890-100-1064-0041.
- Marque ENEL (électro-industrie) N°22-128-02.
- Puissance 2,2 kW.
- Tension nominale de 380V.
- Courant nominal de valeur 5,2A en triangle.
- Vitesse de rotation de 1410 tr/min.
- Coefficient de puissance  $\cos\varphi=0,83$ .
- Classe d'isolation f (155°C).

### IV-3 Description du banc d'essai

Le matériel utilisé pour effectuer les essais sur la machine d'étude est constitué :

- D'une machine à courant continu d'entraînement possédant les caractéristiques suivantes :
  - Type DL2062
  - Puissance nominale 2.4kW
  - Tension nominale 220V
  - Courant nominale 10.9A
  - Vitesse nominale 1420tr/min
  - Courant d'excitation nominale 1.6A
  - Classe d'isolation (F)
- Une source d'alimentation triphasé fixe 380V/20A, et variable 0-400V/3,4A en alternatif et une source de tension variable continue.

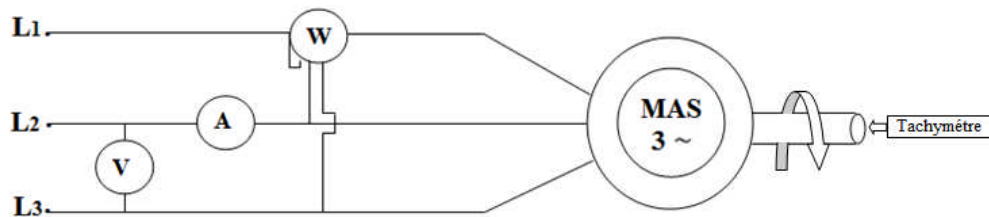
- Rhéostat de champ.
- Différents appareils de mesure
  - ✓ Ampèremètres, Voltmètres, Wattmètres, Tachymètre, Thermomètre.
  - ✓ Des capteurs de température.
  - ✓ Un enregistreur de température (CA 625 ECOPOINTER)
  - ✓ Des fils électrique de câblage.

Dans cette étude pratique, en réalise deux essais (à vide et au synchronisme) de la machine on commence par :

#### IV-3-1 Essai à vide

L'essai à vide c'est l'essai ou la charge est nulle, et qui consiste à alimenter le moteur asynchrone selon différentes valeurs de tension d'alimentation. Dans cet essai le moteur est accouplé mécaniquement à la machine à courant continu.

##### IV-3-1-2 le schéma de montage



**Figure IV-1 Le schéma de montage de la machine à vide.**

Pendant cet essai on fait varier la tension d'alimentation, le moteur entraînant la génératrice à courant continu, ce qui nous permet de déduire les différentes grandeurs qui sont présentées dans le tableau IV- a (dont le calcul est fait en annexe c) :

$P_{fer}(W)$	$P_{mec}(W)$	$X_s(\Omega)$	$X'r(\Omega)$	$R_m(\Omega)$	$X_m(\Omega)$	$R_s(\Omega)$	$R'r(\Omega)$
120	50	20.114	20.114	$3.61 * 10^3$	117.698	8.37	8.074

**Tableau IV- a : Résultats de mesure de l'essai à vide.**

#### IV-3-2 Essai de synchronisme ( $g=0$ )

Cet essai permet de déterminer la résistance du fer  $R_m$  de circuit équivalent qui est présentée sur la figure IV-4 et aussi de calculer les pertes fer de la machine.

**IV-3-2 a) Circuit de mesure au synchronisme**

Dans cet essai le moteur entrainer grâce à la machine à courant continu fonctionnant en moteur pour qu'elle tourne au synchronisme. Comme le glissement est nul, le courant  $I_2$  est aussi nul.

Pour réaliser cet essai, on couple la machine à courant continu (MCC) et la machine asynchrone d'étude. En premier, on alimente la MCC avec une source variable jusqu'à atteindre la vitesse de synchronisme (1500tr/min) au même temps on vérifie le sens de rotation.

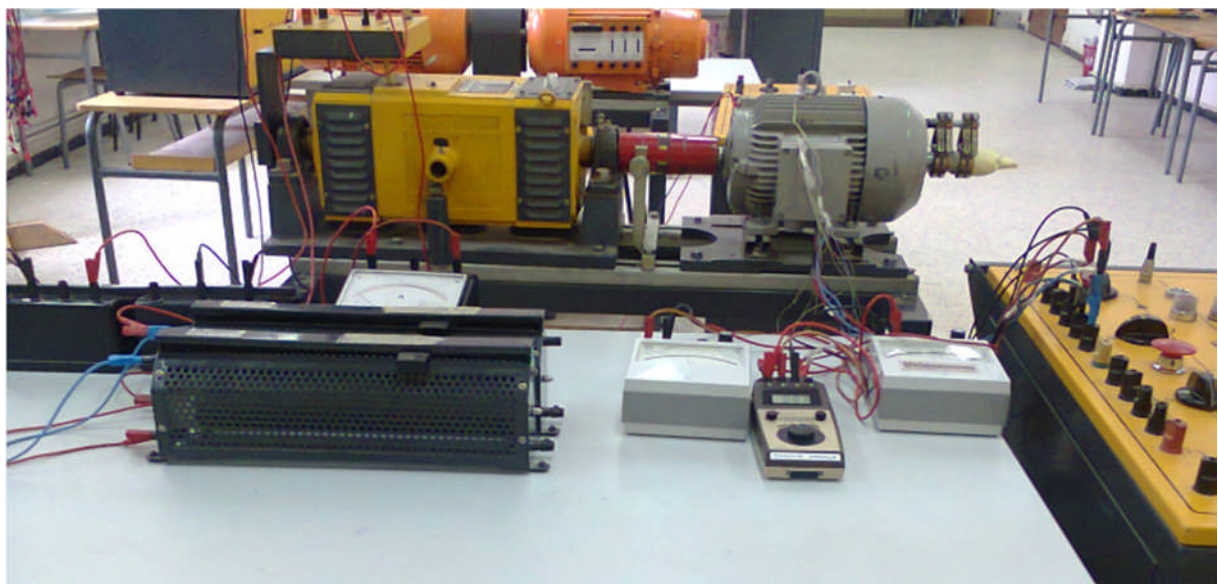
On va utiliser pour sa les appareils suivants :

- Une source variable à courant continu
- Deux ampèremètres
- Un voltmètre
- Deux rhéostats branchés en parallèle à l'excitation pour varier la vitesse.
- Un tachymètre pour vérifier la vitesse

D'autre part on alimente la machine asynchrone avec une autre source variable à courant alternatif jusqu'à atteindre la tension nominale et tournant dans le même sens que la MCC. On utilise les appareils de mesure suivants :

- Deux ampèremètres
- Un voltmètre
- Un wattmètre

La photographique suivante présente le montage complet de l'essai au synchronisme :



**Figure IV-2 Le montage complet de l'essai au synchronisme (juin 2015)**

La figure suivante présente le circuit de mesure au synchronisme :

