

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI, TIZI-OUZOU.



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de fin d'études

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

Option : Machines Electriques

Thème

**ÉTUDE DES PERTES ET LEUR
REPARTITION DANS UN MOTEUR
ASYNCHRONE A CAGE
D'ECUREUIL 2.2kW**

Proposé et dirigé par :

M^r KHALDI Rabah

Réalisé par :

M^{elle} ALIMIROUSSAID Karima

M^{elle} SEKKAI Yasmina

PROMOTION: 2012/2013

Remerciement

Nous tenons d'abord à remercions le bon dieu pour le courage et la patience qu'il nous a donné tout au long de ce travail afin de mener ce projet de fin d'étude

Nous tenons aussi à remercier monsieur Rabah KHALDI, Maitre-assistant chargé de Cours au Département d'Electrotechnique de l'Université Tizi-Ouzou, qui nous a fait l'honneur de nous encadré.

Nous remercions de même Monsieur Salah HADAD, professeur au département d'Électrotechnique de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, pour nous avoir aidés.

Les membres de jury qui nous feront l'honneur d'examiner notre mémoire de fin d'études.

Je dédie ce modeste travail

*A mes très chers parents, que dieu les garde et les protège
pour leurs soutien moral et financier, pour leurs
encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés*

A mon frère mouloud

A mes sœurs(sadia, zina , rachida, hayet)

A ma grande famille

*A mes nouveaux et nièces surtout amir farhat , lyna, ,lyes et
Milina*

A mon binome KARIMA et toute sa famille

*A tous les amis(es) d'études surtout ceux d'électrotechnique
promotion 2013*

YASMINA

Je dédie ce modeste travail

*A mes très chers parents, que dieu les garde et les protège
pour leurs soutien moral et financier, pour leurs
encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés*

A mes frères

A mes sœurs

A mon binome YASMINA et toute sa famille

A tous mes amis(es) surtout YAZID

A toutes la promotion d'électrotechnique 2012/2013

KARIMA

INTRODUCTION GENERALE.....1

CHAPITRE I : GENERALITES ET DIFFERENTES PERTES DANS UN MOTEUR ASYNCHRONE A CAGE D'ECUREUIL.

I.1. Introduction..... 2

I.2.Généralités sur la machine asynchrone 3

I.3.Principe de fonctionnement 7

I.4.La vitesse du synchronisme 8

I.5.Glisement 8

I.6.Bilan des puissances et des pertes..... 8

I.7. Couple utile C_u 11

I.8. Les différentes pertes dans un moteur asynchrone 11

 I.8.1.Pertes dans le circuit électrique 11

 I.8.2.Pertes fer 13

 I.8.3.Pertes mécaniques (par frottement et ventilation) 14

 I.8.4.Pertes supplémentaires..... 14

I.9.Conclusion 18

CHAPITRE II : CALCUL DES PERTES D'UN MOTEUR ASYNCHRONE PAR METHODE DE DIMENSIONNEMENT ET PAR LE CIRCUIT ELECTRIQUE EQUIVALENT

II.1.Introduction..... 19

II.2. Calcul des pertes de puissance par méthode de dimensionnement 19

 II.2.1. Pertes électriques 19

 II.2.2. Pertes mécaniques 20

 II.2.3. Pertes magnétiques 20

 II.2.4. Les pertes magnétiques supplémentaires d'acier 22

 II.2.5. Pertes totales dans l'acier 23

 II.2.6. Pertes supplémentaires 23

 II.2.7. Pertes totales du moteur..... 24

 II.2.8. Le rendement 24

II.3. Résultats de calcul des pertes et du rendement 24

II.4. Commentaire du tableau..... 25

II.5. Calcul des pertes de puissance par la méthode du circuit électrique équivalent.....	26
II.6. Détermination des paramètres par la méthode classique.....	27
II.6.1. Le schéma électrique équivalent en T	27
II.6.2. Détermination de la résistance statorique R_s	28
II.6.3. Essai à vide	29
II.7. Essai à rotor bloqué	33
II.8. Expression des différentes impédances du schéma équivalent	36
II.9. Expression du courant primaire.....	36
II.10. Expression du courant secondaire ramené au stator.....	36
II.11. Expression du courant magnétisant.....	37
II.12. Expression du facteur de puissance.....	37
II.13. Expression de la puissance absorbée	38
II.14. Expression de la puissance utile	38
II.15. Expression de couple utile.....	38
II.16. Expression de rendement	38
II.17. Conclusion	38

CHAPITRE III: REPARTITION DES PERTES DANS LES DIFFERENTES PARTIES DE LA MACHINE PUIS DANS CHAQUE MATERIAU

III.1. Introduction.....	39
III.2. Répartition des pertes de puissance dans la machine.....	39
III.2.1. Répartition des puissances et des pertes dans la machine à vide	39
III.2.2. Répartition des puissances et des pertes dans la machine en charge nominale	40
III.2.3. Répartition des pertes totales dans la machine à vide.....	40
III.2.4. Répartition des pertes totales dans la machine en charge nominale	41
III.3. Répartition des pertes Joules statorique et des pertes fer dans l'acier magnétique.....	42
III.4. Répartition des pertes fer dans les dents statoriques et la culasse	48
III.5. Répartition des pertes mécaniques	49
III.6. Comparaison entre les résultats mesurés et calculés.....	49
III.7. Conclusion	50

CHAPITRE IV : MESURE EXPERIMENTALE DES PERTES D'UN MOTEUR ASYNCHRONE A CAGE D'ECUREUIL ET COMPARAISON

IV.1. Introduction	51
IV.2. Présentation du moteur étudié.....	51
IV.3. Description du banc d'essai	51
IV.5. Essai en charge.....	52
IV.6. Etude théorique	54
IV.7. Les caractéristiques de fonctionnement de la machine pour les différentes charges...	55
IV.8. Interprétation des résultats et comparaison	58
IV.9. Conclusion	58
CONCLUSION GENERALE.....	59
Bibliographie.....	60
Annexe A. Calcul des contraintes électromagnétique et paramètres électriques de la machine	62
Annexe B. Calcul des pertes d'une machine asynchrone à cage par méthode de dimensionnement	67
Annexe C. Calcul des résistances et des pertes dans les différentes parties de la machine.....	71
Annexe D. Dimension géométrique de la machine asynchrone étudiée et plaque signalétique	

Les moteurs asynchrones, aussi appelés moteurs d'induction, sont pratiquement en majorité des moteurs triphasés. Ils sont basés sur l'entraînement d'une masse métallique par l'action d'un champ tournant.

Le moteur asynchrone a l'avantage d'être alimenté directement par le réseau triphasé. Ses deux qualités fondamentales sont le bas prix et la solidité mécanique. Il est beaucoup plus robuste que les autres types de machines ; il ne nécessite pratiquement pas d'entretien. Son domaine de puissance varie de quelques watts à plusieurs mégawatts.

Comme toutes les machines électriques, le rôle de la machine asynchrone est de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique (cas d'un moteur), ou l'inverse (cas d'une génératrice).

Une partie de cette énergie est perdue sous forme de chaleur. Cette dernière est causée par différentes pertes qui réduisent considérablement le rendement de la machine. Pour cette raison la connaissance, la détermination et la localisation de ces pertes est primordiale avant toute conception optimale.

A cette fin, l'objectif de notre mémoire de fin d'étude, est l'étude des pertes et leur détermination ainsi que leur répartition dans un moteur asynchrone à cage fabriqué au **complexe Electro-Industrie d'Azazga (Ex. ENEL)**.

Pour ce faire nous répartissons ce mémoire en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, on s'intéresse aux différentes pertes dans un moteur asynchrone.

Le second chapitre, est consacré aux calculs des pertes d'un moteur asynchrone par méthode de dimensionnement et par le circuit électrique équivalent.

Dans le troisième chapitre, on s'intéresse à la répartition des pertes dans les différentes parties d'un moteur asynchrone à cage.

Le quatrième et dernier chapitre consiste à faire des mesures expérimentales des pertes, puis à les comparer à celles trouvées théoriquement.

Nous terminons par une conclusion générale.

I.1. Introduction

Pendant le processus de transfert d'énergie électrique en énergie mécanique ou l'inverse dans les machines électriques, une partie de cette énergie est perdue sous forme de perte de puissance.

Cette perte se produit dans la machine elle-même et donne lieu [1] :

1. à un échauffement des différentes parties de la machine.
2. à une diminution du rendement de la machine. La puissance débitée par la machine étant inférieure à la puissance qui lui est fournie.

Les pertes d'une machine électrique tournante ne sont pas aisées à déterminer, vu qu'on ne peut connaître exactement tous les phénomènes qui les engendrent.

Durant longtemps, le but des concepteurs et des fabricants des machines était de réaliser des machines ayant un bon rendement sans augmenter le prix de revient de ces machines. Le concepteur explore continuellement les méthodes permettant de réduire au minimum les pertes. Pour cela, il doit comprendre les causes et la distribution de ces pertes dans les machines électriques en général et dans les moteurs à induction en particulier.

Pour étudier ces pertes, diverses classifications ont été adoptées par les chercheurs, dans notre travail on peut répartir ces pertes comme suit [2] :

➤ **Les pertes dans le circuit électrique**

Se sont les pertes par effet Joule dans les enroulements d'induit et d'excitation et généralement dans toutes les parties conductrices d'une machine traversée par des courants.

➤ **Les pertes dans le circuit magnétique**

Elles sont appelées aussi les pertes dans le 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.

➤ **Les pertes mécaniques**

Ces pertes prennent en compte tous les frottements dus à la rotation de la partie tournante de la machine.

A ces trois pertes qui représentent 90% à 95% de la totalité des pertes [2], on doit ajouter les pertes supplémentaires, qui sont dues à tous les phénomènes secondaires.

Dans ce chapitre, nous commençons d'abord par des généralités sur la machine asynchrone, puis nous présentons les détails des différentes pertes cités ci-dessus.

I.2. Généralités sur la machine asynchrone

I.2.1. Présentation de la machine asynchrone

Un moteur asynchrone est un moteur à courant alternatif pour lequel la vitesse de rotation de l'arbre est différente de la vitesse de rotation du champ tournant. La machine qui nous intéresse dans notre travail est plus précisément un moteur à induction (moteur asynchrone à cage d'écureuil (Figure I.1)). Un moteur à induction est un moteur asynchrone dont le circuit magnétique est associé à deux ou plus de deux circuits électriques se déplaçant l'un par rapport à l'autre et dans lequel l'énergie est transférée de la partie fixe à la partie mobile, ou inversement, par induction électromagnétique. Cependant, le seul moteur asynchrone qui ait une importance pratique est le moteur à induction [3].

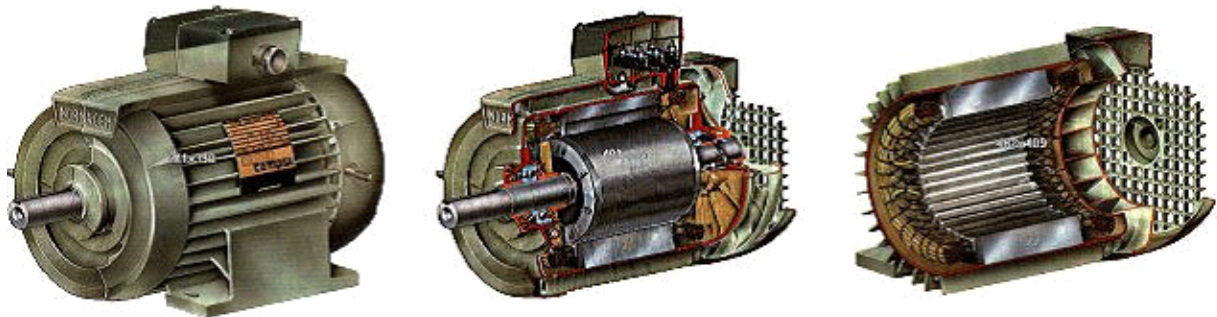


Figure I.1: La machine asynchrone

Le moteur asynchrone triphasé qui est le récepteur de puissance est constitué de deux parties principales:

I.2.1.a. Le stator

Le stator d'un moteur triphasé, comme son nom l'indique, est la partie statique de la machine asynchrone. Il se compose principalement:

- D'un noyau magnétique

- Des paliers
- Enroulements statoriques
- Du ventilateur refroidissant le moteur
- Le capot protégeant le ventilateur

Le noyau magnétique est réalisé par un empilement de tôles magnétiques de faible épaisseur et l'ensemble forme un cylindre creux. Sur sa face interne le stator comporte une répartition régulière d'encoches, où sont logés trois enroulements distribués.

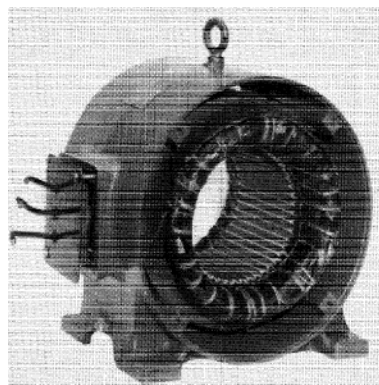


Figure I.3 : Vue d'un stator d'un moteur asynchrone triphasé

I.2.1.b. Le rotor

C'est la partie mobile du moteur, c'est lui qui transmet la force mécanique de la machine en se mettant en mouvement. Il est placé à l'intérieur du stator, et est constitué d'un empilement de tôles d'acier formant un cylindre fixée sur l'arbre du moteur. On distingue deux types de rotors : les rotors à cage (dit rotor en court-circuit) et les rotors bobinés (à bagues) [4].

I.2.1.b.1. Rotor bobiné

Le rotor 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, même si le moteur est monophasé, en pratique, toujours triphasé à couplage en étoile. Les encoches découpées dans les tôles sont légèrement inclinées par rapport à l'axe de la machine de façon à réduire les variations de réluctance liées à la position angulaire rotor/stator et certaines pertes dues aux harmoniques. Les extrémités des enroulements rotorique sont sorties et reliées à des bagues montées sur l'arbre, sur lesquelles frottent des balais en carbone. On peut ainsi mettre en série avec le circuit rotorique des

éléments de circuit complémentaires (résistances, électronique de puissance, etc.) qui permettent des réglages de la caractéristique couple/vitesse. Ce type de moteur est utilisé essentiellement dans des applications où les démarrages sont difficiles et/ou nombreux [4].

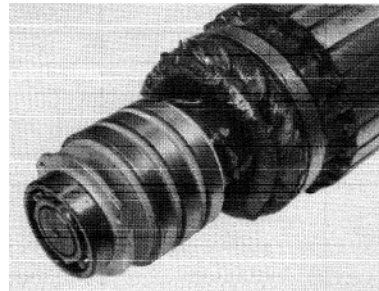


Figure I.4 : Vue d'un rotor bobiné (à bagues) d'un moteur asynchrone triphasé.

a. Symbole

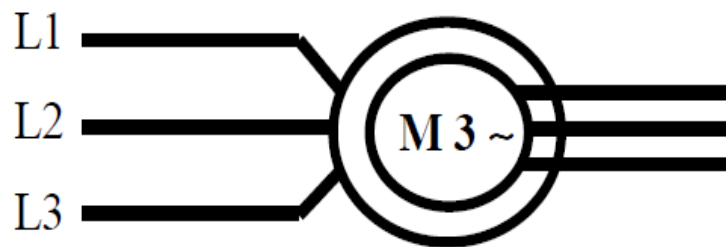


Figure I.5 : Symbole d'un moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné (à bagues).

b. Description de différentes pièces d'un moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné

La figure ci-dessous montre les différents composants d'un moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné.

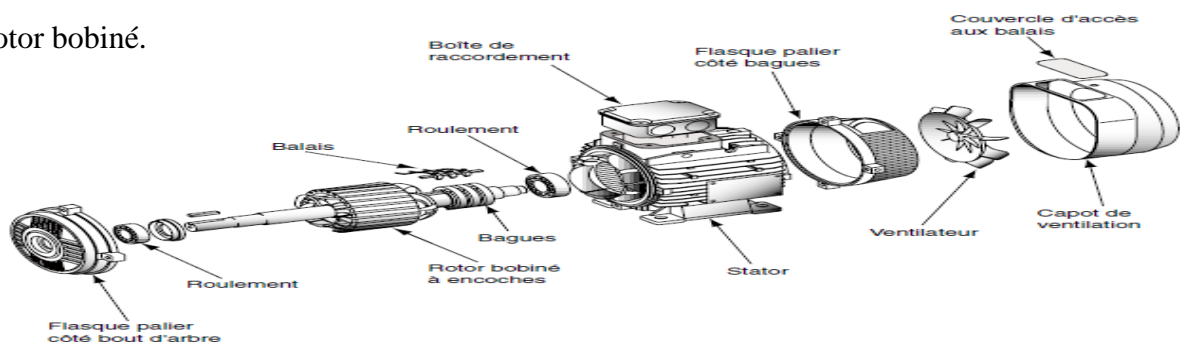


Figure I.6 : Différentes pièces d'un moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné (À bagues).

I.2.1.b.2. Rotor à cage d'écureuil

Le circuit du rotor est constitué de barres conductrices régulièrement réparties entre deux couronnes métalliques formant les extrémités, le tout rappelant la forme d'une cage d'écureuil. Bien entendu, cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique analogue

à celui du moteur à rotor bobiné. Les barres sont faites en cuivre, en bronze ou en aluminium, suivant les caractéristiques mécaniques et électriques recherchées par le constructeur. Dans certaines constructions, notamment pour des moteurs à basse tension, la cage est réalisée par coulée et centrifugation d'aluminium. On démontre que, si le nombre de barres est suffisamment grand, la cage se transforme automatiquement en un circuit polyphasé de polarité adéquate. Ce type de moteur, beaucoup plus aisé à construire que le moteur à rotor bobiné est par conséquent d'un prix de revient inférieur et a une robustesse intrinsèquement plus grande. Il n'est donc pas étonnant qu'il constitue la plus grande partie du parc des moteurs asynchrones actuellement en service. Son inconvénient majeur est qu'il a au démarrage, de mauvaises performances (courant élevé et faible couple). C'est pour remédier à cette situation qu'ont été développés deux autres types de cages (rotor à double cage et rotor à encoches profondes) [4].

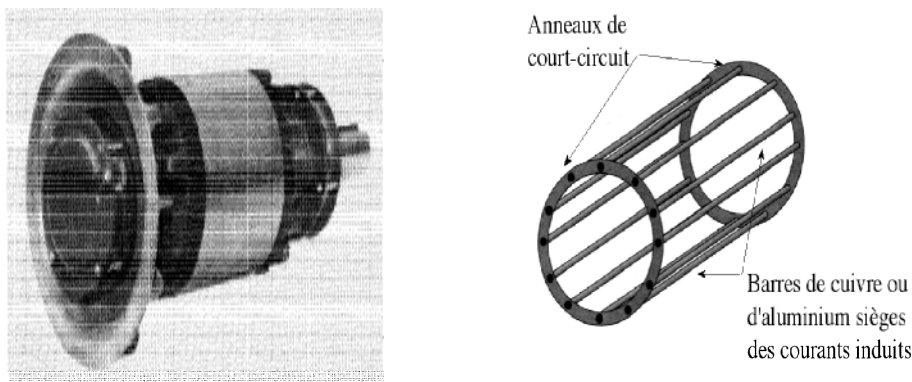


Figure I.7 : Vue d'un rotor à cage d'écureuil d'un moteur asynchrone triphasé.

a. Symbole

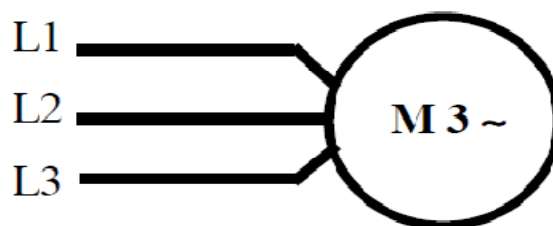


Figure I.8 : Symbole d'un moteur asynchrone triphasé à rotor à cage.

b. Description de différentes pièces d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil

La figure ci-dessous montre les différents composants d'un moteur asynchrone triphasé à rotor à cage [4].

