REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU

FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET DE L'INFORMATIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique

Option : Machines Electriques

Thème

Modélisation des contraintes thermiques d'un moteur asynchrone à cage sous FEMM

Proposé et dirigé par :

Mr. M.BOUHERAOUA

Réalisé par :

Mr. BASSAID Ahcène

Mr. BOUZOUAR Ahmed

Mr. SEGHIR Madjid

2010/2011

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

REMERCIEMENTS

Le présent travail a été effectué sous la direction de monsieur M. Bouheraoua, Maître de conférences à l'université de Tizi-Ouzou. Nous tenons à lui exprimer nos reconnaissance pour l'intérêt qu'il a constamment porté à ce travail, et pour ses conseils, ainsi que pour ses encouragements et sa gentillesse.

Nos remerciements s'adressent aussi aux membres de jury pour avoir bien vouloir examiner ce travail.

Enfin, nous remercions toutes personnes ayant contribué de prés et de loin au bon accomplissement de notre travail.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes chères parents qui se sont sacrifier tout au long de mes études, pour qui je prie ALLAH de leurs accorder santé et longue vie.

A mon frère Mohamed et à petite sœur et surtout ma grande sœur qui ma beaucoup soutenu durant ma formation et sans oublier mon neuve Mohamed Nassim

A toute ma famille surtout à ma grande mère et mon cousin Rabah et bien sure ma tente Aldja qui ma vraiment soutenu

A tous mes amis (es).

Ahmed BOUZOUAR

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Je dédie ce travail à :

Ma famille ;

Tous mes amis ;

Tous mes frères surtout Youcef ,sans lui ce travail ne vois pas la lumière sans oublier ma sœur.

Toutes les personnes qui m'ont inspiré toute au long de ma vie par leurs sagesse et leurs façon de faire face aux dures épreuves de la vie.

Madjid

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Je dédie ce mémoire :

Spécialement à ma très chère mère qui nous a quittés très-tôt, qu'elle repose en paix.

A mes chers parents qui se sont sacrifiés tout au long de mes études.

A mes frères et mes sœurs qui m'ont soutenue.

A mes proches et tous mes amis et tous ceux qui me sont cher

A*hcène*

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Sommaire

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Introduction générale 1

Chapitre I : Généralités sur le moteur asynchrone à cage

I.1 Introduction 3

I.2 Eléments de constitution de la machine asynchrone 3

I.2.1 Le stator 4

I.2.2 Le rotor 5

I.3 Principe de fonctionnement 6

I.4 Le glissement 6

I.5 Schéma équivalent 7

I.6 Expression du couple 7

I.7 Caractéristique mécanique 8

I.8 Démarrage des moteurs asynchrones 11

I.9 Conclusion 11

Chapitre II : Analyse des pertes dans un moteur asynchrone à cage

II.1 Introduction 12

II.2 Pertes en charge 12

II.2.1 Pertes joules statorique 12

II.2.2 Pertes joules rotorique 13

II.3 Pertes constantes 13

II.3.1 Pertes fer 13

II.3.1.1 Pertes par hystérésis 13

II.3.1.2 Pertes par courant de Foucault 13

II.3.2 Pertes mécaniques 14

II.3.2.1 Pertes par frottement 14

II.3.2.2 Pertes par ventilation 14

II.4 Pertes supplémentaires en charge 14

II.5 Conclusion 15

Chapitre III : Transfert de chaleur dans un moteur asynchrone à cage

III.1 Introduction 17

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

III.2 Transfert de chaleur par conduction 17
III.2.1 Conductivité thermique des solides hétérogènes 18
III.2.2 Résistance thermique de contact 21
III.3 Transfert de chaleur par convection 22
III.3.1 Calcul de coefficient d'échange h 23
III.4 Transfert de chaleur par rayonnement 25
III.5 Application à la machine étudiée 26
III.6 Conclusion 28
Chapitre IV : Modélisation thermique d'un moteur asynchrone à cage
IV.1 Introduction 29
IV.2 méthode nodale 29
IV.2.1 Méthode des réseaux thermiques équivalents 29
IV.2.2 circuit thermique équivalent dans la direction axiale 30
IV.2.3 Circuit thermique équivalent dans la direction radiale 32
IV.3 Méthode des éléments finis 35
IV.3.1 Principe de la méthode des éléments finis 36
IV.3.2 Etudes 2D et 3D 36
IV.3.3 Logiciel FEMM 37
IV.3.4 Langage de programmation LUA 38
IV.4 Conclusion 39
Chapitre V : Application et validation
V.1 Introduction 40
V.2 Description de la machine étudiée 40
V.3 Application 41
V.3.1 Structure étudiée 41
V.3.2 Hypothèses de travail 42
V.3.3 Evaluation des paramètres thermo physiques 42
V.3.3.1 Conductivité thermique 42
V.3.3.2 Les pertes générées 43

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

V.4 Validation des résultats et discussion 43
V.4.1 les essais sous FEMM 46
V.4.2 Evolution de la température le long de l'entrefer 48
V.4.3 Comparaison des résultats simulées et mesurées en régime nominale 48
V.4.4 Etude de la sensibilité du modèle à la variation de l'épaisseur de contact 49
V.5 Conclusion 50
Conclusion générale 51

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Introduction générale

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

La croissante utilisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil, essentiellement due à sa simplicité de construction, son faible coût d'achat et de fabrication, sa robustesse mécanique ou encore sa quasi-absence d'entretien, est telle que nous la trouvons maintenant dans tous les domaines industriels et en particulier dans les secteurs de pointe comme l'aéronautique, le nucléaire, la chimie ou encore les transports ferroviaires. Il est évident que ces moteurs conduisent à porter une attention de plus en plus sérieuse quant à leur fonctionnement et leur disponibilité.

Dans un moteur asynchrone, la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique s'accompagne de différentes pertes (mécanique, Joule et fer) qui sont localisées dans les parties massives de la machine :

- Les pertes Joule sont présentes au niveau des enroulements statoriques et de la cage rotorique.
- Les circuits magnétiques rotorique et statorique sont le siège de pertes fer.
- Les pertes mécaniques sont dues au frottement dans les paliers, au frottement de l'air dans l'entrefer (pertes aérodynamiques) et à la ventilation car il faut prélever de la puissance mécanique pour entraîner le ventilateur monté en bout d'arbre.

Les pertes dans la machine asynchrone constituent les sources de chaleur du problème thermique [1].

Le développement d'un outil de simulation thermique nécessite de quantifier, séparer et localiser les différentes sources de chaleur internes génératrices d'échauffements. La validation de tels outils numériques demande une bonne connaissance des modes de transferts internes à la machine. Les trois modes fondamentaux sont à considérer lors des analyses thermiques fines. Ils peuvent toutefois être pris globalement pour des études plus appliquées et moins fondamentales.

Les méthodes d'analyse couramment utilisées sont initialement les méthodes nodales, ces méthode basées sur les réseaux thermique équivalents [2], donnent seulement la température moyenne de l'élément, mais elles donnent une bonne approximation de la température des endroits plus chaud. Actuellement ces méthodes sont remplacées par les méthodes numériques, et en particulier la méthode des éléments finis. Cette dernière est en plein essor est fréquemment développée sur un plan thermique. Elles sont beaucoup utilisées du fait qu'elle offre de plus grands avantages car elle est particulièrement bien adaptée à la résolution des problèmes complexes (problèmes non linéaires et évolutifs dans une géométrie complexe à une, deux et trois dimensions) [2].

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Dans notre travail, nous nous intéressons à la modélisation thermique en régime permanant, basée sur la méthode des éléments finis sous environnement FEMM 4.2 (heat flow), d'un moteur asynchrone à cage afin de déduire l'échauffement correspondant à une répartition des pertes connues.

Le plan de notre travail se décompose en cinq chapitres :

Dans le premier chapitre, nous donnons un aperçu général sur la constitution du moteur asynchrone en rappelant le principe de fonctionnement et l'expression du couple ainsi son démarrage.

Dans le deuxième chapitre sera consacré à l'analyse des différentes pertes existantes dans les machines électriques tournantes.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les différents modes de transfert de chaleur, puis, nous établissons l'équation de diffusion de chaleur par conduction en régime permanent.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons la méthode de modélisation thermique par réseaux thermiques équivalents d'une manière globale, et la méthode des éléments finis que nous allons adapter au problème thermique considéré. Puis nous présenterons le logiciel FEMM (Finite Element Method Magnetics), sous lequel nous effectuerons notre calcul.

Dans le cinquième et dernier chapitre est consacré à la confrontation des résultats obtenue à partir du model élaboré et ceux obtenu expérimentalement. La cohérence et la conformité de l'ensemble des résultats obtenus ont été discutées. Ensuite une étude de sensibilité à la variation de la résistance de contact est aussi présentée.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

chapitre I

Généralité sur le moteur asynchrone à cage

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

I.1 Introduction

On appelle machine asynchrone, toute machine électrique à courant alternatif pour laquelle la vitesse de rotation de l'arbre (vitesse réelle) est différente de la vitesse de rotation du champ tournant (vitesse de synchronisme). Elle à deux enroulements, l'enroulement primaire est alimentée par un réseau électrique de pulsation ω ; alors que l'enroulement secondaire est fermé sur lui-même ou sur des résistances électriques.

La machine asynchrone peut être représentée par son symbole normalisé générale qui précise si elle fonctionne en moteur (figure I.1) ou en générateur (figure I.2). Le symbole peut apporter des précisions sur la nature de la machine.

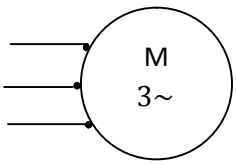


Figure I.1-Symbole générale d'un moteur asynchrone triphasé

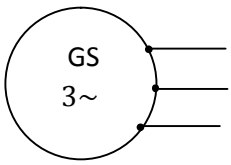


Figure I.2-Symbole générale d'un générateur asynchrone triphasé

I.2 Eléments de constitution de la machine asynchrone

La machine asynchrone se compose essentiellement de deux parties principales : l'un est le stator, on y trouve les enroulements reliés à la source, l'autre est le rotor, il est monté sur un axe libre de tourner.

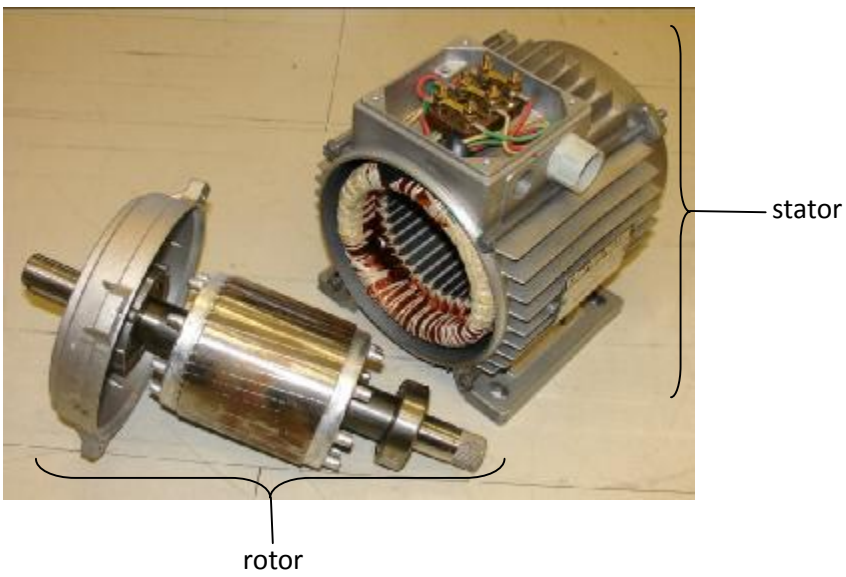


Figure I.3 stator et rotor d'une machine asynchrone à cage

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

La figure I.3 représente stator et rotor d'une machine asynchrone à cage. Ils sont constitués de matériaux ferromagnétiques (silisuim).

On trouve aussi les différents organes mécaniques permettant la retation du rotor et le maintien des différents sous-ensembles. Selon que les enroulements du rotor sont fermés sur eux même ou accessibles à l'extérieure on distingue deux types de rotor ; rotor bobiné et rotor à cage. La figure I-4 représente la vue éclatée d'un moteur asynchrone.

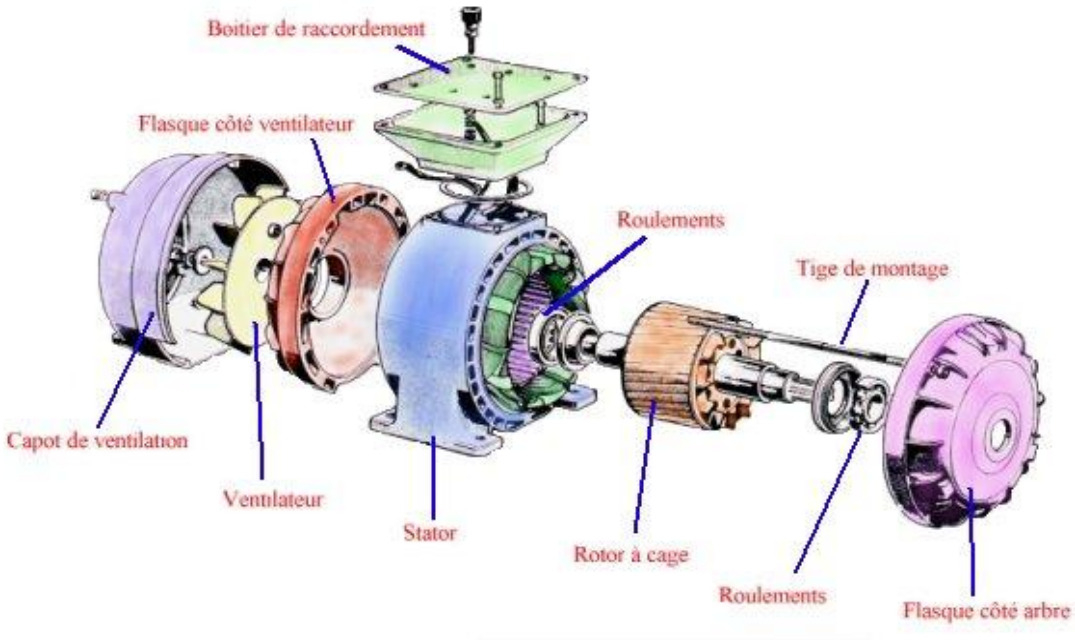


Figure I.4 Vue éclatée d'un moteur asynchrone à cage

I.2.1 Le stator

Le stator de la machine asynchrone est constitué de tôles d'acier dans lesquelles sont placés les bobinages statoriques. Ces tôles sont, pour les petites machines, découpées en une seule pièce alors qu'elles sont, pour les machines de puissance plus importante, découpées par sections. Elles sont habituellement recouvertes de vernis pour limiter l'effet des courants de Foucault. Au final, elles sont assemblées les unes aux autres à l'aide de boulons ou de soudures pour former le circuit magnétique statorique.