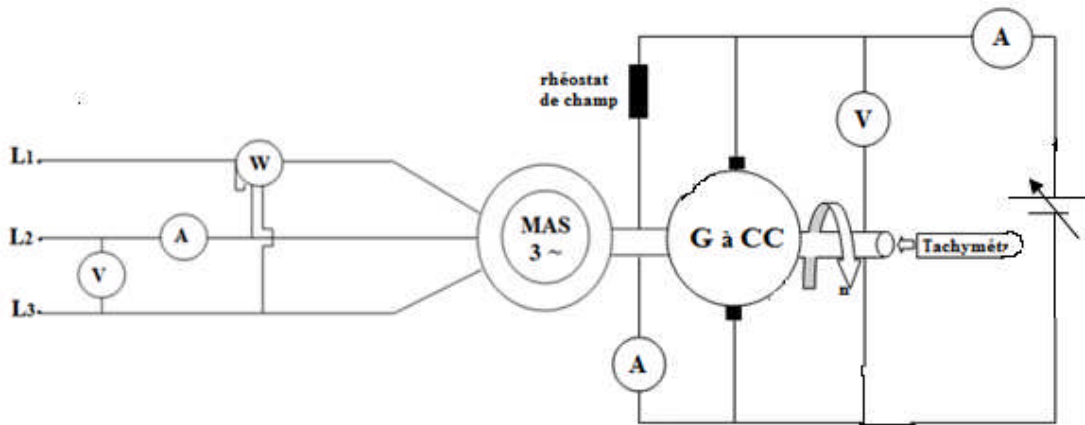


Figure IV-3 Circuit de mesure au synchronisme

Le schéma équivalent pour l'essai au synchronisme est comme suit :

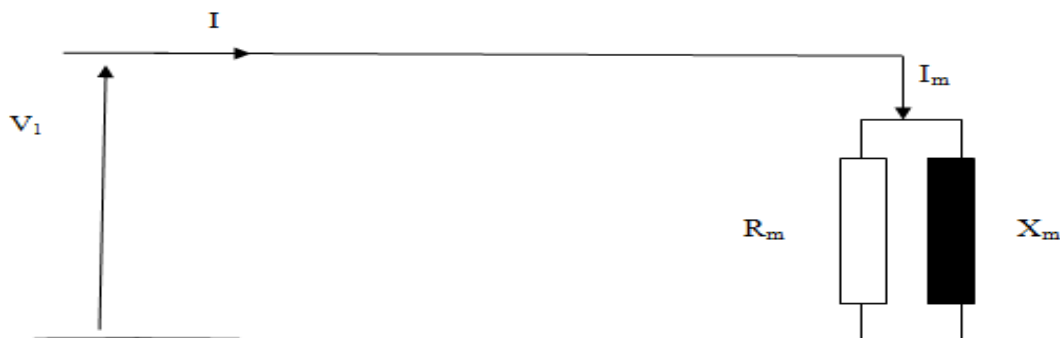


Figure IV-4 Le schéma équivalent pour l'essai au synchronisme

Après avoir alimenté la génératrice et la machine asynchrone on obtient les résultats suivants :

$V_0$ [V]	$I_{0(y)}$ [A]	$P_0$ [W]	N [tr/min]
380	1.84	66	1500
400	2.25	144	1500

Tableau IV- b : Résultats de mesure de l'essai au synchronisme

**IV-3-2 b) calcul de la résistance magnétisante  $R_m$** 

$$R_m = 3 \cdot V_0^2 / P_0$$

$$R_m = 3 \cdot (400)^2 / 144$$

$$R_m = 3.333 \cdot 10^3 \text{ } [\Omega]$$

**Avec :**

$V_0$  : La tension nominale [V]

$P_0$  : La puissance active absorbée [W]

**IV-3-2 b) calcul de la puissance réactive  $Q_0$** 

- **On calcul  $S_0$**

$$S_0 = 3 \cdot V_0 \cdot I_{0y}$$

$$S_0 = 3 \cdot 400 \cdot 2.25$$

$$S_0 = 2700 \text{ [VA]}$$

- **Alors on calcul  $Q_0$**

$$Q_0 = \sqrt{S_0^2 - P_0^2}$$

$$Q_0 = \sqrt{2700^2 - 144^2}$$

$$Q_0 = 2.696 \cdot 10^3 \text{ [VAR]}$$

**IV-3-2 c) calcul de la réactance de magnétisation  $X_m$** 

$$X_m = 3 \cdot V_0^2 / Q_0$$

$$X_m = 3 \cdot (400)^2 / 2.696 \cdot 10^3$$

$$X_m = 178.031 \text{ } [\Omega]$$

**IV-3-2 d) calcul des pertes fer**

$$P_{fer} = 3 \cdot V_0^2 / R_m$$

$$P_{fer} = 3 \cdot (400)^2 / 3.333 \cdot 10^3$$

$$P_{fer} = 144 \text{ [W]}$$

Le tableau suivant représente les calculs de l'essai au synchronisme

$P_{fer}[W]$	$X_m[\Omega]$	$Q_0[VAR]$	$R_m[\Omega]$
144	178.031	$2.696 \cdot 10^3$	$3.333 \cdot 10^3$

**Tableau IV- c : Les résultats de calcul de l'essai au synchronisme**

### Remarque

D'après les résultats de mesure des pertes fer obtenus deux essais (à vide et au synchronisme), on remarque qu'il ya une petite différence dans leur valeur. Cette différence est due, d'une part à l'essai au synchronisme qui est difficile à réaliser. En effet Toute très légères variation de vitesse provoquent des indications erronées des appareils de mesure. Et d'autre part aux erreurs de mesure de l'essai à vide.

### IV-4 comparaison des résultats

La comparaison des différents résultats de calcul des pertes fer obtenus dans les chapitres précédents sont présentés dans le tableau IV-d suivant :

les différentes méthodes de calcul les pertes fer	Pertes fer	L'unité
Méthode de dimensionnement	100.334	W
Méthode du circuit électrique équivalent	86.7324	W
Méthode analytique par la formulation de Steinmetz	897.696	W
Par l'essai de synchronisme	144	W
Par l'essai à vide	120	W

**Tableau IV-d Résultats des calculs des pertes fer par différentes méthodes.**

### Commentaire sur le tableau

- D'après ce tableau on constate que les valeurs des pertes fer sont différentes d'une méthode à l'autre.

- Globalement, la différence de valeur des pertes fer avoisine de 20W, pour la méthode analytique elles sont surestimées.

#### **IV-5 conclusion**

Dans ce chapitre nous avons réalisé deux essais différents pour mesurer les pertes fer dans la machine asynchrone à cage. Entre autre, l'essai à vide et l'essai au synchronisme. Ce dernier essai présente des difficultés d'ordre pratique en toute variation de vitesse de rotation en de hors de la vitesse de synchronisme, entraîne des différences plus ou moins importantes dans la valeur des pertes fer.

Les résultats obtenus pour l'essai à vide nous servent de référence pour valider les méthodes théoriques on a une différence de l'ordre de 15W à 24 W est constaté. Seules les pertes obtenues par la méthode analytique (formulation de Steinmetz) sont surestimées.

**CONCLUSION**

**GENERALE**

## Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire a pour objectif l'étude et l'estimation des pertes fer dans la machine asynchrone à cage d'écureuil par différentes méthodes.

Après avoir rappelé les principes de base de fonctionnement de la machine asynchrone, nous nous sommes intéressés aux différentes pertes qui existent dans la machine d'étude en particulier les pertes fer.

Par la suite on a basé calculé ces pertes fer par deux méthodes théoriques, la méthode de dimensionnement, qui est basée premièrement sur les données fournies par le cahier de charge ensuite sur les dimensions géométrique et électrique de la machine, et par la méthode de circuit équivalent nécessitant des essais expérimentaux pour déterminer les paramètres de ce dernier ensuite déduire les pertes.