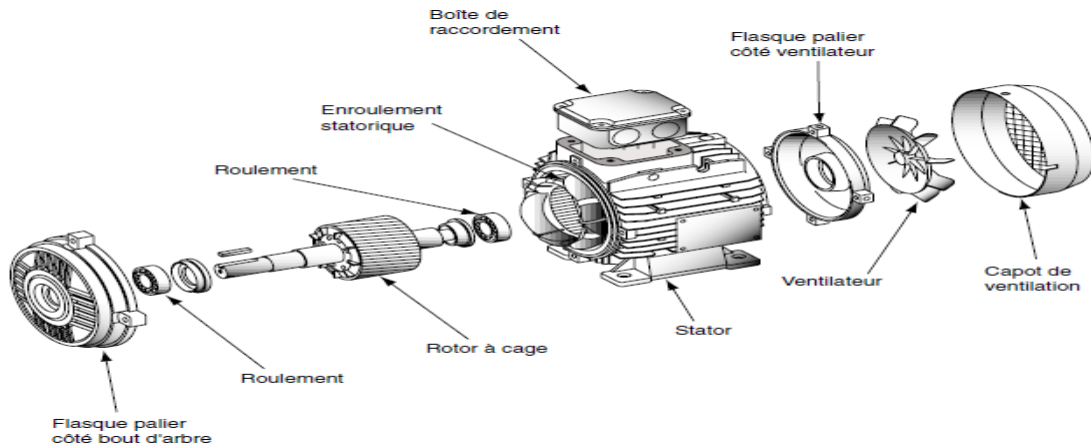


Figure I.9 : Différentes pièces d'un moteur asynchrone triphasé à rotor à cage.

I.2.1.c. L'entrefer

L'entrefer est l'espace entre le stator et le rotor.

I.3.Principe de fonctionnement

L'enroulement statorique, parcouru par un système triphasé équilibré de courant de pulsation ω_s , crée une tension magnétique tournante d'entrefer à la vitesse synchrone, soit avec p paires de pôles :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad (\text{I-1})$$

Le flux balayant l'enroulement rotorique en court-circuit y induit des courants. L'action du champ magnétique statorique sur ces courants met en mouvement le rotor. La vitesse Ω_r du rotor est inférieure à la vitesse synchrone Ω_s . La différence relative est le glissement g .

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} \quad (\text{I-2})$$

La vitesse du champ tournant par rapport au rotor est $\Omega_s - \Omega_r$ et la pulsation ω_r des courants rotorique est alors : [3]

$$\omega_r = p(\Omega_s - \Omega_r) \quad (\text{I-3})$$

Soit

$$\omega_r = g\omega_s \quad (\text{I-4})$$

Les courants rotoriques de pulsation ω_r créent une tension magnétique tournante d'entrefer dont la vitesse par rapport au rotor est $\frac{\omega_r}{p}$, c'est-à-dire $\Omega_s - \Omega_r$. Par rapport au stator, la vitesse de cette tension magnétique tournantes d'entrefer est $\Omega_r + (\Omega_s - \Omega_r)$, c'est-à-dire Ω_s . Les tensions magnétiques tournantes créées par le rotor ont donc même vitesse de rotation Ω_s . La

tension magnétique tournante d'entrefer réelle est la résultante de ces deux tensions magnétiques créées par le stator et par le rotor. [3]

I.4. La vitesse du synchronisme

Sur les moteurs asynchrones, la vitesse de synchronisme dépend de la fréquence d'alimentation et du nombre de paires de pôles p constituant le stator [4] :

$$\Omega_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (\text{I-5})$$

Avec :

Ω_s : Vitesse de synchronisme [tr/min].

f : Fréquence [Hz].

p : Nombre de paires de pôles.

I.5. Glissement

Il existe une différence de vitesse de rotation entre le stator (Ω_s) et le rotor (Ω). Cette différence s'appelle le glissement.

C'est la raison pour laquelle un moteur électrique fonctionnant suivant le principe que nous venons de décrire est appelé "moteur asynchrone". La différence entre la vitesse de synchronisme et celle du rotor est appelée "glissement" et s'exprime en % de la vitesse de synchronisme [4].

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \cdot 100 \quad (\text{I-6})$$

Avec :

Ω_s : vitesse angulaire de synchronisme $\Omega_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot N_s}{60}$ [rd/s].

N_s : La vitesse du synchronisme du champ tournant [tr/min].

Ω : La vitesse angulaire de rotation du rotor $\Omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot N}{60}$ [rd/s].

N : La vitesse de rotation du rotor [tr/min].

I.6. Bilan des puissances et des pertes

Le bilan des puissances et des pertes dans un moteur asynchrone est reporté sur la figure ci-dessous, le moteur asynchrone absorbe sur le réseau une puissance électrique active triphasée P_a . Une partie de cette puissance est dissipée par effet Joule dans les enroulements du stator P_{Js} . Par la suite, le champ magnétique inducteur entraîne des pertes dans le fer P_{fer} , par hystérésis et par courant de Foucault. Le reste de la puissance P_{tr} est transmise au rotor à

travers l'entrefer. La majeure partie de cette puissance est alors utilisée pour produire une puissance électromagnétique P_{em} , tandis que la présence d'un courant induit dans le rotor provoque des pertes par effet Joule P_{Jr} . La puissance électromagnétique fournie par le stator est responsable de la mise en mouvement du rotor, qui produit la puissance mécanique utile P_u qui sera par la suite transmise à la charge par le biais d'un arbre de transmission ou d'une courroie de distribution. Toutefois, dans le mouvement du rotor, une partie de la puissance est perdue par divers mécanismes de frottements, c'est ce que l'on appelle les pertes rotationnelles P_c . Nous donnons par la suite les différentes relations permettant de calculer les pertes et les puissances [4].

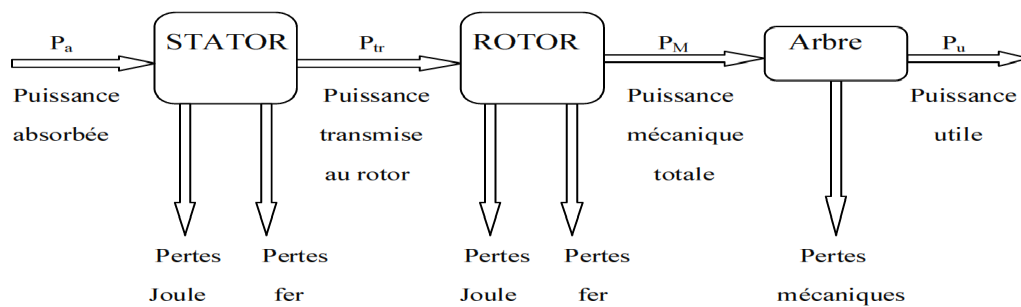


Figure I.10: Diagramme énergétique d'un moteur asynchrone

I.6.a. Puissance électrique absorbée

La puissance absorbée par un moteur asynchrone est une puissance active électrique. Lorsque le moteur est connecté à un réseau triphasé, P_a vérifie la relation [4] :

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

Avec :

P_a : Puissance électrique absorbée [W].

U : La tension d'alimentation [V].

I : Le courant absorbé [A].

$\cos \varphi$: Facteur de puissance.

I.6.b. La puissance transmise dans l'entrefer

La puissance transmise au rotor à travers l'entrefer P_{tr} est la partie de la puissance absorbée qui n'est pas perdue dans les enroulements du stator et dans le fer elle est donnée comme suit [4] :

$$P_{tr} = P_a - (P_{Js} + P_{fer}) \quad (\text{I-8})$$

Avec :

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

I.6.c. Puissance électromagnétique

La puissance électromagnétique P_{em} transmise au rotor est égale à [4] :

$$P_{em} = P_{tr} - P_{Jr} = (1 - g).P_{tr} \quad (\text{I-9})$$

Avec :

P_{em} : Puissance électromagnétique [W].

I.6.d. La puissance mécanique

La puissance mécanique développée par le rotor est égale à la puissance électromagnétique que le stator lui fournit diminuée des pertes fer et pertes Joule au rotor [4].

$$P_m = P_{em} - P_{ferR} \quad (\text{I-10})$$

Avec :

P_m : La puissance mécanique [W].

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

I.6.e. La puissance utile

De la puissance mécanique on soustrait les pertes mécaniques P_{mec} pour arriver à la puissance utile [7].

$$P_u = P_m - P_{mec} \quad [\text{W}] \quad (\text{I-11})$$

Avec :

Les pertes fer du rotor sont négligeables.

P_u : La puissance utile [W].

I.6.f. Rendement du moteur asynchrone triphasé

Le rendement η du moteur asynchrone est le rapport entre la puissance utile qu'il fournit et la puissance électrique qu'il absorbe, de sorte que [4] :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \quad (\text{I-12})$$

À l'aide de la chaîne des pertes, on peut aussi écrire :

$$\eta = \frac{P_a - \sum \text{Pertes}}{P_a} = \frac{P_a - (P_{Js} + P_{fer} + P_{Jr} + P_{sup})}{P_a} \quad (\text{I-13})$$

D'où:

$$\eta = \frac{P_{tr}(1-g) - P_{mec}}{P_a} 100[\%] \quad (\text{I-14})$$

I.7. Couple utile C_u

Le rotor déploie un couple utile C_u à la vitesse Ω_r . Il délivre alors la puissance utile P_u telle que [3] :

$$C_u = \frac{P_u}{\Omega_r} [N.m] \quad (\text{I-15})$$

I.8. Les différentes pertes dans un moteur asynchrone

I.8.1. Pertes dans le circuit électrique

Ce sont des pertes par effet Joule dans toutes les parties conductrices d'une machine asynchrone traversée par des courants (enroulements statorique et cage rotorique), elles peuvent être obtenues précisément par des calculs théoriques connaissant la résistance et le courant ou par des essais pratiques [4].

I.8.1.a. Les pertes par effet Joule

Dans les moteurs à induction, ces pertes sont considérées séparément pour les enroulements du stator et du rotor. Elles sont calculées à partir de l'équation $R I^2$, où R est la valeur de la résistance du circuit qui varie avec la température et la fréquence et I est le courant qui parcourt l'enroulement de résistance R, ces pertes se manifestent par la chaleur qui se dégage des conducteurs [1], [7].

I.8.1.a.1 .Les pertes Joule au stator

Le stator peut être câblé en étoile ou en triangle. Puisque le moteur constitue un récepteur triphasé équilibré, alors [3] :

I.8.1.a.1.a. Formule selon le couplage

➤ Si le moteur est couplé en étoile

$$P_{Js} = 3.r.I^2 \quad (\text{I-16})$$

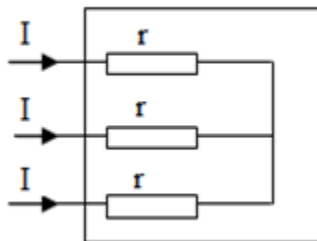


Figure I.11 : Couplage étoile

➤ Si le moteur est couplé en triangle

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

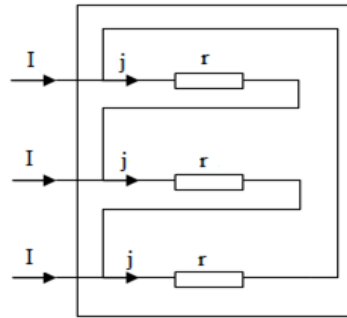


Figure I.12 : Couplage triangle

Avec :

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

r : La résistance d'un enroulement statorique [Ω].

I : Le courant de ligne [A].

I.8.1.a.1.b. Formule indépendante de couplage

Si on appelle R la résistance mesurée entre deux bornes du stator, quelque soit le couplage, les pertes par effet Joules sont : [8]

$$P_{Js} = \frac{3}{2} RI^2 \quad (\text{I-18})$$

I.8.1.a.2. Pertes Joule au rotor

Les pertes Joule au rotor sont en fonctions de la puissance transmise à celui-ci. On peut aussi montrer qu'elles sont aussi en fonctions du glissement.

Les grandeurs P_{tr} et P_{jr} sont liées par la relation [2], [4].

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

Ou bien :

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

Avec :

m_2 : nombre de barre.

R_2 : Résistance d'une phase rotorique [Ω].

I_2 : Le courant dans la barre [A].

I.8.2. pertes fer

Ce sont principalement les pertes qui se produisent en raison des pulsations des fréquences d'alimentation du flux principal dans le fer du stator induisant les pertes par hystérésis et les pertes par courant de Foucault. Les pertes fer au rotor sont négligeables. Les pertes fer peuvent être considérées comme constantes quelle que soit la charge du moteur [2], [3].

I.8.2.1. Pertes dans le circuit magnétique

Ce sont les pertes fer, elles sont constituées par les pertes par hystérésis P_h et les pertes par courant de Foucault P_{fer} [4].

I.8.2.1.a. Pertes par hystérésis :

Les pertes par hystérésis 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 [9] :

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_{\max}^2 \quad (\text{I-21})$$

Avec :

P_h : Puissance perdue par hystérésis [w/Kg].

K_h : Coefficient des pertes par hystérésis.

f : Fréquence de l'induction [Hz].

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

I.8.2.1.b. 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-e-m). Ces dernières donnent naissance à des courants qui se referment dans la masse du fer.

La relation qui nous permet de calculer ces pertes est la suivante [9] :

$$P_f = K_f (e \cdot f \cdot B_{\max})^2 \quad (\text{I-22})$$

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 : fréquence des champs tournant résultants [Hz].

I.8.3. Pertes mécaniques (par frottement et ventilation)

Dans les machines électriques à ventilateur, le refroidissement naturel n'est pas suffisant, pour cela, on fait appel à un refroidissement forcé. Ce dernier est assuré par un ventilateur monté au bout d'arbre de la machine [4].

La puissance absorbée par le ventilateur représente les pertes par ventilation et les pertes dues au frottement, sont engendrées par la résistance au mouvement à l'intérieur des paliers.

En réalité, il n'est pas possible de séparer les pertes par frottement et par ventilation dans une machine car elles sont toutes deux associées à la rotation.

Les pertes mécaniques peuvent être exprimées par la relation suivante [4] :

$$P_{méc} = K_T \left(\frac{n}{10}\right)^2 (D_e \cdot 10^{-3})^4 \quad (\text{I-23})$$

Avec :

$K_T = 1,3(1 - D_e)$ Pour $0,1 \leq D_e \leq 0,5m$

D_e : Diamètre extérieur du stator [m].

n : Vitesse de rotation synchrone [tr/min].

I.8.4. Pertes supplémentaires

Elles sont dues au champ de fuite dans les encoches et dans les têtes de bobines.

I.8.4.1. Pertes fer supplémentaires

I.8.4.1.a. Pertes fer supplémentaires à la surface d'un pôle

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 [4].

I.8.4.1.b. Pertes fer supplémentaires dues aux pulsations dans les dents

Ces pertes sont créées dans les dents du rotor par la variation périodique d'induction dues au passage des dents statoriques. 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 [4].

I.8.4.2. Pertes supplémentaires dans le circuit électrique

Les flux auxquels sont soumis les conducteurs logés dans les encoches modifient la densité du courant en charge par création des courants de Foucault. Ils provoquent ainsi une augmentation de la résistance des conducteurs (effet de peau), donc une augmentation des pertes par effet Joules. Cependant pour réduire ces pertes on diminue le diamètre des conducteurs en les subdivisant en brins élémentaires isolés les uns des autres.

D'autres pertes apparaissent à cause des discontinuités géométriques de la machine au niveau de l'entrefer. Ainsi, des flux de fuite harmonique de phase et d'encoche apparaissent et engendrent des pertes dans les conducteurs rotorique des machines asynchrone dont l'entrefer est particulièrement faible [4].

I.8.4.2.a. 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. Un flux de fuite de phase (ou flux différentiel de phase) apparaît alors, et engendre des pertes non négligeables [4].

I.8.4.2.b. 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.

De ce fait, un 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 suivante [4] :

$$P_{de} = m_1 I_1^2 r_2' K_i K_{di} \quad (\text{I-24})$$

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

I.8.4.3. Pertes supplémentaires dans le circuit magnétique

En plus des pertes fer dues au flux fondamentales, il en existe d'autres dues aux variations de l'induction dont la fréquence est beaucoup plus élevée. Elles sont produites par les discontinuités de la machine [4].

La présence des encoches 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.

Le diagramme ci-dessous résume la répartition des différentes pertes dans une machine asynchrone.

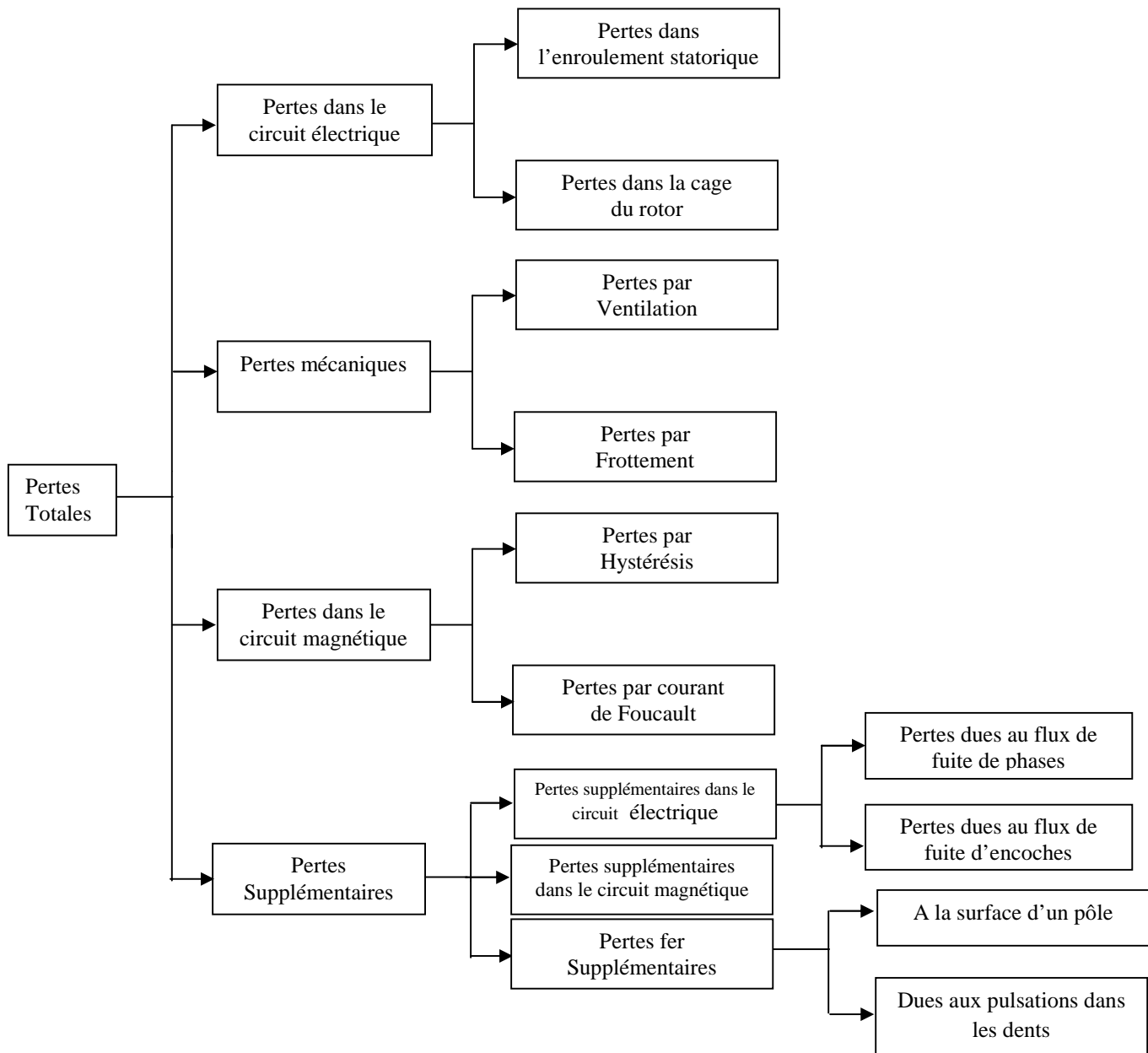


Figure I.13: Différentes pertes dans une machine asynchrone

I.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le moteur asynchrone ainsi que les puissances consommées et les puissances fournis par ce dernier.

