

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou

Faculté de Génie Electrique et D'informatique

Département d'Electrotechnique

Mémoire de fin d'études

En Vue de l'Obtention Du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique

Option : Machines Electriques

Thème :
Thème :

**Identification par Algorithmes Génétiques
des Pertes dans un Moteur à Courant
Continu à Excitation Séparée**

Promoteur :

M^r. MIOUAT AZZOUZ

Candidats :

M^r. HAMITOUCHE AKLI

M^r. SELMANI MOHAMED

M^r. ZAMOUM MANSOUR

Promotion 2012-2013

Remerciement

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à notre promoteur M^r MIOUAT AZZOUZ qui nous a orienté et soutenu et qui, par sa collaboration effective et par ses judicieux conseils a rendu possible l'élaboration de ce travail.

Nos remerciements vont également à tous ceux et toutes celles qui nous ont apporté leur aide de près ou de loin.

Que monsieur le président et les membres du jury trouvent ici l'expression de notre gratitude pour nous avoir fait l'honneur de juger ce modeste travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

- *A toute ma famille.*
- *A mes camarades.*
- *A mes amis.*

SELMANI MOHAMED

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

- *A toute ma famille.*
- *A mes camarades.*
- *A mes amis.*

ZAMOUM MANSOUR

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

- *A toute ma famille.*
- *A mes camarades.*
- *A mes amis*

Hamitouche akli

Sommaire

Introduction Générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I **Généralités sur les Machines à Courant Continu**

Introduction	2
I.1 Constitution de la machine à courant continu	2
I.1.1 L'inducteur	3
I.1.2 L'induit	4
I.1.3 Le collecteur	4
I.2 Principe de réversibilité	5
I.2.1 La génératrice à courant continu	5
I.2.2 Le moteur à courant continu	5
I.3 Fonctionnement en mode génératrice	5
I.4 Principe de fonctionnement du moteur à courant continu	6
I.5 Réaction magnétique de l'induit	7
I.6 Pôles auxiliaires de commutation	7
I.7 Equation du moteur à courant continu	7
I.7.1 Force électromotrice	7
I.7.2 Modèle équivalent de l'induit	8
I.7.3 Vitesse	8
I.7.4 Puissance et couple électromagnétique	9
I.7.5 Couple utile, puissance utile	9
I.7.6 Le rendement	10
I.8 Bilan de la puissance	10
I.9 Différents modes d'excitation des machines à courant continu	11
I.9.1 Excitation dérivation ou shunt	11
I.9.2 Excitation série	13
I.9.3 Excitation séparée (indépendante)	15
I.9.4 Excitation composée (compound)	17

I.10	Différents expressions de la machine à courant continu à excitation shunt	19
I.10.1	Expression de la tension d'induit	19
I.10.2	Expression de la force électromotrice	19
I.10.3	Expression de couple électromagnétique	19
I.11	Action sur la tension d'alimentation	20
I.12	Action sur le flux	20
I.13	Les avantages et les inconvénients des machines à courant continu	20
	Conclusion	21

Chapitre II

Les Pertes dans les Machines à Courant Continu

Introduction	22
II.1 Classification des pertes	23
II.2 Les différents types des pertes dans une machine à courant continu	23
II.2.1 Les pertes mécaniques	23
II.2.1.1 Pertes dans les paliers du glissement	23
II.2.1.2 Pertes dans les paliers de roulement	24
II.2.1.3 Pertes par frottement des balais	25
II.2.1.4 Pertes par ventilation	25
II.2.2 Pertes joules	26
II.2.3 Pertes fer	27
II.2.3.1 Pertes par hystérésis	27
II.2.3.2 Pertes par courant de Foucault	28
II.2.3.3 La perméabilité de l'acier et sa résistivité restent constantes	28
II.3 Modélisation des pertes du moteur à excitation séparée	29
II.3.1 Pertes cuivre	29
II.3.1.1 Les pertes joule dans l'induit	29
II.3.1.2 Les pertes joule dans l'inducteur	29
II.3.2 Les pertes par frottement	30
II.3.3 Les pertes fer	30
II.3.3.1 Les pertes par hystérésis	30
II.3.3.2 Les pertes par courant de Foucault	31
II.3.4 Pertes par contact balais collecteur	33
II.3.5 les pertes supplémentaire	33
II.3.6 Pertes totales	33
Conclusion	34

Chapitre III

Identification par Algorithme Génétique du Modèle des Pertes d'un Moteur à Courant Continu

Introduction	35
III.1 Les origines des algorithmes génétiques	35
III.2 Présentation.....	36
III.2.1 Analogie avec la biologie	36
III.2.2 Les outils de la biologie	36
III.2.2.1 Les sélections	36
III.2.2.2 L'enjambement ou croisement ou recombinaison.....	37
III.2.2.3 Les mutations.....	37
III.3 Principe	38
III.4 Critère d'arrêt des algorithmes génétiques.....	40
III.5 Identification par algorithme génétique des pertes d'un moteur à courant continu à excitation séparée	40
III.5.1 Essai expérimental du moteur à courant continu	40
III.5.2 Application de l'algorithme génétique à l'identification du modèle	43
III.5.3 Résultats d'identification des paramètres du modèle de pertes	45
III.5.4 Validation du modèle de pertes identifié	46
III.5.5 Interprétation des résultats	48
sConclusion	49
Conclusion générale.....	50

Introduction générale

Les machines électriques sont destinées à transformer l'énergie d'une forme à une autre. Cette transformation s'accompagne toujours d'une certaine perte de puissance. Cette perte se produit dans la machine elle-même et donne lieu à un échauffement des différentes parties de la machine et à une diminution du rendement de cette machine. Ce problème de pertes préoccupe les ingénieurs dans tous les domaines de l'électrotechnique ; pertes de puissance dans les lignes, dans les transformateurs et dans les machines électriques tournantes. Cette préoccupation vient du fait que l'étude de ces pertes nous révèle comment ces pertes peuvent être réduites pour une éventuelle économie d'énergie [1,2].

Actuellement, les entraînements électriques à base de moteurs à courant continu sont très nombreux à travers plusieurs domaines d'application tels que la traction, le levage, la propulsion des sous-marins, les machines-outils, et d'autres industries. Un taux important d'énergie peut encore être économisé en minimisant les pertes dans ces moteurs [1].

Dans le cadre de notre travail on se propose d'utiliser la méthode d'optimisation par algorithmes génétiques pour identifier un modèle de pertes de puissance dans un moteur à courant continu à excitation séparée qui nous permet de calculer ces pertes avec une meilleure précision.

Notre travail est organisé en trois chapitres. Le premier chapitre présentera des généralités sur les moteurs à courant continu. Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude des pertes dans un moteur à courant continu pour avoir un modèle caractérisant les pertes dans le moteur. Dans le troisième chapitre nous allons présenter l'application de la méthode d'optimisation par algorithmes génétiques pour identifier les paramètres du modèle utilisé.

On terminera notre travail par une conclusion générale qui donnera un résumé du travail effectué et les résultats obtenus.

CHAPITRE I :

Généralités sur les moteurs à courant continu

Introduction

Les moteurs à courant continu sont des machines qui transforment l'énergie électrique qu'ils reçoivent en énergie mécanique. La construction des moteurs est identique à celle des génératrices, de sorte qu'une machine à courant continu peut servir indifféremment comme moteur ou comme génératrice.

L'usage des moteurs à courant continu est plutôt restreint, car la distribution se fait à courant alternatif. Cependant, pour certaines applications il est parfois avantageux d'utiliser des moteurs à courant continu alimentés par des convertisseurs qui transforment le courant alternatif en courant continu. La supériorité de ces moteurs réside dans le fait qu'ils se prêtent facilement à un contrôle souple, continu et presque instantané de leur vitesse [2] [3].

Ce chapitre présentera des généralités sur la machine à courant continu en particulier son fonctionnement en moteur électrique.

I. 1 Constitution de la machine à courant continu

La machine à courant continu est réversible. La même machine peut fonctionner en moteur ou en génératrice, c'est-à-dire que la constitution d'une génératrice est identique à celle du moteur. La machine à courant continu comporte trois éléments essentiels (figure I.1 et I.2) :