Une fois cette étape d'assemblage terminée, les enroulements statoriques sont placés dans les encoches prévues à cet effet. Ces enroulements peuvent être insérés de manière imbriqués, ondulés ou encore concentriques. L'enroulement concentrique est très souvent utilisé lorsque le bobinage de la machine asynchrone est effectué mécaniquement.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Le stator d'une machine asynchrone est aussi pourvu d'une boîte à bornes à laquelle est reliée l'alimentation électrique. Nous représentons sur la figure I.5 les différentes parties de constitution du stator d'une machine asynchrone. Nous pouvons visualiser la présence d'ailettes de ventilation assurant le refroidissement de la machine lorsque celle-ci fonctionne en charge.

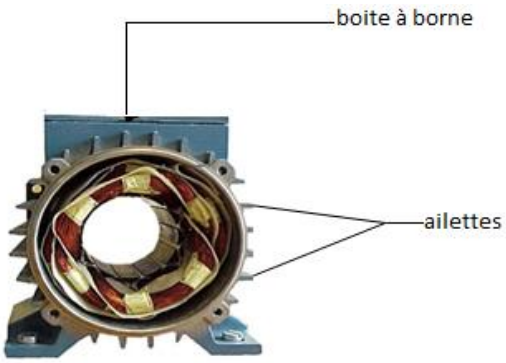


Figure I.5 Stator d'une machine asynchrone basse tension

Figure I.6 représentation d'un paquet de tôles statoriques

I.2.2 Le rotor

C'est un anneau de tôles rainuré à l'extérieur, concentrique au stator et séparé du rotor par un entrefer constant. Le rotor porte un enroulement polyphasé mis en court-circuit constituant ainsi le secondaire. Le courant dans ses enroulements est induit uniquement par le champ statorique, car le rotor n'est lié à aucune source électrique extérieure.

Les barres sont fabriquées en cuivre ou en aluminium, suivant les caractéristiques mécaniques et électrique recherchées par le constructeur. Dans le cas de moteur de faible ou moyenne puissance les cages sont en aluminium coulé sous vide partiel et pression. Ce procédé permet d'éviter la présence néfaste de bulles d'air dans les barres. Pour les gros moteurs les barres sont en cuivre [3].

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

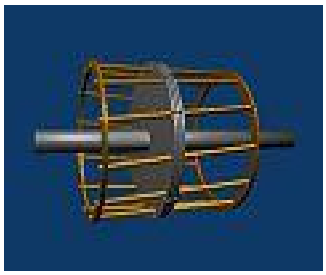


Figure I.7 Structure d'un rotor à cage d'écureuil

I.3 Principe de fonctionnement

Le moteur électrique asynchrone a pour rôle de transformer l'énergie électrique apporter par le courant alternatif en énergie mécanique de rotation .L'alimentation du stator par un système triphasé donne naissance à un champ tournant à la vitesse de synchronisme au niveau de l'entrefer, ce qui crée une f.é.m. induite dans les enroulements du rotor qui sont court-circuités, et par des courants induits.

D'après la loi LENZ, l'action électromagnétique que subit alors le rotor est tend à s'opposer a la cause productrice de ces courants. Le rotor tourne alors dans le même sens que le champ, à une vitesse de rotation N_r inférieur à celle de synchronisme N_s, d'où le nom de la machine asynchrone.

Cette différence de vitesse de rotation du rotor par rapport celle du champ tournant, nous ramène a définir un paramètre qui caractérise les machines asynchrones, qu'on appelle le glissement.

I.4 Le glissement

C'est le rapport de la différence entre la vitesse synchrone Ωs (vitesse du champ tournant) et la vitesse actuelle Ω_r de rotor par la vitesse de synchrone Ωs**.** On dit que le rotor glisse par rapport au champ tournant. Ce glissement g dépendre de la charge En % :

$$g(\%) = \frac{N_s - N_r}{N_s} \times 100 = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} \times 100 \qquad (I.1)$$

Avec:

$N_s = \frac{60f}{p}$ vitesse du champ tournant statorique [rd/s] ;

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ω_s: Vitesse du champ tournant statorique [tr/mn] ;

f : Fréquence de réseaux ;

p : Nombre de paires de pôles.

I.5 Schéma équivalent

Le schéma équivalent le plus commode d'emploi est le schéma monophasé de la figure I.8 où le moteur asynchrone est assimilé à un transformateur statique dont le secondaire serait fermé sur une résistance R'_2/g inversement proportionnelle au glissement.

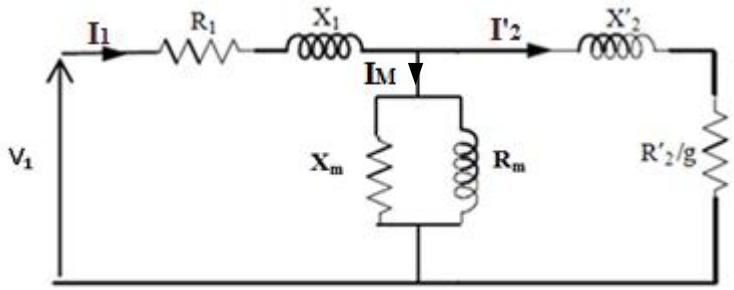


Figure I.8 Schéma équivalent d'un moteur asynchrone
(Paramètres du rotor ramené au stator)

Avec :

X_m : Réactance magnétisante ;

R_m : Résistance magnétisante ;

R_1 : Résistance du stator ;

X_1 : Réactance du stator ;

R_2' : Résistance du rotor ramené du stator ;

X_2' : Réactance du rotor ramené du stator ;

g: Glissement.

I.6 Expression du couple

a) Couple électromagnétique :

$$C_{elc} = \frac{P_{elc}}{\Omega_s} = \frac{P_{elc}}{2\pi N_s/60} \qquad (I.2)$$

P_{elc} : Puissance électromagnétique ;

Ω_s : Vitesse de synchronisme (rd/s).

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

b) Couple mécanique :

$$C_{mec} = \frac{P_{mec}}{\Omega_r} = \frac{P_{mec}}{2\pi N_r/60} \quad (I.3)$$

P_{mec} : Puissance mécanique ;

Ω_r : Vitesse de rotation du rotor (rd/s).

c) Couple utile :

$$C_u = \frac{P_u}{\Omega_r} = \frac{P_u}{2\pi N_r/60} \quad (I.4)$$

P_u : Puissance utile ;

Ω_r : Vitesse de rotation du rotor (rd/s).

I.7 Caractéristique mécanique

La Caractéristique mécanique est la caractéristique donnant le couple en fonction du glissement : *C = f(g)*

Le calcul de cette caractéristique se facilite si on ramène l'impédance du stator R_1+jX_1 en série avec $R'_2/g + jX'_2$ (c'est-à-dire qu'on utilise le schéma équivalent approché de la machine asynchrone) [4].

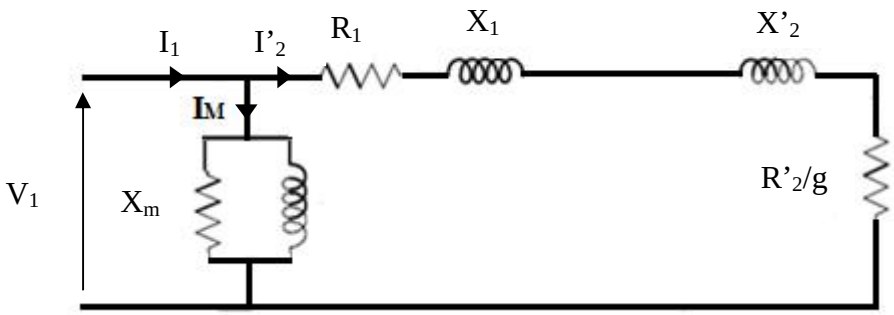


Figure I.9 Schéma équivalent approché de la machine asynchrone

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Avec :

V_1 : Tension de phase ;

I_1 : Courant de statorique ;

I'_2 : Courant rotorique.

De la figure I.9 l'expression de I'_2 est donnée comme suite :

$$I_2' = \frac{V_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{g}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}} \quad (I.5)$$

Posons X1+X'2=X' : réactance cyclique de fuites total ramenée au primaire.

Alors notre expression deviendra comme suite :

$$I_2' = \frac{V_1}{\sqrt{\left(R_1 + {R'_2}/{g}\right)^2 + (X')^2}} \quad (I.6)$$

Cherchons maintenant l'expression du couple

$$C = \frac{P_{elc}}{\Omega_s} = \frac{3R'_2 I'^2_2}{g\Omega_s} \quad (I.7)$$

De l'expression I.6 on trouvera

$$C = \frac{3R'_2 V_1^2}{\Omega_s} \times \frac{g}{(R_1 g + R'_2)^2 + (X'g)^2} \quad (I.8)$$

On a: $g = \frac{N_s - N_r}{N_s}$

1) Dans le cas ou N_s=N_r on aura le glissement g=0 donc le couple C =0
2) Pour de faibles valeurs de g, R_1g et X'g sont négligeable devant R'$_2$, alors le couple est proportionnel à g voir le graphe de la figure I.10.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

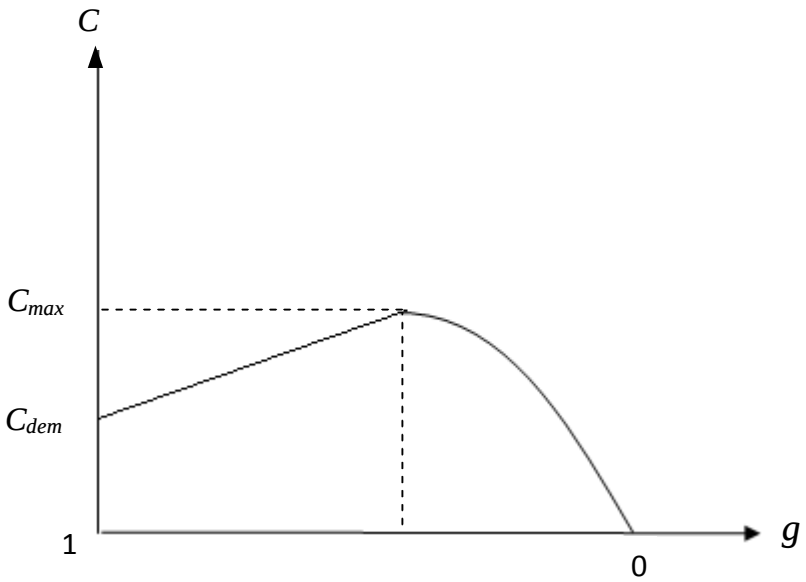


Figure I.10 Courbe du couple en fonction du glissement

3) Quand g continue à croitre, la caractéristique *C = f(g)* atteint un maximum puis s'incurve

On doit donc trouvé le couple maximal comme suite :

$$\frac{dC}{dg} = 0 \Longrightarrow g_m = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X'^2}} \quad (I.9)$$

D'où

$$C_{max} = \frac{3V_1^2}{2\Omega_s} \times \frac{1}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + X'^2}} \quad (I.10)$$

4) Dans le cas ou g=1 c'est au démarrage. l'expression du couple de démarrage est donnée comme suite :

$$C_{dem} = \frac{3V_1^2}{\Omega_s} \times \frac{R'_2}{(R_1 + R'_2)^2 + X'^2} \quad (I.11)$$

D'où l'expression du courant de démarrage

$$I_{dem} = \frac{V_1}{\sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + (X')^2}} \quad (I.12)$$

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

D'après le graphe (figure I.10) représentant le couple en fonction du glissement, on voit que cette caractéristique est non linéaire d'où la difficulté de commandé les machines asynchrone.

I.8 Démarrage des moteurs asynchrones

Le démarrage des moteurs asynchrones est caractérisé par le couple de démarrage et par l'appel de courant engendré, il est facile de montré que :

- Pour avoir un bon rendement du moteur, la résistance de l'enroulement secondaire doit être faible, mais cela réduit le couple de démarrage.
- Pour obtenir un bon facteur de puissance il faut minimiser l'effet de fuite (minimiser X_1, X'_2) et cela augmente l'appel du courant de démarrage.
- Pour obtenir un couple maximal élevé il faut augmenter le courant magnétisant et diminuer les flux de dispersions, ces deux actions contribuent à augmenter le courant au démarrage. Il est clair que ces différentes conditions sont contradictoires d'où le recours artifices pour obtenir à la fois un couple élevé et un appel de courant limité au démarrage [4].

Dans les moteurs asynchrones à cage d'écureuil, la seule façon pour minimiser le courant de démarrage est de réduire la tension d'alimentation, et cela entraine une diminution du couple.

Pour régler ce problème, les moteurs à double cages ou à encoches profondes sont utilisés.

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre on a défini la machine asynchrone et rappelé les éléments de constitutions et les expressions du couple ainsi que son démarrage. La machine asynchrone à cage est constituée de différentes pertes qui représentent la source de chaleur dans la modélisation thermique du moteur qui fera l'objet du chapitre suivant.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

chapitre II

Analyse des pertes dans un moteur asynchrone à cage

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

II.1 Introduction

Les moteurs et les générateurs électriques sont des machines qui convertissent l'énergie électrique en mécanique et vice versa. Durant le processus de conversion, une partie de cette énergie est perdue sous forme de chaleur. Les causes et la distribution des pertes dans les machines électriques tournantes sont complexe, ce qui exige une étude très approfondie ceci est du principalement au fait que : Le champ magnétique et le courant électrique, qui sont les principales causes, ont une distribution assez complexe à tel point qu'il est difficile de les localiser [5].

Dans ce chapitre, nous définirons toutes les machines électriques tournantes. La mesure des différentes pertes de puissance de la machine asynchrone permet de calculer son rendement. On peut surtout utiliser ces grandeurs pour estimer les échauffements des différentes parties de la machine et juger l'efficacité des isolants thermiques et des procédés de refroidissement utiliser.

Pour mesurer ou calculer ces différentes grandeurs, la norme NFC fixe les méthodes suivantes.

- Pertes en charge
- Pertes constantes
- Pertes supplémentaires en charge

II.2 Pertes en charge

Ce sont des pertes électriques dissipées par effet joule dans les enroulements statorique et rotorique, elles varient en fonction du carré des courants circulant dans ces enroulements.

II.2.1 Pertes joules statorique

$$P_{js} = 3R_s{I_1}^2 \qquad \text{(II.1)}$$

Avec :

R_s : La résistance d'une phase statorique [Ω] ;

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

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

II.2.2 Pertes joules rotorique

$$P_{jr} = mR_2{I_2}^2 \quad \text{(II.2)}$$

Avec :

m : Nombre de phases ;

R_2 : La résistance équivalente d'une phase rotorique [Ω] ;

I_2 : Le courant enduit dans le rotor [A].

II.3 Pertes constantes

Elle se détermine par la méthode du fonctionnement en moteur à vide. La machine est alimentée à sa tension et à sa fréquence nominale (50Hz). Les pertes constantes sont :

II.3.1 Pertes fer

Une attention particulière doit être donnée aux pertes fer car celles-ci représentent une part non négligeable des pertes totales. Ce sont des pertes qui ont lieu dans le circuit magnétique, constitué d'alliages ferromagnétiques largement utilisés dans la construction des circuits magnétique.