Les pertes totales dans un moteur asynchrone sont égales à la somme des pertes Joule statorique, des pertes fer, des pertes Joule rotorique, pertes mécaniques et les pertes supplémentaires.

Le calcul de ces pertes fera l'objet du prochain chapitre.

II.1.Introduction

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer les pertes dans un moteur asynchrone à cage. Dans ce chapitre on s'intéresse à déterminer ces pertes analytiquement par deux méthodes différentes; la méthode de dimensionnement et la méthode de circuit électrique équivalent.

II.2. Calcul des pertes de puissance par méthode de dimensionnement

II.2.1. Pertes électriques

Elles représentent les pertes Joule dans les enroulements du stator et du rotor

II.2.1.a. Pertes Joule statorique

Elles sont données par la formule suivante [4] :

$$P_{Js} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_1^2 \quad (\text{II-1})$$

Avec:

m_1 : Nombre de phase statorique.

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

R_1 : Résistance d'une phase statorique calculée (voir annexe A page 64) [Ω].

I_1 : Le courant dans la phase statorique calculé (voir annexe A page 62) [A].

II.2.1.b. Pertes Joules rotorique

Elles sont données par la formule suivante [4] :

$$P_{Jr} = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 \quad (\text{II-2})$$

Avec :

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

m_2 : nombre de phase rotorique.

R_2 : Résistance d'une phase rotorique calculée (voir annexe A page 64) [Ω].

I_2 : Le courant de la barre rotorique calculé (voir annexe A page 66) [A].

II.2.2. Pertes mécaniques

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.

Elles sont données par l'expression suivante [4] :

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

Avec :

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

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

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

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

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

II.2.3. 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 de la culasse statorique. Dans le rotor ces pertes sont négligeables à cause de la faible fréquence de la variation du flux au régime nominal [4].

II.2.3.a. Les pertes dans la culasse statorique

On obtient les pertes dans la culasse statorique par la multiplication des pertes spécifiques calculées, pour une induction $B_{c1\text{max}}$ (induction maximale dans la culasse) par la masse d'acier de la culasse, mais en tenant compte de la magnétisation qui est elliptique sur la frontière avec la couche des dents et pulsatoire sur la périphérie et de l'influence de l'usinage de l'isolation des tôles dans la culasse en introduisant le coefficient de majoration [7].

Les pertes dans la culasse sont données par :

$$P_{fc1} = P_{10(50\text{Hz})} \cdot (f_1/50)^\beta \cdot K_{dc} \cdot G_{c1} \cdot B_{c1\text{max}}^2 \quad (\text{II-4})$$

Avec :

B_{c1} : l'induction magnétique dans la culasse du stator ; calculer en fonction de β_δ (voir annexe A page)

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 spécifiques dans les tôles d'acier.

$P_{10(50Hz)} = 2.5 \text{ W/Kg}$.

G_{c1} : le poids total de la culasse, il est donné par la formule suivante :

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

$\gamma_c = 7,8 \cdot 10^3 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$: masse volumique.

$\beta = 3/2$: coefficient de dilatation des tôles, il est donnée par le tableau 1 (annexe D)

f_1 = fréquence du réseau d'alimentation.

II.2.3.b. Pertes dans les dents statorique

Les dents sont soumises à une magnétisation pulsatoire. On a donc ici à tenir compte seulement de l'augmentation des pertes dues à l'usinage des dents et des pertes liées aux harmoniques supérieurs de l'induction [4].

Les pertes dans les dents statorique sont calculées par [4] :

$$P_{fz1} = K_{dz} \cdot B_{z1max}^2 \cdot G_{z1} \cdot P_{10(50Hz)} \cdot (f_1/50)^\beta \text{ [W]} \quad \text{(II-5)}$$

Avec :

G_{z1} : poids total des dents statoriques, il est donné par la formule suivante :

$$G_{z1} = h_{z1} \cdot b_{z1} \cdot l_\delta \cdot Z_1 \cdot K_{fer} \cdot Y_c \cdot 10^{-9} \text{ [Kg]}$$

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

$K_{dz} = (1,7 \div 1,8)$.

$B_{z1 \max}$: induction maximale dans la dent statorique ; calculer en fonction de β_δ (voir annexe A page 63)

Enfin, les pertes principales sont données par la somme des pertes dans la culasse et dans les dents statoriques et sont calculées par la formule suivante [6] :

$$P_{\text{acp}} = P_{\text{fc1}} + P_{\text{fz1}} = P_{10(50\text{Hz})} \cdot (f_1/50)^\beta \cdot (K_{\text{dc}} \cdot B_{\text{c1max}}^2 \cdot G_{\text{c1}} + K_{\text{dz}} \cdot B_{\text{z1max}}^2 \cdot G_{\text{z1}}) [\text{W}] \quad (\text{II-6})$$

II.2.4. Les pertes magnétiques supplémentaires d'acier

II.2.4.a. Pertes à la surface du rotor (pertes superficielles)

Les pertes superficielles apparaissent à la surface du rotor par la présence d'encoche ouverte du stator [4]:

$$P_{\text{sr}} = P_{\text{sr2}} (t_2 - b_{f2}) \cdot l_i \cdot Z_2 \cdot 10^{-6} \quad (\text{II-7})$$

Avec :

t_2 : pas dentaire rotorique.

b_{f2} : la largeur de la fente rotorique.

P_{sr2} : calculé comme suit :

$$P_{\text{sr2}} = 0,5 \cdot K_{02} \left(\frac{Z_1 \cdot n_1}{10^4} \right)^{3/2} \cdot (B_{02} \cdot t_1)^2 [\text{W}] \quad (\text{II-8})$$

Avec :

t_1 : pas dentaire statorique.

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

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

$$\beta_{02} = 0,275$$

β_{02} : Coefficient déterminé à partir de la figure 2 (voir annexe D).

Z_1 : Nombre d'encoches statorique.

n_1 : la vitesse de synchronisme [tr/min].

b_{f2} : la largeur de la fente rotorique.

II.2.4.b. Pertes par pulsation du flux dans les dents

Par la présence des encoches statorique et rotorique, l'induction dans les dents varie avec la position respective de celui-ci. Les oscillations du flux dans les dents, consécutives à ce phénomène, créent des pertes supplémentaires ou pertes par pulsation du flux qui sont données par l'expression suivante [6] :

$$P_{pul2} = 0,11 \cdot \left[\left(\frac{Z_1 n_1}{10^3} \right) B_{pul2} \right]^2 \cdot G_{z2} \text{ [W]} \quad \text{(II-9)}$$

Avec :

$$B_{pul2} = \left[\frac{\gamma_1 \cdot \delta \cdot B_{z2max}}{2 \cdot t_2} \right] \text{ [T]} \quad \text{(II-10)}$$

B_{z2max} : Induction maximale de la dent rotorique [T] ; calculer en fonction de β_δ (voir annexe A page 65)

II.2.4.c. Pertes magnétiques supplémentaires totale dans l'acier

Les pertes supplémentaires sont données par la somme des pertes à la surface du stator et des pertes par harmonique du flux dans les dents [5].

$$P_{acsup} = P_{sr} + P_{pul2} \text{ [W]} \quad \text{(II-11)}$$

II.2.5. Pertes totales dans l'acier

Les pertes totales dans l'acier sont égales à la somme des pertes principales dans l'acier et les pertes supplémentaires dans l'acier, est calculée par la relation suivante [6] :

$$P_{ac\Sigma} = P_{acp} + P_{acsup} \text{ [W]} \quad \text{(II-12)}$$

II.2.6. Pertes supplémentaires

L'origine de ces pertes, c'est le champ de fuite dans les encoches et dans les têtes de bobines, elles sont difficile à mesurer et à calculer mathématiquement à cause de la

complexité des lignes de champ dû à la fuite des bobines, elles sont estimées à 0,5% de la puissance absorbée [6].

$$P_{\text{sup}} = 0,005 \frac{P_{2\text{nom}} \cdot 10^3}{\eta_n} \text{ [W]} \quad (\text{II-13})$$

$P_{2\text{nom}}$: puissance utile nominale[w].

η_n : rendement nominale.

II.2.7. Pertes totales du moteur

C'est la somme de toutes les pertes [6]:

$$P_{\text{Tot}} = P_{Js} + P_{Jr} + P_{mec} + P_{ac\Sigma} + P_{\text{sup}} \text{ [W]} \quad (\text{II-14})$$

II.2.8. Le rendement

Le rendement du moteur est le rapport entre la puissance utile et la puissance absorbée [6] :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{\text{tot}}} \quad (\text{II-15})$$

II.3. Résultats de calcul des pertes et du rendement

Les résultats obtenus sont calculés dans l'annexe B et résumés dans le tableau (II.1)

DESIGNATION	SYMBOLE	RESULTAT	UNITE
Pertes Joules statorique	P_{Js}	305,75	W
Pertes Joules rotorique	P_{Jr}	174,8	W
Pertes mécaniques	P_{mec}	11,04	W
Pertes dans la culasse statorique	P_{fc1}	49,9	W
Pertes dans les dents statoriques	P_{fz1}	28,02	W
Pertes d'acier principales	P_{acp}	77,92	W
Pertes à la surface du rotor	P_{sr}	2,63	W
Pertes dans les dents rotorique	P_{pul2}	19,04	W
Pertes supplémentaires dans l'acier	$P_{ac\ sup}$	21,67	W
Pertes totales dans l'acier	$P_{ac\ \Sigma}$	99,59	W
Pertes supplémentaires	P_{sup}	14,1	W
Pertes totales	P_{tot}	605,1	W
Rendement	η	78	%

Tableau II.1 : Résultats de calcul des pertes et de rendement par la méthode de dimensionnement.

II.4. 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.
- Pour les plus faibles valeurs des pertes calculées, on trouve les pertes mécaniques et les pertes supplémentaires.
- Et enfin de calcul on à déduit le rendement de la machine.

II.5. 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.

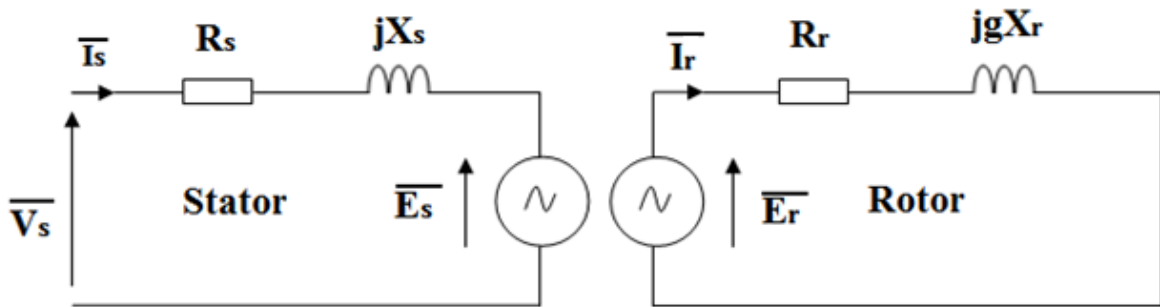


Figure II.1 : Schéma équivalent d'une machine asynchrone à cage

II.5.1. Les équations de schéma électrique équivalent

À partir du schéma équivalent de la figure (II.1) on peut tirer les équations générales suivantes :

II.5.1.a. Equations du stator

$$\overline{V}_s = \overline{E}_s + (R_s + jX_s) \cdot \overline{I}_s \quad [\text{V}] \quad (\text{II-16})$$

Avec :

\overline{V}_s : Tension simple d'alimentation [V]

\overline{I}_s : Le courant d'une phase statorique [A]

R_s : Résistance statorique par phase [Ω]

X_s : La réactance cyclique de fuite d'une phase statorique [Ω]

\overline{E}_s : La f.e.m (force électromotrice) induite d'une phase statorique [V]

II.5.1.b. Equations du rotor

$$\overline{E}_r = (R_r + jgX_r) \cdot \overline{I}_r \quad [\text{V}] \quad (\text{II-17})$$

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

$$\frac{\bar{E}_r}{g} = \left(\frac{R_r}{g} + jX_r' \right) \cdot \bar{I}_r \quad \text{(II-18)}$$

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 [Ω]

g : Le glissement de la machine

X_r' : La réactance cyclique de fuite d'une phase rotorique [Ω]

II.6. Détermination des paramètres par la méthode classique

Les paramètres électriques de la machine peuvent être déterminés par trois essais :

- ❖ Essai en courant continu.
- ❖ Essai à vide.
- ❖ Essai à rotor bloqué.

Tous les essais de notre travail sont effectués sur un moteur asynchrone à cage d'écurie au sein de laboratoire **TEC 423** de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

II.6.1. Le schéma électrique équivalent en T

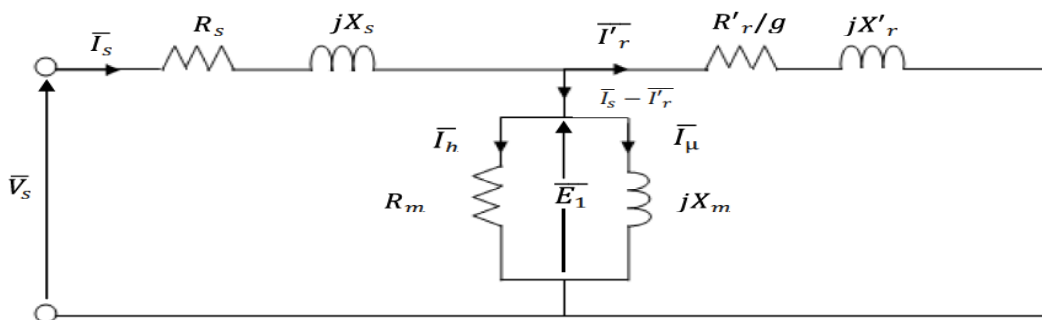


Figure II.2 : Schéma équivalent ramené au stator de la machine asynchrone

À partir de ce schéma on déduit les équations électriques suivantes [10]:

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

Avec :

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

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

II.6.2. Détermination de la résistance statorique R_s

La mesure de cette résistance est faite par la méthode volt- ampère métrique.

On alimente un enroulement de la machine en courant continu, cet essai nécessite une source d'alimentation en continu, un voltmètre et un ampèremètre afin de mesurer les grandeurs qui caractérisent la résistance suivant la loi d'ohm :

$$U = R_s I_s \Rightarrow R_s = \frac{U}{I_s} [\Omega] \quad \text{(II-19)}$$

Cette mesure est faite à une température ambiante de 26°C.

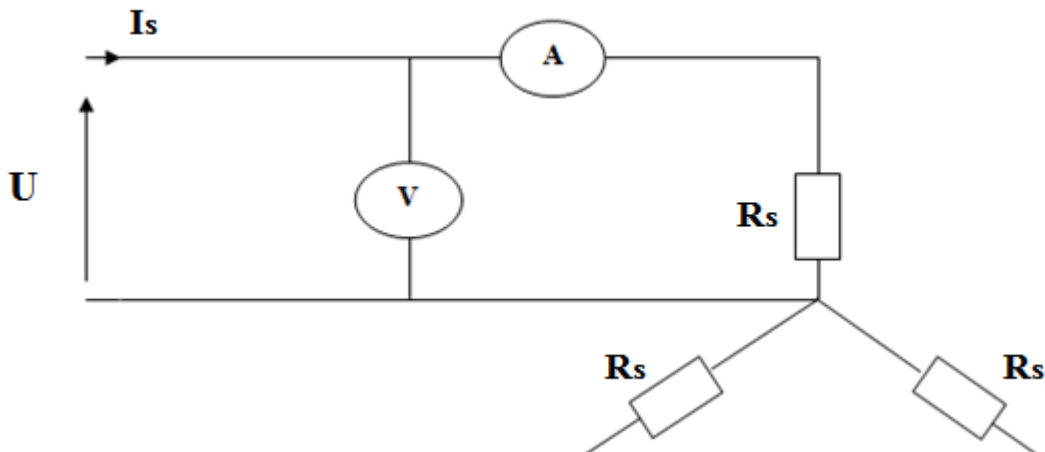


Figure II.3 : Schéma de mesure de la résistance statorique en continu

II.6.2.a. Résultat de mesure

Les résultats de mesure sont résumés dans le tableau (II.2) :

Phase [U ₁ U ₂]			Phase [V ₁ V ₂]			Phase [W ₁ W ₂]		
I _{sy} (A)	U (V)	R _s (Ω)	I _{sy} (A)	U(V)	R _s (Ω)	I _{sy} (A)	U(V)	R _s (Ω)
1	7,2	7,2	1	7,5	7,5	1	7,5	7,5
2	15,5	7,75	2	15,5	7,75	2	15,5	7,75
3	23,5	7,83	3	23,5	7,83	3	24	8

Tableau II.2 : Résultats de mesure de l'essai en courant continu.

Donc la valeur moyenne de la résistance statorique à froid Tamb= 26°C

$$R_{smoy}=7,67 \Omega$$

II.6.3. Essai à vide

Cet essai permet de mesurer les pertes fer et les pertes mécaniques du moteur. Dans cet essai la charge est nulle, on alimente le moteur sous différentes tension.

Le glissement g_0 obtenu 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. Cependant 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 [10] :

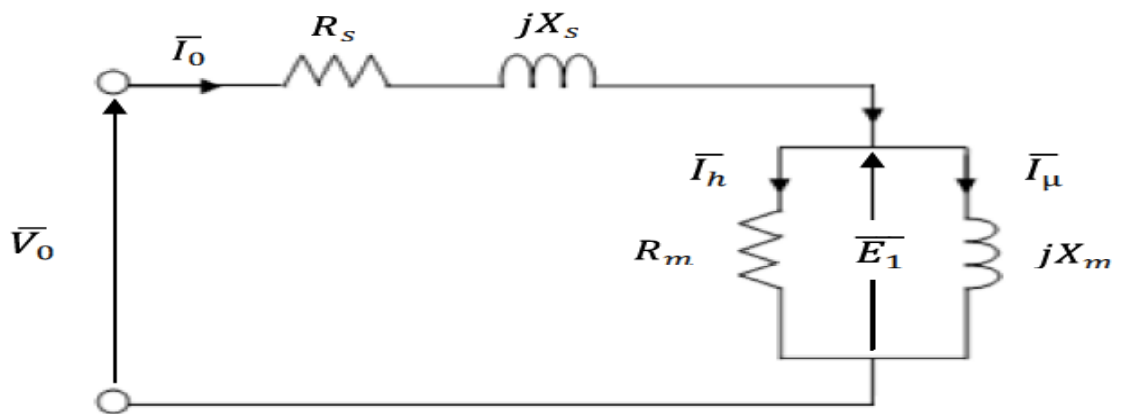


Figure 2.4 : Schéma équivalent à vide

II.6.3.1. 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} .

$$P_0 = 3R_s I_0^2 + P_{fer} + P_{mec}$$

$$P_0 - 3R_s I_0^2 = P_{fer} + P_{mec} \quad (\text{II-20})$$

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 :

$$R_s = R_{s(26^\circ\text{C})} \cdot \frac{T_2 + K}{T_1 + K} \quad (\text{II-21})$$

Avec :

$R_{s(26^\circ\text{C})}$: La résistance statorique à 26°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

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

$$P_{fer} + P_{mec} = P_0 - 3R_s I_0^2 = f(U^2)$$

Cet essai est fait sans entraînement, et à une température ambiante de 26°C .