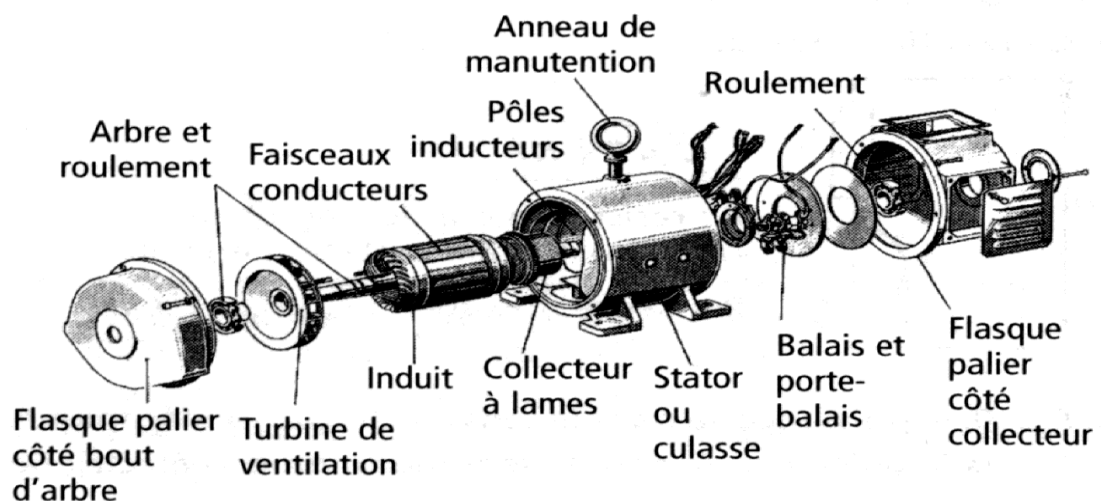


Figure I.1 : constitution de la machine à courant continu

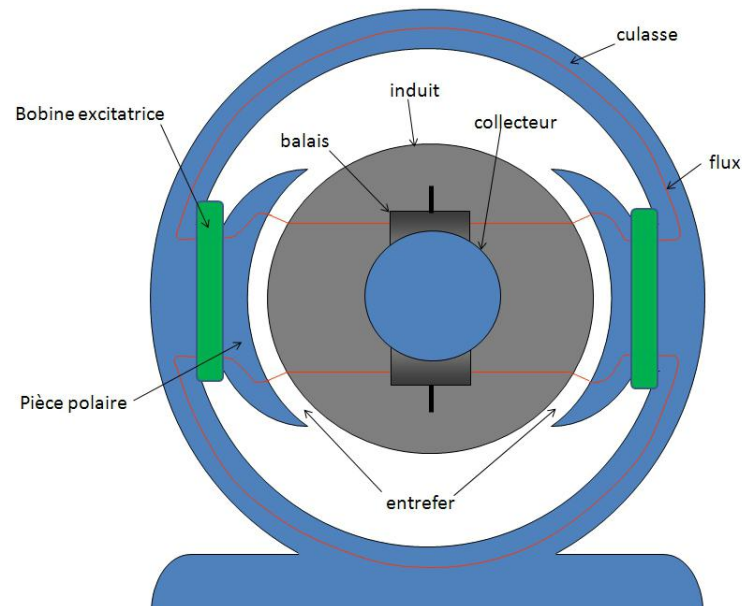


Figure I.2 : Parties principales de la machine à courant continu

I.1.1 L'inducteur

C'est la partie fixe du moteur, dont la fonction consiste à créer le champ magnétique d'excitation. Il est constitué, soit par un aimant permanent, soit par un électro-aimant dont les enroulements sont parcourus par le courant continu d'excitation. Les bobines sont montées à l'intérieur d'une culasse qui est généralement en fonte d'acier, les pièces polaires sont formées de tôle d'acier doux. Les bobines excitatrices sont alimentées en courant continu, ce courant est le courant d'excitation (figure I.3).

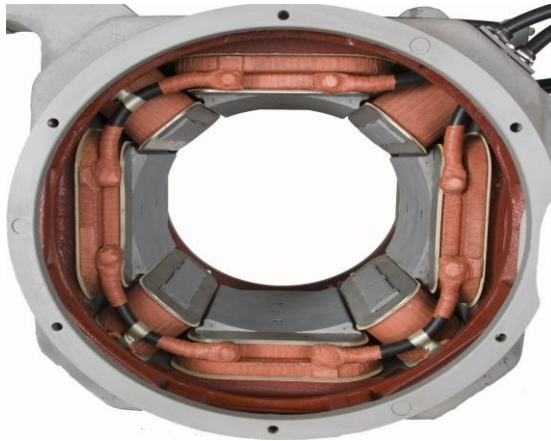


Figure I.3 : Inducteur complet d'une machine à courant continu [6]

I.1.2 L'induit

C'est la partie mobile, qui comporte une ou plusieurs bobines tournantes dans le champ magnétique. Il est le siège d'une f.é.m. induite alternative (figure I.4).

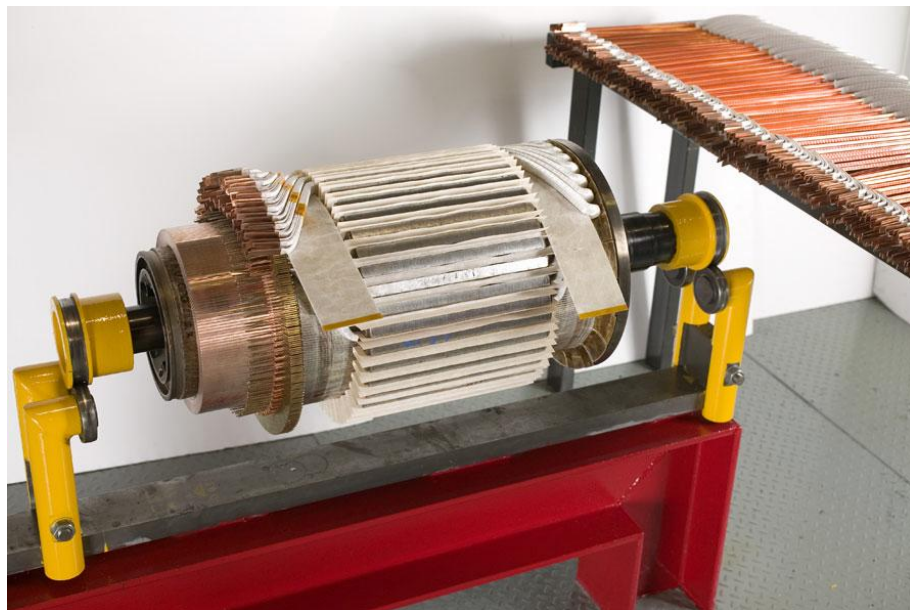


Figure I.4 : Induit d'une machine à courant continu [6]

I.1.3 Le collecteur

Il est également mobile, dont le rôle est de transformer le courant induit alternatif en courant unidirectionnel (continu). Il est constitué de lames de cuivres isolées entre elles par des feuilles de mica. Il est monté sur l'arbre mais il est isolé de ce dernier (figure I.5).



Figure I.5 : Collecteur d'une machine à courant continu [6]

I-2 PRINCIPE DE REVERSIBILITE :

Selon la nature de la conversion énergétique réalisée, deux types de machines sont distingués

I.2.1 La génératrice à courant continu :

Elle transforme une énergie mécanique en énergie électrique sous forme de courant continu.

I.2.2 Le moteur a courant continu:

Il transforme une énergie électrique de forme continue en une énergie mécanique. La machine à courant continu possède la propriété de réversibilité. Elle peut en effet fonctionner Indifféremment en génératrice ou en moteur.

I.3 Fonctionnement en mode génératrice :

L'inducteur est alimenté par une tension continue et produit un champ magnétique constant.

L'induit est entraîné en rotation par un moteur. Il est le siège de variation de flux au travers de spires qui le constituent. Ils en résultent la création d'une f.é.m. alternative qui est redressée et transmise au circuit extérieur par l'ensemble collecteur-balais.

I. 4 Principe de fonctionnement du moteur à courant continu

Lorsque le bobinage d'un inducteur du moteur est alimenté par un courant, sur le même principe qu'un aimant permanent, il crée un champ magnétique (flux d'excitation) de direction nord-sud. Une spire capable de tourner sur l'axe de rotation est placée dans le champ magnétique.

De plus, les deux conducteurs formant la spire sont chacun raccordé électriquement à un demi collecteur et alimenté en courant continu via deux balais.

D'après la loi de Laplace (équation I. 1 et figure I.5), tout conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique est soumis à une force. Les conducteurs de l'induit placés de part et d'autre de l'axe des balais (ligne neutre) sont soumis à des forces F égales mais de sens opposé en créant un couple moteur, l'induit se met donc à tourner [3][4].

$$\vec{dF} = I(\vec{dl} \wedge \vec{B}) \quad (\text{I.1})$$

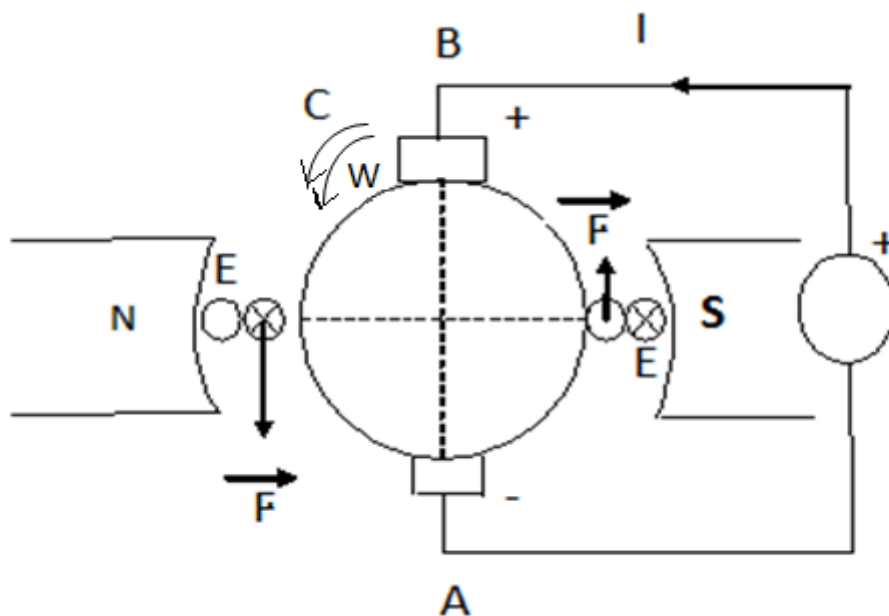


Figure I.5 : Principe de fonctionnement du moteur à courant continu

I. 5 Réaction magnétique de l'induit

Lorsque l'induit d'un moteur à courant continu est alimenté, le courant I_a qui y circule crée un flux magnétique dans l'entrefer de la machine, les lignes de champ constituant ce flux traversent les pièces polaires de l'inducteur perpendiculairement à leurs axes. On dit que cette réaction d'induit est transversale. Ce flux d'induit, en saturant une partie des pièces polaires, diminue un peu le flux inducteur, en plus, cette réaction d'induit en créant le flux dans les zones où se trouvent les cotes des sections en commutation, rend plus difficile celle-ci.

Pour éviter ces inconvénients, on munit les moteurs à courant continu d'enroulement supplémentaire pour compenser la réaction magnétique d'induit. Cette enroulement est appelé enroulement de compensation, il est logé dans des encoches pratiquées dans les pièces polaires des pôles principaux. Leur bobinage est parcouru le même courant que l'induit est crée une f.é.m. égale et opposée à celle crée par l'induit [2][3].

I. 6 Pôles auxiliaires de commutation

Ils sont placés dans l'axe interpolaire des pôles principaux, les enroulements des pôles auxiliaires sont parcouru par le courant de l'induit. Le rôle des pôles auxiliaires est d'améliorer la commutation, c'est-à-dire accélérer le processus de renversement des courants dans les sections de bobines, en plus, ils compensent encore la réaction magnétique de l'induit [3].