Elles englobent les pertes par hystérésis et par courant de Foucault.

II.3.1.1 Pertes par hystérésis

Les pertes par hystérésis résultent de transformation de l'organisation de la matière, sous l'effet de la variation en intensité et/ou en direction du champ magnétique appliqué.

Elles sont proportionnelles à la fréquence et à une certaine puissance de l'amplitude B_m de l'induction [6].

$$P_H = K_1 f {B_m}^2 \quad \text{(II.3)}$$

II.3.1.2 Pertes par courant de Foucault

Les pertes par courant de Foucault résultent des variations temporelles des flux qui induisent des f.e.m dans leurs masses. Ces f.e.m donnent naissance à des courants qui se ferment dans la masse du fer

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Elles sont proportionnelles au carré de la fréquence et de l'induction magnétique.

$$P_{Fc} = K_2 f^2 {B_m}^2 \quad \text{(II.4)}$$

Ou

K_1, K_2 : Sont des constantes ;

f : La fréquence du réseau ;

B_m : L'induction maximale dans l'entrefer [T].

II.3.2 Pertes mécaniques

Les pertes mécaniques regroupent les pertes par frottement et par ventilation qui sont en réalité inséparables car toutes les deux sont associées à la rotation. Cependant, aux basses vitesses, les pertes par ventilation associées à la rotation sont faibles et les pertes par frottement sont estimables [5,6].

II.3.2.1 Pertes par frottement

Elles constituent toutes les pertes causées par les frottements qui sont dus à la rotation de la partie tournantes de la machine, que ce soit entre solides ou entre solides et fluides. On associe à ces pertes, celles causées par la résistance en mouvement dans les enroulements.

II.3.2.2 Pertes par ventilation

On appelle pertes par ventilation la puissance absorbée par le ventilateur monté en bout d'arbre de la machine qui est utilisé pour le refroidissement forcé de la machine.

II.4 Pertes supplémentaires en charge

Ce sont des pertes dues à tous les phénomènes parasites, en particulier celles qui correspondent aux flux de fuites, à la fréquence fondamentale et harmonique.

La détermination des pertes supplémentaires est un problème aigu. Cependant ces pertes peuvent être exprimées en fonction des autres pertes comme suit :

$$P_{sup} = P_t - (P_{js} + P_{jr} + P_{mec} + P_{fer}) \quad \text{(II.5)}$$

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Ou :

P_{sup} : Pertes supplémentaires en charge [W] ;

P_t : Pertes totales [W] ;

P_{js} : Pertes joules statorique [W] ;

P_{jr} : Pertes joules rotorique [W] ;

P_{mec} : Pertes mécanique [W] ;

P_{fer} : Pertes fer [W].

Les différentes pertes d'un moteur asynchrone sont utilisées dans la figure. II.1.

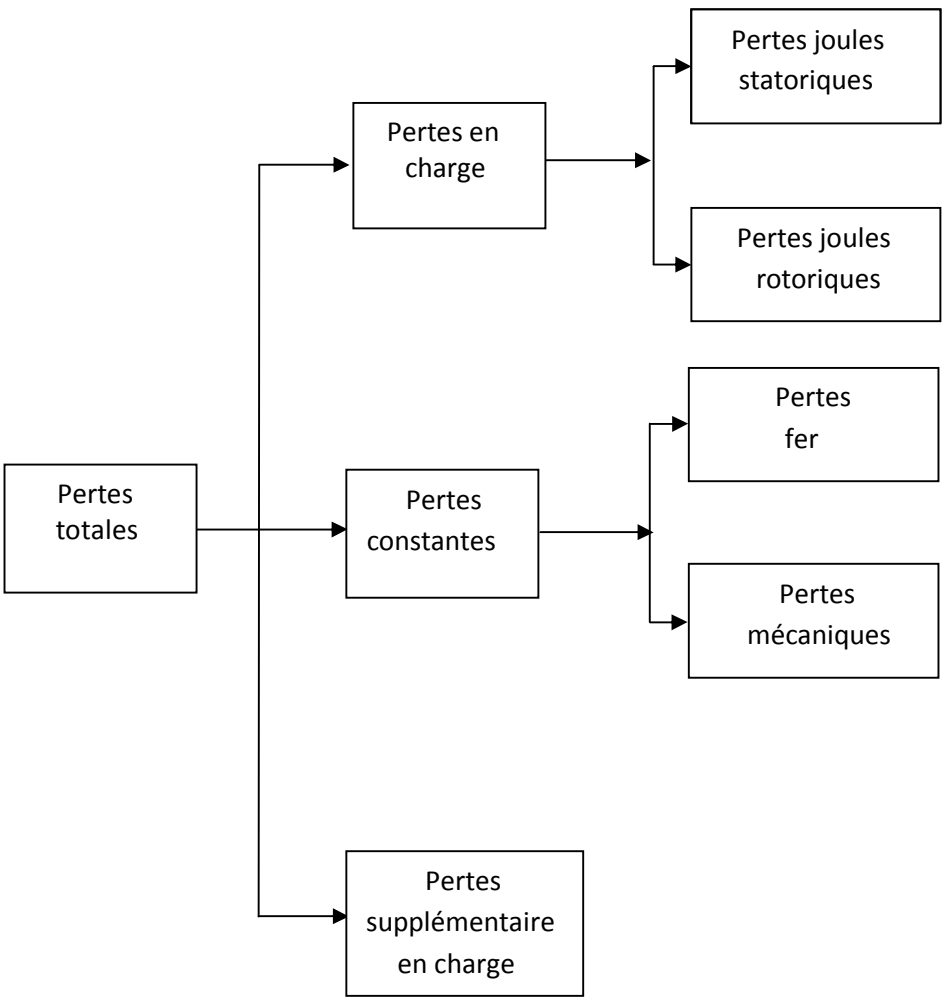


Figure. II.1 : Séparation des pertes dans un moteur asynchrone[5] .

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé les différentes pertes existantes dans le moteur asynchrone étudié. Une connaissance exacte de la distribution des pertes est indispensable pour le calcul de l'élévation de la température qui forme l'un des objectifs majeurs de la modélisation thermique.

.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

chapitre III

Transfert de chaleur dans un moteur asynchrone à cage

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

III.1 Introduction

La conversion de l'énergie électromécanique dans les machines électriques s'accompagne de pertes (électromagnétique et mécanique) qui se transforment en énergie calorifique. Ceci se traduit par des élévations de température à l'intérieur de la machine. Le transfert de chaleur se fait essentiellement par conduction thermique des parties actives internes vers le milieu ambiant où la chaleur est cédée par convection et rayonnement.

L'échauffement des éléments internes de la machine qui en résulte de cette production de chaleur et pour cela il faut réaliser des systèmes de refroidissement qui facilitent ces échanges de chaleurs dépendant de la machine considérée, de sa puissance [1].

Dans ce chapitre on donne une brève description des divers modes de transmission de la chaleur : conduction, convection et rayonnement [2,7].

III.2 Transfert de chaleur par conduction

La conduction thermique est un transfert de chaleur à travers un milieu matériel sans déplacement de matière, C'est ce qui se passe en particulier dans un milieu solide homogène. La conduction ne peut exister que s'il existe des écarts de températures c'est-à-dire si le gradient de température n'est pas nul. Dans le cas contraire le milieu est en équilibre thermique et aucun transfert de chaleur ne peut se produire. La loi de Fourier permet de relier la densité du flux de chaleur au gradient de température :

$$\varphi = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}}(\theta) \qquad \text{(III.1)}$$

Avec :

φ : Densité de flux de chaleur ;

θ : Température ;

λ : Conductivité thermique.

Dans un milieu homogène, la densité de flux de chaleur s'écrit [7].

$$\varphi = \frac{\lambda}{L}(\theta_I - \theta_j) \qquad \text{(III.2)}$$

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Avec :

φ : Densité de flux de chaleur transférée entre deux point i et j [W/m^2] ;

θ_i, θ_j: Températures entre deux points i et j [◦C] ;

L : Distance entre ces deux points i et j [m] ;

λ : Conductivité thermique [W/m.◦C].

Dans un milieu hétérogène, la conductivité thermique équivalente peut être définie en utilisant la notion de résistance thermique.

III.2.1 Conductivité thermique des solides hétérogènes

La conductivité dépend principalement de la nature du matériau, de la température et d autres paramètres comme l'humidité, la pression. Dans les solides pures (homogène) on peut facilement trouver la conductivité thermique par contre dans les matériaux solides hétérogènes pas le cas et pour cela on utilise la notion de résistance thermique qui est analogue en électrocinétique a la résistance électrique [2,8], qui se déduit de la définition de la conduction a travers un matériau de conductivité λ, d'épaisseur e et de section S. Dans la direction de la conduction figure II.1, les faces externes sont respectivement aux températures θ_1 et θ_2 sur les surfaces (1) et (2) de cette même figure.

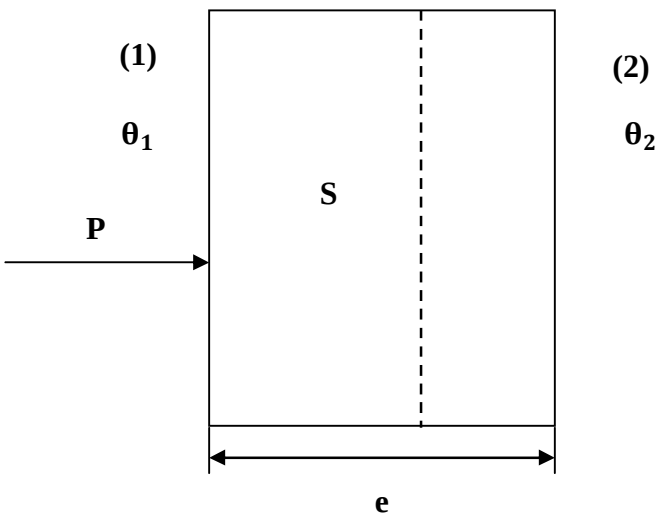


Figure III.1 Elément simple d'un cırcuit thermique

Si la surface (1) reçoit une puissance calorifique P en Watts, loi de Fourier appliquée à ce problème permet d'écrire

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

$$\frac{P}{S} = \lambda \frac{\theta_1 - \theta_2}{e} \quad \text{(III.3)}$$

D'où :

$$P = \frac{\lambda \cdot S}{e}(\theta_1 - \theta_2) \quad \text{(III.4)}$$

Qui peut ce mettre sous la forme

$$\theta_1 - \theta_2 = \frac{e}{\lambda \cdot S} P \quad \text{(III.5)}$$

Par analogue de la loi d'Ohm, on déduit l'expression de la résistance thermique

$$R = \frac{e}{\lambda \cdot S} \quad \text{(III.6)}$$

Nous pouvons généraliser cette expression pour des différentes géométries en considérant une section moyenne S_{moy} . Dans ce cas, la résistance thermique s'écrit comme suit :

$$R = \frac{e}{\lambda \cdot S_{moy}} \quad \text{(III.7)}$$

- Pour un cylindre

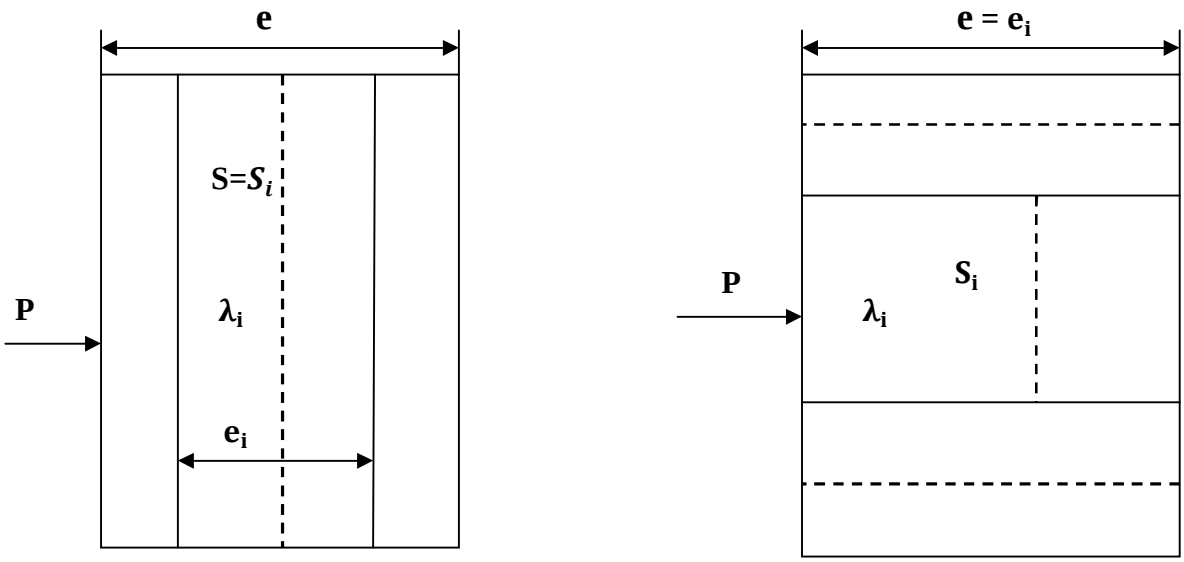
$S_{moy} = \frac{S_2 - S_1}{\log(\frac{S_2}{S_1})}$ est la moyenne logarithmique des surfaces (1) et (2) des faces internes et externes.

- Pour une sphère :

$S_{moy} = \sqrt{S_1 \cdot S_2}$ est la moyenne géométrique des surfaces (1) et (2) des faces internes et externes.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Considérons, maintenant, plusieurs couches (i) de milieux différents, ce système présenté sur la figure III.2.



(a) (b)

Figure III.2 Conduction à travers élément composé

(a) association en série
(b) association en parallèle

Dans la figure III.2(a), la résistance thermique équivalente est l'association en série des résistances thermiques de chaque couche. La conductivité équivalente est déduite à partir de cette relation :

$$\frac{e}{\lambda_{eq} \cdot S} = \sum_i \frac{e_i}{\lambda_i \cdot S_i} \qquad \text{(III.8)}$$

Dans la figure III.2(b), la résistance thermique équivalente est l'association en parallèle des résistances thermiques de chaque couche. La conductivité équivalente est déduite à partir de cette relation :

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

$$\lambda_{eq} \cdot \frac{S}{e} = \sum_{i} \frac{\lambda_i \cdot s_i}{e_i} \qquad \text{(III.9)}$$

Dans le cas des géométries différentes, S est remplacée par S_{moy} .

III.2.2 Résistance thermique de contact

La formation d'interface solide - solide, lors d'assemblages industriels, ne peut donner lieu à un contact parfait entre ces solides. Pour illustrer l'effet de contacts imparfaits entre deux solides, nous considérons le schéma de la figure III.3.

Entre les zones de contact subsiste un espace interstitiel, en général mauvais conducteur, qui constitue un frein au transfert de chaleur, qui de ce fait passe de manière préférentielle au niveau des contacts directs là où le passage de la chaleur est facilité.

Le champ de température se trouve donc considérablement perturbé dans la région localisée de part et d' autres de l'interface.