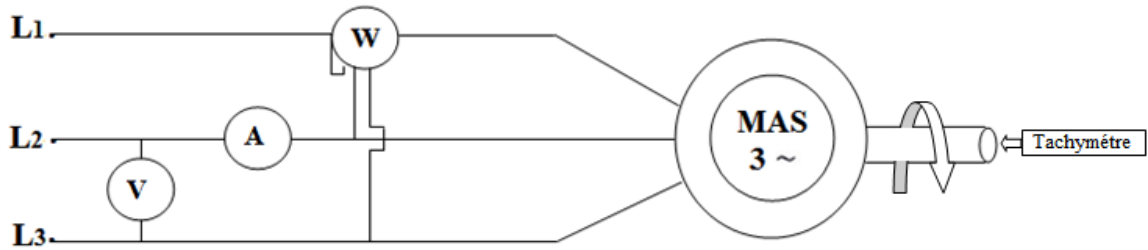


Figure II.5. Circuit de mesure de l'essai à vide

Le circuit de mesure comporte :

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

II.6.3.1.a. La courbes des pertes fer et mécaniques

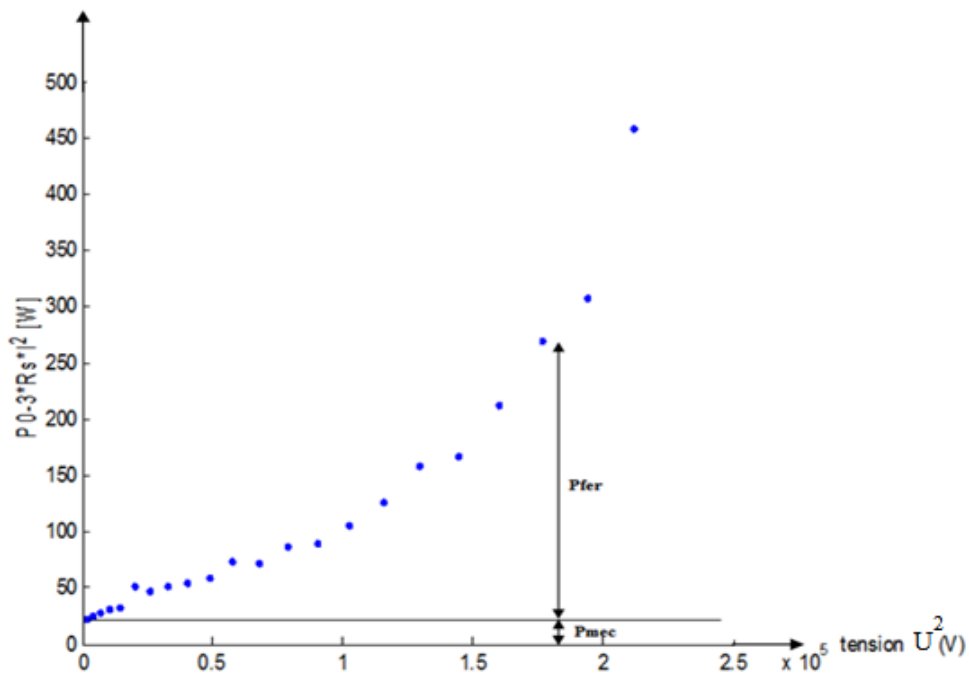


Figure II.6: Courbe des pertes fer et des pertes mécaniques à vide

II.6.3.1.b. Détermination de R_m et X_m

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

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

D'où :

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

Avec :

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

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

❖ **Le facteur de puissance à vide**

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

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

Avec :

V_0 : La tension nominale à vide [V].

P_0 [W] et I_0 [A] sont mesurés pour la valeur nominale de V_0 .

❖ **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 :

$$R_m = \frac{3 \cdot E_1^2}{P_{fer}} [\Omega] \quad \text{(II-22)}$$

❖ **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'ou:

$$X_m = \frac{E_1}{I_0 \cdot \sin \varphi_0} \quad [\Omega] \quad (\text{II-23})$$

II.7. Essai à rotor bloqué

II.7.1. Le schéma de montage

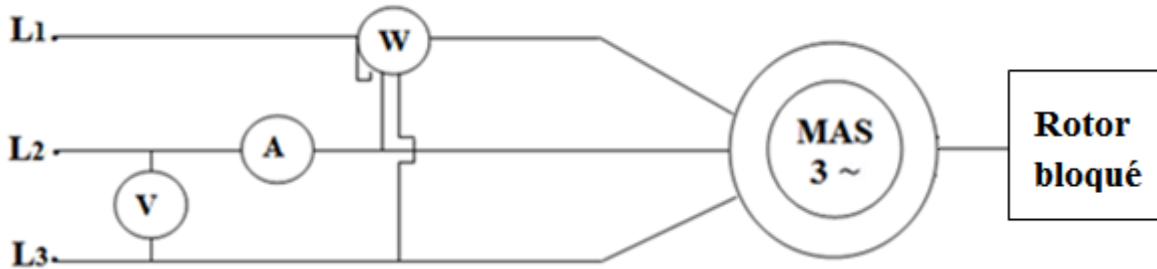


Figure II.7 : Schéma de montage d'un moteur asynchrone à rotor bloqué.

Dans cet essai, on bloque le rotor afin d'empêcher sa rotation ($\Omega=0$, $g=1$). On alimente le moteur sous une tension réduite de façon à ne pas dépasser le courant nominal et on mesure :

- La tension nominale d'alimentation V_{cc} [V].
- Le courant nominal statorique I_{cc} [A].
- La puissance nominale absorbée P_{cc} [W].

L'essai à rotor bloqué, appelé aussi essai en court-circuit car le courant absorbé par le moteur est très élevé. Le courant magnétisant est négligeable par rapport au courant I_{cc} d'où le schéma équivalent en court-circuit suivant :

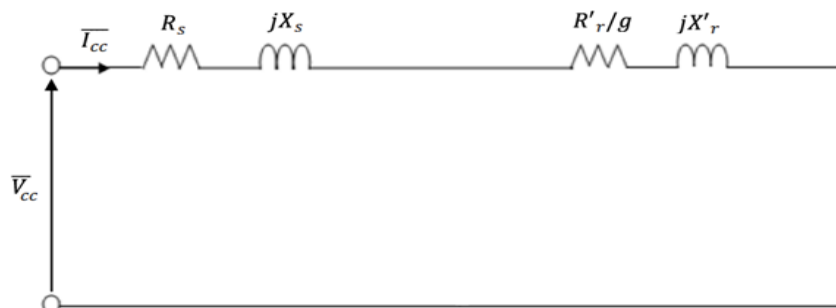


Figure 2.8 : Schéma électrique équivalent à rotor bloqué

II.7.2. Résultat de mesure

Les valeurs mesurées à rotor bloqué sont représentée dans le tableau (II.4)

$V_{cc}(V)$	$I_{cc\Delta}(A)$	$P_{cc}(W)$
76	5.2	435
50	3.4	180
30	2	60
10	1.2	7.5

Tableau II.4 : Résultats de mesure de l'essai en court circuit.

II.7.2.a. Expression de la résistance R'_r

La puissance électrique absorbée à rotor bloqué P_{cc} correspond à la somme des pertes par effet Joule dans le stator P_{js} et les pertes par effet Joule dans le rotor P_{jr} :

$$P_{cc} = 3(R_s + R'_r) \cdot I_{cc}^2 \quad (\text{II-24})$$

D'où :

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

II.7.2.b. Expression des réactances de fuites X_s et X'_r

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

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

Avec :

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

On notera

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

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

❖ **Le facteur de puissance en court circuit**

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

D'où :

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

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

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

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 [10].

Donc

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

$$X_s = X'_r = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{Z_{cc}^2 - (R_s + R'_r)^2} \text{ } [\Omega] \quad \text{(II-25)}$$

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

Les résultats obtenus à partir de cette méthode et pour une tension d'alimentation $U=400V$ sont représentés dans le tableau (II.5)

$P_{fer}[\text{W}]$	$P_{mec}[\text{W}]$	$X_s[\Omega]$	$X'_r[\Omega]$	$R_m[\Omega]$	$X_m[\Omega]$	$R_s[\Omega]$	$R'_r[\Omega]$
200	23	9.7728	9.7728	2061.1	166.1947	7.67	8.4128

Tableau II.5:Les paramètres du schéma électrique équivalent.

II.8. Expression des différentes impédances du schéma équivalent

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

$$\bar{Z}_e = \bar{Z}_1 + \frac{\bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_m}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_m} \quad [\Omega] \tag{II-26}$$

Avec

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

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

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

II.9. Expression du courant primaire

$$\bar{I}_s = \frac{\bar{V}_s}{\bar{Z}_1 + \frac{\bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_m}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_m}} = \frac{\bar{V}_s}{\bar{Z}_e} [A] \tag{II - 27}$$

II.10. 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 de son expression trouvée précédemment on trouve:

$$\bar{I}'_r = \frac{\bar{Z}_2}{(\bar{Z}_2 + \bar{Z}_m) \left(\bar{Z}_1 + \frac{\bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_m}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_m} \right)} * \bar{V}_s \quad [A] \tag{II - 28}$$

II.11. 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 de son expression trouvée précédemment on trouve:

$$\bar{I}_m = \frac{\bar{Z}_2}{(\bar{Z}_2 + \bar{Z}_m) \left(\bar{Z}_1 + \frac{\bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_m}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_m} \right)} * \bar{V}_s \quad [\text{A}] \quad (\text{II} - 29)$$

II.12. Expression du facteur de puissance

On à :

$$\bar{Z}_e = \Re(Z_e) + \Im(Z_e)$$

$$\bar{Z}_e = \frac{\bar{V}_s}{\bar{I}_s}$$

D'où :

$$|\bar{Z}_e| = \frac{|\bar{V}_s|}{|\bar{I}_s|}$$

$$\cos \varphi = \frac{\Re(Z_e)}{|\bar{Z}_e|}$$

Donc :

$$\cos \varphi = \frac{\Re(Z_e) \cdot |\bar{I}_s|}{|\bar{V}_s|} \quad (\text{II} - 30)$$

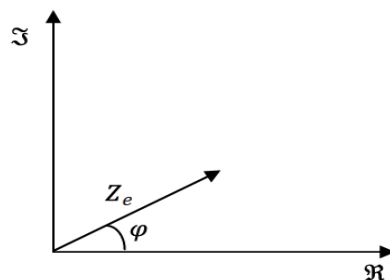


Figure II.8. Présentation trigonométrique de l'impédance Z_e

Avec :

\Re : est la partie réelle de l'impédance Z_e .

\Im : est la partie imaginaire de l'impédance Z_e .

II.13. Expression de la puissance absorbée

$$P_a = 3 \cdot |\bar{V}_s| \cdot |\bar{I}_s| \cdot \cos \varphi \quad [\text{W}] \quad (\text{II-31})$$

II.14. Expression de la puissance utile

$$P_u = P_a - (P_{J_s} + P_{J_r} + P_{fer} + P_{mec}) \quad [\text{W}] \quad (\text{II-32})$$

$$P_u = P_a - (3 \cdot R_s \cdot I_s^2 + 3 \cdot R_r' \cdot I_r'^2 + P_{fer} + P_{mec}) \quad [\text{W}] \quad (\text{II-33})$$

II.15. Expression de couple utile

$$C_u = \frac{P_u}{\Omega} \quad [\text{W}] \quad (\text{II-34})$$

II.16. Expression de rendement

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} * 100 \quad [\%] \quad (\text{II-35})$$

Le calcul des impédances et des puissances est fait on utilisant un programme informatique (langage de programmation MATLAB).

II.17. 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.

Pour savoir laquelle des deux méthodes donne de meilleurs résultats, il faut comparer les résultats obtenus par les deux méthodes à ceux obtenus expérimentalement, c'est ce que nous verrons dans le chapitre suivant.

III.1. Introduction

Dans ce chapitre on s'intéresse à répartir les pertes dans les différentes parties de la machine en pourcentage puis dans chaque matériaux et de faire une comparaison entre les résultats mesurés expérimentalement et calculer théoriquement.

III.2. Répartition des pertes de puissance dans la machine

Dans ce qui suit nous allons faire la répartition des pertes de la machine par rapport à 100% de la puissance absorbée puis par rapport à 100% des pertes totales dans la machine à vide et en charge.

III.2.1. Répartition des puissances et des pertes dans la machine à vide

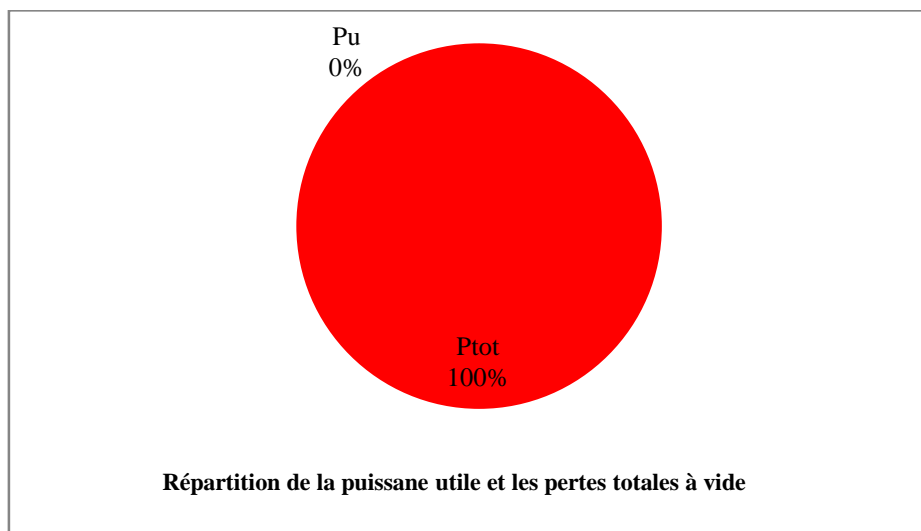


Figure III.1: Répartition de la puissance utile et les pertes totales dans la machine à vide

III.2.1.a. Interprétation

On remarque que la totalité de la puissance absorbée à vide représente les pertes totales.

Dans ce cas la puissance utile est nulle parce que la machine tourne à vide.

III.2.2. Répartition des puissances et des pertes dans la machine en charge nominale

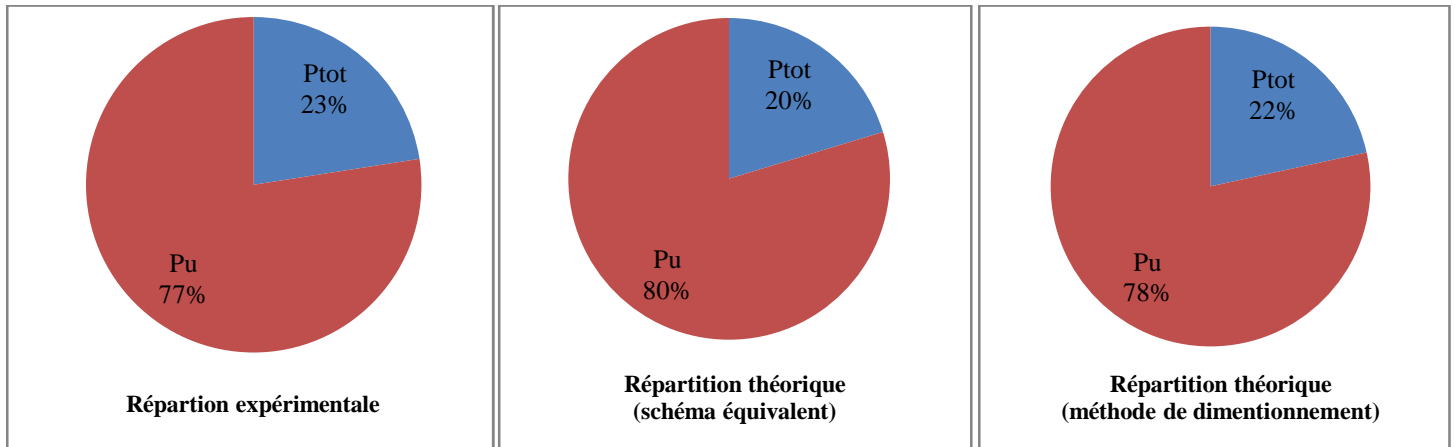


Figure III.2: Répartition de la puissance utile et les pertes totales dans la machine en charge nominale

III.2.2.a. Interprétation

On remarque que 80% de la puissance absorbée théorique (schéma équivalent) est transformée en puissance utile; les 20% restant de cette puissance représente les pertes totales.

On remarque que 77% de la puissance absorbée calculé expérimentalement est transformée en puissance utile; les 23% restant de cette puissance représente les pertes totales.

Même chose pour la répartition théorique (méthode de dimensionnement); 78% de la puissance absorbée est transformée en puissance utile; les 22% restant de cette puissance représente les pertes totales.

III.2.2.b. Comparaison

On remarque que le pourcentage de la puissance utile théorique et expérimental est presque le même avec une petite différence.

III.2.3. Répartition des pertes totales dans la machine à vide

Nous allons faire la répartition des pertes totales à vide; ces pertes sont les pertes Joules statorique, Joules rotorique, fer, mécaniques et supplémentaires.

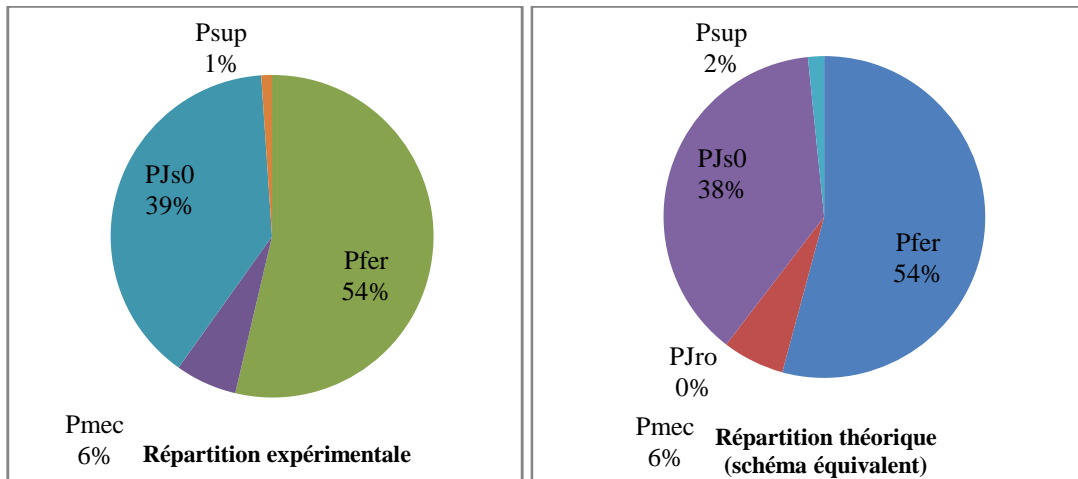


Figure III.3: Répartition des pertes totales dans la machine à vide

III.2.3.a. Interprétation et comparaison

On remarque que presque la moitié des pertes totales sont les pertes fer ; la totalité des pertes restantes sont les pertes Joule statorique suivit par les pertes mécaniques puis par les pertes supplémentaires ; les pertes Joules rotorique sont presque nulle et cela dans les deux cas ; théorique et expérimentale.