I.7 Equation du moteur à courant continu

I.7.1 Force électromotrice

Nous savons qu'une bobine en mouvement dans un champ magnétique voit apparaître à ses bornes une force électromotrice (f.é.m.) donnée par la loi de Faraday:

$$dE = B(\overrightarrow{dL} \wedge \vec{v}) \quad (I.2)$$

Sur ce principe, la machine à courant continu est le siège d'une f.é.m. donnée par :

$$E = \frac{p}{2\pi \cdot a} \cdot N \cdot \Phi \cdot \Omega \quad [V] \quad (I.3)$$

Avec :

p : le nombre de paires de pôles.

a : le nombre de paires de voies d'enroulement.

Φ : le flux maximum à travers les spires [Wb].

Ω : la vitesse de rotation [rd/s].

N : nombre de conducteur actif

Finalement on peut écrire ;

$$E = K \cdot \Phi \cdot \Omega \quad (\text{I.4})$$

Avec $K = \frac{p}{2\pi \cdot a} \cdot N$

K est la constante de la f.é.m.

I.7.2 Modèle équivalent de l'induit

Si on néglige la chute de tensions aux contacts balais-collecteur et on considère que la réaction magnétique d'induit est totalement compensée, le schéma électrique équivalent de l'induit est représenté par la figure I.6 :

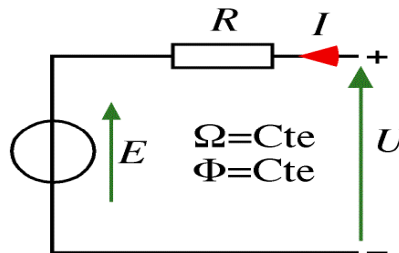


Figure I.6 : Modèle équivalent de l'induit

D'après la loi d'Ohms :

$$U = E + R \cdot I \quad (\text{I.5})$$

I.7.3 Vitesse

A partir de l'expression de la force électromotrice développée aux bornes de l'induit et l'équation électrique (I.5), on peut déduire l'expression de la vitesse qui sera donnée par :

$$\Omega = \frac{U - R \cdot I}{K \Phi} \quad (\text{I.6})$$

Avec : K est une constante de construction du moteur est égal à

$$K = \frac{p}{aw}$$

P : nombre de paire de pôles.

a : nombre de voies d'enroulement.

w : nombre de conducteurs par section.

I.7.4 Puissance et couple électromagnétiques

Si l'induit présente une f.é.m. E et s'il est parcouru par le courant I, il reçoit une puissance électromagnétique ;

$$P_{em} = E \cdot I \quad (I.7)$$

D'après le principe de conservation de l'énergie cette puissance est égale à la puissance développée par le couple électromagnétique.

$$P_{em} = C_{em} \cdot \Omega = E \cdot I \quad (I.8)$$

D'où l'expression du couple électromagnétique ;

$$C_{em} = K \cdot \Phi \cdot I \quad (I.9)$$

I.7.5 Couple utile, Puissance utile :

Les pertes mécaniques (frottement dans les paliers, action de l'aire de ventilation) et les pertes fer dans l'induit produisent un couple C_p appelé couple de pertes.

Le couple utile disponible sur l'arbre du moteur sera exprimé par :

$$C_u = C_{em} - C_p \quad (I.10)$$

La puissance utile développée par le moteur est donnée par:

$$P_u = C_u \cdot \Omega \quad (I.11)$$

I.7.6 Le rendement :

Le rendement du moteur est donné par :

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

Où P_a est la puissance absorbée par le moteur.

I.8 Bilan de la puissance

Les pertes dans la machine à courant continu sont subdivisées en différentes catégories qui sont :

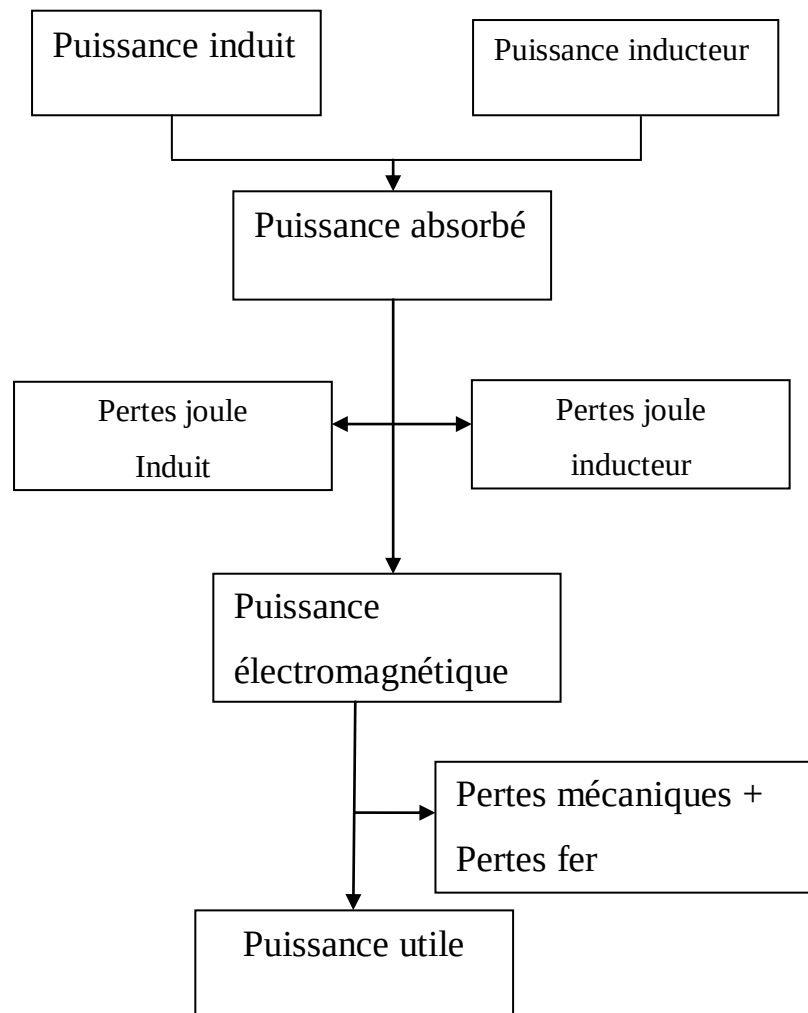


Figure I.7 Bilan de puissance

I.9 Différents modes d'excitation des moteurs à courant continu

I.9.1 Excitation dérivation ou shunt :

Le moteur à excitation shunt (parallèle), lorsque sont inducteur est aux borne de l'induit. Il est alimenté par une source continue de tension (V_a) et de courant (I_n), le circuit inducteur constitué d'une self (L_f) et d'une résistance (R_f) est parcouru par un courant (I_f), et celui de l'induit comportant une résistance, une inductance et une force contre électromotrice respectivement (R_a , L_a , E) est parcouru par un courant I_a .

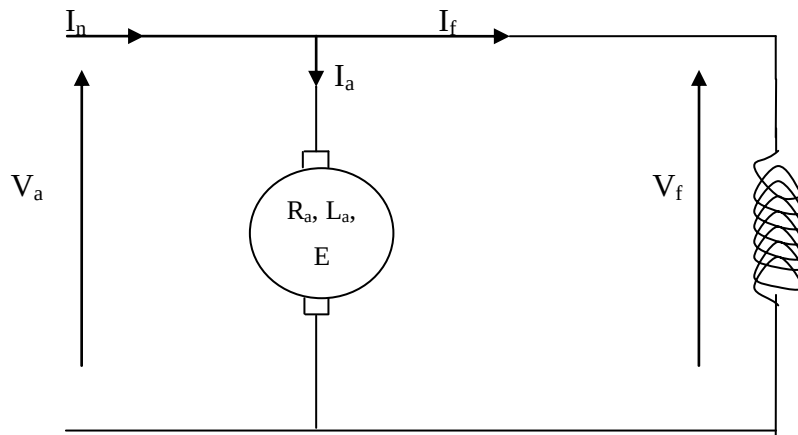


Figure I.8 : Schéma électrique d'un moteur shunt.

Avec :

V_a : Tension d'alimentation du circuit induit [Volt].

I_a : Courant d'induit [ampère].

R_a : Résistance du circuit d'induit [Ohm].

L_a : Inductance du circuit d'induit [Henry].

V_f : Tension du circuit d'excitation [Volt].

I_f : Courant d'excitation [Ampère].

R_f : Résistance du circuit d'excitation [Ohm].

L_f : Inductance du circuit d'excitation [Henry].

E : Force électromotrice [Volt].

Caractéristique :

D'après ces caractéristique, on remarque que le moteur shunt est un autorégulateur de vitesse dans des limites étroites. Cette dernière n'est pas vraiment influencée par la variation de la tension d'induit, que le moteur à excitation séparée, elle est relativement constante

quelle que soit la charge. Il peut fonctionner à vide sans risque d'emballement, utilisé pour l'entraînement des machines dont la vitesse ne doit pas dépendre de la charge, cas des machines outils, et remplace le moteur série ou l'emballement est craindre, et utilisé dans des appareils de lavage, machine textile et téléphérique ...etc.