Dans le troisième chapitre on a exploité une méthode analytique basée sur une formule établie par Steinmetz pour calculer les pertes fer.

Cette méthode a surtout l'avantage de séparer les pertes par hystérésis et par courant de Foucault. Dans ce cas la machine étudiée les pertes fer sont constituées majoritairement par les pertes par hystérésis.

Les résultats obtenus par certaine méthode sont comparés à celle mesure expérimental par l'essai à vide et au synchronisme. Globalement la différence dans les valeurs des pertes sont de l'ordre de 15 à 24 W.

Seuls, les pertes fer obtenus par la méthode analytique (Steinmetz) sont surestimées.

En fin ces résultats mettent en évidence la difficulté dans le calcul des pertes fer.

# *Bibliographie*

- [1] K.ALIMIRAOUSSAID, Y. SEKKAI, « Etude des pertes et leur répartition dans un moteur asynchrone à cage d'écureuil 2.2kw », mémoire de fin d'étude U.M.M.T.O 2012/2013.
- [2] COURS D'ELECTRICITE 2-ELECTROTCHNIQUE, le moteur asynchrone triphasé, Université Montpellier 2. 2008/2009.
- [3] K.CHAIR, Y.MIMOUNI, « Processus de fabrication d'un moteur asynchrone triphasé », mémoire de licence électrotechnique U.M.M.T.O 2012/2013
- [4]H.CHEBBAT, F.GANE, « Etudes et simulation de la machine asynchrone à double alimentation », mémoire de fin d'étude D.E.U.A U.M.M.T.O2009.
- [5] AKKOU. Dj, MEZIAE.B, « Optimisation d'une série de moteur asynchrone triphasés a cage d'écureuil », mémoire de fin d'étude U.M.M.T.O 2008.
- [6] A.LOUNI, M.ALLOUCHENE, « Identification des paramètres de la machine asynchrone à cage d'écureuil », mémoire de fin d'étude master académique U.M.M.T.O 2011/2012.
- [7] A.AIGOUN, S.AMRANE, « Mesure et calcul des pertes fer d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil », mémoire de fin d'étude D.E.U.M.M.T.O 2010
- [8] AURELIE FASQUELLE, « Contribution à la modélisation multi-physique : électro-vibro- acoustique et aérothermique de machine de traction », thèse de doctorat 30 novembre 2007.
- [9] GUY. GRELLET, « Les pertes dans les machines tournantes », dossier technique de l'ingénieur 10/12/1989.
- [10] S.ZOURDANI, K.KARIMA ; « Détermination de la répartition des pertes fer dans un moteur asynchrone triphasés », licence professionnel U.M.M.T.O 2011

## Bibliographie

[11] A.BELOT, « Calcul des machines électriques tournantes », école supérieure d'électricité 1976.

# Annexe A

*Calcul des contraintes électromagnétique  
et paramètres électriques  
de la machine*

**I- Le stator****I-1-calcul du courant dans la phase statorique**

$$I_1 = \frac{P_n * 10^3}{m_1 * U_1 * \eta_n * \cos\theta}$$

$$I_1 = \frac{2.2 * 10^3}{3 * 380 * 0.78 * 0.83}$$

$$I_1 = 2.981 \text{ A}$$

**I-2- calcul de coefficient de l'enroulement**

$$K_{enr1} = K_{d1} * K_{r1}$$

$$K_{enr1} = 0.96 * 1$$

$$K_{enr1} = 0.96$$

Avec :

$$K_{r1} = \sin \frac{\beta\pi}{2} \quad \text{et} \quad \beta = \frac{Y_1}{\tau} = 1$$

$$\text{Alor :} \quad K_{r1} = 1$$

**a) Calcul de pas polaire**

$$\tau = \frac{\pi * D_{1int}}{2p}$$

$$\tau = \frac{\pi * 88.5}{2 * 2}$$

$$\tau = 69.508 \text{ mm}$$

Et :

**b) coefficient de distribution**

$$K_{d1} = \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{q_1 * \sin \frac{\alpha}{2 * q_1}}$$

$$\text{Avec :} \quad \alpha = \frac{2\pi * p * q_1}{Z_1} = \frac{2 * \pi * 2 * 3}{36}$$

$$\alpha = 1.047 \text{ rad} = 59.98^\circ$$

Alor :  $K_{d1} = 0.96$

Avec :

$\alpha$  : Zone phasique.

$Z_1$  : nombre d'encoches statorique.

$q_1$  : nombre d'encoches par pole par phase.

$K_{r1}$  : coefficient de raccourcissement.

$K_{d1}$  : coefficient de distribution

$\beta$  : Pas de raccourcissement

$Y_1$  : pas de l'enroulement.

$\tau$  : Pas polaire.

### I-3- calcul de l'induction magnétique

$$B_\delta = \frac{6.1 * 10^{12} * P_e}{l_i * \alpha_i * K_f * K_{enr1} * A_1 * D_{1int}^2 * n}$$

Avec :

$l_i$  : longueur virtuelle de l'induit.

$D_{1int}$  : diamètre intérieur du stator.

$n$  : La vitesse de synchronisme [tr/min]

$P_e$  : La puissance électromagnétique :

$$P_e = K_e \frac{P_n}{\eta_n \cdot \cos \varphi_n}$$

Avec :

$P_n$  : puissance nominal de la machine

$\cos \varphi_n$  : Facteur de puissance nominal de la machine

$\eta_n$  : Rendement nominal de la machine

$K_e$  : Ce coefficient est le rapport entre la f.e.m et la tension ( $K_e = E_1 / U_1$ ) Avec

$$K_e = 0.985 - 5.P.10^{-3}$$

$P$  : nombre de pair de pôle

$$K_e = 0.975$$

$$\text{Alors : } P_e = 0.975 \frac{2.2}{0.78 * 0.83}$$

$$P_e = 3.262 \text{ Kw}$$

Et :

$\alpha_i$  : Le coefficient de recouvrement polaire

$$\alpha_i = 2/\pi ; (\alpha_i = \mathbf{0.63})$$

$K_f$  : le coefficient de forme de l'onde d'induction dans l'entrefer  $K_f = \mathbf{1.11}$

$A_1$  : la charge linéaire

$$A_1 = \frac{U_{enc1} * I_1 * Z_1}{\pi * a_1 * D_{1int} * 10^{-3}}$$

Avec:

$U_{enc1}$ : Nombre de conducteur effectifs dans l'encoche

Alors :

$$A_1 = \frac{64 * 2.981 * 36}{\pi * 1 * 88.5 * 10^{-3}}$$

$$A_1 = 2.47 * 10^4 \text{ A/m}$$

Alors la valeur de l'induction magnétique dans l'entrefer :

$$B_\delta = \frac{6.1 * 10^{12} * 3.262}{110 * 0.63 * 1.11 * 0.96 * 2.47 * 10^4 * 88.5^2 * 1500}$$

$$B_\delta = 0.91 \text{ T}$$

#### I-4- calcul de l'induction maximale dans la dent statorique

$$B_{Z1max} = \frac{t_1 * \beta_\delta}{K_{fer} * b_{Z1}} \text{ [Tesla]}$$

Avec :