Il en résulte une constriction des lignes de flux dont dépend la résistance thermique de contact. Celle-ci dépend des propriétés physiques des solides en contact, de l'état des surfaces et de la pression de contact [1,8].

La résistance de contact lors de l'écoulement de chaleur à travers l'interface est donnée comme suit :

$$R_c = \frac{1}{h_c \cdot S} \qquad \text{(III.10)}$$

Avec :

h_c : Coefficient de contact en [$W/m^2.°C$], et ce coefficient est donnée pour quelques interfaces solides-solides en fonction de la pression de contact [9].

S : surface en [m^2]

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

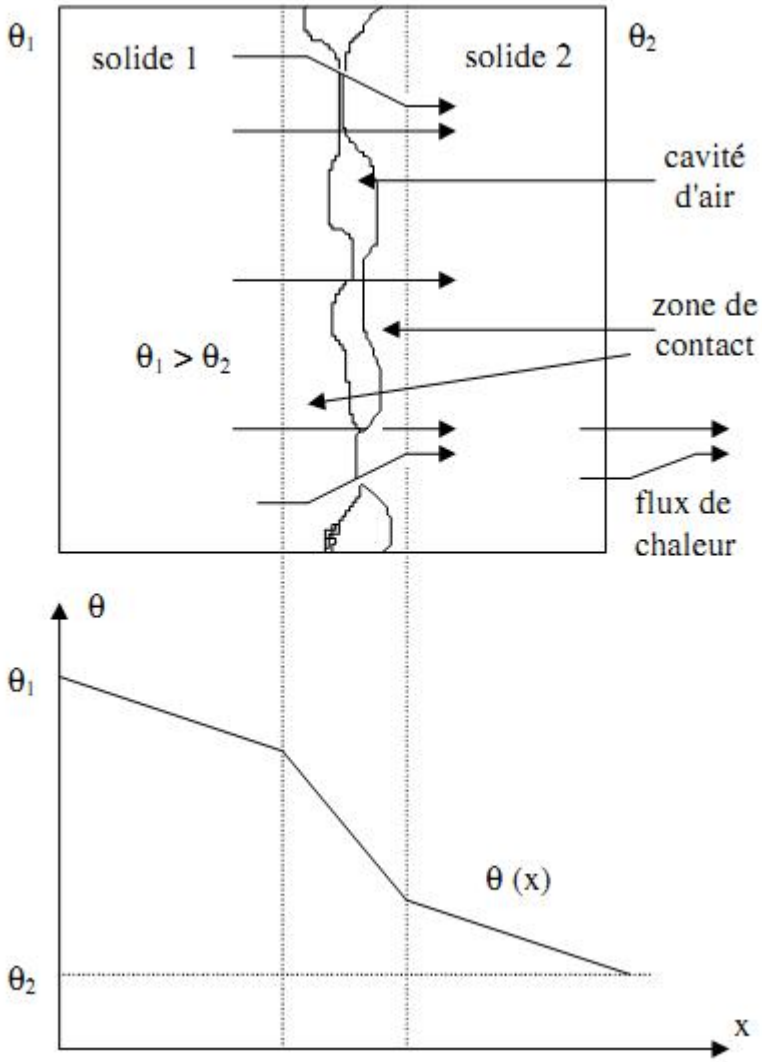


Figure III.3 Schématisation de contact imparfait entre deux solides

III.3 Transfert de chaleur par convection

Il s'agit d'un transport de chaleur dû au mouvement d'un fluide de température moyenne θ_m en contact d'un solide de température θ_s.

La loi de Newton permet de relier la densité du flux de chaleur φ [W/m^2] à la différence de température entre les deux milieux par la relation :

$$\varphi = h\,(\theta_s - \theta_m) \qquad \text{(III.11)}$$

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

h est coefficient d'échange par convection [w/m^2.◦C].

La convection peut être de deux natures :

a. La convection forcée : elle est dite forcée lorsque le mouvement du fluide est obtenu volontairement au moyen d'une source de pression ou de débit.

$$N_u = b_g \cdot (R_e^m \cdot P_r^n) \quad \text{(III.12)}$$

b. La convection naturelle : elle est dite naturelle lorsque c'est la variation de la masse volumique du fluide par élévation de sa température qui produit le mouvement et donc l'échange de chaleur.

$$N_u = a_g \cdot (G_r \cdot P_r)^n \quad \text{(III.13)}$$

Avec a_g et b_g constantes qui dépendent des configurations géométriques et mécaniques étudiées.

La valeur du coefficient h dépend également du type d'écoulement du fluide qui peut être laminaire, turbulent [1].

III.3.1 Calcul de coefficient d'échange h

Pour établir des relations permettant de déterminer les valeurs de h, nous avons recours à une analyse introduisant des nombres sans dimension.

Cette dernière analyse est une méthode empirique basée sur une détermination expérimentale du coefficient d'échange où interviennent des coefficients susceptibles d'influer le phénomène physique [8].

Les principaux paramètres caractéristiques du transfert convectif sont :

- Nombre de Reynolds (R_e)

Il traduit la comparaison entre la viscosité cinématique et les forces d'inertie utilisé pour indiquer la transition de l'écoulement laminaire vers un écoulement turbulent :

$$R_e = \frac{\rho \nu D_h}{\mu_d} \quad \text{(III.14)}$$

ρ : Masse volumique ;

ν : Vitesse d'écoulement de fluide ;

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

μ_d : Viscosité dynamique ;

D_h : Diamètre hydraulique.

- Nombre de Nusselt (N_u)

Il traduit la comparaison entre les échanges par convection et par conduction

$$N_u = \frac{h_c D_h}{\lambda} \quad \text{(III.15)}$$

h_c : Coefficient d'échange par convection ;

λ : La conductivité thermique de fluide ;

D_h : Diamètre hydraulique.

- Nombre de Prandtl (P_r)

Il traduit la distribution des vitesses par rapport à la distribution de la température

$$P_r = \frac{\mu_d C_p}{\lambda} \quad \text{(III.16)}$$

- Nombre de Grashof (G_r)

Ce nombre est utilisé en convection libre ou naturelle. Il représente la comparaison entre les forces dues à la dilatation et les forces dues à la viscosité.

$$G_r = \frac{g_{acc}\beta\Delta T D_h^3 \rho^2}{\mu_d^2} \quad \text{(III.17)}$$

g_{acc} : L'accélération due à la pesanteur ;

β : Coefficient d'expansion thermique ;

- Nombre de Rayleigh (R_a)

$$R_a = G_r \cdot P_r \quad \text{(III.18)}$$

R_a indique les conditions de l'écoulement dans le cas de la convection naturelle (utilisé à la place de R_e)

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

ü Nombre de Tylor (T_a)

Il traduit le rapport des forces centrifuges sur les forces de viscosités. Il caractérise l'écoulement induit par la rotation de rotor dans les machines tournantes.

$$T_a = \frac{r_{ext.r}.\omega.e^3}{\nu_c} \qquad \text{(III.19)}$$

ω : La vitesse du rotation en [rd/s] ;

$r_{ext.r}$: Le rayon du rotor ;

ν_c : La viscosité cinématique de l'air.

III.4 Transfert de chaleur par rayonnement

Le rayonnement thermique est constitue d'ondes électromagnétiques qui transportent l'énergie émise a la surface d'une substance sans nécessité de support matériel. Dans le cas ou l'échange se fait entre deux surfaces S_1 et S_2 grises, mates et isothermes, face à face, la loi de Stéphan – Boltzman permet d'écrire :

$$P = \frac{\sigma F_{1-2}(\theta_2^4 - \theta_1^4)}{1 + \frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} F_{1-2} + \frac{1+\varepsilon_2}{\varepsilon_2} F_{2-1}} \qquad \text{(III.20)}$$

Il est possible de définir, comme pour la convection, un coefficient équivalent qui linéarise l'équation (III.20). Ceci est possible lorsque les températures mises en jeu ne sont pas très importantes et lorsque l'effet de rayonnement n'est pas un mode de transfert prépondérant, comme c'est le cas pour les machines électrique [10]. Dans ce cas, la relation (III.20) devient :

$$\varphi = h_r(\theta_2 - \theta_1) \qquad \text{(III.21)}$$

Ou :

$h_r = \frac{\sigma F_{1-2}(\theta_1 - \theta_2)(\theta_1^2 + \theta_2^2)}{1 + \frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} F_{1-2} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2} F_{2-1}}$ est le coefficient d'échange par rayonnement [w/m².◦C].

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Dans le cadre de notre travail ont négligeons les effets de transfert de chaleur par rayonnement. En effet, dans une machine électrique, l effet du rayonnement ne peut exister que vers le milieu extérieur, alors en trouve que l'effet de la convection qui est prépondérant.

III.5 Application à la machine étudiée

Nous ne considérons ici que le cas des machines tournantes de faibles puissances, totalement fermées et auto-ventilées.

Le schéma d'une machine fermée à auto-ventilation extérieure, une machine asynchrone à cage dans notre cas, est présente par la figure III.4. Le ventilateur, monté en bout d'arbre, tourne avec le rotor duquel il est solidaire et débite un flot d'air sur la surface extérieure de la carcasse. La surface d'échange essentielle avec l'environnement est justement celle de cette carcasse, elle-même augmenté d'ailettes pour accentuer le transfert de chaleur, qui ce fait principalement par convection forcée.

A l'intérieur de la machine, le transfert de chaleur entre les parties solides ce fait par conduction. Le rotor tourne dans l'air emprisonné qui sert d'intermédiaire pour le transfert de chaleur entre les différentes surfaces internes.

A travers l'entrefer, et en absence de la circulation axiale de l'air, la chaleur est transférée radialement depuis la surface du rotor vers le stator. Les modes de transfert que l'on retrouve alors sont la conduction et la convection.

Axialement. Les transferts de chaleur par l'intermédiaire de l'arbre sont réduits compte tenu des surfaces d'échanges réduites disponibles. Les modes de transferts utilisables sont la convection et rayonnement (négligeable) à travers l'air emprisonne qui véhicule la chaleur des extrémités des parties solides (têtes des bobines, anneaux de court circuit, circuit magnétiques) vers les flasques.

Les échanges globaux dans la machine considérée sont présentés sur la figure III.5.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

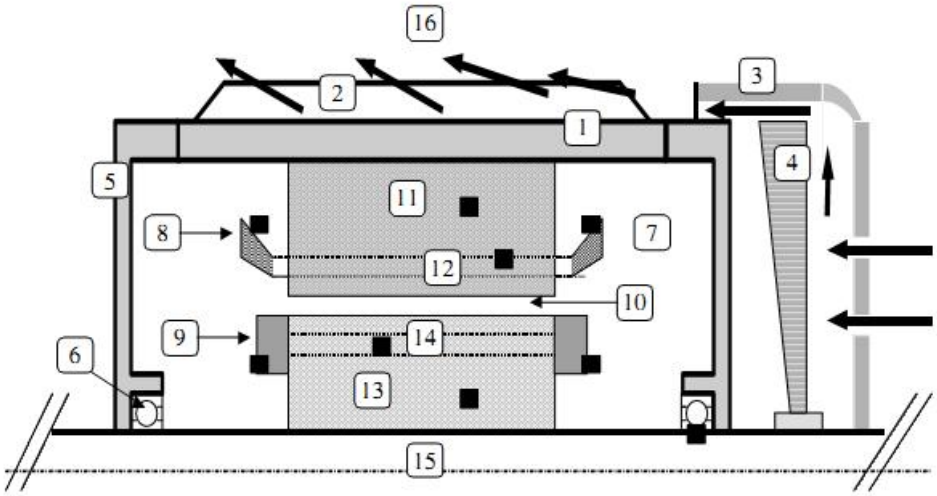


Figure III.4 Transfert de chaleur dans une machine asynchrone fermée et auto-ventilée

■ Source de chaleur interne

→ Circulation de l'air

1. carcasse
2. ailettes
3. cache ventilateur
4. ventilateur
5. flasque
6. roulement
7. air interne
8. têtes de bobines
9. anneau de court circuit
10. entrefer
11. fer statorique
12. encoche statorique
13. fer rotorique
14. barre rotorique
15. arbre
16. air ambiant

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

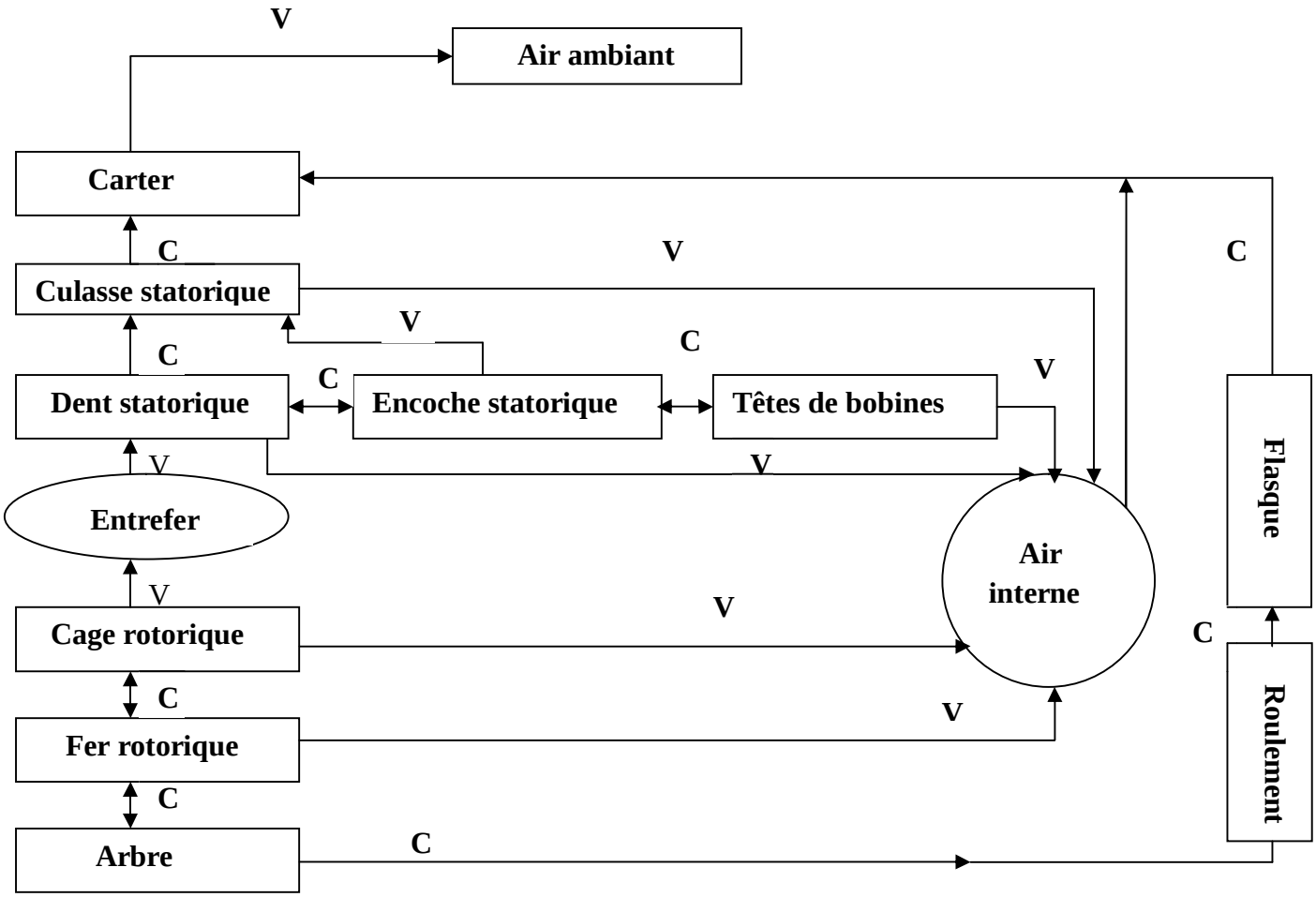


Figure III.4 Carte des échanges thermiques dans une machine fermée et auto-ventilée [12]

C : conduction V : convection

III.6 Conclusion

Nous avons établi ans ce chapitre une représentation de différents mode de transferts de chaleur dans une machine électrique. Des formulations relativement simples des différents modes de transferts de chaleur pour le cas des machines électriques fermées et auto-ventilées. Ainsi qu'une carte des échanges thermiques dans une machine asynchrone à cage ont été présentées.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

chapitre IV

Modélisation thermique d'un moteur asynchrone à cage

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

IV.1 Introduction

Le fonctionnement d'une machine électrique tournante est fortement conditionné par son environnement extérieur et son mode de fabrication. Les conditions ambiantes sont très flottantes selon l'utilisation du moteur (températures, humidité...).