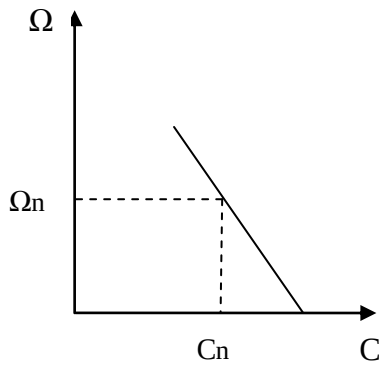


Figure I.9 : Caractéristique mécanique du moteur shunt

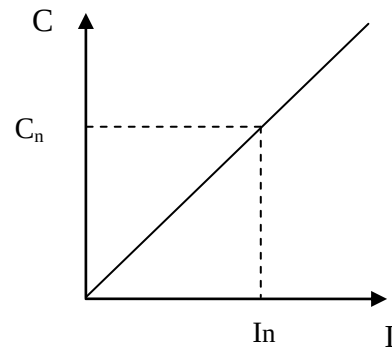


Figure I.10 : Caractéristique électromécanique du moteur shunt

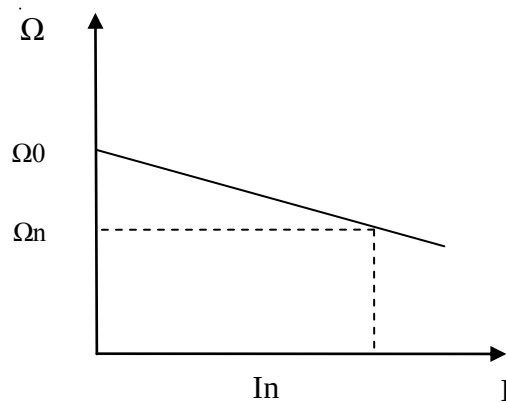


Figure I.11 : Caractéristique de vitesse en fonction du courant (moteur shunt)

I.9.2 Excitation série :

Le moteur série est constitué de deux enroulements, induit et inducteur montés en série (même courant). Il est alimenté par une source constituée de tension V_a et de courant $I_a = I_f$ qui débite sur l'induit, de résistance R_a , d'inductance L_a et de force contre électromotrice E et d'un inducteur de résistance R_f et d'inductance L_f .

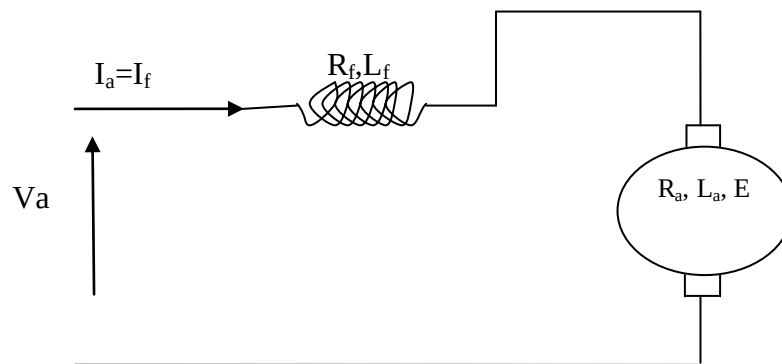


Figure I.12 : Schéma électrique d'un moteur série.

Avec :

V_a : Tension d'alimentation du circuit d'induit (Volt).

I_a : Courant d'induit (Ampère).

R_a : Résistance du circuit d'induit (Ohm).

L_a : Inductance du circuit d'induit (Henry).

V_f : Tension du circuit d'excitation (Volt).

I_f : Courant d'excitation (Ampère).

R_f : Résistance du circuit d'excitation (Ohm).

L_f : Inductance du circuit d'excitation (Henry).

E : Force électromotrice (Volt).

Caractéristiques :

Le moteur série est autorégulateur de puissance. Sa caractéristique mécanique montre qu'il possède un très fort couple au démarrage qui ne dépend pas de la tension, mais il ne peut pas fonctionner à faible charge car sa vitesse devient infini (risque de destruction du moteur). Sa vitesse décroît quand la charge augmente d' ou l'option de changement de vitesse

automatique. Ce dernier est moins sensible aux variations brusques de la tension d'alimentation que le moteur shunt (figures I.13-I.15)

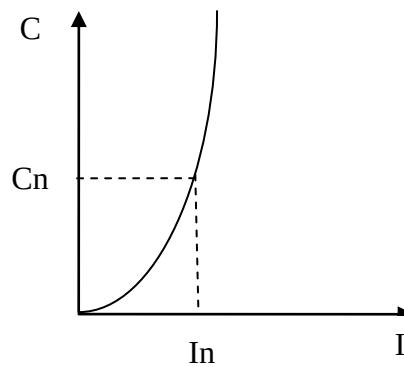


Figure I.13 : Caractéristique électromécanique du moteur série

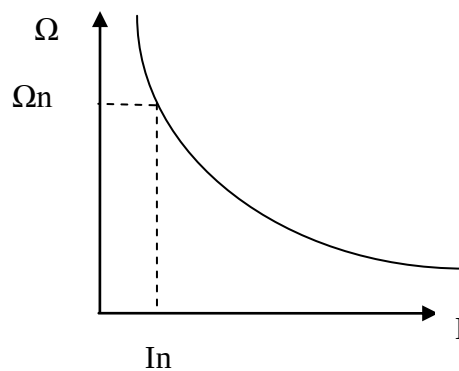


Figure. I.14 : Caractéristique de vitesse en fonction du courant (moteur série)

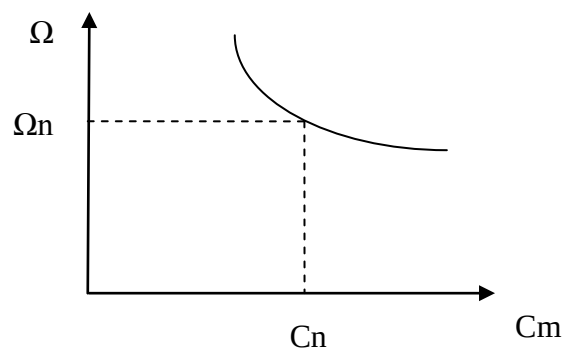


Figure I.15 : Caractéristique mécanique du moteur série

I.9.3 Excitation séparée (indépendante) :

Le moteur à excitation indépendante est constitué de deux enroulements induit et inducteur qui sont alimentés séparément par deux sources distinctes. L'inducteur qui comporte une résistance (R_f) et une inductance (L_f) est excité par une source continue de tension (V_f) et de courant (I_f), et l'induit qui est constitué d'une résistance, d'une inductance, et d'une force électromotrice (R_a, L_a, E), est excité par une source de tension (V_a), et de courant (I_a)

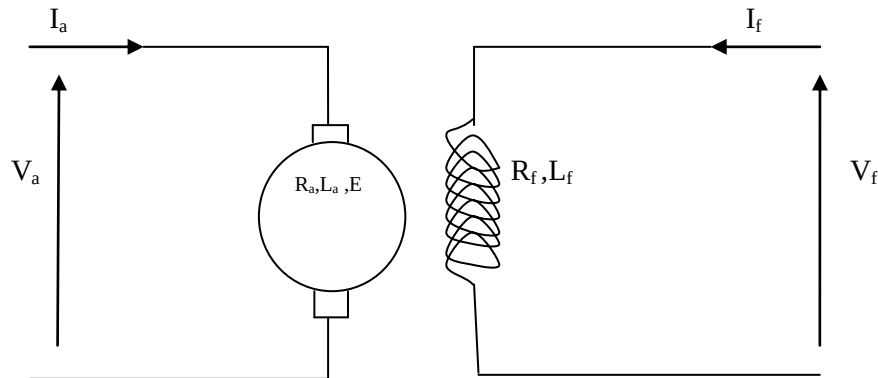


Figure I.16 : Schéma d'un moteur à excitation séparée

Avec :

V_a : Tension d'alimentation du circuit induit [Volt].

I_a : Courant d'induit [ampère].

R_a : Résistance du circuit d'induit [Ohm].

L_a : Inductance du circuit d'induit [Henry].

V_f : Tension du circuit d'excitation [Volt].

I_f : Courant d'excitation [Ampère].

R_f : Résistance du circuit d'excitation [Ohm].

L_f : Inductance du circuit d'excitation [Henry].

E : Force électromotrice [Volt].

Caractéristiques :

Le moteur à excitation séparée jouit à l'avantage d'un réglage de vitesse dans de larges limites. Cette dernière est très sensible aux variations de la tension d'induit, et indépendante de la charge, ce pour cela qu'on peut le coupler à des faibles charges sans risque d'emballement. Son couple est proportionnel au courant d'induit, et très important à faible vitesse, d'où ces performances dynamiques très élevées (figure I.17-I.19). Son courant de démarrage est très fort d'où la limiter pour éviter l'échauffement du circuit induit. Ce moteur

est le moteur de base des asservissements de position, aussi bien pour les petites que les grandes puissances, et il est utilisé dans des pompes, le transport comme TGV.

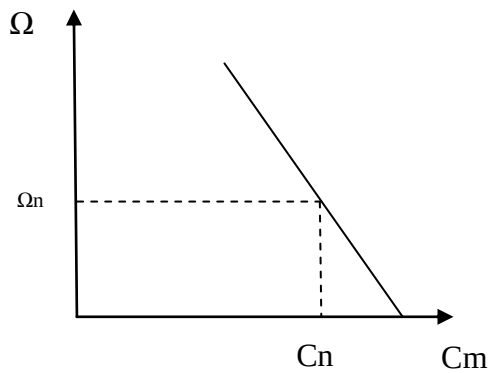


Figure I.17 : Caractéristique mécanique du moteur séparée

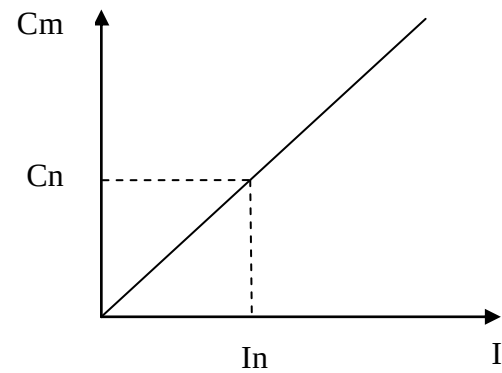


Figure I.18 : Caractéristique électromécanique du moteur

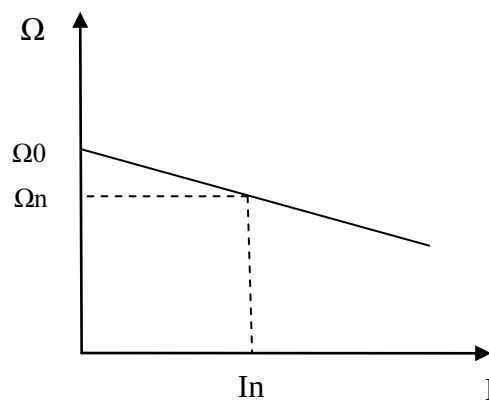


Figure I.19 : Caractéristique de vitesse en fonction du courant (moteur séparée)

I.9.3 Excitation composée (compound) :

Il porte deux enroulements inducteurs dont l'un est placé en série avec l'induit et l'autre en parallèle.