III.2.4. Répartition des pertes totales dans la machine en charge nominale

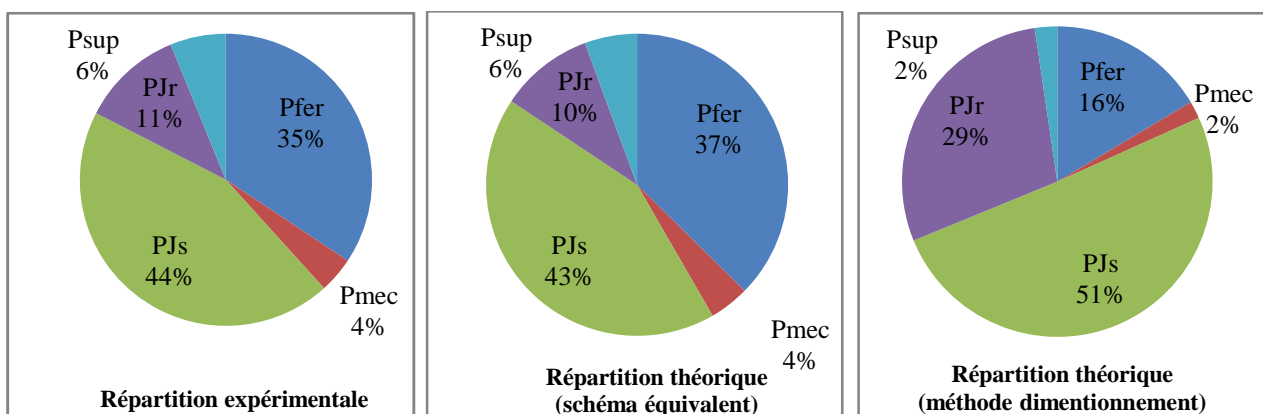


Figure III.4: Répartition des pertes totales dans la machine en charge nominale

III.2.4.a. Interprétation

On remarque que presque la moitié des pertes totales en charge nominale sont les pertes Joules statorique, la somme des pertes totales restantes sont les pertes fer, suivit par les pertes Joule rotorique, ensuite les pertes mécaniques, par suite les pertes supplémentaires avec un petit pourcentage.

III.2.4.b. Comparaison

On remarque que la différence dans la répartition des pertes totales, théorique (schéma équivalent) et expérimentale est presque égale, elle est de 1% de différence. Par contre cette répartition par la méthode de dimensionnement est un peut plu différentes d'un pourcentage de plus élevé.

III.3. Répartition des pertes Joules statorique et des pertes fer dans l'acier magnétique

Dans ce qui suit nous faisons la répartition des pertes Joules statorique dans les enroulements des parties d'encoche et dans les têtes de bobines côté ventilé et non ventilé. Ceci dans le cas ou la température est considéré constante et dans le cas réel, ou elle est différente d'une partie à une autre.

Ensuite, on fait la répartition des pertes fer dans la culasse et dans les dents statorique.

III.3.1. Répartition des pertes Joules statorique dans l'enroulement statorique

On cherche à faire la répartition des pertes Joules statorique, à vide et en charge, dans les encoches puis dans les têtes de bobines à une température constante égale à 115°C.

III.3.1.1. Essai en charge au régime établie

On suppose que la température constante dans les différentes parties de l'enroulement.

III.3.1.1.a. Calcul de nombre de conducteurs dans les encoches par phase

$$n = Z_{1ph} \cdot U_{enr1} \quad \text{(III-1)}$$

Avec :

Z_{1ph} : nombre d'encoches par phase statorique.

U_{enr1} : nombre de conducteurs par encoche statorique.

a.1. Calcul de la longueur totale du conducteur dans les encoches par phase

$$l = l_i \cdot n \quad (\text{III-2})$$

Avec :

l_i : longueur du paquet de la tôle statorique.

a.2. Calcul de la résistance totale du conducteur dans la partie d'encoche d'une phase

$$R_{enc} = \rho_{115^\circ c} \cdot \frac{l}{S} \quad (\text{III-3})$$

Avec :

ρ_{cu} : résistivité du cuivre à la température $115^\circ C$, elle est égale à $24,4 \cdot 10^{-9} \Omega m$

S : section du conducteur nu en mm^2 .

On suppose que les têtes de bobine ont les mêmes dimensions (donc même résistances)

a.3. Calcul des pertes Joules statorique dans la partie d'encoche

$$P_{jsenc} = 3 \cdot R_{enc} \cdot I_1^2 \quad (\text{III-4})$$

Avec :

I_1 : courant d'une phase statorique.

a.4. Calcul des pertes Joules dans les têtes des bobines du coté ventilé

$$P_{jstbv} = 3 \cdot R_{tb} \cdot I_1^2 \quad (\text{III-5})$$

a.5. Calcul des pertes Joules dans les têtes des bobines du coté non ventilé

$$P_{jstbnv} = 3 \cdot R_{tb} \cdot I_1^2 \quad (\text{III-6})$$

a.6. Répartition des pertes Joules statorique de la machine en charge nominale à température constante

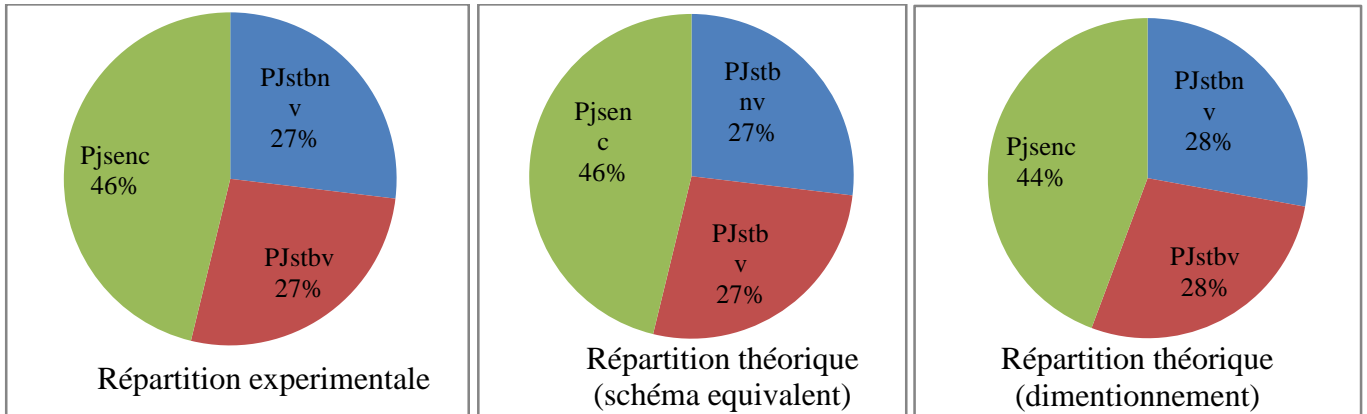


Figure III.5: Répartition des pertes Joule statorique de la machine en charge nominale à température constante

a.6.a. Interprétation

On remarque que presque la moitié des pertes Joules statorique se trouve au niveau de la partie d'encoche, le reste se repartissent équitablement dans les têtes de bobines du côté ventilé et non ventilé puisque la température est considérée identique dans les deux côtés des têtes de bobines.

a.6.b. Comparaison

La répartition des pertes Joule statorique trouvés expérimentalement sont presque égale à celle trouvés par la méthode de schéma équivalent, par contre elles sont différent de celle trouvés par la méthode de dimensionnement.

III.3.1.1.b. Température de l'enroulement statorique différente dans divers parties

Sachons que la température dans l'encoche statorique est égale à 97.5°C, la température de la bobine de côté ventilé est à 94.2°C et celle de côté non ventilé est à 103.6°C.

b.1. Calcul des pertes Joules statorique dans la partie d'encoche

$$P_{jsenc.} = 3.R_{enc.}.I_1^2 \quad (\text{III-7})$$

b.2. Calcul des pertes Joules dans les têtes de bobines du côté non ventilé

$$P_{jstbnv.} = 3.R_{tbnv}.I_1^2 \quad (\text{III-8})$$

b.3. Calcul des pertes Joules dans les têtes de bobines du côté ventilé

$$P_{jstbv.} = 3.R_{tbv}.I_1^2 \quad (\text{III-9})$$

b.4. Répartition des pertes totales en charge dans le cas des températures réelle

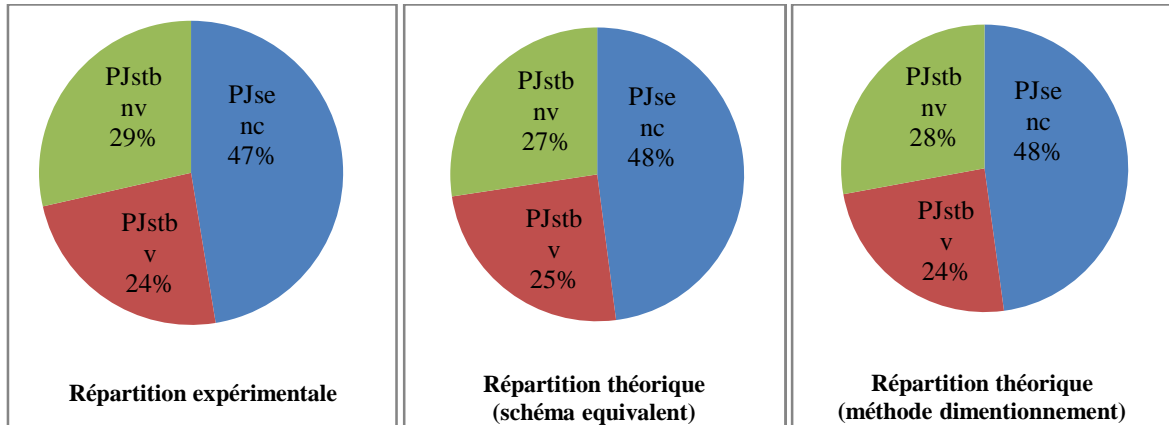


Figure III.6: répartition des pertes Joule statorique de la machine en charge nominale à température réelle

b.4.a. Interprétation

On remarque que 48% des pertes Joules statorique en charge sont dans la partie d'encoche, les pertes restantes se localisent sur les têtes de bobines du côté non ventilé et de coté vontilé de valeurs presque égale puisque la température dans ces deux côté est légèrement différente, Dans ce cas la somme des pertes Joules des deux côtés des têtes de bobines est plus importante par rapport aux pertes Joules d'encoches.

b.4.b. Comparaison

La répartition des pertes Joule statorique trouvés expérimentalement sont presque égale à celle trouvés par la méthode théorique (schéma équivalent et méthode de dimensionnement) : avec une différence de 1 %

III.3.1.2. Essai à vide

a. Température de l'enroulement statorique constante dans ses différentes parties

Sachons que la température dans le paquet statorique et dans les deux côtés des têtes de bobines (ventilé et non ventilé) est égale à 65°C.

a.4. Calcul des pertes Joules statorique dans la partie d'encoche

$$P_{j\text{enc.}} = 3.R_{\text{enc}(65^{\circ}\text{C})}.I_{0y}^2 \quad (\text{III-16})$$

Avec :

I_{0y} : courant à vide.

a.5. Calcul des pertes Joules dans les têtes de bobines côté non ventilé

$$P_{j\text{stbnv}} = 3.R_{tb}.I_{0y}^2 \quad (\text{III-17})$$

a.6. Calcul des pertes joules dans les têtes de bobines côté ventilé

$$P_{j\text{stbv}} = 3.R_{tb}.I_{0y}^2 \quad (\text{III-18})$$

a.7. Répartition des pertes Joules statorique à vide à température identique partout dans l'enroulement

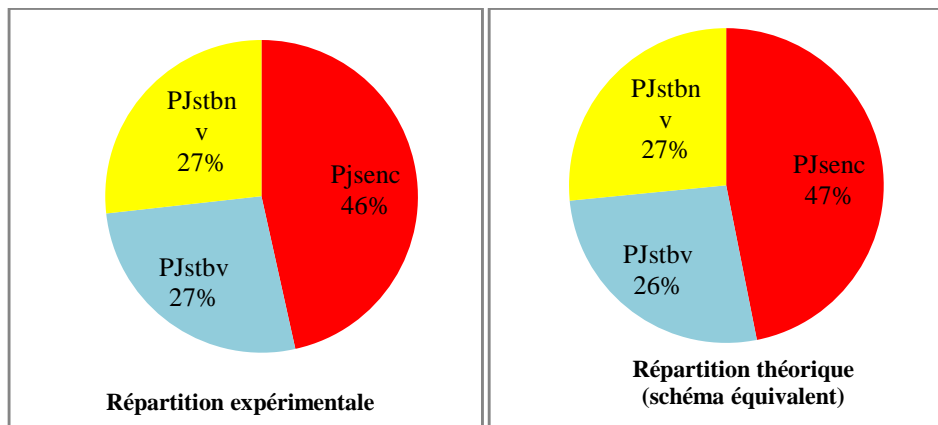


Figure III.7: Répartition des pertes Joule statorique de la machine à vide à température constante

a.7.a. Interprétation et comparaison:

On remarque que 47% des pertes Joules statorique à vide se situent dans les encoches statorique, les 53% des pertes restantes se répartissent équitablement dans les deux côté des têtes de bobines ventilé et non ventilé est cela pour les deux cas expérimentale et théorique (schéma équivalent)

a.7.b. Comparaison

Il ya une différence entre la répartition théorique (schéma équivalent) et la répartition expérimentale ; cette différence est de 5%.

b. Température de l'enroulement statorique réelle

Sachons que la température dans les encoches statorique est égale à 65°C et la température de la bobine du côté ventilé est égale à 64°C et celle du côté non ventilé est égale 68°C.

b.3. Calcul des pertes Joules statorique dans la partie d'encoche

$$P_{jsenc.} = 3.R_{enc(65^{\circ}C)}.I_{0y}^2 \quad \text{(III-21)}$$

b.4. Calcul des pertes Joules dans les têtes de bobines du côté non ventilé

$$P_{jstbnv} = 3.R_{tb(68^{\circ}C)}.I_{0y}^2 \quad \text{(III-22)}$$

b.5. Calcul des pertes Joules dans les têtes de bobines du côté ventilé

$$P_{jstbv} = 3.R_{tb(64^{\circ}C)}.I_{0y}^2 \quad \text{(III-23)}$$

b.6. Répartition des pertes Joules statorique à vide à température réelle

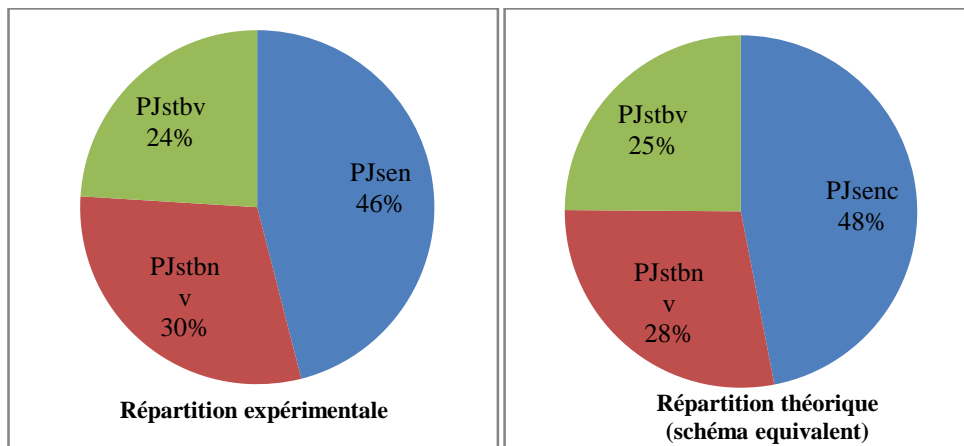


Figure III.8: Répartition des pertes Joule statorique de la machine à vide à température réelle

b.6.a. Interprétation et comparaison

On remarque que 46% des pertes Joules statorique à vide se situent dans les encoches, 54% des pertes se répartissent dans les têtes de bobines avec 30% dans le côté non ventilé et 24% dans l'autre côté ventilé et cela pour la répartition théorique (schéma équivalent), dans la répartition expérimentale 28% dans le côté non ventilé et 25% dans l'autre côté ventilé, elle est différentes de celle de la répartition théorique d'un pourcentage de 2%.

III.4. Répartition des pertes fer dans les dents statoriques et la culasse

Sachons que les pertes fer sont constantes et elles sont égales à 200W, répartissons ces pertes dans la culasse et les dents statorique en calculons le volume totales du stator ainsi que celui de la culasse.

III.4.a. Calcul des pertes fer dans les dents statorique

$$P_{fer} = P_{fercul} + P_{ferdent} \Rightarrow P_{ferdent} = P_{fer} - P_{fercul}$$

III.4.b. Répartition des pertes fer à vide

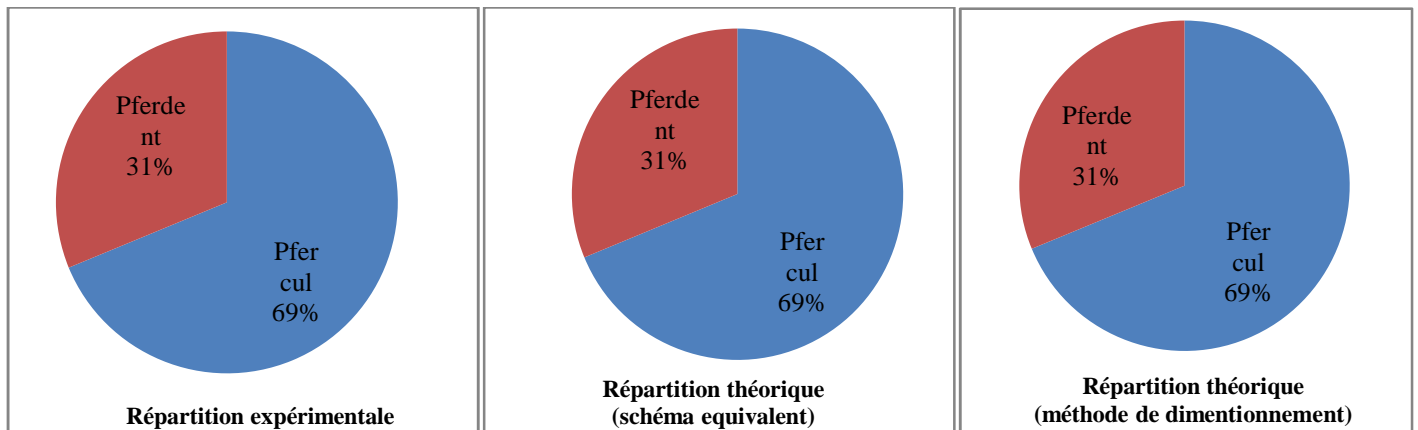


Figure III.9: Répartition des pertes dans les dents et la culasse

III.4.c. Interprétation

On remarque que 69% des pertes fer totales se localisent au niveau de la culasse statorique, les 31% restantes se trouvent dans les dents statorique.

III.4.d. Comparaison

La répartition expérimentale est identique à la répartition théorique.

III.5. Répartition des pertes mécaniques

On suppose que les pertes par ventilation sont localisée équitablement dans les deux coté de la machine coté ventilé et coté non ventilé ; dans ce cas les pertes mécaniques sont répartis à 50% de chaque coté de la machine.

III.6. Comparaison entre les résultats mesurés et calculés

Après comparaison; on constate que

Les résultats mesurés sont proches aux résultats calculés

La qualité de ces résultats dépend essentiellement de la précision avec la quelle on à estimé les pertes fer et mécanique dans la machine.

A noter que ses résultats sont obtenues sur un exemple de série de machines asynchrones de puissances 2,2kW et que chaque machines a ses propres caractéristiques ainsi la machine

qu'on à étudié fait partie de cette série des machines asynchrones construites par électro industriel (**Ex. ENEL**).