L'étude de comportement thermique des machines électriques fait appel à différentes méthodes. Dans ce chapitre nous allons donner un petit aperçu sur la méthode d'analyse nodale et la méthode des éléments finis sous environnement FEMM 4.2 (heat flow) appliquées à la modélisation thermique des machines asynchrones.

IV.2 méthode nodale

Cette méthode de modélisation, très ancienne [9], consiste à ramener l'étude du comportement thermique à un schéma équivalent électrique en utilisant des résistances et des capacités thermiques. Les pertes constituent alors les sources de courant et le potentiel aux différents nœuds donne la température.

IV.2.1 Méthode des réseaux thermiques équivalents

En toute première approximation, on peut schématiser la machine par un ou deux blocs. Les modèles ainsi établis se prêtent à des calculs analytiques simples. Dans les machines asynchrones où les pertes sont davantage réparties entre le stator et le rotor, On utilise alors des modèles à 3 blocs (bobinage statorique, fer statorique et rotor) [9] ou mieux encore, des modèles à 5 blocs, où l'on tient compte des têtes de bobines [12, 9].

Un nombre bien défini de nœuds et de résistances thermiques est issu de la résolution analytique de l'équation de la chaleur en régime permanent. Ces nœuds sont ensuite raccordés à un nœud central représentant la température moyenne du bloc (le transfert de chaleur est indépendant dans chaque direction). Les pertes et les capacités thermiques (pour l'étude des régimes transitoires) sont injectées en ce nœud, ce qui permet d'écrire l'équation différentielle qui y correspond. En procédant ainsi pour chaque bloc, on obtient un système global d'équations qui traduit le comportement thermique global de la machine.

La figure IV.1 représente les dimensions et les températures d'un élément cylindrique.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

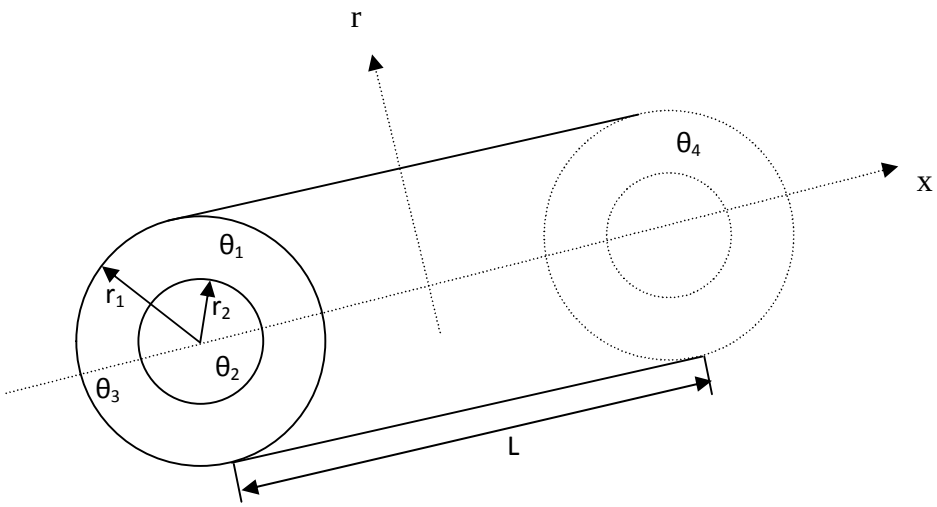


Figure IV.1 Elément cylindrique à deux dimensions [11]

IV.2.2 circuit thermique équivalent dans la direction axiale

Pour un cylindre, la conduction de chaleur en régime permanent dans la direction axiale est régie par l'équation de Poisson :

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} + \frac{q}{\lambda_a} = 0 \qquad \text{(IV .1)}$$

Avec :

x : La direction axiale, mesurée à partir de centre ;

q: Densité volumique des pertes (w/m^3) ;

λ_a : Conductivité thermique dans la direction axiale.

La résolution analytique de l'équation IV.1 permet d'établir le circuit thermique dans la direction axiale, figure IV.2. Sur cette figure, θ_{moy} représente la température moyenne du cylindre dans la direction axiale. Les différentes résistances sont données par les expressions suivantes [11] :

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

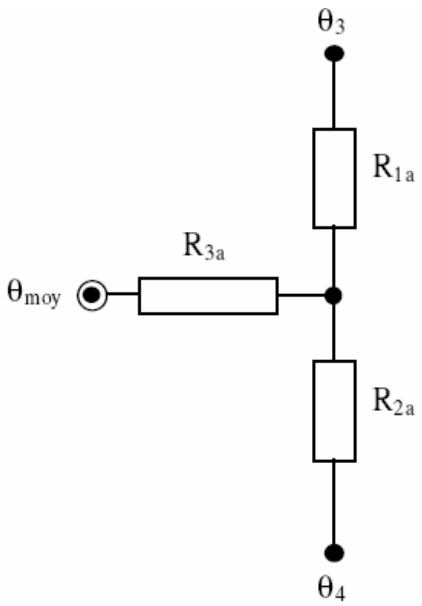


Figure IV.2 Circuit thermique équivalent dans la direction axiale

$$R_{1a} = \frac{R_0}{2} = \frac{L}{2.\pi.\lambda_a.(r_1^2 - r_2^2)} \quad \text{(IV .2)}$$

$$R_{2a} = \frac{R_0}{2} = \frac{L}{2.\pi.\lambda_a.(r_1^2 - r_2^2)} \quad \text{(IV .3)}$$

$$R_{3a} = -\frac{R_0}{6} = \frac{-L}{6.\pi.\lambda_a.(r_1^2 - r_2^2)} \quad \text{(IV .4)}$$

R_0 est la résistance thermique dans la direction axiale, elle est donnée par l'expression :

$$R_0 = \frac{L}{\pi.\lambda_a.(r_1^2 - r_2^2)} \quad \text{(IV .5)}$$

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

IV.2.3 Circuit thermique équivalent dans la direction radiale

Le transfert de chaleur par conduction dans la direction radiale, est régi par l'équation de Poisson à une dimension. Elle est donnée par :

$$\frac{d^2\theta}{dr^2}+\frac{1}{r}\frac{d\theta}{rdr}+\frac{q}{\lambda_r}=0 \qquad \text{(IV .6)}$$

λ_r : La conductivité thermique dans la direction radiale.

La solution de l'équation IV.6 permet d'établir le circuit thermique équivalent. Dans le cas d'une symétrie par rapport au plan médian, nous obtenons le circuit thermique illustré par la figure IV.3. Les différentes résistances thermiques sont données les expressions suivantes:

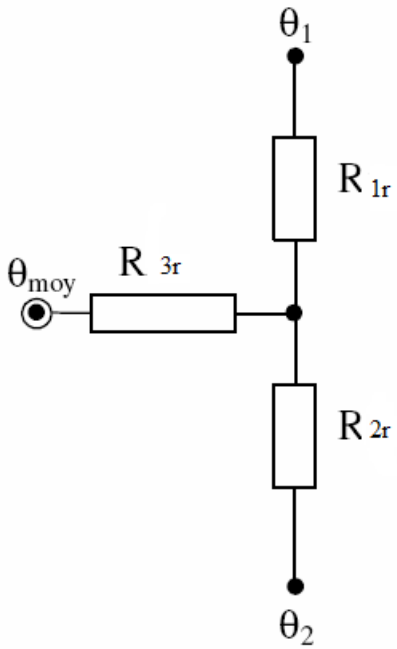


Figure IV.3 Circuit thermique équivalent dans la direction radiale

$$R_{1r}=\frac{1}{4.\pi.\lambda_r.L}\left[1-\frac{2r_2^2\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}{(r_1^2-r_2^2)}\right] \qquad \text{(IV .7)}$$

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

$$R_{2r} = \frac{1}{4.\pi.\lambda_r.L}\left[\frac{2r_1^2 \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}{(r_1^2 - r_2^2)} - 1\right] \quad \text{(IV .8)}$$

$$R_{3r} = \frac{-1}{8.\pi.(r_1^2 - r_2^2)}\left[r_1^2 + r_2^2 - \frac{4r_1^2 r_1^2 \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}{(r_1^2 - r_2^2)}\right] \quad \text{(IV.9)}$$

En couplant le circuit radial et axial à la position de la température moyenne, un modèle complet d'une section d'un cylindre creux est obtenu comme le montre la figure IV.4.

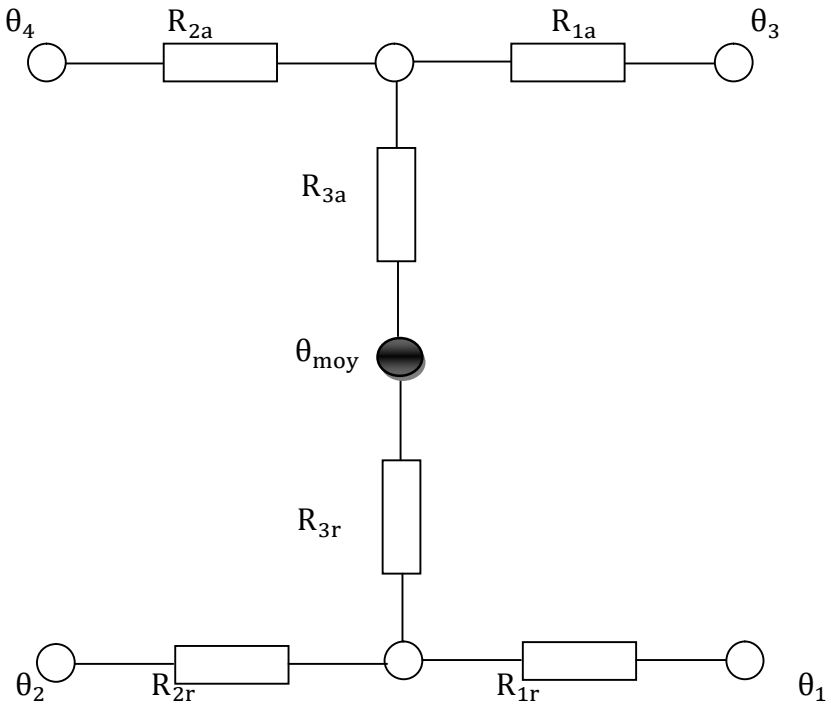


Figure IV.4 Circuit thermique équivalent d'un cylindre creux

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Si on admet que les températures dans le cylindre sont symétriques par rapport au plant radial de sorte à ce que les températures θ_3 et θ_4 soient égales, il est alors seulement nécessaire de modéliser la moitié du cylindre. Le réseau thermique est alors réduit à la forme montrée dans la figure IV.5, formé de quatre résistances R_a, R_b, R_c et R_m qui sont données par [11] :

$$R_a = R_{1a} + 2R_{3a} = \frac{L}{6\pi\lambda_a(r_1^2 - r_2^2)} \tag{IV.10}$$

$$R_b = 2R_{1r} = \frac{1}{2\pi\lambda_r L}\left[1 - \frac{2r_2^2 \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}{(r_1^2 - r_2^2)}\right] \tag{IV.11}$$

$$R_c = 2R_{2r} = R_{2r} = \frac{1}{2.\pi.\lambda_r.L}\left[\frac{2r_1^2 \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}{(r_1^2 - r_2^2)} - 1\right] \tag{IV.12}$$

$$R_m = 2R_{3r} = \frac{-1}{4.\pi.(r_1^2 - r_2^2)}\left[r_1^2 + r_2^2 - \frac{4r_1^2 r_1^2 \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}{(r_1^2 - r_2^2)}\right] \tag{IV .13}$$

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

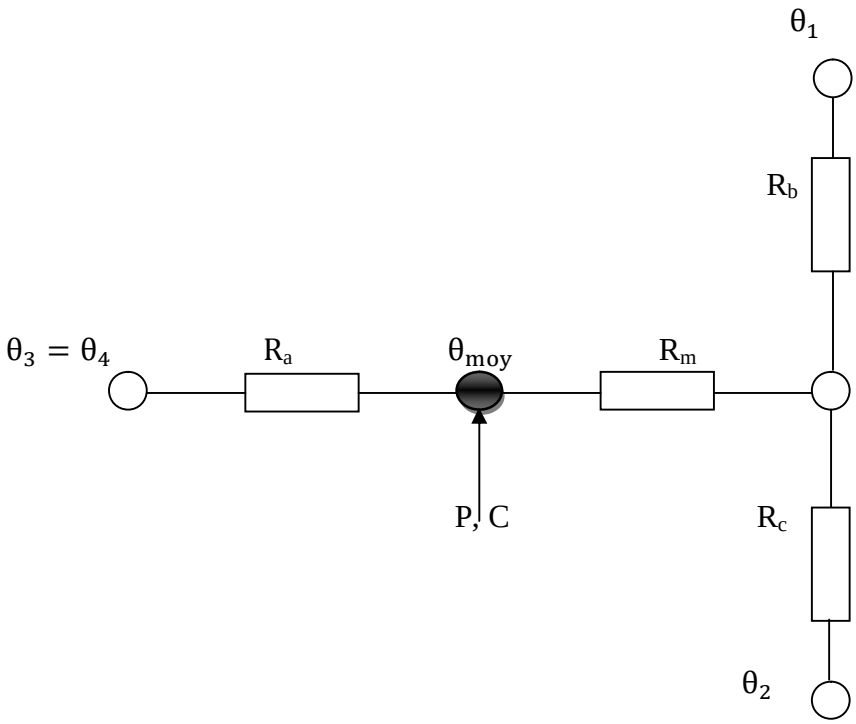


Figure IV.5 Circuit thermique équivalent pour un élément symétrique

Ce réseau permet de tenir compte des conductivités axiale et radiale peut être utilisé pour modéliser tout élément de la machine possédant une configuration géométrique d'un cylindre creux (le fer statorique et rotorique, l'enroulement dans l'encoche et les têtes de bobines ainsi que l'arbre de la machine).