$K_{fer}$  : Coefficient de remplissage des tôles statorique

$$K_{fer} = 0.985 - 5p * 10^{-3}$$

$$K_{fer} = 0.975$$

$b_{z1}$  : largeur de la dent statorique [mm]

$t_1$  : pas dentaire qui est définie comme étant la distance qui sépare deux axes de deux encoches voisines [mm]

$$t_1 = \frac{\pi * D_{1int}}{Z_1}$$

$$t_1 = \frac{\pi * 88.5}{36}$$

$$t_1 = 7.723 \text{ mm}$$

Alor :

$$B_{Z1max} = \frac{7.723 * 0.91}{0.975 * 3.87}$$

$$B_{Z1max} = 1.88 \text{ T}$$

### I-5-calcul de l'induction magnétique dans le dos statorique

$$B_{c1} = \frac{0.5 * \alpha_i * \tau * \beta_\delta}{K_{fer} * h_{c1}}$$

Avec :

$\alpha_i$  : Coefficient de recouvrement polaire, il est donné par la formule suivante :  $\alpha_i = \frac{2}{\pi}$

$$\alpha_i = 0.64$$

Alor :

$$B_{c1} = \frac{0.5 * 0.64 * 69.47 * 0.91}{0.975 * 12.73}$$

$$B_{c1} = 1.63 \text{ T}$$

### I-6- calcul de la résistance d'une phase statorique

$$R_1 = \frac{\rho_{Cu}(L_{w1} * W_1 * 10^3)}{(a_1 * N_{el} * S_{eff})}$$

Avec :

#### I-6-a Calcul de la longueur moyenne d'une spire de l'enroulement statorique

$$L_{w1} = 2(l_i + L_{f1})$$

Avec  $L_{f1}$  et calcul par la formule suivante :

#### Calcul de la longueur moyenne de la partie frontale d'une demi-spire

$$L_{f1} = [(1,16 + 0,14.P).b_{1moy}] + 15$$

$$L_{f1} = 132,56 \text{ mm}$$

**Calcul de la longueur moyenne d'une section**

$$b_{1moy} = [\pi(D_{1int} + h_{z1}) \cdot Y_{1moy}] / Z_1$$

$$b_{1moy} = [\pi(88,5 + 15,51) \cdot 9] / 36$$

$$b_{1moy} = 81.689$$

Avec :

$\rho_{cu}$  : Résistivité du cuivre à la température 115° , elle est égale à  $24,4 \cdot 10^{-9} \Omega m$

$Y_{1moy}$  : Le pas moyen de l'enroulement statorique.

$S_{eff}$  : La section effective d'un conducteur.

$N_{el}$  : Le nombre des conducteurs élémentaires.

Alors la valeur de la résistance est :

$$R_1 = \frac{24,4 \cdot 10^{-9} (485.265 \cdot 384 \cdot 10^3)}{(1 \cdot 1 \cdot 0.396)}$$

$$R_1 = 11.482 \Omega$$

**II- Rotor****II-1 calcul de courant rotorique  $I_2$** 

$$I_2 = \frac{K_i \cdot 2 \cdot m_1 \cdot I_1 \cdot W_1 \cdot K_{enr1}}{Z_2}$$

$$I_2 = \frac{0.86 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 2.981 \cdot 384 \cdot 0.96}{28}$$

$$I_2 = 202.514 A$$

**II-2 calcul de l'induction maximale dans la dent rotorique**

$$B_{z2max} = \frac{B_\delta \cdot t_2}{b_{z2} \cdot K_{fer}}$$

Avec :

$$b_{z2} = 4.77 mm$$

a) Calcul la largeur de la dent rotorique avec la relation suivant

$$t_2 = \frac{\pi * D_{2ext}}{Z_2}$$

$$t_2 = \frac{\pi * 88}{28}$$

$$t_2 = 9.874 \text{ mm}$$

**Avec :**

$D_{2ext}$  : Diamètre extérieur du rotor [mm]

$Z_2$  : Nombre d'encoches rotorique.

$K_{fer}$  : Coefficient de remplissage des tôles rotorique ( $K_{fer} = 0.97$ )

**Alor :**

$$B_{z2max} = \frac{0.91 * 9.874}{4.77 * 0.97}$$

$$B_{z2max} = 1.942 \text{ T}$$

### II-3 calcul de l'induction magnétique dans le dos rotorique

$$B_{c2} = \frac{0.5(\alpha_i * \tau * B_\delta)}{(h_{c2} * K_{fer})}$$

$$B_{c2} = \frac{0.5(0.64 * 69.508 * 0.915)}{(15.12 * 0.97)}$$

$$B_{c2} = 1.38 \text{ T}$$

### II-4 calcul de la résistance active d'une phase rotorique

$$R_2 = R_b + R'_{an}$$

Avec :

#### II-4-1 calcul de la résistance de la barre

$$R_b = \rho_{al} * \left(\frac{l_i}{S_b}\right) * 10^3$$

Avec :

$S_b$  : section de la barre [mm<sup>2</sup>]

$\rho_{al}$  : la résistivité de l'aluminium à 115°C, elle est égale à  $48,8 \cdot 10^{-9} \Omega m$

Alors :

$$R_b = 48,8 * 10^{-9} * \left( \frac{110}{45,32} \right) * 10^3$$

$$R_b = 1,184 * 10^{-4} \Omega$$

#### II-4-2 calcul de la résistance de l'anneau

$$R_{an} = \frac{(\rho_{al} * 2 * \pi * D_{an} * 10^3)}{Z_2 * S_{an}}$$

Avec :

##### II-4-2-a Calcul du Diamètre moyen de l'anneau

$$D_{an} = D_{2ext} - h_{an}$$

$$D_{an} = 88 - 17,09$$

$$D_{an} = 70,91$$

Et :

##### II-4-2-b Calcul de la Section de l'anneau

$$S_{an} = \frac{(0,35 * Z_2 * S_b)}{2 * P}$$

$$S_{an} = \frac{(0,35 * 28 * 45,32)}{2 * 2}$$

$$S_{an} = 111,034 \text{ mm}^2$$

Alors :

$$R_{an} = \frac{(48,8 * 10^{-9} * 2 * \pi * 70,91 * 10^3)}{28 * 111,034}$$

$$R_{an} = 6,993 * 10^{-6} \Omega$$

#### II-5- Calcul de la résistance ramené à la barre

$$R'_{an} = \frac{R_{an}}{\Delta^2}$$

Avec :

$\Delta$ : Coefficient de réduction de l'anneau vers la barre, il est calculé comme suis :

$$\Delta = 2 \sin\left(\frac{\pi * 2}{28}\right)$$

$$\Delta = 0.445$$

**Alors**

$$R'_{an} = \frac{6.993 * 10^{-6}}{0.435^2}$$

$$R'_{an} = 3.531 * 10^{-5} \Omega$$

Alors :

**La résistance active d'une phase rotorique**

$$R_2 = 1.184 * 10^{-4} + 3.531 * 10^{-6}$$

$$R_2 = 1.538 * 10^{-4} \Omega$$

# ANNEXE B

*Calcul des pertes d'une machine  
asynchrone à cage par méthode de  
dimensionnement*