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons réparti les pertes dans les différentes parties de la machine puis dans chaque matériau, on à déduit que la répartition des pertes Joules statorique dans les différentes parties de l'enroulement statorique à vide et en charge est similaire.

Les pertes fer se localisent au niveau de la culasse puis dans les dents statorique avec un taux respectivement de 69% et 31%.

La plus grande valeur des pertes calculées sont les pertes Joules statorique déterminées avec précision puisque les valeurs théoriques et pratiques sont très proches.

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre on s'intéresse à déterminer les pertes d'un moteur asynchrone par la méthode expérimentale, ceci dans le but d'obtenir l'évolution de ces pertes en fonction de la charge, par la suite on fera une comparaison avec les résultats théoriques.

Dans ce qui suit, nous allons présenter la machine asynchrone étudiée, le banc d'essai, suivi de présentation et d'interprétation des différents résultats des essais effectués et réalisés au sein du laboratoire de machine électrique (TEC 423) du département d'électrotechnique (Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou).

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 l'essai sur la machine asynchrone est le suivant :

- ❖ Une génératrice à courant continu pour les essais en charge. Elle possède 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, transformateur de courant, Tachymètre, Thermomètre et balance pour mesurer le couple).
 - Des capteurs de température.
 - Un enregistreur de température (CA 625 ECOPOINTER)
 - Une charge résistive variable.
 - Des fils électrique de câblage.

IV.5. Essai en charge

L'essai en charge consiste à alimenter le moteur asynchrone à sa tension nominale et la machine à courant continu servant de charge.

La machine à courant continu fonctionne alors en génératrice, débitant sur des résistances variables.

IV.5.1. Schéma de montage

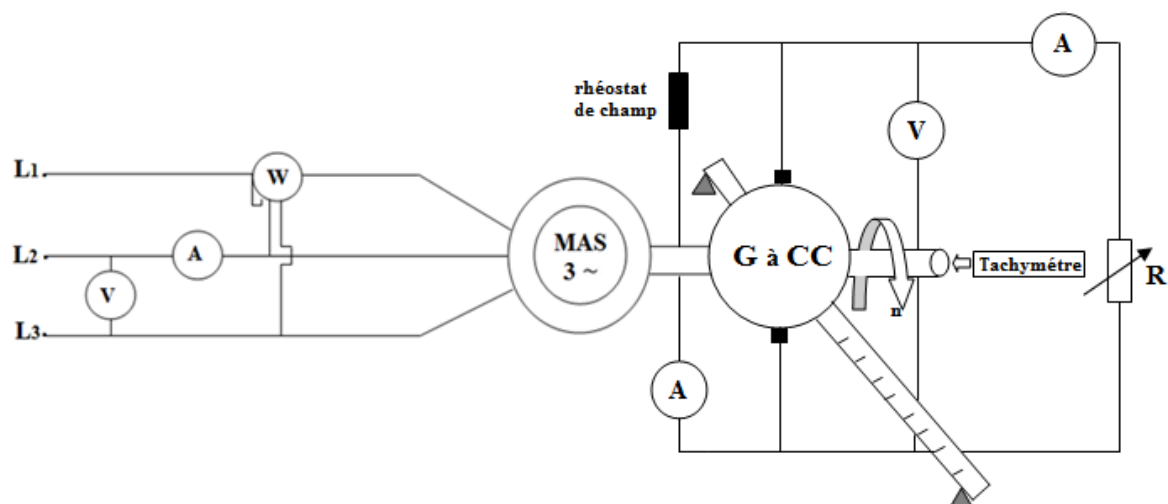


Figure IV.2 : Circuit de mesure de l'essai en charge

IV.5.2. Manipulation

On alimente le moteur asynchrone à sa tension nominale, ensuite on fait varier les résistances de charge de la génératrice à courant continu.

Pour chaque charge on relève les mesures suivantes :

- Le courant I [A].
- La tension entre phase U [V]
- La puissance absorbée P_{ab} [W].
- La vitesse N [tr/min].
- La distance d du bras de la balance
- La température des enroulements au régime établi.

IV.5.2.a. Calcul du couple nominal

$$C_n = P_n / \Omega_n [N.m] \quad (\text{IV-2})$$

$$C_n = 2200 / 147,58 = 14,9 N.m$$

IV.5.2.b. Calcul de la distance nominale de la balance

$$C_n = F \cdot d_n \Rightarrow d_n = C_n / F \quad (\text{IV-3})$$

$$d_n = 14.9 / 50 = 0.298m$$

IV.5.3. Résultats de l'essai en charge

Les résultats de mesure sont relevés à une température ambiante de 26°C.

Une fois la génératrice excitée, on fait varier le courant d'induit à l'aide des résistances de charges

IV.5.4. Calcul de la résistance statorique pour les différentes valeurs de la température

Afin de déterminer les pertes Joules avec une bonne précision on tient compte de la température dans les enroulements.

Pour calculer la résistance R_s , on utilise la formule suivante :

$$R_s = R_{s(26^\circ C)} \cdot \frac{T_2 + K}{T_1 + K} \quad (\text{IV-4})$$

Avec :

$R_s (26^\circ\text{C})$: La résistance statorique a 26°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 .

IV.5.5. Calcul des pertes et du rendement

IV.5.5.a. Les pertes Joules statorique

$$P_{js} = 3R_s I_s^2 [W] \quad (\text{IV-5})$$

IV.5.5.b. La puissance transmise au rotor

$$P_{tr} = P_a - (P_{js} + P_{fer}) [W] \quad (\text{IV-6})$$

IV.5.5.c. Les pertes Joules rotorique

$$P_{jr} = P_{tr} \cdot g [W] \quad (\text{IV-7})$$

IV.4.5.d. La puissance utile

$$P_u = C_u \cdot \Omega [W] \quad (\text{IV-8})$$

IV.4.5.e. Calcul des pertes supplémentaires

$$P_{sup} = 0,05 \cdot P_a [W] \quad (\text{IV-9})$$

IV.5.5.f. Le rendement

$$\eta = P_u / P_a \quad (\text{IV-10})$$

IV.6. Etude théorique

Dans cette étude on utilise le schéma équivalent de la figure (II.2 page 27)

Pour chaque valeur de glissement on calcul l'impédance équivalente Z_e , Puis on calcul le courant rotorique, ainsi que les différentes pertes et le rendement.

Le calcul théorique est fait on utilisant un programme informatique (langage de programmation MATLAB).

IV.7. Les caractéristiques de fonctionnement de la machine pour les différentes charges

Après avoir simulé le programme informatique « MATLAB »; ceci peut se faire en faisant une étude comparative des performances du moteur par essai expérimental, et théorique.

Les figures (IV.3) à (IV.12) illustrent les différentes puissances, pertes, courant, couple, rendement en fonction du glissement et la résistance statorique en fonction de la température.

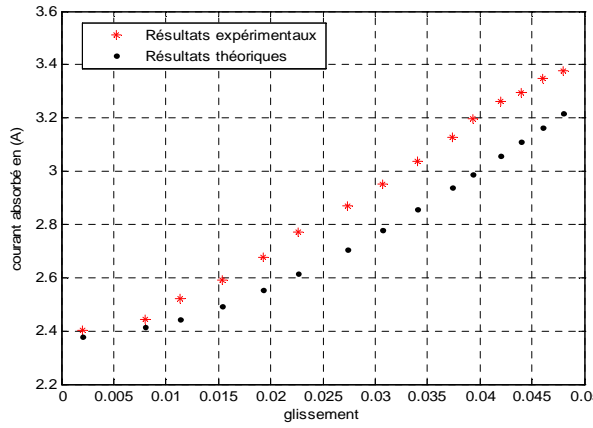


Figure IV.3 : Evolution du courant absorbé en fonction du glissement

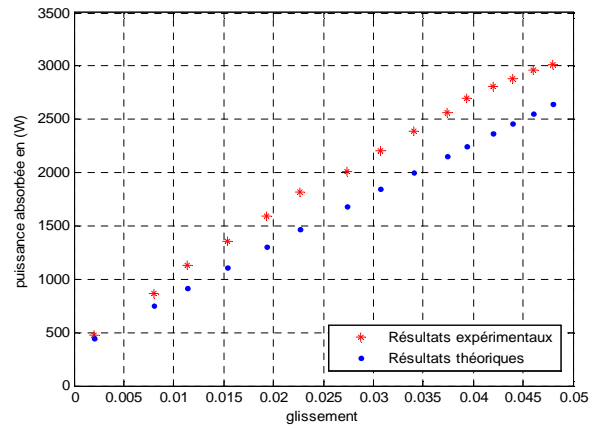


Figure IV.4 : Evolution de la puissance absorbée en fonction du glissement

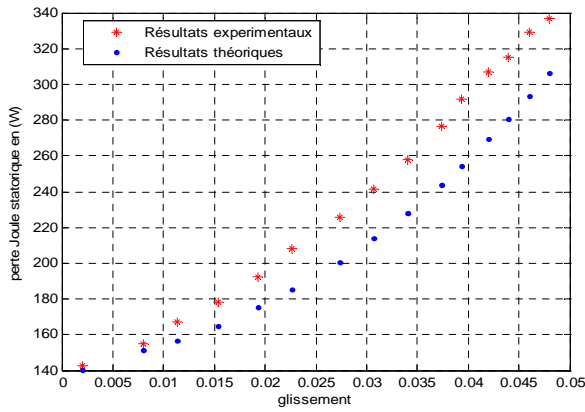


Figure IV.5 : Evolution des pertes Joule statorique en fonction du glissement

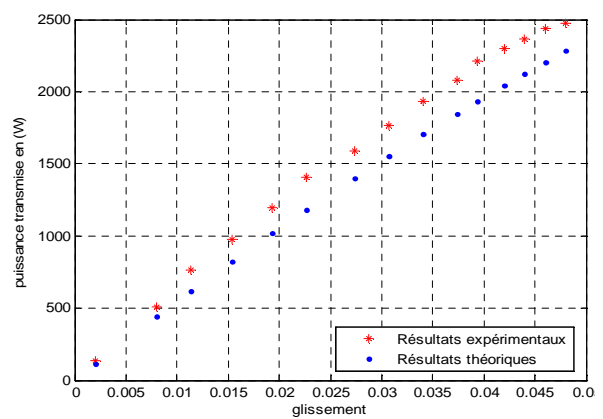


Figure IV.6 : Evolution de la puissance transmise au rotor en fonction du glissement

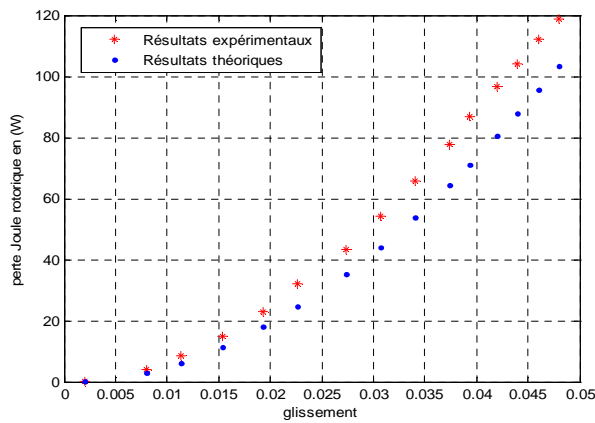


Figure IV.7 : Evolution des pertes Joule rotorique en fonction du glissement

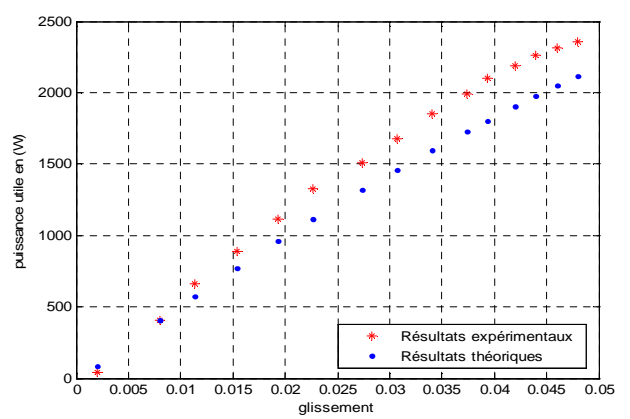


Figure IV.8 : Evolution de la puissance utile en fonction du glissement

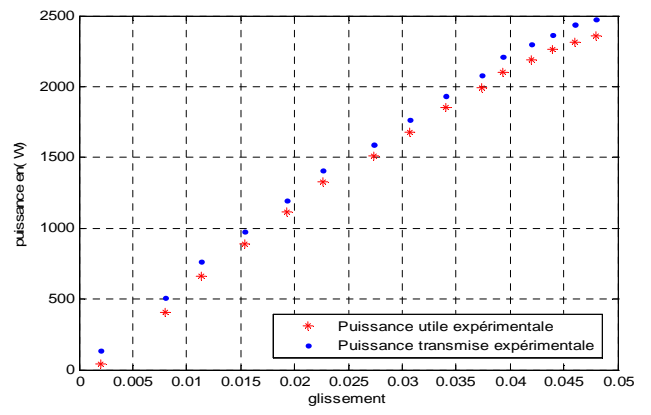
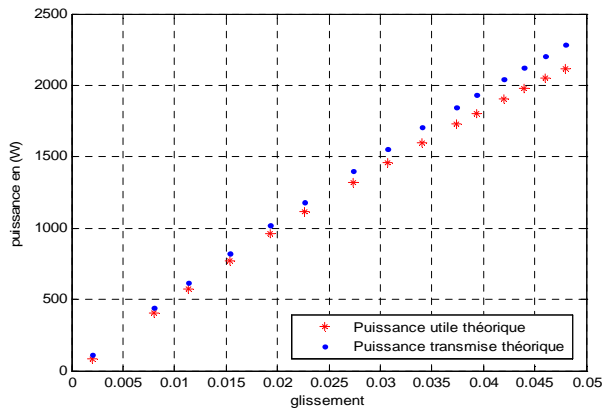


Figure IV.9: Evolution de la puissance utile et transmise en fonction du glissement

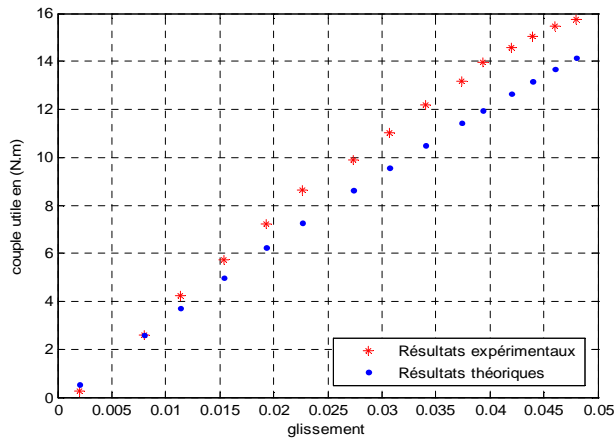


Figure IV.10: Evolution de couple utile en fonction du glissement

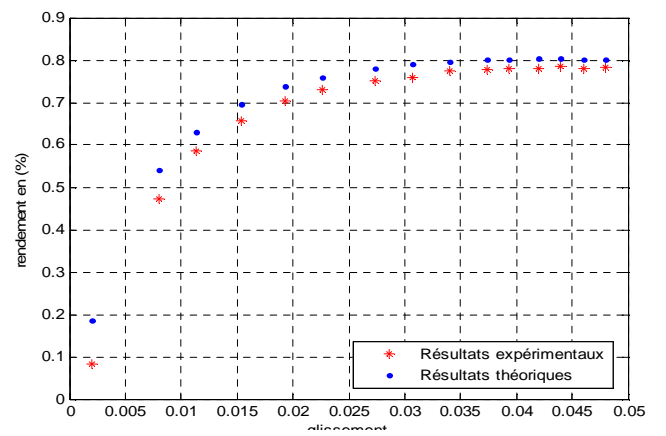


Figure IV.11: Evolution de rendement en fonction du glissement

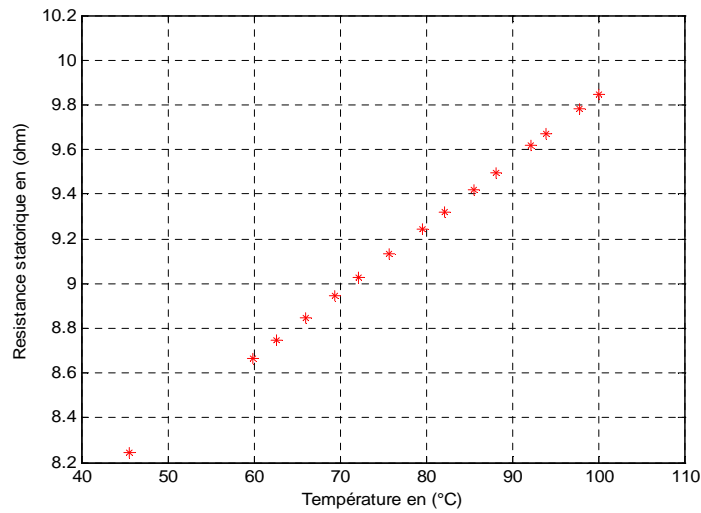


Figure IV.12: Evolution de la résistance statorique en fonction de la température

IV.8. Interprétation des résultats et comparaison

En comparant les courbes théoriques aux courbes expérimentales en fonction du glissement, on trouve que toutes les courbes sont proches du point de fonctionnement nominal. Donc on peut dire que les paramètres déduit du circuit équivalent du moteur asynchrone donne des résultats satisfaisant pour le point de fonctionnement nominal de la machine.

Avant d'atteindre le régime nominal, les courbes obtenues théoriquement sont très proche des courbes expérimentales et augmentes linéairement avec l'augmentation du glissement, mais de plus on plus que le glissement augmente l'écart entre les courbes théoriques et les courbes expérimentales augmente. On pout expliquer cela par les phénomènes qui apparaissent sur la machine comme l'effet de peau, l'effet de la température et l'effet de saturation qui font varier les paramètres électriques du moteur en fonction de la de la charge.

La résistance statorique qui est présentée sur la figure (VI.12) augmente linéairement avec l'augmentation de la température, ceci montre qu'elle est influencée par l'effet de la température.

D'après la figure (IV.9) on remarque qu'il ya une différence entre la puissance transmise au rotor et la puissance utile; cette différence représente les pertes Joule rotorique et les pertes mécaniques.

IV.9. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les différents résultats des puissances et des pertes expérimentales et théoriques d'une machine asynchrone à cage.

La variation des pertes de puissance en fonction de la charge obtenues par les deux méthodes est presque identique donc nous pouvons dire que le moteur asynchrone peut être représenté par le schéma équivalent que nous avons utilisé.

On conclue que les pertes Joules statorique sont déterminées avec précision puisque leur valeur théorique correspond aux valeurs expérimentales et que les pertes fer sont estimées avec une précision nettement moindre.

Les pertes Joules rotorique dépendent essentiellement des valeurs avec lesquelles les pertes fer sont estimées.

Le présent travail consiste en l'étude des pertes et leur répartition dans un moteur asynchrone à cage. Pour aborder notre étude nous avons identifié les différentes pertes qui existent dans la machine étudié.

Ensuite nous avons utilisé deux méthodes de calcul pour déterminer ces pertes dans la machine asynchrone à cage d'écureuil 2.2kW ; la méthode de dimensionnement et la méthode de circuit électrique équivalent.

Nous pouvons déduire que les résultats obtenus par la méthode de schéma électrique équivalent dépendent des paramètres électriques de ce dernier.

Par la suite, après comparaison des résultats théoriques aux résultats expérimentaux, on conclut que les valeurs des pertes et leur répartition obtenus par la méthode du schéma équivalent sont plus proche de celles des tests expérimentaux.