Globalement pour des études plus appliquées et moins fondamentales. Il convient cependant de connaître l'ensemble des paramètres thermophysiques propres à la machine étudiée (masses volumiques, capacités thermiques massiques et conductivités).

IV.3 Méthode des éléments finis

Afin de connaitre l'évolution de la température en tout point de la machine, il est nécessaire de connaitre la distribution précise des densités de pertes dans le moteur ; ce qui nécessite le recours aux méthodes numériques et particulièrement la méthode des éléments finis.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

La méthode des éléments finis a été successivement appliquée pour résoudre divers types de problème aux dérivées partielles ; c'est pourquoi elle est aujourd'hui très utilisée dans l'analyse des problèmes thermiques.

IV.3.1 Principe de la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis permet donc de résoudre de manière discrète une équation aux dérivées partielles dont on cherche une solution approchée « suffisamment » fiable. De manière générale, cette EDP porte sur une fonction *u*, définie sur un domaine. Elle comporte des conditions aux bords permettant d'assurer existence et unicité d'une solution.

Sauf cas particuliers, la discrétisation passe par une redéfinition et une approximation de la géométrie, on considère donc le problème posé sur la géométrie approchée par un domaine polygonal ou polyédrique par morceaux. Une fois la géométrie approchée, il faut choisir un espace d'approximation de la solution du problème, dans la MEF, cet espace est défini à l'aide du maillage du domaine (ce qui explique aussi pourquoi il est nécessaire d'approcher la géométrie). Le maillage du domaine permet d'en définir un pavage dont les pavés sont les éléments finis. Un élément fini est la donnée d'une cellule élémentaire et de fonctions de base de l'espace d'approximation dont le support est l'élément, et définies de manière à être interpolantes.

La solution trouvée, il reste cependant à déterminer les caractéristiques de la méthode ainsi développée, notamment l'unicité de l'éventuelle solution ou encore la stabilité numérique du schéma de résolution. Il est essentiel de trouver une estimation juste de l'erreur liée à la discrétisation et montrer que la méthode ainsi écrite converge, c'est-à-dire que l'erreur tend vers 0 si la finesse du maillage tend elle aussi vers 0.

IV.3.2 Etudes 2D et 3D

Les études 2D en régime permanent sont nombreuses et concernent tous les types de machines. L'apport du 3D, quoique plus lourd à mettre en œuvre, colle beaucoup plus au comportement réel. La figure IV.6 montre les deux plans axial et radial que l'on étudie en général en 2D.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

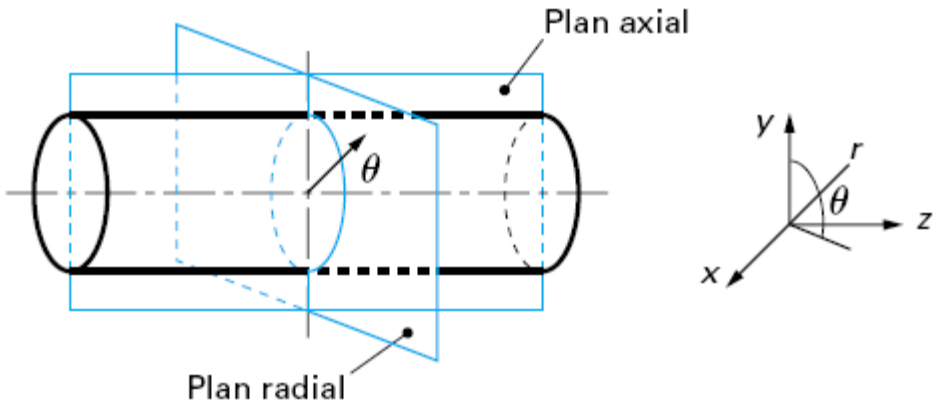


Figure IV.6 Plan d'étude 2D

IV.3.3 Logiciel FEMM

Bien qu'il existe de nombreux logiciels exploitant cette méthode et permettant de résoudre des problèmes dans divers domaines, il est important que l'utilisateur ait une bonne idée de ce qu'il fait, notamment quant au choix du maillage et du type d'éléments qui doivent être adaptés au problème posé : aucun logiciel ne fera tout pour l'utilisateur, et il faut toujours garder un œil critique vis-à-vis de solutions approchées. Pour cela il existe des indicateurs d'erreur et des estimateurs d'erreur qui permettent d'ajuster les différents paramètres.

Parmi ces logiciels, on distingue le logiciel FEMM que nous adoptons pour la résoudre du problème thermique, vu sa disponibilité et sa facilité et rapidité de résolution.

FEMM est une suite de programmes pour résoudre des problèmes statiques et de basses fréquences en magnétisme. Les programmes actuels s'adressent aux problèmes bidimensionnels dans les domaines cartésiens et axisymétriques.

FEMM est divisé en trois parties [13] :

a) Préprocesseur (femme.exe)

C'est un programme permettant de définir la géométrie de la structure à étudier et d'affecter les propriétés des matériaux dans chaque région et les conditions aux limites choisies, ainsi que le type de problème à résoudre (plan, axisymétrique).

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

b) Solutionner (fkerne.exe)

Le solutionneur prend en considération le problème complètement défini et résout les équations de MAXWELL appropriées pour obtenir des valeurs du potentiel magnétique à travers tout le domaine d'étude.

c) Post processeur (femmview.exe)

C'set une interface graphique qui permet de traiter les résultats fournis par le solutionneur dans les différentes régions, le programme permet aussi à l'utilisateur d'inspecter le champ dans n'importe quel point de la structure.

Deux programmes additionnels sont appelés pour accomplir des taches spécialisées, Ceux-ci sont :

- **Triangle.exe :** c'est programme qui décompose la région d'étude en un grand nombre de triangles, une partie essentielle du processus de la MEF.
- **Femmplot.exe :** c'est un petit programme employé pour tracer les diverses courbes.

IV.3.4 Langage de programmation LUA

Le langage LUA est également intégré dans le pré et le post-processeur. Il suffit d'écrire un programme ou donner des instructions dans la console LUA pour commander les étapes de calculs. Toute modification sur le domaine d'étude, analyses ou exploitations des résultats peut être effectuée de manière automatique par un programme en LUA sans l'intervention manuelle de l'utilisateur.

Pour résoudre un problème donné sous l'environnement FEMM, nous effectuons les opérations suivantes :

1. Définir le problème (unité, épaisseur, précision, angle minimale).
2. Tracer la structure géométrique en :

   - Ajoutant des points.

   - Connectant les différents points avec des lignes ou des arcs de segment.

3. Ajouter les propriétés des matériaux qui constituent la structure d'étude.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

4. Ajouter les densités de pertes à injecter.
5. Ajouter des « blocs label » dont les quels nous affectons les différentes propriétés.
6. Ajouter des groupes.
7. Ajouter des conditions aux limites et puis les affecter.
8. Mailler la structure après l'avoir enregistrée.
9. Résoudre le problème.
10. Visualiser les résultats.

Le maillage de la structure avec FEMM se fait automatiquement en utilisant des éléments triangulaires.

IV.4 Conclusion

Nous avons parlé dans ce chapitre de la méthode de modélisation par réseau thermique équivalent. Un élément cylindrique est utilisé comme base pour modéliser les différentes parties constituant le moteur. Pour cette géométrie simple, la résolution des équations différentielles de transfert de la chaleur dans les deux directions radiale et axiale permet d'obtenir une distribution exacte de la température. Ainsi l'établissement d'un circuit thermique équivalent est possible. Nous avons présenté en suite la méthode des éléments finis de manière globale, et les étapes nécessaires qui nous permettent la résolution d'un problème physique, et nous avons aussi présenté le logiciel «FEMM» que nous allons considérer comme l'outil de résolution du problème thermique et les résultats obtenu sont illustré dans le chapitre suivant.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

chapitre V

Application et validation

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

V.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons rappelé les étapes nécessaires qui permettent la résolution d'un problème physique par la méthode des éléments finis sous environnement FEMM. Dans ce chapitre, nous donnons les résultats obtenus par ce calcul numérique qui nous permettra de déterminer la distribution des températures dans la machine considérée, ainsi que l'effet de la variation de l'épaisseur de la zone de contact (carcasse, fer statorique) sur l'évolution de la température dans la machine. Enfin, en vue de valider le modèle, une comparaison des résultats obtenus expérimentalement [11].

V.2 Description de la machine étudiée

- La machine étudiée est un moteur asynchrone triphasé tétra polaire à cage auto-ventilée, fabrique par l'entreprise Electro-industrie Azazga tizi ouzou (ENEL), de petite puissance (2.2KW).
- Le bobinage statorique est monte en triangle sous une tension nominale de 380V, le courant nominal est de 5.2A et la vitesse de rotation nominale est de 1410 tr/min. la cage rotorique est en aluminium moule directement sur les tôles assurant ainsi leur serrage.
- La machine complètement fermée est auto-ventilée, un ventilateur radial est monte en bout d'arbre formant ainsi un system de refroidissement forcée, les caractéristiques nominale de la machine sont données sur le tableau V.1 :

Caractéristiques	**Valeurs**	**Unités**
Puissance utile	2.2	kW
Nombre de phases	3	–
Fréquence d'alimentation	50	Hz
Vitesse de rotation	1500	Tr/min
Glissement	4.66	%
Tension d'alimentation	380	V
Connexion des enroulements	Triangle (Δ)	–
Courant absorbé	5.2	A
Facteur de puissance	0.83	–
Rendement	78	%
Resistance d'une phase au stator a 20 °C	7.63	Ω
Hauteur d'axe	100	Mm
Couple nominal	15	N.m

Tableau V.1 Caractéristiques nominale de la machine étudiée [11]

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

V.3 Application

V.3.1 Structure étudiée

La structure complète du moteur étudié en 2D est présentée sur la figure V.1

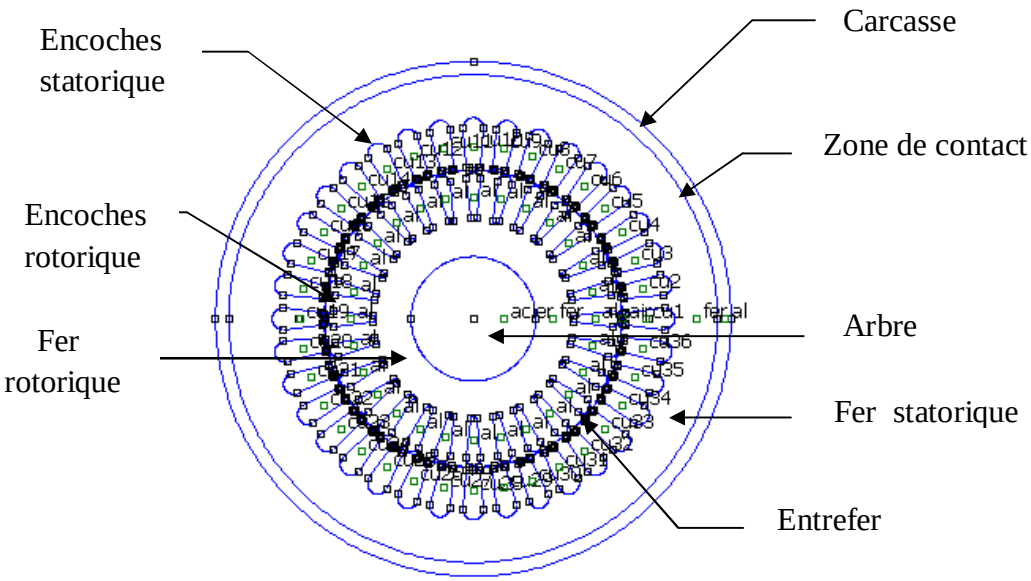


Figure V.1.1 Structure de la machine étudiée

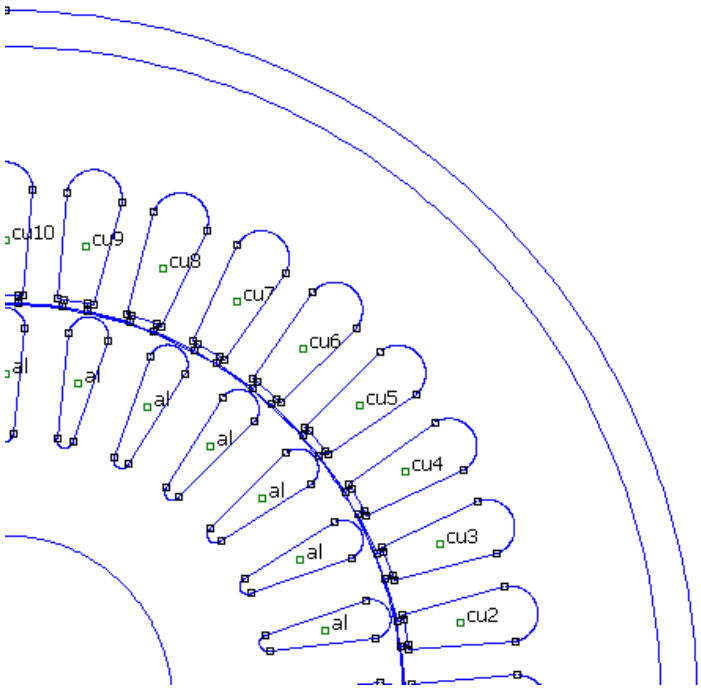


Figure V.1.2 Zoom de la structure

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

V.3.2 Hypothèses de travail

- Nous ne considérons que le cas isotrope et linéaire, toutes les propriétés thermos physiques des matériaux utilisent étant isotropes et indépendante de la température.
- Les pertes fer rotorique sont négligées car le circuit magnétique est feuilleté, et la fréquence des courants induits dans le rotor est très faible (glissement de 4.66%).
- En raison de la lenteur des processus thermiques, le mouvement du rotor n'est pas pris en compte. Les positions respectives du rotor et du stator sont donc choisies arbitrairement.
- Le transfert de chaleur dans le l'entrefer est suppose purement conductif. Cela est du à l'absence de circulation de l'air d'une part et à la faible épaisseur de l'entrefer (0.25mm) d'autre part. ainsi, toutes les pertes générées à la surface du rotor sont transférées radialement vers le stator via l'entrefer.

V.3.3 Evaluation des paramètres thermo physiques

Dans notre calcul de la température dans la machine étudiée nécessite la connaissance des paramètres thermo physiques (conductivités thermiques et toutes les pertes générées).

V.3.3.1 Conductivité thermique

Nous avons regroupé dans le tableau V.2 les valeurs des conductivités thermiques des différentes matériaux utilises dans la construction électrique.