**I-1 Pertes électriques****I-1-a) Pertes joules statorique**

$$P_{js} = m_1 * R_1 * I_1^2$$

$$P_{js} = 3 * 11.482 * 2.981^2$$

$$P_{js} = 306.1 \text{ W}$$

**I-1-b) Pertes joule rotorique**

$$P_{jr} = m_2 * R_2 * I_2^2$$

$$P_{jr} = 28 * 1.538 * 10^{-4} * 202.514^2$$

$$P_{jr} = 176.614 \text{ W}$$

**I-2- Pertes mécaniques**

$$P_{mec} = K_t * \left(\frac{n_1}{10}\right)^2 * (D_{1ext} * 10^{-3})^4$$

Avec :

$$n_1 = 1500 \text{ tr/min}$$

$$D_{1ext} = 145 \text{ mm}$$

$$K_t = 1.3 * (1 - D_{1ext} * 10^{-3}) \text{ et } K_t = 1.11$$

Alors :

$$P_{mec} = 1.11 * \left(\frac{1500}{10}\right)^2 * (145 * 10^{-3})^4$$

$$P_{mec} = 11.055 \text{ W}$$

**I-3- Pertes magnétique dans l'acier :****I-3-1 les pertes dans la culasse statorique :**

$$P_{fc1} = P_{10(50hz)} \left(\frac{f_1}{50}\right)^\beta * K_{dc} * G_{c1} * B_{c1max}^2$$

Avec :

$$P_{10(50hz)} = 2.5 \text{ w/kg}$$

$$K_{dc} = 1.7$$

$$(\gamma_c = 7.8 * 10^3 \text{ kg/m}^3)$$

$$G_{c1} = \pi \cdot (D_{1ext} - h_{c1}) \cdot K_{fer} \cdot h_{c1} \cdot l_i \cdot \gamma_c \cdot 10^{-9}$$

$$G_{c1} = 4.402 \text{ kg}$$

$$\beta = \frac{3}{2}$$

Alors :

$$P_{fc1} = 2.5 \left(\frac{50}{50}\right)^{3/2} * 1.7 * 4.402 * 1.63$$

$$P_{fc1} = 49.712 \text{ W}$$

### I-3-2 les pertes dans les dents statorique

$$P_{fz1} = P_{10(50hz)} * K_{dz} * B_{z1max}^2 * G_{z1} * \left(\frac{f_1}{50}\right)^\beta$$

Avec :

$$G_{z1} = h_{z1} * b_{z1} * Z_1 * K_{fer} * l_i * \gamma_c * 10^{-9}$$

$$G_{z1} = 1.798 \text{ kg}$$

$$B_{z1max} = 1.873 \text{ mm}$$

$$K_{dz} = 1.8$$

Alors :

$$P_{fz1} = 2.5 * 1.8 * 1.873 * 1.798 * \left(\frac{50}{50}\right)^{3/2}$$

$$P_{fz1} = 28.39 \text{ W}$$

### I-3-3 les pertes magnétique principales d'acier

$$P_{acp} = P_{fc1} + P_{fz1}$$

$$P_{acp} = 49.712 + 28.39$$

$$P_{acp} = 78.103 \text{ W}$$

#### I 4- les pertes magnétiques supplémentaires d'acier

$$P_{acsup} = P_{sr} + P_{pulz}$$

Avec :

##### I-4-a) les pertes à la surface du rotor (pertes superficielles)

$$P_{sr} = P_{sr2}(t_2 - b_{f2}) * l_i * Z_2 * 10^{-6}$$

Avec :

$$P_{sr2} = 0.5K_{02} \left( \frac{Z_1 * N_s}{10^4} \right)^{3/2} * (B_{02} * t_1)^2$$

Avec :

$$K_{02} = 2$$

$$B_{02} = \beta_{02} * K_{\delta} * B_{\delta}$$

Et  $K_{\delta} = 1.38$  et  $B_{\delta} = 0.918 \text{ T}$  (on la calcul dans l'annexe A)

$\beta_{02} = 0.275$  (On le trouve dans la figure 5 l'annexe E)

$$B_{02} = 0.275 * 1.38 * 0.918$$

$$B_{02} = 0.348$$

Alors :

$$P_{sr2} = 0.5 * 2 \left( \frac{36 * 1500}{10^4} \right)^{3/2} * (0.348 * 7.71)^2$$

$$P_{sr2} = 90.533 \text{ T}$$

Et alors :

$$P_{sr} = 90.533(9.87 - 1) * 110 * 28 * 10^{-6}$$

$$P_{sr} = 2.473 \text{ W}$$

**I-4-b) les pertes par pulsation du flux dans les dents**

$$P_{pul2} = 0.11 * \left( \left( \frac{Z_1 * n_1}{10^3} \right) B_{pul2} \right)^2 G_{z2}$$

**Avec :**

$$G_{z2} = Z_2 * h_{c2} * b_{z2} * l_i * K_{fer} * \gamma_c * 10^{-9}$$

$$G_{z2} = 28 * 15.12 * 4.77 * 110 * 0.97 * 7.8 * 10^3 * 10^{-9}$$

$$G_{z2} = 1.681 \text{ kg}$$

$$B_{pul2} = \left[ \frac{\gamma_1 * \delta * B_{z2max}}{2 * t_2} \right]$$

$$B_{pul2} = \left[ \frac{7.74 * 0.25 * 1.953}{2 * 9.87} \right]$$

$$B_{pul2} = 0.191$$

**Alors :**

$$P_{pul2} = 0.11 * \left( \left( \frac{36 * 1500}{10^3} \right) \right)^2 1.681$$

$$P_{pul2} = 19.758 \text{ W}$$

**I-4-c) les pertes magnétique supplémentaires totale dans l'acier**

$$P_{acsup} = P_{sr} + P_{pul2}$$

$$P_{acsup} = 2.473 + 19.758$$

$$P_{acsup} = 22.231 \text{ W}$$

**I-5- les pertes totales dans l'acier**

$$P_{ac\Sigma} = P_{acp} + P_{acsup}$$

$$P_{ac\Sigma} = 78.103 + 22.231$$

$$P_{ac\Sigma} = 100.334 \text{ W}$$

**I-6- les pertes supplémentaires**

$$P_{sup} = 0.005 \frac{P_{2nom} * 10^3}{\eta_n}$$

$$P_{sup} = 0.005 \frac{2.2 * 10^3}{0.78}$$

$$P_{sup} = 14.103 \text{ W}$$

**I 7- Les pertes totales**

$$P_{tot} = P_{js} + P_{jr} + P_{mec} + P_{ac\Sigma} + P_{sup}$$

$$P_{tot} = 306.1 + 176.614 + 11.055 + 100.334 + 14.103$$

$$P_{tot} = 608.205 \text{ W}$$

**I-8- Le rendement:**

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{tot}}$$

$$\eta = \frac{2200}{2200 + 608.205}$$

$$\eta = 0.783\%$$

# ANNEXE C

Calcul des différents paramètres  
électriques par les essais classique et la  
méthode analytique en utilisant le logiciel  
Mathcad

calcul les différents paramètres avec la méthode classique:

à vide:

$$P_0 := 245\text{W}$$

$$V_0 := 380\text{V}$$

$$E_1 := V_0 = 380\text{V}$$

$$P_{\text{fer}} := 120\text{W}$$

$$P_{\text{mec}} := 50\text{W}$$

$$I_0 := 3.25\text{A} = 3.25\text{A}$$

le facteur de puissance::

$$a := \frac{P_0}{\sqrt{3} V_0 I_0} = 0.115$$

$$a = 0.115$$

sachant que:  $a = \cos(\varphi . 0)$

$$a_1 := \sqrt{1 - a^2} = 0.993$$

$$a_1 = 0.993$$

détermination de:  $R_m$  et  $X_m$

$$R_m := 3 \cdot \frac{V_0^2}{P_{\text{fer}}} = 3.61 \times 10^3 \Omega$$

$$R_m = 3.61 \times 10^3 \Omega$$

$$X_m := \frac{V_0}{I_0 \cdot a_1} = 117.698 \Omega$$

$$X_m = 117.698 \Omega$$

En court-circuit :

$$V_{cc} := 45V$$

$$P_{cc} := 148W$$

$$I_{cc} := 3 \frac{A}{\sqrt{3}} = 1.732A$$

$$I_{cc} = 1.732A$$

$$b := \frac{P_{cc}}{3 \cdot V_{cc} \cdot I_{cc}} = 0.633$$

$$b = 0.633$$

sachant que  $b = \sin(\varphi_{cc})$

On a:

$$R_s := 8.37\Omega$$

$$R_r := \left( \frac{P_{cc}}{3 \cdot I_{cc}^2} \right) - R_s = 8.074\Omega$$

$$R_r = 8.074\Omega$$

$$Z_{cc} := \frac{V_{cc}}{I_{cc}} = 25.981\Omega$$

$$Z_{cc} = 25.981\Omega$$

$$X_s := \sqrt{(Z_{cc})^2 - (R_s + R_r)^2} = 20.114\Omega$$

$$X_r := X_s = 20.114\Omega$$

$$Z_s := \sqrt{R_s^2 + X_s^2} = 21.786\Omega$$

$$Z_s = 21.786\Omega$$

$$D_{\text{ext}} := 145 \text{ mm}$$

$$R_{\text{ext}} := \frac{D_{\text{ext}}}{2}$$

$$R_{\text{ext}} = 0.073 \text{ m}$$

$$D_{\text{int}} := 88.5 \text{ mm}$$

$$h_{z1} := 15.5 \text{ mm}$$

$$R_{\text{int}} := \frac{D_{\text{int}}}{2} + h_{z1}$$

$$R_{\text{int}} = 0.06 \text{ m}$$

$$\frac{R_{\text{ext}}}{R_{\text{int}}} = 1.213$$

les pertes fer par hystérésis

$$K_h := 1.00\%$$

$$f := 50 \text{ Hz}$$

$$B_{\text{maxmoy}} := 1.7 \text{ T}$$

$$P_{\text{hyst}} := K_h \cdot f \cdot B_{\text{maxmoy}}^2$$

$$P_{\text{hyst}} = 144.789 \frac{\text{kg}^2}{\text{A}^2 \cdot \text{s}^5}$$

les pertes fer par le courant de Foucault

$$K_f := 1.0\%$$

$$e_1 := 0.35 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$f_m := 50 \text{ Hz}$$

$$P_{\text{cf}} := K_f \cdot (e_1 \cdot f_m \cdot B_{\text{maxmoy}})^2$$

$$P_{\text{cf}} = 9.028 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^2 \cdot \text{kg}^2}{\text{A}^2 \cdot \text{s}^6}$$

les pertes dans les dents en w

$$M_d := 1.798 \text{ kg}$$

$$P_{\text{hyst}} := (K_h \cdot f \cdot B_{\text{maxmoy}}^2) \cdot M_d$$

$$P_{\text{hyst}} = 260.331 \frac{\text{kg}^3}{\text{A}^2 \cdot \text{s}^5}$$

$$P_{\text{cf}} := [K_f \cdot (e_1 \cdot f \cdot B_{\text{maxmoy}})^2] \cdot M_d$$

$$P_{\text{cf}} = 1.623 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^2 \cdot \text{kg}^3}{\text{A}^2 \cdot \text{s}^6}$$

$$P_1 := 260.33$$

les pertes dans la culasse en W

$$M_c := 4.402$$

$$P_{\text{hyst}} := [K_h \cdot f \cdot (B_{\text{maxmoy}})^2] \cdot M_c$$

$$P_{\text{hyst}} = 637.361 \frac{\text{kg}^2}{\text{A}^2 \cdot \text{s}^5}$$

$$P_{\text{cf}} := [K_f \cdot (e_1 \cdot f \cdot B_{\text{maxmoy}})^2] \cdot M_c$$

$$P_{\text{cf}} = 3.974 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^2 \cdot \text{kg}^2}{\text{A}^2 \cdot \text{s}^6}$$

$$P_2 := 637.36$$

les pertes fer avec les 1.5et 3

les pertes dans les dents en w (3)

$$M_d := 1.798 \text{ kg}$$

$$P_{\text{hyst}} := \left( K_h \cdot f \cdot B_{\text{maxmoy}}^2 \right) \cdot 3M_d$$

$$P_{\text{hyst}} = 780.992 \frac{\text{kg}^3}{\text{A}^2 \cdot \text{s}^5}$$

$$P_{\text{cf}} := \left[ K_f \cdot (e_1 \cdot f \cdot B_{\text{maxmoy}})^2 \right] \cdot 3M_d$$

$$P_{\text{cf}} = 4.87 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^2 \cdot \text{kg}^3}{\text{A}^2 \cdot \text{s}^6}$$

les pertes dans la culasse en W (1.5)

$$M_c := 4.40 \text{ kg}$$

$$P_{\text{hyst}} := \left[ K_h \cdot f \cdot (B_{\text{maxmoy}})^2 \right] \cdot 1.5M_c$$

$$P_{\text{hyst}} = 956.042 \frac{\text{kg}^2}{\text{A}^2 \cdot \text{s}^5}$$

$$P_{\text{cf}} := \left[ K_f \cdot (e_1 \cdot f \cdot B_{\text{maxmoy}})^2 \right] \cdot 1.5M_c$$

$$P_{\text{cf}} = 5.961 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^2 \cdot \text{kg}^2}{\text{A}^2 \cdot \text{s}^6}$$

# ANNEXE D

Programme qui donne les différents courants et pertes ainsi que la résistance en fonction de la température du circuit électrique équivalent avec Matlab