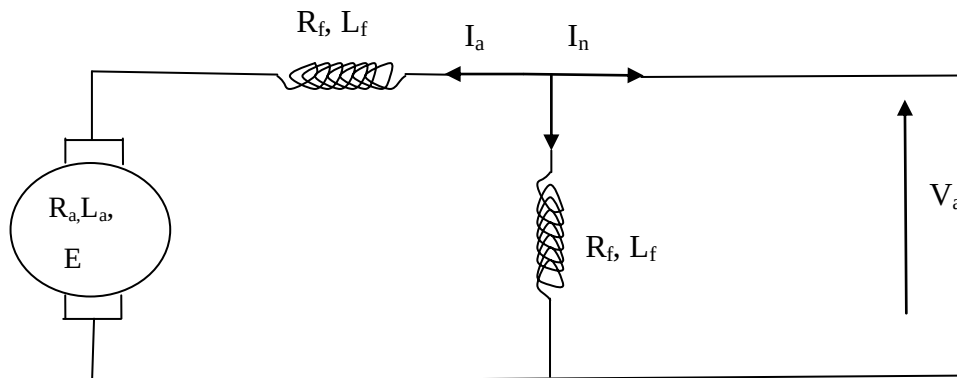


Figure I.20 : Schéma électrique d'un moteur composé.

Avec :

V_a : Tension d'alimentation du circuit induit [Volt].

I_a : Courant d'induit [ampère].

R_a : Résistance du circuit d'induit [Ohm].

L_a : Inductance du circuit d'induit [Henry].

V_f : Tension du circuit d'excitation [Volt].

I_f : Courant d'excitation [Ampère].

R_f : Résistance du circuit d'excitation [Ohm].

L_f : Inductance du circuit d'excitation [Henry].

E : Force électromotrice [Volt].

Caractéristiques :

Le moteur composé est un alliage du moteur série et du shunt, il a bénéficié des avantages des deux moteurs.

Son couple de démarrage est plus fort que le moteur shunt. Il peut fonctionner à faible charge sans risque d'emballement et présente une meilleure stabilité que les deux moteurs précédents, mais il est fait seulement pour l'entraînement à vitesse rigoureusement constante (figure I.21-I.23).. On peut utiliser ces moteurs dans les ateliers où on utilise les appareils de lavage, les cisailles et les broyeuses...etc

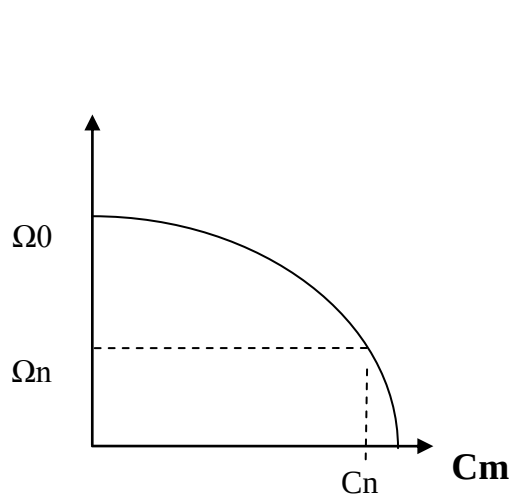


Figure I.21 : Caractéristique mécanique du moteur composé

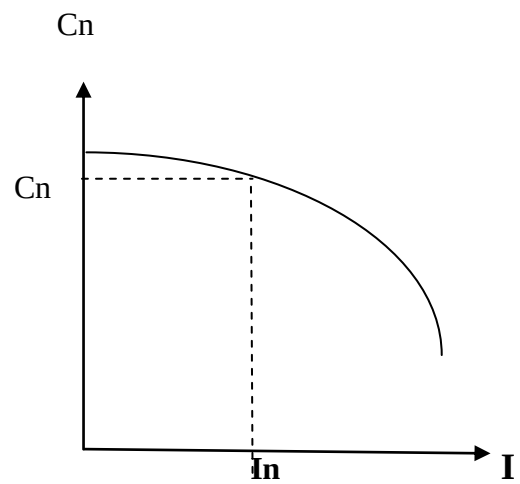


Figure I.22 : Caractéristique de vitesse en fonction du courant

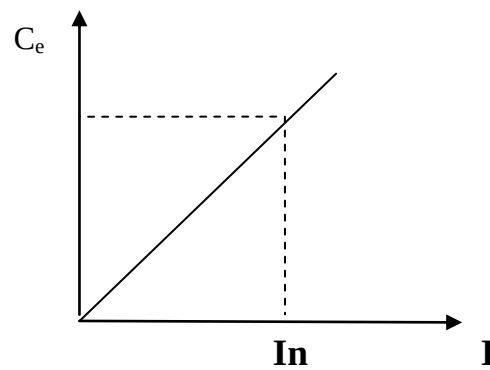


Figure I.23 : Caractéristique électromécanique du moteur composé

I.10 Différentes expressions de la machine a courant continu à excitation shunt(ou séparée)

I.10.1 Expression de la tension d'induit

La tension aux bornes de l induit est donnée par l équation suivante:

$$V_a = R_a I_a + L \frac{di}{dt} + E \quad (\text{I.13})$$

Le courant de l induit étant constant, en régime permanant d ou :

$$V_a = R_a I_a + E \quad (\text{I.14})$$

Avec :

R_a : Résistance de l induit.

I_a : courant d'induit.

I.10.2 Expression de la force électromotrice:

La force électromotrice est liée à la vitesse et au flux du moteur dans l'équation suivante:

$$E = K_m \phi \Omega \quad (\text{I.15})$$

Avec :

Ω : Vitesse angulaire de l induit.

K_m : Constante propre du moteur.

ϕ : Flux d'induit.

E: La force électromotrice.

I.10.3 Expression du couple électromagnétique:

Le couple moteur est lié au courant d induit et au flux par la relation suivante :

$$C_{em} = k_m I_a \phi \quad (\text{I.16})$$

Avec :

C_{em} : Couple électromagnétique de la machine

I.11 Action sur la tension d'alimentations

La relation (I-15) montre que la vitesse est proportionnelle à la tension d'alimentations (u) lorsque le flux magnétique (ϕ) est constant. La variation de la tension d'alimentations est obtenue par un montage convertisseur d'électronique de puissance.

I.12 Action sur le flux

Lorsque le courant inducteur diminue, le flux magnétique dans le moteur diminue. Cette diminution provoque une augmentation de la vitesse pouvant aller jusqu'à l'emballement du moteur et sa destruction.

Outre ce risque la diminution du flux conduit aussi à une diminution du couple moteur qui est directement proportionnel au flux, selon la relation:

$$C_e = K \cdot \phi \cdot I \quad (I. 17)$$

L'action sur le flux permet une légère survitesse avec une diminution du couple utile.

I.13 Les avantages et les inconvénients des machines à courant continu

L'avantage principal des machines à courant continu réside dans leur adaptation simple aux moyens permettant de régler ou de faire varier leur vitesse, leur couple et leur sens de rotation : les variateurs de vitesse, voire leur raccordement direct à la source d'énergie : batteries d'accumulateur, piles, etc.

Le principal problème de ces machines vient de la liaison entre les balais, ou « charbons » et le collecteur rotatif. Ainsi que le collecteur lui-même comme indiqué plus haut et la complexité de sa réalisation. De plus il faut signaler que :

- plus la vitesse de rotation est élevée, plus la pression des balais doit augmenter pour rester en contact avec le collecteur donc plus le frottement est important ;
- aux vitesses élevées les balais doivent donc être remplacés très régulièrement ;
- le collecteur imposant des ruptures de contact provoque des arcs, qui usent rapidement le commutateur et génèrent des parasites dans le circuit d'alimentation, ainsi que par rayonnement électromagnétique.

Un autre problème limite les vitesses d'utilisation élevées de ces moteurs lorsque le rotor est bobiné, c'est le phénomène de « défretage », la force centrifuge finissant par casser les liens assurant la tenue des ensembles de spires (le fretage).

La température est limitée au niveau du collecteur par l'alliage utilisé pour braser les conducteurs du rotor aux lames du collecteur. Un alliage à base d'argent doit être utilisé lorsque la température de fonctionnement dépasse la température de fusion de l'alliage classique à base d'étain.

Un certain nombre de ces inconvénients ont partiellement été résolus par des réalisations de moteurs sans fer au rotor, comme les moteurs « disques » ou les moteurs « cloches », qui néanmoins possèdent toujours des balais.

Les inconvénients ci-dessus ont été radicalement éliminés grâce à la technologie du moteur *brushless*, aussi dénommé « moteur à courant continu sans balais », ou moteur sans balais, ou machine synchrone auto-pilotée.

Conclusion

Le moteur à courant continu est encore utilisé dans de nombreux domaines d'applications tels que la traction, la propulsion des sous marins, et les machines outils...etc. Cela est dû essentiellement à certaines caractéristiques très importantes par rapport aux autres types de moteurs (à courant alternatif).

Dans ce chapitre nous avons présenté des généralités sur ce type de moteur à savoir sa conception et les différentes équations qui régissent le fonctionnement de la machine à courant continu.

Dans le chapitre suivant, nous allons rappeler les différents types de pertes dans cette machine.

CHAPITRE II :

Les pertes dans les machines à courant continu

Introduction

Les machines électriques transforment l'énergie électrique en énergie mécanique ou l'énergie mécanique en énergie électrique. Une partie de l'énergie fournie n'est pas utilisée dans la machine ; elle est dissipée dans l'espace ambiant sous forme de chaleur ; ce sont les pertes.