Matériaux	**Conductivité thermique (W/m°C)**
Acier	40-75
Cuivre	386
Aluminium	204
Tôles Direction radiale Direction axiale	 45-55 1.97
Vernis isolant	0.15-0.86

Tableau V.2 Conductivités thermiques des matériaux utilisés dans la construction électrique [11]

Pour notre machine les valeurs de la conductivité de différentes parties de la machine sont présentées sur le tableau V.3

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Régions	Conductivités thermiques (w/m°C)
Arbre (acier)	45
Fer statorique	35
Fer rotorique	50
Encoche rotorique et carcasse (aluminium)	204
Entrefer (air)	0.03

Tableau V.3 conductivités thermiques du modèle présenté

V.3.3.2 Les pertes générées

Toutes les pertes générées dans le moteur étudié en régime nominale sont illustrées dans le tableau V.4.

Type de pertes	Grandeurs (W)
Pertes joules statorique	300
Pertes joules rotorique	122
Pertes fer	181
Pertes mécaniques	50

Tableau V.4 Distribution des pertes dans la machine en régime nominale [11].

La densité volumique de ces pertes est obtenue devisant simplement la valeur de chacune par le volume de l'endroit correspondant et les dimensions de la machine sont indiquées en annexe A.

V.4 Validation des résultats et discussion

Avec le logiciel FEMM, l'opération du maillage est très simple, car elle se fait automatiquement. Après avoir enregistré la structure déjà construite dans la partie préprocesseur, on exécute le programme auxiliaire de triangulation, Triangle.exe. Le maillage de la structure étudiée est représenté sur la figure V.2

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

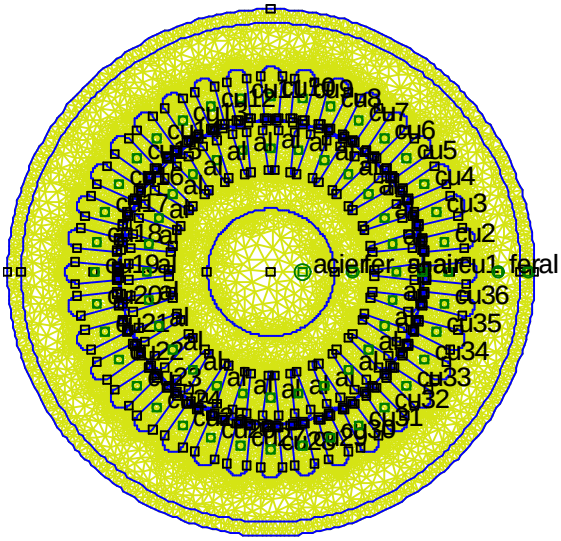


Figure V.2 maillage de la structure étudiée

Dans le but d'obtenir une vraie distribution de température dans la machine, nous avons introduit la condition de convection sur le contour avec un coefficient d'échange du milieu ambiant d'environ 224 $W/m^2\,^{\circ}C$

Le tracé des lignes isothermes à pleine charge est représenté sur la figure V.3

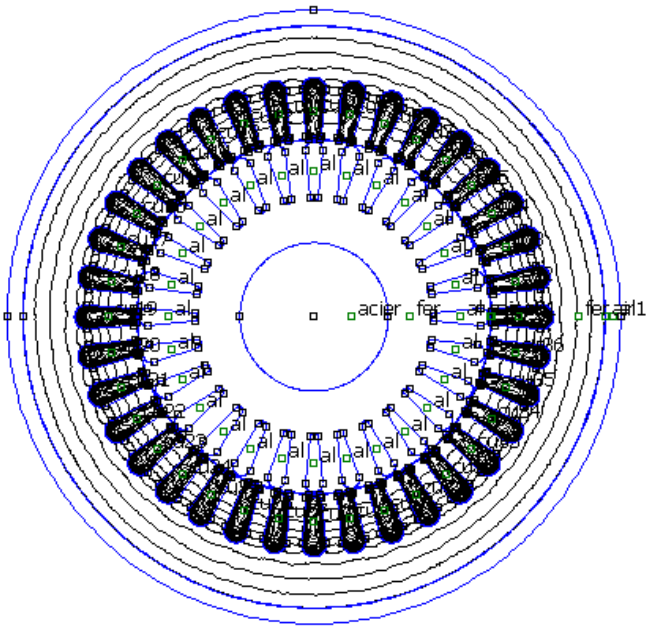


Figure V.3.1 Les lignes isothermes a pleine charge (=5.2A et =4.66%)

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

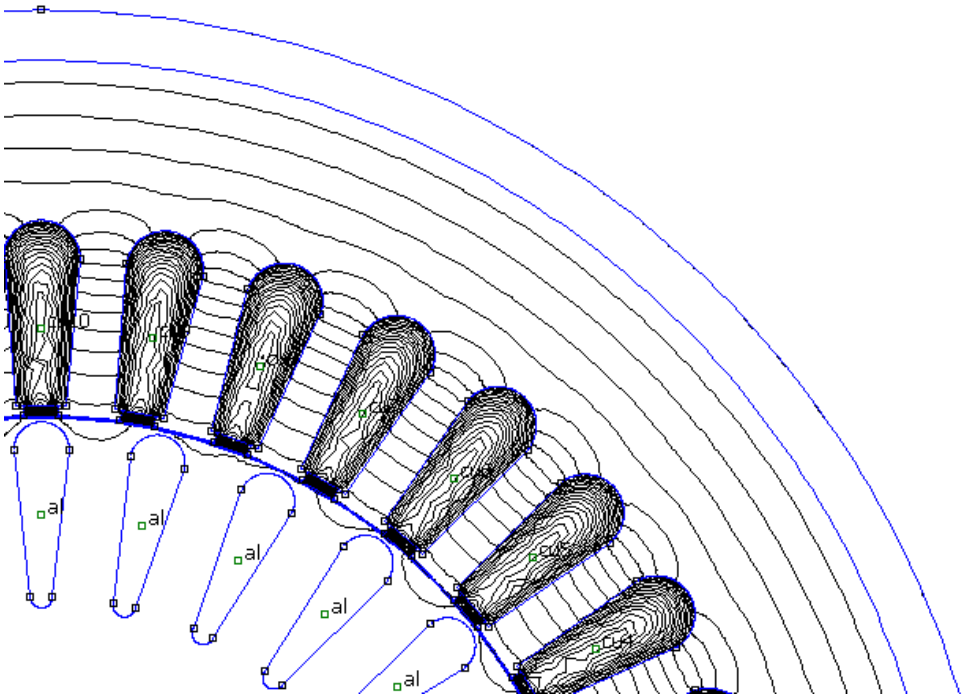


Figure V.3.2 Zoom des lignes isothermes

Nous présentons sur la figure V.4 la carte de température de la machine en régime permanent

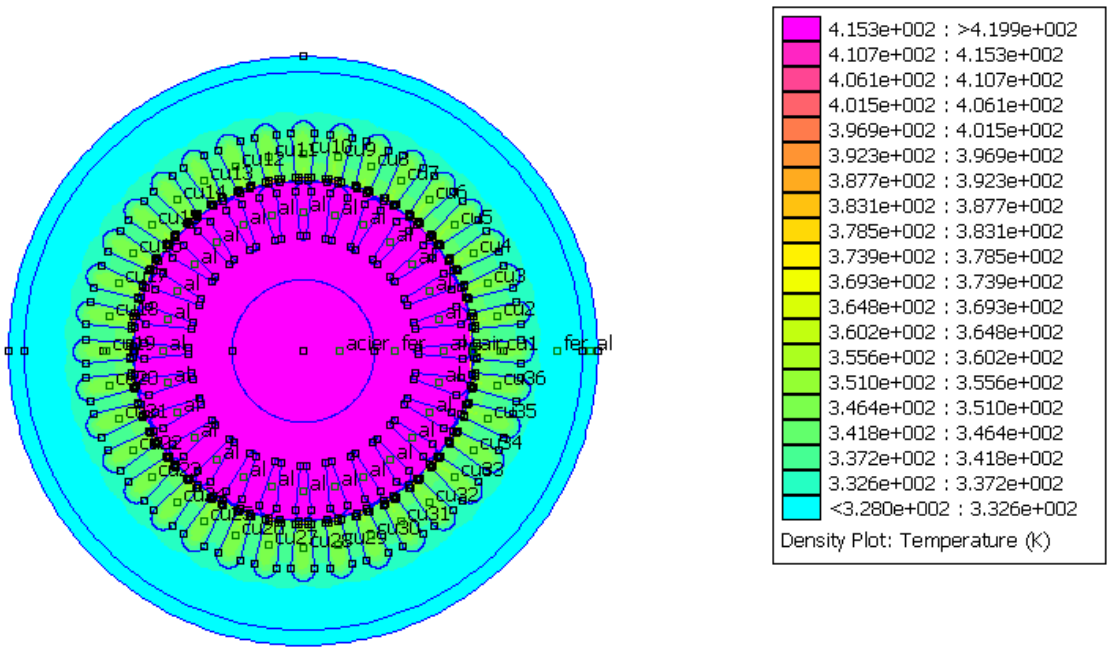


Figure V.4 Carte de température de la machine en régime permanant [K]

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

V.4.1 les essais sous FEMM

Dans le but de voir la distribution de la température dans la machine on a effectuée deux essais :

1. On tracer un arc AB traverse les encoches statorique (voir la figure V.5)

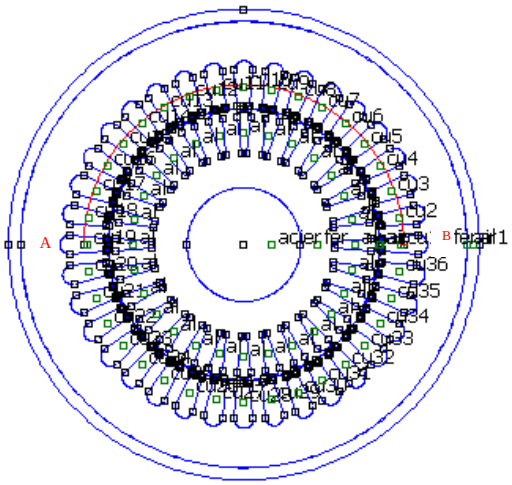


Figure V.5 trace de l arc AB

L'évolution de la température le long de l'arc AB en fonction de l'angle est présentée sur la figure V.6.

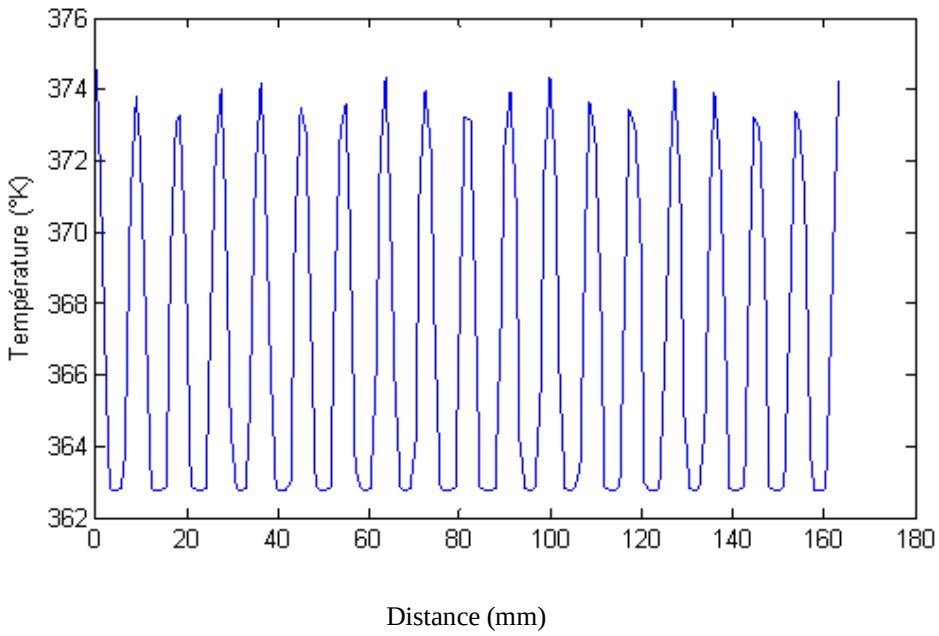


Figure V.6 Evolution de la température le long de l'arc AB

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

2. On trace un segment droit CD traverse le centre de l'arbre jusqu'à la carcasse (voir la figure V.7).

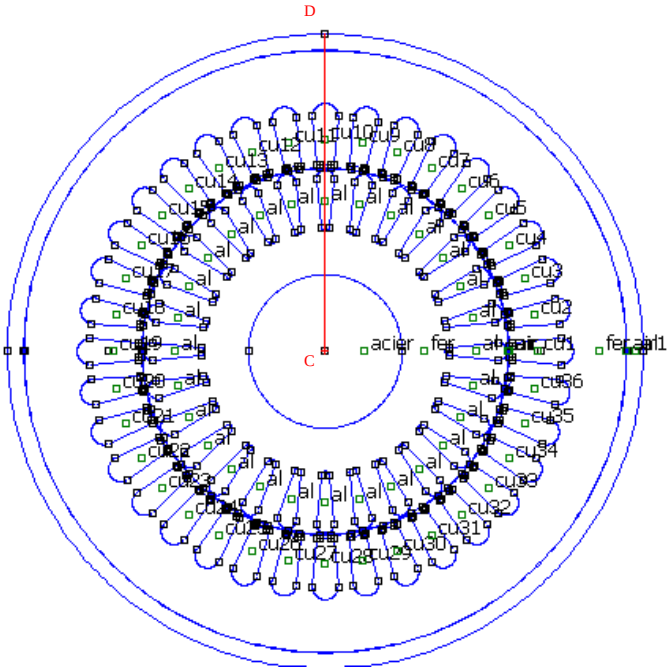


Figure V.7 Tracer de segment CD

L'évolution de la température le long de segment CD en fonction de la distance est présentée sur la figure V.8.

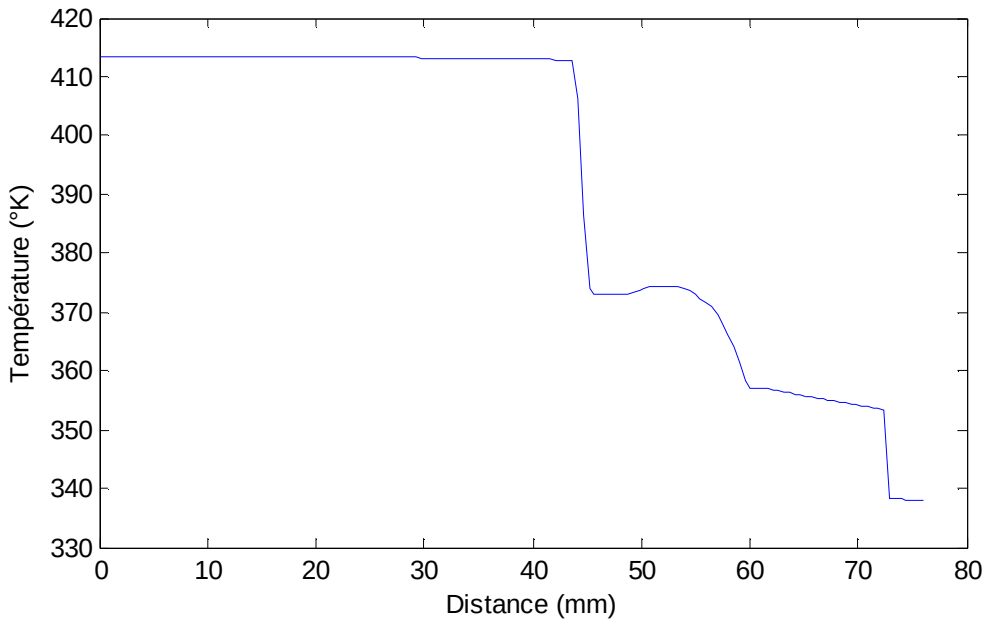


Figure V.8 Evolution de la température le long de segment CD (épaisseur de contact=0.1mm)

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

V.4.2 Evolution de la température le long de l'entrefer

A cause de la mauvaise conductivité thermique dans l'entrefer on a remarque une grande différence de température entre le rotor et le stator, l évaluation de la température le long de l'entrefer est présentée sur la figure V.9.