Le programme qui donne les différentes courants et pertes ainsi la résistance en fonction de la température dans la partie de circuit équivalent :

```

Pm=50;
Vs=380;
Rs=8.37;
Xs=20.114;
Rm=3.61e+003;
Xm=117.698;
Rr=8.074;
Xr=20.114;
g=1.33e-003;
a=Rm.*(Rr./g)-Xs*Xm;
b=Rm*Xm+(Rr./g).*Xm+Xr*Rm;
c=Rs.*(Rr./g).*Rm-Rm*Xm*Xr-Rs*Xr*Xm-Xs*Rm*Xm-Xs.*(Rr./g).*Xm-Xs*Xr*Rm;
d=Rm.*Xm.*(Rr./g)+Rs*Xm*Rm+Rs.*Xm.*(Rr./g)+Rs*Rm*Xr+Xs.*Rm.*(Rr./g)-
Xs*Xm*Xr;
e=(Rr./g).*Xm+Xr*Rm;
Is=(Vs./((c.^2)+(d.^2))).*sqrt(((a.*c+b.*d).^2)+((b.*c-a.*d).^2));
Ir=((Rm.*Xm.*Is)./((a.^2)+(b.^2))).*sqrt((b.^2)+(a.^2));
Im=(Is.*sqrt(((a.^2)+e.*b).^2)+((e.*a-a.*b).^2))./((a.^2)+(b.^2));
If=(sqrt((a.^2)+(e.^2)).*Is)./(sqrt((b.^2)+(a.^2)));
Ih=(Xm.*Im)./(sqrt((Rm.^2)+(Xm.^2)));
B=0.115
Pa=3.*Vs.*Is.*B;
Pjs=3.*Rs.*(Is.^2);
Pjr=3.*Rr.*(Ir.^2);
Pfer=3.*Rm.*(Ih.^2);
Ptr=Pa-Pjs-Pf;
Pu=Pa-(Pjs+Pjr+Pf);
Ren=Pu./Pa;

clc
clearall
closeall
E1=309.195;
Vs=380;
%Rs=8.37;
Xs=20.114;
Rm=1.434e+003;
Xm=95.346;
Rr27=8.074;k1=225.0;To=27.;k=235.;Rs27=8.37;
T=[42.9 48.7 47 46.5 45.8 45.2 44.4 43.3 42.9 42.5 41.9 41.4 41.1 40.3 39.8
39.4 38.9 38.5 38.3 38 0];%[°C]
Rs=Rs27*((k+T(1,:))/(k+To));
plot(T,Rs);
xlabel('temperature en (°C)');
ylabel('resistance en(hom)') ;
%title('Figure II.1:la résistance en fonction du la température')

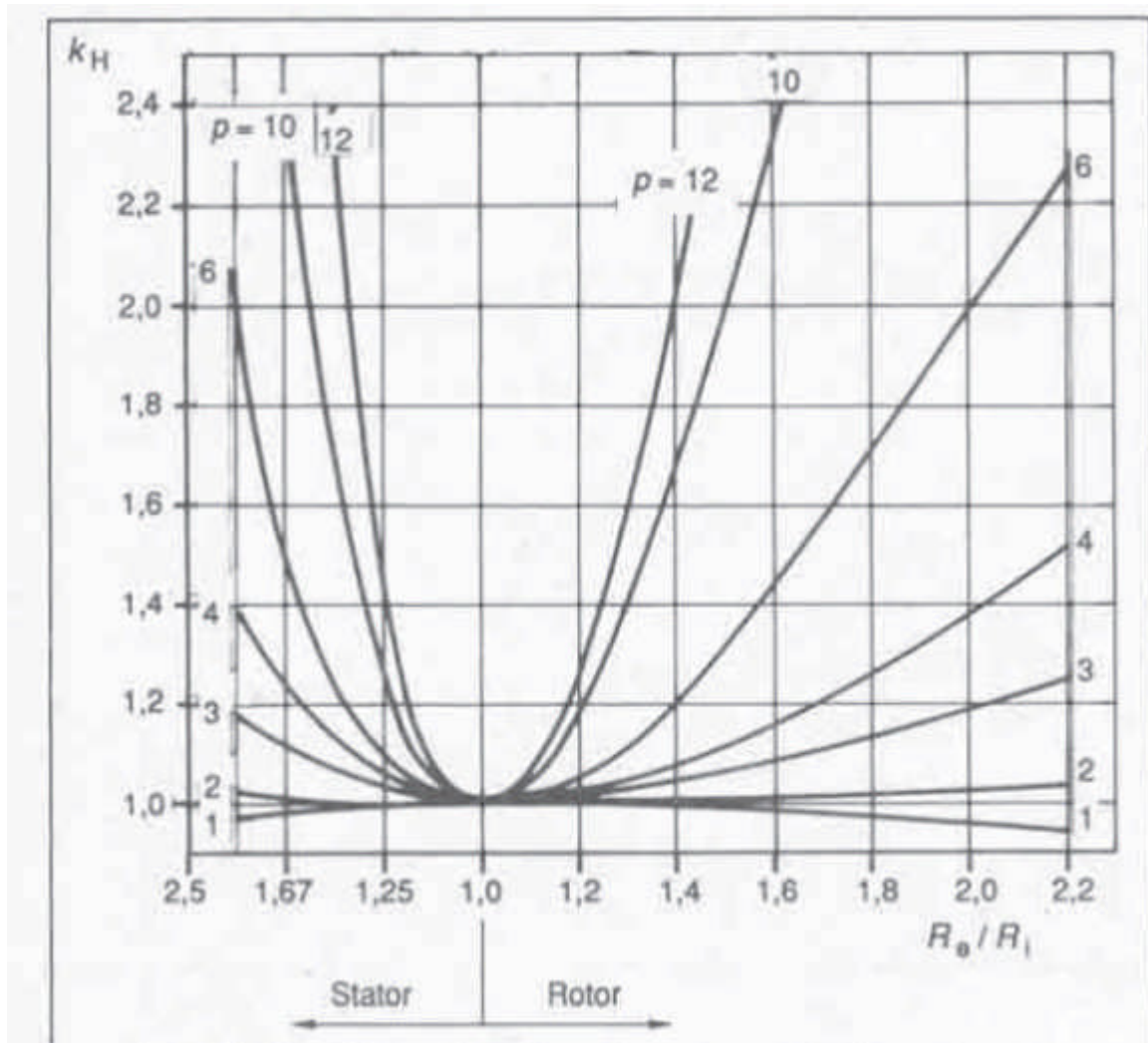
```

# ANNEXE E

Dimensions géométriques de la machine  
asynchrone étudiée et certain coefficients

Type de tôle	$P_{10}(50\text{Hz})$ W/Kg	Indice de puissance
2013, 2011,2211	2.5+2.6	1.5
2312	1.75	1.4
2411	1.6	1.3

Tableau 1 : les pertes spécifique dans les tôles d'acier (ENEL)

Figure 2 : coefficient  $K_H$  des pertes par hystérésis au stator en fonction du nombre de paires de pôles et de rapport des rayons externe  $R_{\text{ext}}$  et interne  $R_{\text{int}}$  de la couronne [11]