Dans les machines électriques les pertes sont relativement faibles. Si on envisage les machines à courant continu de moyenne et de grande puissance les pertes représentent 4% à 10% de la puissance de la puissance fournie pour la machine ; Néanmoins ; vu la quantité considérable d'énergie électrique transformée, la question des pertes joue actuellement un très grand rôle, Car chaque pour cent de pertes correspond en valeur absolue à de très grandes quantités d'énergie non utilisée.

D'autre part, vu que les pertes sont transformées en chaleur elles échauffent la machine

L'expérience montre que pour assurer le bon fonctionnement de la machine pendant une durée normale (10 à 20 ans), la température des différentes parties de la machines ne doit pas dépasser certaines limites.

II.1 Classification des pertes

Toutes les pertes d'une machine peuvent être divisées en deux groupes : pertes principales et pertes supplémentaires.

Les pertes principales sont celles qui apparaissent par suite des principaux phénomènes électromagnétiques et mécaniques qui se produisent dans la machine.

II.2 Les différents types des pertes dans un moteur à courant continu

II.2.1 Les pertes mécaniques [9]

II.2.1.1 Pertes dans les paliers du glissement

Selon la loi générale des frottements, ces pertes s'expriment comme suit :

$$P_p = K_f F_t V_t = K_f f_t d_t l_t v_t \quad (\text{II.1})$$

Avec :

K_f : est le coefficient de frottement.

F_t : est la pression total sur le tourillon.

f_t : est la pression spécifique sur le tourillon, c'est-à-dire la pression rapportée a une unité de projection de la surface du tourillon sur le plan parallèle a l'axe de l'arbre.

d_t : est le diamètre.

l_t : la longueur du tourillon.

v_t : est la vitesse a la périphérie du tourillon.

En unités du SI la pression F_t est exprimée en newtons et la vitesse en (m/s)

Pour la lubrification des paliers on utilise de l'huile. Au repos, l'huile se trouvant entre les parties frottâtes est chassé est le métal du tourillon est en contact direct avec le métal du coussinet .Lorsque l'arbre tourne l'huile est entraînée par le tourillon et produit dans l'espace entre la surface de l'arbre et celle du coussinet une pression augmentée qui maintient l'arbre

suspendu de sorte qu'entre les surfaces frottées apparaît une fine pellicule d'huile. Pour que le frottement soit à caractère purement liquide il est très important de former une pellicule dont l'épaisseur soit supérieure aux rugosités existant sur la surface des pièces en frottement.

De nombreuses études ont montré que pour une vitesse $v_t = 0.5$ à 4 m/s , le coefficient de frottement liquide peut être exprimé comme :

$$K_f = \frac{C v_t^{0,5}}{f_t \vartheta_t} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

C : est la constante dont la valeur dépend du genre d'huile et du jeu dans le palier

ϑ : est la température du palier en degrés centigrades

Si la vitesse $v_t > 4 \text{ m/s}$, le coefficient de frottement croît de plus en plus lentement en fonction de celle-ci et lorsque $v_t \geq 10 \text{ m/s}$, il cesse d'être en fonction de la vitesse

Si les pertes sont exprimées en watt, le diamètre du tourillon et sa longueur en centimètres et la vitesse en m/s on a en moyenne $C=26$

Les pertes dans les paliers de glissement ne dépendent pas de la pression spécifique, donc ne dépendent pas de la charge de la machine. Ces pertes peuvent être déterminées lors de la marche à vide et elles gardent la même valeur pour une vitesse de rotation quelconque quelle que soit la charge tant que le frottement liquide existe dans le palier.

II.2.1.2 Pertes dans les paliers de roulement

Les roulements à billes sont utilisés dans les petites machines et les roulements à rouleaux utilisés dans les machines de puissance moyenne. Dans les machines de puissance intermédiaire on utilise un roulement à rouleaux du côté de la commande. Comparés aux paliers de glissement les paliers de roulement présentent plusieurs avantages : un coefficient

de frottement beaucoup plus petit (de 10 à 15 fois) moins, des dimensions réduites, ce qui permet de diminuer la longueur axiale de la machine, facilite l'entretien

Les pertes dans les paliers de roulement sont calculées d'après cette formule :

$$P_p = K_f \frac{F}{D_b} v_t \quad (\text{II.3})$$

Avec :

F : représente la charge sur la bague du palier

D_b : Le diamètre de la circonférence passant par les axes des rouleaux

v_t : La vitesse à la périphérie du tourillon.

Si F est exprimé en Kg, D_b en centimètres et v_t en m/s on a pour des roulements à rouleaux $K_f = 0,002$ à $0,003$.

II.2.1.3 Pertes par frottement des balais

Si f_b est la pression est la pression spécifique exercée sur le balai S_b la surface de contact de tous les balais avec le collecteur ou la bague ; v_c la vitesse à périphérie du collecteur ou de la bague et K_f le coefficient de frottement des balais contre le collecteur on a :

$$P_{fb} = K_f f_b S_b v_c \quad (\text{II.4})$$

Généralement on exprime f_b en Kgf/cm^2 ; S_b en cm^2 et v_c en m/s dans ce cas il faut introduire le coefficient 9,81 à droite de la formule pour avoir P_{fb} en watts. Pour des balais en charbon selon des données expérimentales on a $K_f = 0,2$ à $0,3$ pour un collecteur pour les bagues de frottement ; $f_b = 0,15$ à $0,25 \text{ kgf/cm}^2$ mais il peut atteindre $0,5 \text{ kgf/cm}^2$ dans machines spéciales comme les moteurs de traction.

II.2.1.4 Pertes par ventilation

Les machines électriques dégagent à partir des petits volumes de ses matériaux actifs à surfaces extérieures de refroidissement relativement petite une grande quantité d'énergie sous forme de chaleur

$$P_v = K_v V v^2 \quad (\text{II.5})$$

V : est la quantité d'air de ventilation en m^3/s .

v : est la vitesse périphérique du ventilateur en m/s.

II.2.2 Pertes joules

Pour les calculer il faut connaître les résistances et les intensités, on mesure ses résistances par la méthode du voltmètre et de l'ampèremètre. Pour le calcul des pertes joules il faut tenir compte du type de la machine.

S'il s'agit d'une machine shunt le courant est :

$$I_f = U/R_f \quad (II.6)$$

Si la machine est une génératrice, le courant dans l'induit est :

$$I = I_a + I_f \quad (II.7)$$

Sachant que :

I : le débit sur le circuit extérieur

Si elle fonctionne en moteur le courant dans l'induit est :

$$I_a = I - I_f \quad (II.8)$$

Donc par exemple pour un moteur shunt :

$$P_j = UI_f + (I - I_f)^2 R_a \quad (II.9)$$

Pour un moteur série :

$$P_j = (R_a + R_f) I^2 \quad (II.10)$$

II.2.3 Pertes fer

Au cours du fonctionnement le fer actif des machines électriques est soumis a un cycle d'inversion d'aimantation périodique .Cette inversion d'aimantation peut avoir lieu de deux façon .L'inversion d'aimantation dite alternative a lieu dans les transformateurs ou l'induction est répartie pratiquement de façon uniforme suivant la section active du noyau et varie sinusoïdalement dans le temps .Des conditions presque analogue ont lieu dans les dents des induits des machines a courant continu .L'inversion d'aimantation dite tournante a lieu dans le noyau d'une machine a courant continu qui tourne dans le champ des pôles principaux qui est constant dans le temps. Les pertes dans le fer comprennent : les pertes par hystérésis et les pertes par courant de Foucault

II.2.3.1 Pertes par hystérésis

Les pertes par hystérésis par unité de masse lors d'une inversion d'aimantation alternative sont exprimées par une formule empirique proposée par Steinmetz.

$$P_h = C_h \cdot f \cdot B^\alpha \quad (II.11)$$

Avec :

C_h :est une constante qui depend de la nuance du fer utilisé .

f :la frequence d' inversion d'aimantation.

B :la valeur maximum de l'induction magnetique.

α :exposant de l'induction B .

On peut admettre que lors de l'inversion d'aimantation tournante les pertes par hystérésis augmentent d'abord avec l'accroissement de l'induction a peu près jusqu' a la valeur 1,6T et ensuite, quand l'induction continu de croitre, ces pertes diminuent.

II.2.3.2 Pertes par courant de Foucault

Pendant le cycle d'inversion d'aimantation du fer, des forces électromotrices naissent dans un sens déterminé généralement par la règle de la main droite. Dans le même sens sont d'érigés les courants créés par ces forces électromotrices se sont les courant de Foucault. Dans les machines de construction normale ces courants ne sont pas utilisés. En provoquant des pertes d'énergie ils contribuent à échauffer le fer et abaissent le rendement de la machine. Pour réduire l'action nuisible de ces courants l'induit est réalisé en tôles magnétiques de faible épaisseur approximativement 0,5mm isolées les unes des autres et situées dans un plan perpendiculaire à l'axe de la machine.

En calculons les pertes par courants de Foucault nous supposons que a) l'épaisseur de la tôle d'acier est négligeable par rapport à sa hauteur et à sa longueur b) l'induction varie dans le temps sinusoïdalement et elle est répartie uniformément dans le temps suivant l'épaisseur de la tôle autrement dit nous négligeons l'effet d'écran des courants de Foucault naissant dans la tôle

II.2.3.3 la perméabilité de l'acier et sa résistivité restent constantes

Dans ce cas la F.E.M. induite dans la tôle peut être considérée comme proportionnelle à la fréquence des cycles d'aimantation f et à l'induction B , c'est-à-dire :

$$e_F = f B \quad (\text{II.12})$$

D'autre part :

$$i_F = \frac{e_F}{r} \quad (\text{II.13})$$

Avec :

r : est constante.

Il en résulte que les pertes par courant de Foucault dans une unité de masse sont exprimées Par la formule :

$$P_F = i_F^2 r = C_F f^2 B^2 \quad (\text{II.14})$$

C_F : Représente une constante qui dépend de la nuance de l'acier et de l'épaisseur de la tôle

II.3 modélisation des pertes du moteur à excitation séparée

II.3.1 Pertes cuivre

Elles peuvent être dévisées en deux groupes :

II.3.1.1 les pertes joule dans l'induit

$$P_a = R_a i_a^2 \quad (\text{II.15})$$

Avec :

P_a : est la perte de cuivre induit (w).

i_a : est le courant induit (Ampère).