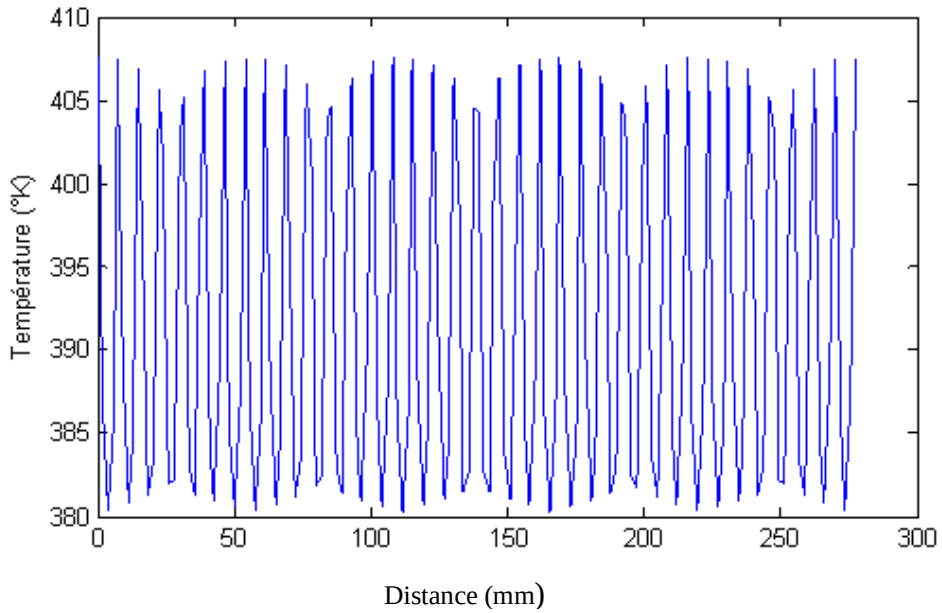


Figure V.9 Evolution de la température le long de l'entrefer

V.4.3 Comparaison des résultats simulées et mesurées en régime nominale

Le tableau V.5 montre la comparaison des résultats expérimentaux [11] avec les résultats de simulation pour le fonctionnement nominal.

Eléments	**Températures simulées [◦C]**	**Températures mesurée [◦C]**	**Erreur [%]**
Carcasse	58	57.93	0.12
Dos statorique	83.44	80.54	3.47
dent statorique	91.39	90	1.52
Enroulement	105.34	103.43	1.81
Rotor	113.5	118.87	4.73
Entrefer	113	—	—
Arbre	114	—	—

Tableau V.5 Comparaison des températures simulées et mesurées pour le point nominal.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

En analysant les résultats obtenus on peut remarque :

1. Au niveau de rotor les températures sont pratiquement identiques a cause de la bonne conductivité thermique de l'aluminium de la cage d'une part et a la compacité de la structure de rotorique ou de bons contacts thermiques existent entre l'arbre, la cage et les tôles, alors on peut considérer le rotor une partie homogène.

2. Au niveau de stator la température des enroulements plus élevée. Une différence de 22◦C existe entre le fer et l'encoche, ceci du a la présence des isolants qui possèdent une faible conductivité thermique.

3. La différence des températures entre le stator et le rotor dû à une faible conductivité thermique dans l'entrefer.

4. La différence des températures entre le fer statorique et la carcasse dû à une faible conductivité thermique dans la zone de contact (fer statorique-carcasse).

5. En effet la température de la machine décroit au fur et à mesure que l'on s'éloigne du rotor et que l'on se dirige vers l'extérieur car le stator est l'élément le plus proche de la carcasse elle-même en contact avec le milieu ambiant qui assure l'évacuation d'une grande partie de chaleur produit dans le moteur

V.4.4 Etude de la sensibilité du modèle à la variation de l'épaisseur de contact

On a présentée sur la figure V.10 l'évolution de la température dans la machine pour trois valeurs d'épaisseur de contact (fer statorique-carcasse).

Au début on a prés l'épaisseur de contact 0.1 mm puis de 0.15 mm en dernier 0.2 mm

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

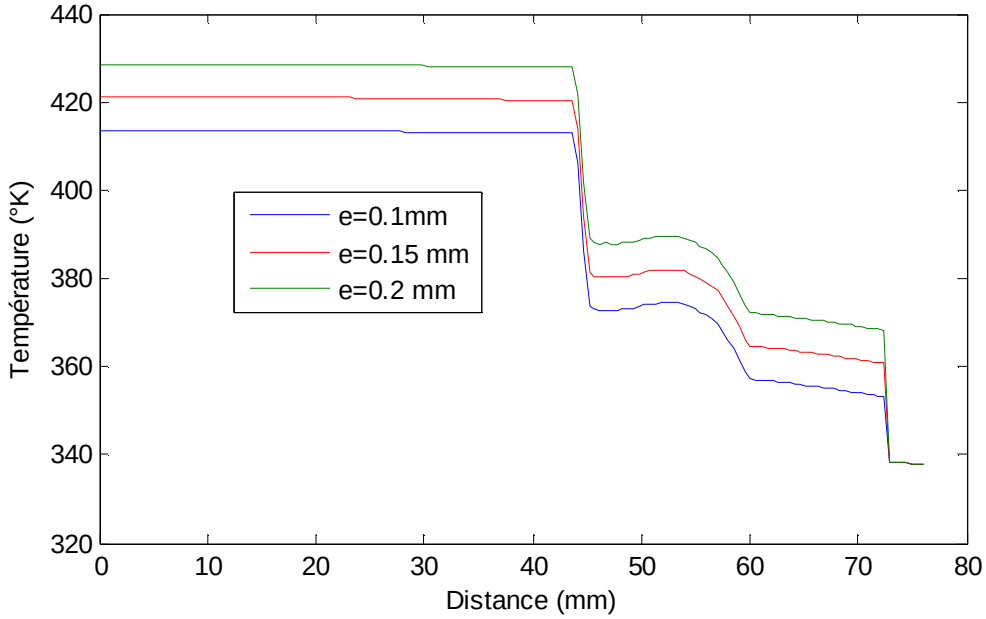


Figure V.10 Influence de l'épaisseur de contact sur l'évolution de la température dans la machine

La figure V.10 montre la variation de la température en fonction de l'épaisseur de contact on remarque que la variation est linéaire dans les différentes endroits de la machine, on remarque que la température augment de 8 ◦C pour chaque augmentation de l'épaisseur de contact.

V.5 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté une modélisation numérique de comportement thermique d'un moteur asynchrone à cage, en régime nominale en utilisant la méthode des éléments finis sous environnement FEMM , les résultats obtenus par la simulation compares aux résultats mesure sont satisfaisants, surtout pour la partie statorique, pour le rotor, a cause de la difficulté d'avoir un système de mesure plus précis.les résultats de simulation montrent que cette partie peut être considérée comme un ensemble homogène ou la température des différents matériaux est pratiquement uniforme. Et on peut dire que l'étude en deux dimensions permet de donner la distribution de la température mais aux extrémités de la machine ne peuvent pas être obtenus, car l'étude thermique réellement un problème 3D.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Conclusion générale

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

La modélisation thermique des machines asynchrones demeure toujours un problème complexe dans la conception des machines électriques. A ce niveau, deux tendances se distinguent : la modélisation nodale et la modélisation par éléments finis.

Il n'existe pas de modèle universel ni d'outil universel de modélisation. Les méthodes de modélisation doivent être plutôt complémentaires.

Le but qui nous a été assigné dans cette étude est la modélisation thermique bidimensionnelle en régime permanant, d'un moteur asynchrone à cage, basée sur la méthode des éléments finis afin de déterminer la répartition de la température en tout point de cette machine. Pour ce faire nous avons utilisé un logiciel FEMM 4.2 (heat flow) de résolution des équations de chaleur que nous avons adaptées au problème thermique.

Les résultats obtenus de cette présente études et ceux mesurés [12] sont en bonne concordance. L'étude en 2D par éléments finis semble être suffisante pour caractériser l'échauffement en régime permanent des différentes parties de la a machine considérée. Cependant, les températures aux extrémités de la machine ne peuvent être obtenues car la modélisation 2D. Il est également nécessaire de traiter le problème thermique en 3D. Quoique plus lourd à mettre en œuvre, la modélisation thermique tridimensionnelle est complète et plus précise.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Références bibliographiques

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

[1] D .Roye, « Modélisation thermique des machine électriques tournantes : application à la machine a induction », Thèse de docteur d'Etat es-sciences, INP Grenoble, 1983.

[2] B. Eyglunent, « Manuel de thermique », Ed. Hermes, Paris, 1997.

[3] G. Didier, « Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de Défaillances », Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université Henri Poincaré, Nancy I.Oct 2004.

[4] N. Benamrouche, « Machines électriques II », Cours de 4^{éme} année électrotechnique, U.M.M.T.O, 2010.

[5] M. Bouheraoua, « Contribution à la modélisation thermique d'un moteur asynchrone à cage », Mémoire de magister, U.M.M.T.O, 2001.

[6] N. Benamrouche, « An investigation of the loss distribution in induction motors fed from nonsinusoidal supplies », Phd Thesis, univ of Sheffield, mai1990.

[7] S.V. Patankar, « Numerical heat transfer and fluid flow », Ed. Hemisphere publishing corp., New York, 1980.

[8] F. P. Incropera, D. P. de Witt, « Fundamentals of heat and mass transfer », John Wiley & Sons Inc., New York (USA), 2nd. Edition, 1985, 802 p.

[9] : S. Mezani « Modélisation électromagnétique et thermique des moteurs a induction, en tenant compte des harmoniques d'espace », Thèse de doctorat l'INPL 08 Juillet 2004.

[10] I.J.Perez., J.G.Kassakian., « A stationary thermal model for smooth air-gap rotating electric machines », Elec.Mach.Eletromech.vol.3-4 pp.285-303,1979.

[11] M. Bouheraoua, « Contribution à la modélisation d'un moteur asynchrone à cage », Thèse de doctorat, U.M.M.T.O, 2009.

[12] S.Mezni, « Modélisation thermique d'un moteur asynchrone à cage », Mémoire de magister, U.S.T.H.B (alger), juillet 1999.

[13] DAVID MEEKER, www.femm.foster-miller.net, « Finite element method magnetics, version 4.2-User's Manual ».

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Annexe

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

A.1 Dimensions géométriques de la machine

Composante	valeur	Unités
Diamètre extérieur	153	mm
Diamètre intérieur	145	mm
Langueur axiale	192	mm
Nombres d'ailettes	40	-
Hauteur de l'ailette	20	mm
Distance entre deux ailettes	10	mm

Tableau A.1 : Dimensions de la carcasse

Composante	Valeur	Unités
Diamètre extérieur	145	mm
Diamètre intérieur	88.5	mm
Diamètre intérieur de la culasse	119.53	mm
Longueur axiale	110	mm
Nombres d'encoches	36	mm
Section de l'encoche	70.4	mm^2
Epaisseur du caniveau d'encoche	0.225	mm
Nombres de brins actifs par encoche	64	-
Diamètre du conducteur nu	0.71	mm
Diamètre du conducteur isolé	0.753	mm
Section du cuivre dans l'encoche	25.34	mm^2
Epaisseur de l'entrefer	0.25	mm
Classe d'isolation	F	-

Tableau A.2 : Dimensions de stator

Composante	Valeur	Unités
Diamètre extérieur	88	mm
Diamètre extérieur de la culasse	57.75	mm
Diamètre de l'arbre	37.75	mm
Longueur axiale	110	mm
Nombre d'encoches	28	-
Section de l'encoche	45.33	mm^2
Diamètre extérieur de l'anneau de court circuit	86.5	mm
Diamètre intérieur de l'anneau de court circuit	48	mm
Nombre d'ailettes à l'extrémité de l'anneau de court circuit	7	-

Tableau A.3: Dimensions de rotor

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

A.2 Formes et dimensions des encoches

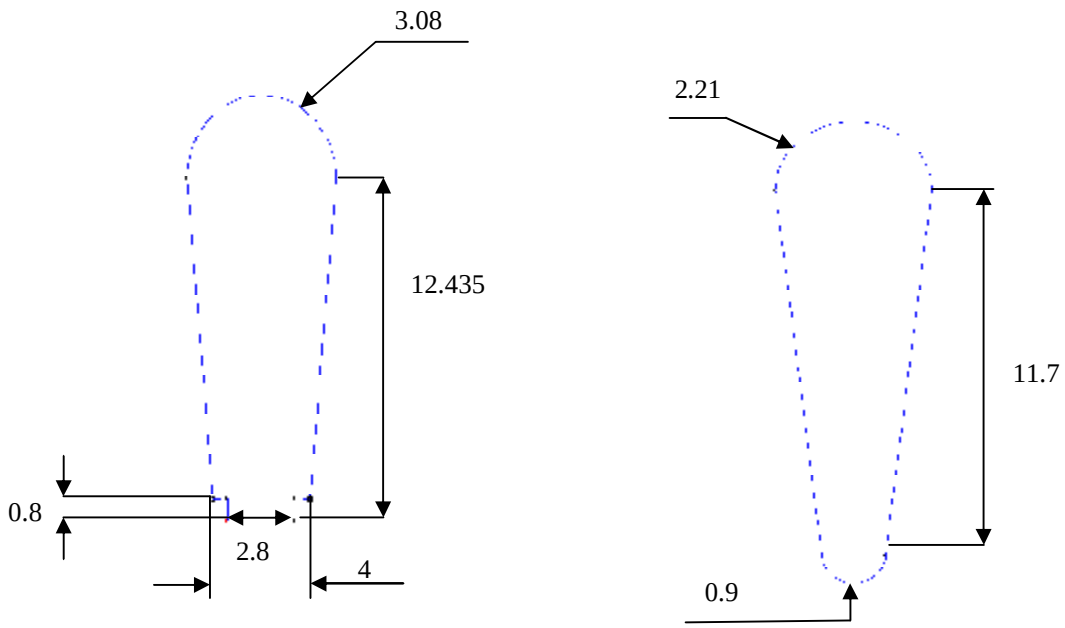


Figure A.1 Formes et dimensions des encoches

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com