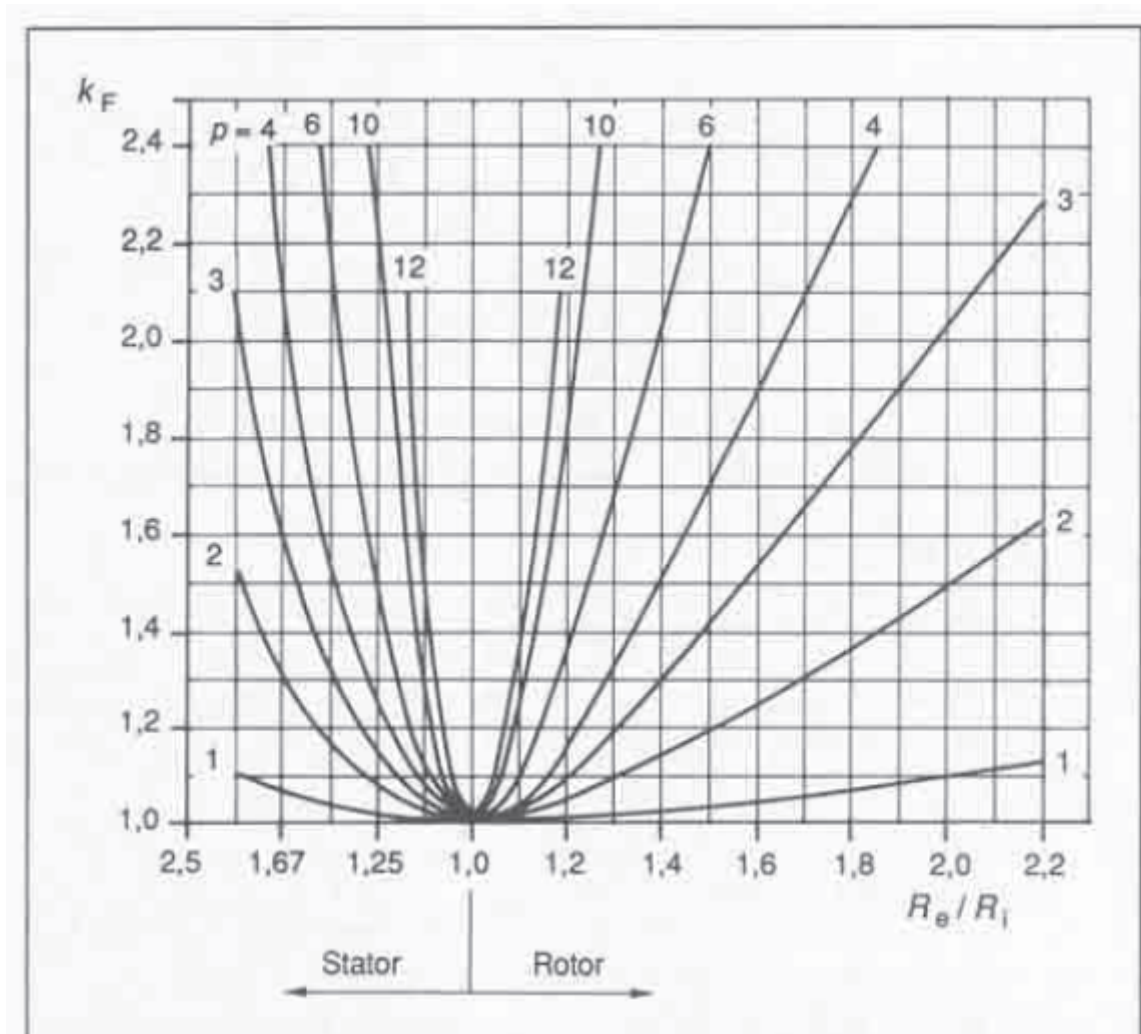


Figure 3 : coefficient  $k_F$  des pertes par courant de Foucault en fonction du nombre de paires de pôles et du rapport des rayons externe  $R_{ext}$  et interne  $R_{int}$  de la couronne[11]

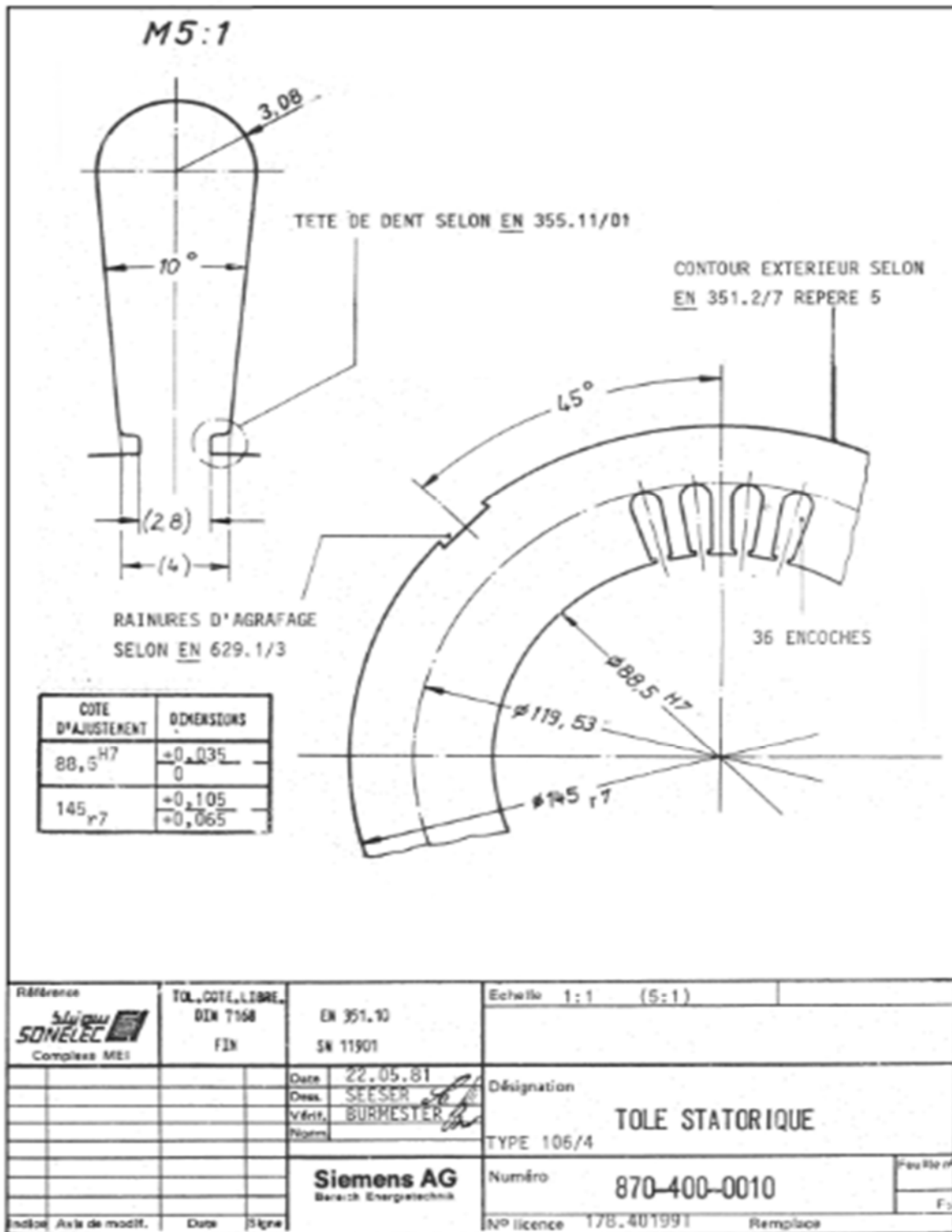


Figure 3 : les caractéristiques de la tôle statorique de la machine étudiée (ENEL)



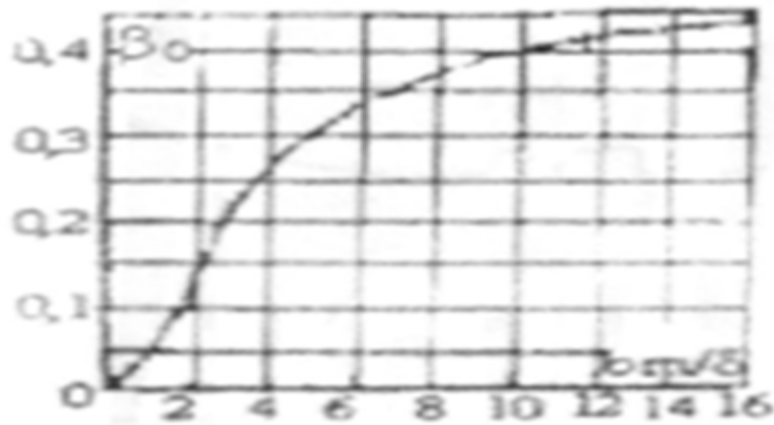


Figure 5 : représente le coefficient  $\beta_0$