Nous remarquons qu'une grande partie de ces pertes se situe au niveau des enroulements statorique et rotorique, suivit par les pertes dans l'acier, puis par les pertes mécaniques et les pertes supplémentaires.

La précision des résultats dépend essentiellement de la précision avec laquelle les pertes fer et mécanique sont déterminés.

- [1] T. WILDI, G. SYBILLE
«Electrotechnique»
4^{ème} édition. Edition de Boeck 2005.
- [2]D.ABDESLAM
«Analyse et construction d'un moteur asynchrone à rotor à cage»
Mémoire d'ingénieur, école nationale polytechnique(ENP) ,2006.
- [3] Pierre Mayé
«Moteurs électriques industriels»
Dunod, Paris, 2005.
- [4] S.ZOURDANI, K.KARIMA
«Détermination de la répartition des pertes de puissance dans un moteur asynchrone triphasé »
Mémoire licence professionnelle U.M.M.T.O, 2011.
- [5] N.KECILI
«Etude des pertes et couples pulsatoire dans les machines asynchrones alimentées par des convertisseurs »
Mémoire Magister U.M.M.T.O.2009.
- [6] WWW.books.google.com.
- [7] A.AIGOUN, S.SAID
«Etude des pertes d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil»
Mémoire D.E.U.A, U.M.M.T.O, 2010.
- [8] N.ARKAB, Y.BOUZIDI, F.MEHOUDI
«Identification des paramètres 'une machine asynchrone à rotor bobiné»
Mémoire D.E.U.A, U.M.M.T.O, 2007.
- [9]G.GRELLET

«Pertes dans les machines tournantes »

Technique d'ingénieur, traité Génie électrique, D1985.

[10] A.LOUNI, M.ALLOUCHENE

«Identification des paramètres électriques de la machine asynchrone à cage d'écureuil»

Mémoire master académique, U.M.M.T.O. ,2012.

I. Le stator

I.1. Calcul du courant dans la phase statorique

$$I_1 = (P_n \cdot 10^3) / (m_1 \cdot U_1 \cdot \eta_n \cdot \cos \theta)$$

$$I_1 = (2,2 \cdot 10^3) / (3 \cdot 380 \cdot 0,78 \cdot 0,83) \quad I_1 = 2,98A$$

I.2. Le Coefficient de l'enroulement

$$K_{enrl} = K_{dl} \cdot K_{rl}$$

$$K_{dl} = \sin(\alpha / 2) / q_1 \sin(\alpha / 2q_1)$$

$$K_{dl} = \sin(1,04 / 2) / 3 \sin(\alpha / 2 \cdot 3)$$

$$\alpha = 2 \cdot \pi \cdot P \cdot q_1 / Z_1$$

$$\alpha = 2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot 3 / 36 \quad \alpha = 1,04 \text{rad} = 59,98^\circ$$

$$K_{dl} = [\sin(1,04/2)] / [3 \sin(1,04/2 \cdot 3)] \quad K_{dl} = 0,96$$

$$K_{rl} = \sin(\beta \cdot \pi / 2)$$

$$\beta = Y_1 / \tau$$

$$\beta = 9 / 9 \quad \beta = 1$$

I.2.a. Calcul de pas polaire

$$\tau = \pi D_{\text{int}} / (2P)$$

$$\tau = \pi 88,5 / (2 \cdot 2) \quad \tau = 69,47 \text{mm}$$

$$K_{rl} = 1$$

$$K_{enrl} = K_{dl} \cdot K_{rl} \quad K_{enrl} = 0,96$$

Avec :

α : 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

β : Pas de raccourcissement

Y_1 : pas de l'enroulement.

τ : Pas polaire.

I.3.Calcul de l'induction magnétique

$$\beta_{\delta} = (0,225 \cdot 2 \cdot P \cdot U_{\Delta} \cdot 10^6) / (l_i \cdot D_{1int} \cdot W_1) [Gauss]$$

$$\beta_{\delta} = (0,225 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 380 \cdot 10^6) / (110 \cdot 88,5 \cdot 384)$$

$$\beta_{\delta} = 0,91T$$

Avec:

U_{Δ} : Tension nominale simple statorique.

l_i : longueur virtuelle de l'induit.

D_{1int} : diamètre intérieur du stator.

I.4.Calcul de l'induction maximale dans la dent statorique

$$B_{Z1max} = (t_1 \cdot \beta_{\delta}) / (K_{fer} \cdot b_{Z1}) [T]$$

$$B_{Z1max} = (7,71 \cdot 0,91) / (0,975 \cdot 3,87)$$

$$B_{Z1max} = 1,85T$$

Avec :

K_{fer} : coefficient de remplissage des tôles statorique

$$K_{fer} = 0,985 - 5 \cdot P \cdot 10^{-3}$$

$$K_{fer} = 0,975$$

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]

I.4.a. Calcul du pas dentaire

$$t_1 = (\pi \cdot D_{1int}) / Z_1$$

$$t_1 = (\pi \cdot 88,5) / 36 \quad t_1 = 7,71mm$$

I.5. Calcul de l'induction magnétique dans le dos statorique

$$B_{c1} = (0,5 \cdot \alpha_i \cdot \tau \cdot \beta_\delta) / (K_{fer} \cdot h_{c1}) [T]$$

$$B_{c1} = (0,5 \cdot 0,64 \cdot 69,47 \cdot 0,91) / (12,73 \cdot 0,975) \quad B_{c1} = 1,63T$$

Avec :

α_i : coefficient de recouvrement polaire, il est donné par la formule suivante :

$$\alpha_i = 2 / \pi$$

$$\alpha_i = 0,64$$

I.6. Calcul de la résistance d'une phase statorique

$$R_1 = \rho_{cu} \cdot (L_{w1} \cdot W_1 \cdot 10^3) / (a_1 \cdot N_{el} \cdot S_{eff})$$

$$R_1 = 24,4 \cdot 10^{-9} \cdot (485,12 \cdot 384 \cdot 10^3) / (1 \cdot 1 \cdot 0,396)$$

$$R_1 = 11,47\Omega$$

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

$$L_{w1} = 2 \cdot (l_i + L_{f1}) [mm]$$

$$L_{w1} = 2 \cdot (110 + 132,56) \quad L_{w1} = 485,12mm$$

I.6.a.1. Calcul de la longueur moyenne de la partie frontale d'une demi-spire

$$L_{f1} = [(1,16 + 0,14 \cdot P) \cdot b_{1moy}] + 15 \quad L_{f1} = 132,56mm$$

I.6.a.1.1. Calcul de la longueur moyenne d'une section

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

$$b_{1moy} = [\pi(88,5 + 15,51) \cdot 9] / 36 \quad b_{1moy} = 81,64mm$$

Avec :

ρ_{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_{e1} : le nombre des conducteurs élémentaires.

II. Le rotor

II.1. Calcul du courant rotorique

$$I_2 = (K_i \cdot 2 \cdot m_1 \cdot I_1 \cdot W_1 \cdot K_{enr1}) / Z_2$$

$$I_2 = (0,86 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 2,98 \cdot 384 \cdot 0,96) / 28 \quad I_2 = 202,4A$$

II.2. Calcul de l'induction maximale dans la dent rotorique

$$B_{z2max} = (\beta_\delta \cdot t_2) / (b_{z2} \cdot K_{fer}) \quad b_{z2} = 4,77mm$$

$$B_{z2max} = (0,91 \cdot 9,87) / (4,77 \cdot 0,975) \quad B_{z2max} = 1,93T$$

II.2.a. Calcul de la largeur de la dent rotorique

$$t_2 = (\pi \cdot D_{2ext}) / Z_2$$

$$t_2 = (\pi \cdot 88) / 28 \quad t_2 = 9,87mm$$

Avec :

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

Z_2 : nombre d'encoches rotorique.

K_{fer} : coefficient de remplissage des tôles rotorique ;

II.3. Calcul de l'induction magnétique dans le dos rotorique

$$B_{c2} = 0,5 \cdot (\alpha_i \cdot \tau \cdot \beta_\delta) / (h_{c2} \cdot K_{fer})$$

$$B_{c2} = 0,5 \cdot (0,64 \cdot 69,47 \cdot 0,91) / (15,12 \cdot 0,975) \quad B_{c2} = 1,37T$$

II.4. Calcul de la résistance active d'une phase rotorique

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

$$R_2 = 118,4 \cdot 10^{-6} + 34 \cdot 10^{-6} \quad R_2 = 152,4 \cdot 10^{-6} \Omega$$

II.4.a. Calcul de la résistance de la barre

$$R_b = \rho_{al} \cdot (l_i / S_b) \cdot 10^3$$

$$R_b = (48,8 \cdot 10^{-9} \cdot 110 \cdot 10^3) / 45,32 \quad R_b = 118,4 \cdot 10^{-6} \Omega$$

Avec :

S_b : section de la barre [mm²]

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

II.5. Calcul de la résistance de l'anneau

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

$$R_{an} = (48,8 \cdot 10^{-9} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 70,91 \cdot 10^3) / (28 \cdot 111,03) \quad R_{an} = 6,9 \cdot 10^{-6} \Omega$$

II.5.a. Calcul du Diamètre moyen de l'anneau

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

$$D_{an} = 88 - 17,09 \quad D_{an} = 70,91 \Omega$$

II.6. Calcul de la Section de l'anneau

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

$$S_{an} = (0,35.28.45,32) / 2.2$$

$$S_{an} = 111,03mm^2$$

II.7. Calcul de la résistance ramenée à la barre

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

$$R'_{an} = (6,9.10^{-6}) / 0,19$$

$$R'_{an} = 34.10^{-6}\Omega$$

Avec:

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

$$\Delta = 2.\sin(\pi.P / Z_2)$$

$$\Delta = 2.\sin(\pi . 2/28)$$

$$\Delta = 0.435$$

II.8. Calcul de la résistance d'une phase ramenée au stator

$$R'_2 = M.R_2$$

$$R'_2 = 59423,4.153,2.10^{-6}$$

$$R'_2 = 9,10\Omega$$

Avec :

M : coefficient de réduction de la cage rotorique vers le stator, il est calculé comme suis :

$$M = [4.m_1.(W_1.K_{en1})^2] / [Z_2.(K_{ob})^2]$$

$$M = [4.3.(384.0,96)^2] / [28.(0,99)^2]$$

$$M = 59423,4$$

K_{ob} : coefficient d'obliquité des encoches rotorique, il est donné par la relation suivante :

$$K_{ob} = [\sin(\alpha_{ob} / 2)] / (\alpha_{ob} / 2)$$

$$K_{ob} = [\sin(0,174 / 2)] / (0,174 / 2)$$

$$K_{ob} = 0,99$$

α_{ob} : Angle d'inclinaison des encoches rotorique

$$\alpha_{ob} = 10^\circ = 0,174rad$$

I.1. Pertes électriques

I.1.a. Pertes Joules statorique

$$P_{js} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_1^2$$

$$P_{js} = 3.11,47 \cdot (2,98)^2$$

$$P_{js} = 305,57W$$

I.1.b. Pertes Joule rotorique

$$P_{jr} = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2$$

$$P_{jr} = 28.152,4 \cdot 10^{-6} \cdot (202,4)^2$$

$$P_{jr} = 174,8W$$

I.2. Pertes mécaniques

Pour $2P \geq 4$ on a : $n_1 = 1500 \text{tr/min}$

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

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

$$K_t = 1,11$$

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

$$P_{mec} = 1,11 \cdot (1500 / 10)^2 \cdot (145 \cdot 10^{-3})^4$$

$$P_{mec} = 11,04W$$

I.3. Pertes magnétique dans l'acier

I.3.a. Les pertes magnétiques principales

I.3.a.1. Les pertes dans la culasse statorique

On a:

$$P_{10(50hz)} = 2,5W / Kg$$

$$K_{dc} = 1,7$$

$$\gamma_c = 7,8 \cdot 10^3 \text{ Kg} / m^2$$

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

$$G_{c1} = 3,14 [145 - 12,73] \cdot 0,975 \cdot 110 \cdot 12,73 \cdot 7,8 \cdot 10^3 \cdot 10^{-9}$$

$$G_{c1} = 4,42Kg$$

$$P_{c1} = P_{10(50hz)} \cdot (f_1 / 50)^\beta \cdot K_{dc} \cdot G_{c1} \cdot B_{c1max}^2$$

$$P_{c1} = 2,5 \cdot (50 / 50)^{1,5} \cdot 1,7 \cdot 4,42 \cdot (1,63)^2$$

$$P_{c1} = 49,9W$$

I.3.a.2. Les pertes dans les dents statorique

On a:

$$K_{dz} = 1,8$$

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

$$G_{z1} = 15,51.3,87.110.36.0,975.7,8.10^3.10^{-9}$$

$$G_{z1} = 1,8Kg$$

$$P_{fz1} = K_{dz} \cdot B_{z1max}^2 \cdot G_{z1} \cdot P_{10(50hz)} \cdot (f_1 / 50)^\beta$$

$$P_{fz1} = 1,8 \cdot (1,86)^2 \cdot 1,8.2,5 \cdot (50/50)^{3/2}$$

$$P_{fz1} = 28,02W$$

I.3.a.3. Les pertes magnétiques principales d'acier

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

$$P_{acp} = 49,9 + 28,02$$

$$P_{acp} = 77,92W$$

I.3.b. Pertes magnétiques supplémentaire d'acier**I.3.b.1. Pertes à la surface du rotor (pertes superficielles)**

$$P_{ac\ sup} = P_{sr} + P_{pul2}$$

On à :

$$\beta_{02} = 0,275$$

$$K_\delta = 1,38$$

$$B_\delta = 0,91T$$

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

$$B_{02} = 0,275 \cdot 1,38 \cdot 0,91$$

$$B_{02} = 0,34$$

$$P_{sr2} = 0,5 \cdot K_{02} \cdot (Z_1 \cdot n_1 / 10^4)^\beta \cdot (B_{02} \cdot t_1)^2$$

$$P_{sr2} = 0,5 \cdot 2 \cdot (36.1500 / 10^4)^{3/2} \cdot (0,34 \cdot 7,71)^2$$

$$P_{sr2} = 86,23W$$

$$P_{sr} = P_{sr2} \cdot (t_2 \cdot b_{f2}) \cdot I_i \cdot Z_2 \cdot 10^{-6}$$

$$P_{sr} = 86,23 \cdot (9,92 \cdot 1) \cdot 110 \cdot 28 \cdot 10^{-6}$$

$$P_{sr} = 2,63W$$

I.3.b.2. Pertes par harmonique du flux dans les dents

$$Y_1 = (b_{f1} / \delta)^2 / (5 + b_{fi} / \delta)$$

$$Y_1 = (2,8 / 0,25)^2 / (5 + 2,8 / 0,25) \quad Y_1 = 7,74$$

$$B_{pul2} = (Y_1 \cdot \delta \cdot B_{z2 \max}) / (2 \cdot t_2)$$

$$B_{pul2} = (7,74 \cdot 0,25 \cdot 1,93) / (2 \cdot 9,87)$$

$$B_{pul2} = 0,153W$$

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

$$G_{z2} = 28.15,12.4,77.110.0,975.7,8.10^3 \cdot 10^{-9} \quad G_{z2} = 1,68Kg$$

$$P_{pul2} = 19,04W$$

$$P_{pul2} = 0,11 \cdot [(Z_1 \cdot n_1 / 10^3) \cdot B_{pul2}]^2 \cdot G_{z2}$$

$$P_{pul2} = 0,11 \cdot [(36.1500 / 10^3) \cdot 0,188]^2 \cdot 1,68$$

I.3.b.3. Pertes magnétique supplémentaire dans l'acier

$$P_{ac \sup} = 2,63 + 19,04$$

$$P_{ac \sup} = 21,67W$$

I.3.b.4. Les pertes totales dans l'acier

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

$$P_{ac \Sigma} = 77,92 + 21,67$$

$$P_{ac \Sigma} = 99,59W$$

I.4. Calcul des pertes supplémentaires

$$P_{sup} = 0,005 \cdot (P_{2nom} \cdot 10^3) / \eta_n$$

$$P_{sup} = 0,005 \cdot (2,2 \cdot 10^3) / 0,78$$

$$P_{sup} = 14,1W$$

I.5. Calcul des pertes totales de la machine

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

$$P_{tot} = 605.1W$$

I.6. Calcul de la puissance absorbée

$$P_1 = P_2 + P_{tot}$$

$$P_1 = 2200 + 605,1$$

$$P_1 = 2805,1W$$

I.7. Calcul de rendement

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

$$\eta = 2200 / 2200 + 605,1$$

$$\eta = 0,784$$

I. Répartition des pertes Joule dans l'enroulement statorique

I.1. Essai en régime établie

a. Calcul de nombre de conducteurs dans les encoches par phase

$$n = Z_{1ph} \cdot U_{enr1}$$

$$n = 12 * 64$$

$$n = 768 \text{conducteurs}$$

b. Calcul de la longueur totale du conducteur dans les encoches par phase

$$l = l_i \cdot n$$

$$l = 110.768$$

$$l = 84480 \text{mm}$$

$$l = 84,48 \text{m}$$

c. Calcul de la résistance totale du conducteur dans la partie d'encoche d'une phase

$$R_{enc} = \rho_{115^\circ\text{C}} \cdot \frac{l}{S}$$

$$R_{enc} = 24,4 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{84,48}{0,396 \cdot 10^{-6}}$$

$$R_{enc} = 5,2 \Omega$$

d. Calcul de la résistance des têtes de bobine par phase

$$R_{tb} = \frac{R_1 - R_{enc}}{2}$$

$$R_{tb} = \frac{11,47 - 5,2}{2}$$

$$R_{tb} = 3,135 \Omega$$

❖ Température constante

• Calcul des pertes Joules statorique dans la partie d'encoche

$$P_{jsenc} = 3 \cdot R_{enc} \cdot I_1^2$$

$$P_{jsenc} = 3 \cdot 5,2 \cdot (2,98)^2$$

$$P_{jsenc} = 138,53 \text{W}$$

• Calcul des pertes Joules dans les têtes des bobines du coté ventilé

$$P_{jstbv} = 3 \cdot R_{tb} \cdot I_1^2$$

$$P_{jstbv} = 3 \cdot 3,135 \cdot (2,98)^2$$

$$P_{jstbv} = 83,52 \text{W}$$

- **Calcul des pertes Joules dans les têtes des bobines du côté non ventilé**

$$P_{jstbnv} = 3.R_{tb}.I_1^2$$

$$P_{jstbnv} = 3.3,03.(2,98)^2$$

$$P_{jstbnv} = 80,79W$$

❖ Température réelle

a. Calcul de la résistance de la tête de bobine par phase du côté non ventilé

$$R_{tbnv} = R_{tb(115^\circ c)} \cdot \frac{T_2 + K}{T_1 + K}$$

$$R_{tbnv} = 3,135 \cdot \frac{103,6 + 235}{115 + 235}$$

$$R_{tbnv} = 3,03\Omega$$

b. Calcul de la résistance de la tête de bobine du côté ventilé

$$R_{tbv} = R_{tb(115^\circ c)} \cdot \frac{T_2 + K}{T_1 + K}$$

$$R_{tbv} = 3,03 \cdot \frac{94,2 + 235}{115 + 235}$$

$$R_{tbv} = 2,84\Omega$$

- **Calcul des pertes Joules statorique dans la partie d'encoche**

$$P_{jsenc} = 3.R_{enc}.I_1^2$$

$$P_{jsenc} = 3.5,2.(2,98)^2$$

$$P_{jsenc} = 138,53W$$

- **Calcul des pertes Joules dans les têtes de bobines du côté non ventilé**

$$P_{jstbnv} = 3.R_{tbnv}.I_1^2$$

$$P_{jstbnv} = 3.3,03.(2,98)^2$$

$$P_{jstbnv} = 80,72W$$

- **Calcul des pertes Joules dans les têtes de bobines du côté ventilé**

$$P_{jstbv} = 3.R_{tbv}.I_1^2$$

$$P_{jstbv} = 3.2,84.(2,98)^2$$

$$P_{jstbv} = 75,66W$$

I.2.Essai à vide

❖ Température constante

a. Calcul de la résistance totale dans la partie d'encoche d'une phase

$$R_{enc(65^{\circ}C)} = R_{enc(115^{\circ}c)} \cdot \frac{T_2 + K}{T_1 + K}$$

$$R_{enc(65^{\circ}C)} = 5,2 \cdot \frac{97,5 + 235}{115 + 235}$$

$$R_{enc(65^{\circ}C)} = 4,94\Omega$$

b. Calcul de la résistance totale d'une phase à 65°C

$$R_{tot(65^{\circ}C)} = R_{tot(61^{\circ}c)} \cdot \frac{T_2 + K}{T_1 + K}$$

$$R_{tot(65^{\circ}C)} = 9,63\Omega$$

c. Calcul de la résistance des deux côtés des têtes de bobines d'une phase

$$R_{tb} = \frac{R_{tot(65^{\circ}C)} - R_{enc(65^{\circ}C)}}{2}$$

$$R_{tb} = \frac{9,63 - 4,94}{2}$$

$$R_{tb} = 2,34\Omega$$

- **Calcul des pertes Joules statorique dans la partie d'encoche**

$$P_{jsenc} = 3 \cdot R_{enc(65^{\circ}C)} \cdot I_{0y}^2$$

$$P_{jsenc} = 3 \cdot 4,94 \cdot (2,3)^2$$

$$P_{jsenc} = 70,62W$$

- **Calcul des pertes Joules dans les têtes de bobines côté non ventilé**

$$P_{jstbnv} = 3 \cdot R_{tb} \cdot I_{0y}^2$$

$$P_{jstbnv} = 3 \cdot 2,34 \cdot (2,3)^2$$

$$P_{jstbnv} = 41,10W$$

- **Calcul des pertes Joules dans les têtes de bobines côté ventilé**

$$P_{jstbv} = 3 \cdot R_{tb} \cdot I_{0y}^2$$

$$P_{jstbv} = 3 \cdot 2,34 \cdot (2,3)^2$$

$$P_{jstbv} = 41,10W$$

❖ Température réelle

a. Calcul de la résistance réelle de la tête de bobine par phase du côté non ventilé