R_a : est la résistance d'inducteur (Ω).

II.3.1.2 Les pertes joule dans l'inducteur

$$P_f = R_f i_f^2 \quad (\text{II.16})$$

Avec :

P_f : est la perte de cuivre de champ (w).

I_f : est le courant d'inducteur (Ampère).

R_f : est la résistance d'inducteur (Ω).

A partir de ces équations, la perte de cuivre se produit à partir de la résistance de l'induit et la bobine de champ, par conséquent, cette perte est la perte électrique et parfait.

II.3.2 Les pertes par frottement

Ces pertes se produisent par le frottement des paliers du moteur et le frottement entre les pièces mobiles du moteur et l'air dans le cas du moteur [3]. Par conséquent, le courant de cette perte est appelé la perte mécanique. Le calcul de cette perte est donné par l'équation (II.17). À partir de l'équation, on peut constater que les pertes par frottement et en dérive varient comme le cube de la vitesse du moteur.

$$P_m = K_m N^3 \quad (\text{II.17})$$

Avec :

K_m : est le coefficient des pertes par frottements

N : est la vitesse de rotation du moteur en trs/mn

P_m : Perte mécanique en watt

II.3.3 Les pertes fer

Elles apparaissent dans le fer de la machine, elles se divisent en pertes par hystérésis et par courant de Foucault.

II.3.3.1 Les pertes par hystérésis

$$P_h = K_h \omega B_m^n V \quad (\text{II.18})$$

Avec :

P_h : Perte hystérésis en watt

K_h : Le coefficient du matériau du moteur

ω : La vitesse angulaire du moteur en rad/s

B_m : L'induction maximale en Tesla

n : l'exponentiel de la valeur B_m

V : le volume du fer en m^3

II.3.3.2 Les pertes par courant de Foucault

Pendant le cycle d'inversion d'aimantation du fer, des forces électromotrices naissent dans un sens déterminé généralement par la règle de la main droite. Dans le même sens sont d'érigés les courants créés par ces forces électromotrices se sont les courant de Foucault. Dans les machines de construction normale ces courants ne sont pas utilisés. En provoquant des pertes d'énergie ils contribuent à échauffer le fer et abaissent le rendement de la machine. Pour réduire l'action nuisible de ces courant l'induit est réalisé en tôles magnétiques de faible épaisseur approximativement 0,5mm isolées les unes des autres et situées dans un plan perpendiculaire à l'axe de la machine

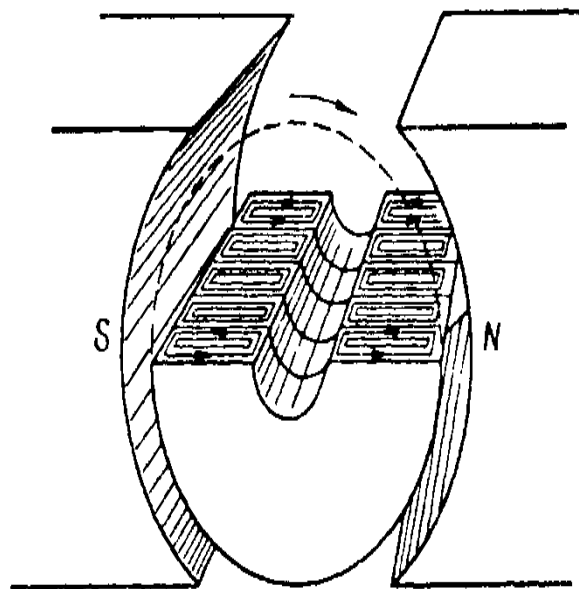


Figure II. 1 : Courant de Foucault dans les tôles d'acier de l'induit pendant sa rotation dans un champ magnétique

En calculons les pertes par courants de Foucault nous supposons que :

- a) l'épaisseur de la tôle d'acier est négligeable par rapport a sa hauteur et a sa longueur
- b) l'induction varie dans le temps sinusoïdalement et elle est répartie uniformément dans le temps suivant l'épaisseur de la tôle autrement dit nous négligeons l'effet d'écran des courants de Foucault naissant dans la tôle
- c) la perméabilité de l'acier et sa résistivité restent constantes.

Dans ce cas la F.E.M. induite dans la tôle peut être considérée comme proportionnelle a la fréquence des cycles d'aimantation f et a l'induction B , c'est-à-dire que $e_F = f B$; d'autre part, $i_F = \frac{e_F}{r}$,

ou r : est constante.

Il en résulte que les pertes par courant de Foucault dans une unité de masse sont exprimées Par la formule :

$$P_F = k_e \omega^2 \delta^2 B^2 V \quad (\text{II.19})$$

Avec :

P_F : Perte de Foucault en watt

δ : Est la densité du matériau du moteur

K_e : Coefficient du moteur

Donc :

$$P_f = K_1 \omega B_m^2 + K_2 \omega^2 B_m^2 \quad (\text{II.20})$$

Ou :

$$K_1 = K_h V \quad \text{et} \quad K_2 = K_e \delta^2 V$$

Sachant que :

$$B_m = f(i_f) = K i_f$$

Donc :

$$P_f = K_h \omega i_f^2 + K_e \omega^2 i_f^2 \quad (\text{II.21})$$

II.3.4 Pertes par contact balais collecteur

Se sont les pertes qui se produisent la chute de tension aux bornes du moteur, on peut calculer avec l'équation suivant :

$$P_c = V_e i_a \quad (\text{II.22})$$

Avec :

P_c : Pertes par contact balais collecteur

V_e : La chute de tension à travers les balais (V).

i_a : est le courant induit (Ampère).

II.3.5 Les pertes supplémentaires

Cette perte ne peut pas être placée dans l'un des types précédents. La perte perdue (P_s) dépend du courant d'induit et de la vitesse du moteur, comme indiqué par l'équation (II.23).

$$P_s = K_{st} i_a^2 N^2 \quad (\text{II.23})$$

Avec :

P_s : la perte supplémentaire en watt.

K_{st} : est le coefficient constant de perte perdue.

II.4 Pertes totales

Dans ces différents pertes qui nous avons étudié, les frottement et les pertes de dérives sont négligés et en supposant que la taille du coefficient constant de la perte par courants de Foucault est très petit que le coefficient constant de la hystérésis. Par conséquent, les pertes de puissance totale peuvent être calculées par l'équation suivant (II.24) :

$$P_T = R_a i_a^2 + R_f i_f^2 + 2i_a + \frac{60^2}{4\pi^2} K_{st} i_a^2 \omega^2 + K_h i_f^2 \omega \quad (\text{II.24})$$

Conclusion

Les pertes dans les machines à courant continu sont de natures différentes. Dans ce chapitre , nous avons présenté les différentes pertes de puissance dans les machines à courant continu d'une manière générale, pour aboutir à la fin à un modèle pour le calcul des pertes sous certaines hypothèses simplificatrice. Ce modèle de pertes sera utilisé dans le troisième chapitre.

CHAPITRE III

Identification par
algorithmes génétiques du
modèle de pertes d'un
moteur à c.c

Introduction

Actuellement, l'économie d'énergie est une préoccupation pour les ingénieurs et les chercheurs. Le moteur d'entraînement électrique est largement utilisé dans les industries. Une plus grande quantité d'économie d'énergie peut encore être obtenue par la minimisation des pertes de puissance du moteur.

L'identification paramétrique par optimisation est largement utilisée dans les domaines de l'ingénierie et la recherche scientifique. Plusieurs méthodes d'optimisation sont inspirées de la vie naturelle, parmi lesquelles les algorithmes génétiques.

Les algorithmes génétiques (AG) sont des algorithmes d'optimisation s'appuyant sur des techniques dérivées de la génétique et de l'évolution naturelle ; croisements, mutation, sélection, etc....

Le but des algorithmes génétiques est d'obtenir une solution approchée à un problème d'optimisation, lorsqu'il n'existe pas de méthodes exacte (ou que la solution est inconnue) pour le résoudre en un temps raisonnable.

Dans ce chapitre, l'identification des pertes de puissance du moteur à courant continu à excitation séparée sera présentée. La méthode de recherche par algorithme génétique est utilisée pour trouver les coefficients exacts du modèle de pertes de puissance. Ces coefficients sont difficiles à calculer ou tester car ils dépendent du matériau du moteur.

III.1 Les origines des algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques ont été proposés par Holland en 1975, puis développés par d'autres chercheurs tels que De Jong, Goldberg, et Michalewicz. C'est actuellement une des méthodes les plus diffusées et les plus utilisées dans la résolution de problèmes d'optimisation dans de nombreux domaines d'application [].

III.2 Présentation

III.2.1 Analogie avec la biologie

Les algorithmes génétiques étant basés sur des phénomènes biologiques, il convient de rappeler au préalable quelques termes de génétique. Les organismes vivants sont constitués de cellules, dont les noyaux comportent des chromosomes qui sont des chaînes d'ADN. L'élément de base de ces chromosomes (le caractère de la chaîne d'ADN) est un gène. Sur chacun de ces chromosomes, une suite de gènes constitue une chaîne qui code les fonctionnalités de l'organisme (la couleur des yeux...). La position d'un gène sur le chromosome est son locus. L'ensemble des gènes d'un individu est son génotype et l'ensemble du patrimoine génétique d'une espèce est le génome. Les différentes versions d'un même gène sont appelées allèles. On utilise ainsi dans les algorithmes génétiques, une analogie avec la théorie de l'évolution qui propose qu'au fil du temps, les gènes conservés au sein d'une population donnée sont ceux qui sont le plus adaptés aux besoins vis-à-vis de son environnement.

III.2.2 Les opérateurs des algorithmes génétiques

La génétique a mis en évidence l'existence de plusieurs opérations au sein d'un organisme donnant lieu au brassage génétique. Ces opérations interviennent lors de la phase de reproduction lorsque les chromosomes de deux organismes fusionnent.

Ces opérations sont limitées par les algorithmes génétiques afin de faire évoluer la population de solution de manière progressive.