$$R_{tbnv(68^{\circ}C)} = R_{tb(65^{\circ}c)} \cdot \frac{T_2 + K}{T_1 + K}$$

$$R_{tbnv(68^{\circ}C)} = 2,59 \cdot \frac{68 + 235}{65 + 235}$$

$$R_{tbnv(68^{\circ}C)} = 2,61\Omega$$

b. Calcul de la résistance de la tête de bobine par phase du côté ventilé

$$R_{tbv(64^{\circ}C)} = 2,59 \cdot \frac{64 + 235}{65 + 235}$$

$$R_{tbv(64^{\circ}C)} = R_{tb(65^{\circ}C)} \cdot \frac{T_2 + K}{T_1 + K} \quad R_{tbv(64^{\circ}C)} = 2,58\Omega$$

- **Calcul des pertes Joules statorique dans la partie d'encoche**

$$P_{jsenc} = 3 \cdot R_{enc(65^{\circ}C)} \cdot I_{0y}^2$$

$$P_{jsenc} = 3 \cdot 4,45 \cdot (2,3)^2 \quad P_{jsenc} = 70,62W$$

- **III.16.b. Calcul des pertes Joules dans les têtes de bobines du côté non ventilé**

$$P_{jstbnv} = 3 \cdot R_{tb(68^{\circ}C)} \cdot I_{0y}^2$$

$$P_{jstbnv} = 3 \cdot 2,61 \cdot (2,3)^2 \quad P_{jstbnv} = 41,42W$$

- **III.16.c. Calcul des pertes Joules dans les têtes de bobines du côté ventilé**

$$P_{jstbv} = 3 \cdot R_{tb(64^{\circ}C)} \cdot I_{0y}^2$$

$$P_{jstbv} = 3 \cdot 2,58 \cdot (2,3)^2 \quad P_{jstbv} = 40,94W$$

II. Répartition des pertes fer

a. Calcul du volume total du fer statorique

$$V_{tot} = \left[\frac{\pi \cdot d_{ext}^2}{4} - \frac{\pi \cdot D^2}{4} - 36 \cdot \left(\frac{\pi \cdot r^2}{2} + \frac{(B + 2 \cdot r) \cdot h_{en1}}{2} \right) \right] l$$

$$V_{tot} = \left[\frac{3,14 \cdot (145)^2}{4} - \frac{3,14 \cdot (88,5)^2}{4} - 36 \left(\frac{3,14 \cdot (3,08)^2}{2} + \frac{(4 + 2 \cdot 3,08) \cdot 11,63}{2} \right) \right] 110$$

$$V_{tot} = 84630634mm^3$$

b. Calcul du volume de la culasse statorique

$$V_{cul} = \left[\frac{\pi \cdot d_{ext}^2}{4} - \frac{\pi \cdot (D + 2h_{z1})^2}{4} \right] \cdot l$$

$$V_{cul} = \left[\frac{3,14 \cdot (145)^2}{4} - \frac{3,14 \cdot (88,5 + 2 \cdot (15,51))^2}{4} \right] \cdot 110 \quad V_{cul} = 581996,47 \text{ mm}^3$$

• **III.17.b. Calcul des pertes fer dans la culasse statorique**

$$\left. \begin{array}{l} 200W \rightarrow 846306,34 \text{ mm}^3 \\ P_{fercul} \rightarrow 581996,47 \text{ mm}^3 \end{array} \right\} \Rightarrow P_{fercul} = \frac{581996,47}{846306,34} \quad P_{fercul} = 137,54 \text{ W}$$

• **III.17.c. Calcul des pertes fer dans les dents statorique**

$$P_{fer} = P_{fercul} + P_{ferdent} \Rightarrow P_{ferdent} = P_{fer} - P_{fercul}$$

$$P_{ferdent} = 200 - 137,54 \quad P_{ferdent} = 62,46 \text{ W}$$

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

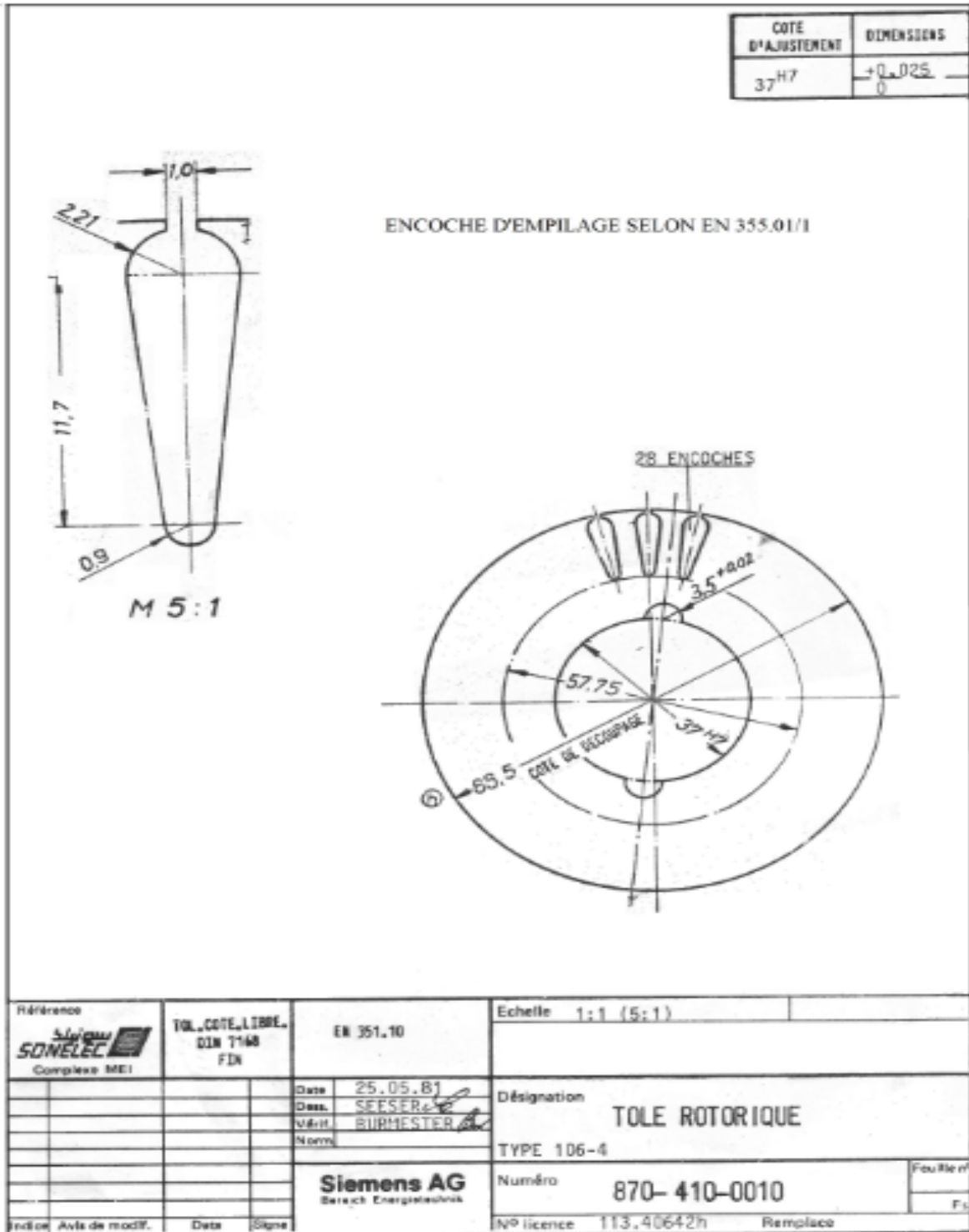
Tableau 1 : Pertes superficielles dans les tôles d'acier

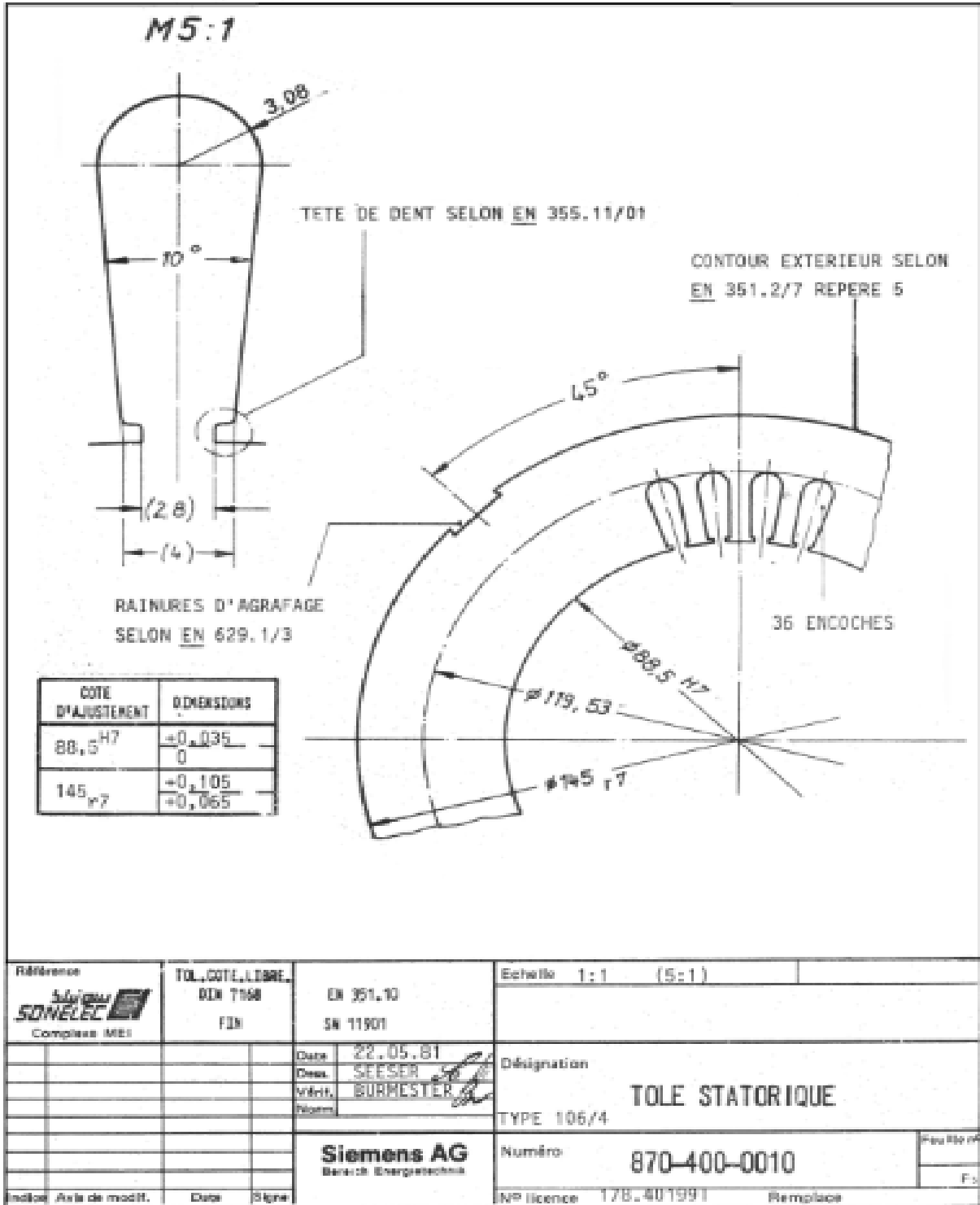
Diamètre de conducteur nu del (mm)	Diamètre de conducteur isolé Diso (mm)	Section de conducteur nu qel (mm ²)	Diamètre de conducteur nu del (mm)	Diamètre d'un conducteur isolé diso (mm)	Section de conducteur nu qel (mm ²)
0.08	0.10	0.00636	0.60	0.655	0.283
0.09	0.11	0.00636	0.63	0.65	0.312
0.10	0.122	0.00785	(0.67)	0.73	0.353
0.112	0.134	0.00985	0.71	0.77	0.396
0.125	0.147	0.1227	0.75	0.815	0.442
(0.132)	0.154	0.1368	0.80	0.865	0.503
0.14	0.162	0.1539	0.85	0,915	0.567
0.15	0.18	0.1767	0.90	0,965	0.636
0.16	0.19	0.0201	0.95	1,015	0.709
0.17	0.20	0.0227	1.00	1,08	0.785
0.18	0.21	0.0255	1.06	1,14	0.883
(0.19)	0.22	0.0284	1.12	1,20	0.985
0.20	0.23	0.0314	1.18	1.26	1.094
(0.212)	0.242	0.0353	1.25	1.33	1.227
0.224	0.259	0.0391	1.32	1.405	1.368
(0.236)	0.271	0.0437	1.40	1.485	1.539
0.25	0.285	0.0495	1.50	1.585	1.767
(0.265)	0.300	0.0552	1.60	1.685	2.011
0.28	0.315	0.0616	1.70	1.785	2.27
(0.30)	0.335	0.0707	1.80	1.895	2.54
0.315	0.350	0.0779	1.90	1.995	2.85
0.335	0.370	0.881	2.00	2.095	3.14
0.355	0.395	0.099	2.12	2.22	3.53
0.375	0.415	0.1104	2.24	2.34	3.94
0.40	0.44	0.1257	2.36	2.46	4.36
0.425	0.465	0.1419	2.50	2.60	4.91
0.45	0.49	0.1590			
(0.475)	0.515	0.1772			
0.5	0.545	0.1963			
(0.53)	0.585	0.221			
0.56	0.615	0.246			

Tableau 2 : diamètre et section normalisés des conducteurs

Caractéristiques des enroulements

- Type 106-4 2.2Kw
- $\phi_{nu}= 0.71\text{mm}$
- $\phi_{isol}=0.753\text{mm}$
- $U=380\text{V}$ couplage triangle
- 6 bobines triple/moteur
- 2 bobines en série par phase
- Enroulement concentrique
- Pas d'enroulement 1-12 2-11 3-10
- N^{bre} de section totale =18 sections
- N^{bre} de section par phase =6 sections
- N^{bre} de bobine totales =6 bobines
- N^{bre} de bobine par phase =2 bobines
- $a_1= 1$ branche parallèle
- $R=7.63\Omega$ à 20°C par phase
- 6 câbles de raccordement de section 0.75mm^2
- 64 conducteurs par encoches
- $Z_1=36$ encoches statorique
- $Z_2=28$ encoche rotorique





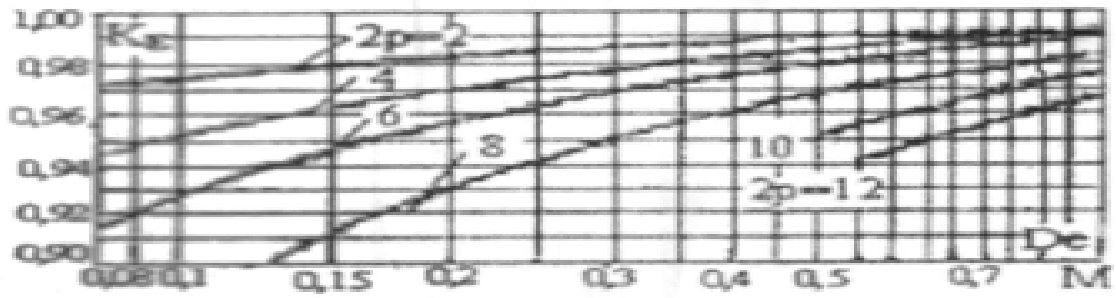


Fig.1: Coefficient, $K_e - f(D_e)$

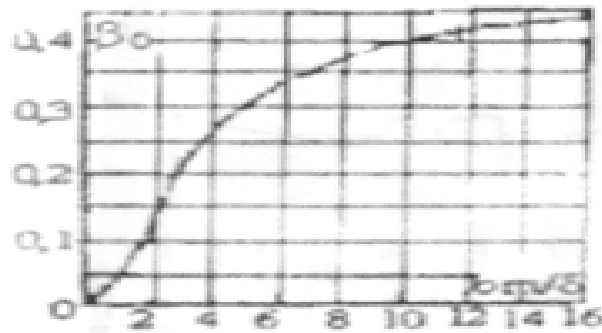


Fig.2: Coefficient, $\beta_{02} - f\left(\frac{b_{02}}{\delta}\right)$

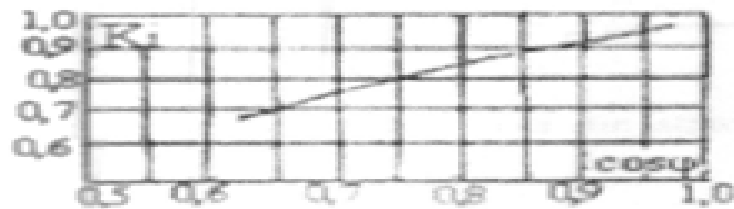


Fig.3: Coefficient, $K_i = f(\cos \varphi)$



Désignation	Moteur asynchrone triphasé à cage
Puissance nominale	$P_n=2,2 \text{ kW}$.
Tension nominale	$U_n=380 \text{ V}$.
Courant nominale	$I_n=5,2 \text{ A}$.
Fréquence de réseau d'alimentation	$f=50 \text{ HZ}$.
Facteur de puissance	$\cos\varphi=0,83$.
Rendement	$\eta=78\%$.
Nombre de phase	$m=3$.
Classe d'isolation	F.
Degré de protection	IP 44.
Couplage	triangle(Δ).