III.2.2.1 Les sélections

Pour déterminer quels individus sont plus enclins à obtenir les meilleurs résultats, une sélection est opérée. Ce processus est analogue à un processus de sélection naturelle, les individus les plus adaptés gagnent la compétition de la reproduction tandis que les moins adaptés meurent avant la reproduction, ce qui améliore globalement l'adaptation. Étant donné que la sélection est le résultat d'une intervention humaine ou, du moins, l'application d'un critère définie par l'homme, l'algorithme génétique devrait donc plutôt être rapproché de la sélection artificielle telle que la pratiquent les agriculteurs que la sélection naturelle, qui œuvre « en aveugle ».

III.2.2.2 L'enjambement ou croisement ou recombinaison

Lors de cette opération, deux chromosomes s'échangent des parties de leurs chaînes, pour donner de nouveaux chromosomes. Ces enjambements peuvent être simples ou multiples. Dans le premier cas, les deux chromosomes se croisent et s'échangent des portions d'ADN en un seul point. Dans le deuxième cas, il y'a plusieurs points de croisement. Pour les algorithmes génétiques c'est cette opération (le plus souvent sous sa forme simple) qui est prépondérante. Sa probabilité d'apparition lors d'un croisement entre deux chromosomes est un paramètre de l'algorithme génétique et dépend du problème et de la technique de recombinaison. La probabilité d'un enjambement est alors comprise entre 0 et 1.

III.2.2.3 Les mutations

A la suite des opérateurs de sélection et de croisement, on mime à nouveau un phénomène biologique, celui de la mutation. Au niveau biologique, une mutation est une modification de l'information génétique par dégradation ou substitution locale de paire de base : ceci permet de produire une nouvelle structure génétique. L'opérateur de mutation dans le cas des AGs possède la propriété de périodicité du parcours de l'espace de recherche : cette propriété indique que l'AG sera susceptible d'atteindre tous les points de l'espace, sans pour autant les parcourir tous dans le processus de résolution. La séquence des opérations de sélection et de croisement peut mener l'AG à "stagner" dans un ensemble de solutions identiques. Dans de telles conditions, tous les chromosomes deviennent identiques et, ainsi, la performance moyenne de la population ne s'améliore plus. Dans ce cas, la mutation aide l'AG à éviter la perte de diversité génétique et, par conséquent, elle garantit que l'AG ne va pas être bloquée dans un optimum local [9].

Le principe de la mutation consiste à modifier, avec une probabilité P_m faible, certains bits des chromosomes. Nous tirons tout d'abord pour chaque bit un nombre aléatoire P dans l'intervalle $[0,1]$. Puis, nous le comparons avec une probabilité de mutation P_m donnée :

- si $P > P_m$, le bit ne subira pas aucune modification.
- si $P < P_m$, la mutation est appliquée au bit correspondant.

Ainsi, le bit choisi pour muter sera remplacé par une valeur aléatoire, souvent proche de la valeur initiale. Dans le cas du codage binaire, cette mutation s'effectue simplement en remplaçant le bit '0' par '1' et vice versa.

III.3 Principe

Le but des algorithmes génétiques est de déterminer les extrêmes d'une fonction $f : X \rightarrow \mathbb{R}$, où X est un ensemble quelconque appelé espace de recherche et f est appelé fonction d'adaptation ou fonction dévaluation ou encore fonction *fitness*. La fonction agit comme une boîte noire pour l'AG. Aussi des problèmes très complexes peuvent être approchés par programmation génétique sans avoir de compréhension particulière du problème. Pour utiliser un AG, on doit disposer des cinq éléments suivants [7]:

1. *Un principe de codage de l'élément de population.* Cette étape associe à chacun des points de l'espace d'état une structure de données. Elle se place généralement après une phase de modélisation mathématique du problème traité. La qualité du codage des données conditionne le succès des algorithmes génétiques. Les codages binaires ont été très utilisés à l'origine. Les codages réels sont désormais largement utilisés, notamment dans les domaines applicatifs pour l'optimisation de problèmes à variables réelles
2. *Un mécanisme de génération de la population initiale.* Ce mécanisme doit être capable de produire une population d'individus non homogène qui servira de base pour les générations futures. Le choix de la population initiale est important car il peut rendre plus ou moins rapide la convergence vers l'optimum global. Dans le cas où l'on ne connaît rien du problème à résoudre, il est essentiel que la population initiale soit répartie sur tout le domaine de recherche.
3. *Une fonction à optimiser.* Celle-ci retourne une valeur de $\mathbb{R}^+$ appelée *fitness* ou fonction d'évaluation de l'individu.
4. *Des opérateurs permettant de diversifier la population au cours des générations et d'explorer l'espace d'état.* L'opérateur de croisement recompose les gènes d'individus existant dans la population, l'opérateur de *mutation* a pour but de garantir l'exploration de l'espace d'états.
5. *Des paramètres de dimensionnement :* taille de la population, nombre total de génération ou critère d'arrêt, probabilités d'application des opérateurs de croisement et de mutation.

Le principe général de fonctionnement d'un algorithme génétique est représenté sur la figure (III.1), on commence par générer une population d'individus d'une façon aléatoire. Pour passer d'une génération K à la génération $K+1$, les trois opérations suivantes sont répétées

pour tous les éléments de la population K . deux couple de parents P_1 et P_2 sont sélectionnés en fonction de leurs adaptation.

L'opérateur de croisement leur est appliqué avec une probabilité P_c (généralement autour de 0,6) et génère des couples d'enfants C_1 et C_2 . D'autres éléments P sont sélectionnés en fonction de leurs adaptations. L'opérateur de mutation leur est appliqué avec la probabilité P_m (P_m est généralement très inférieur a P_c est génère des individus mutés P' . les niveaux d'adaptation des enfants C_1 et C_2 et des individus mutés P' sont ensuite évalué avant insertion dans la nouvelle population.

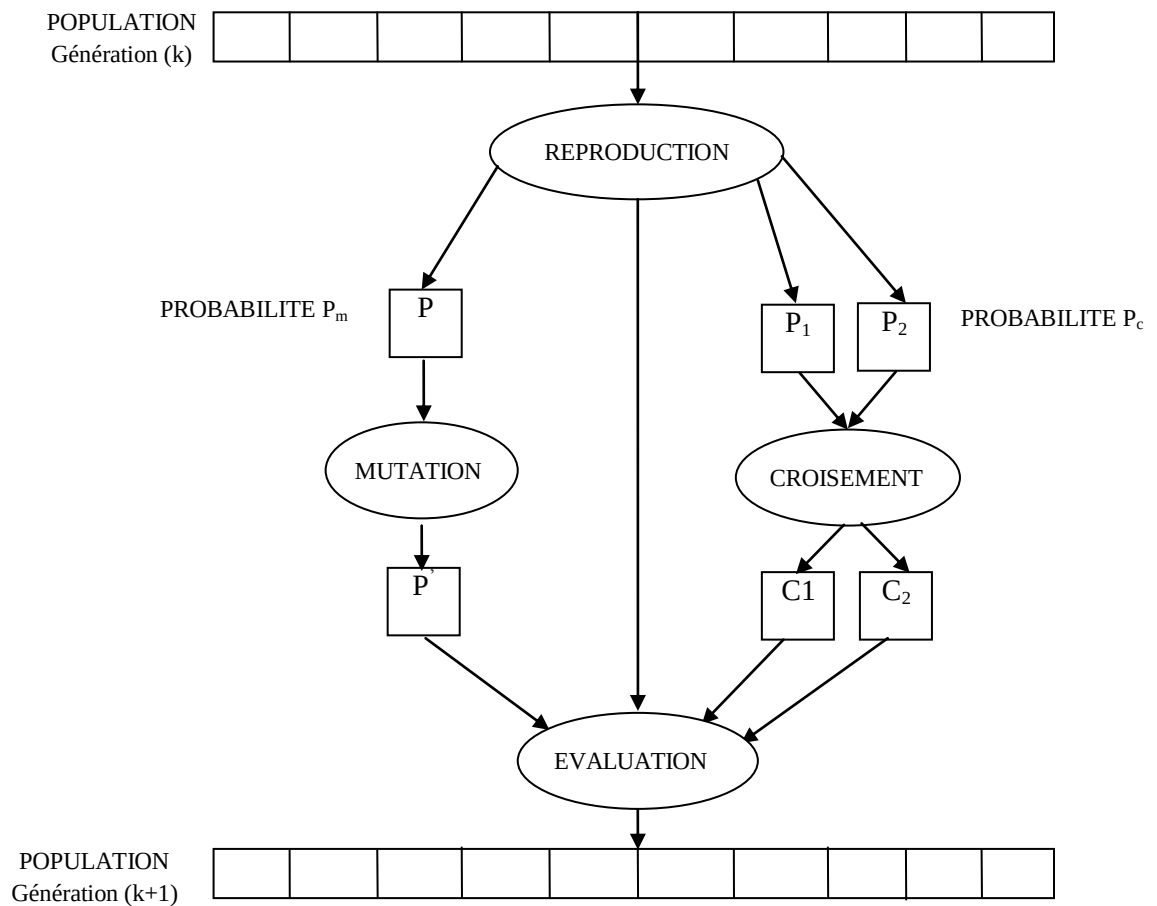


Figure III.1 : Principe général des algorithmes génétiques

III.4. Critère d'arrêt des algorithmes génétiques

Différents critères d'arrêts de l'algorithme peuvent être choisis :

- Le nombre de génération que l'on souhaite exécuter peut être fixé a priori. C'est ce que l'on est tenté de faire lorsque l'on doit trouver une solution dans un temps limité.
- L'algorithme peut être arrêté lorsque la population n'évolue plus ou plus suffisamment rapidement

III.5 Identification par algorithme génétique des pertes d'un Moteur à courant continu à excitation séparée

Dans cette partie de notre travail, on traite l'identification du modèle de pertes de puissance du moteur à courant continu à excitation séparée que nous avons présenté dans le chapitre précédent. Ce modèle peut être exprimé par l'équation (III.1) suivante :

$$P_{loss} = 1,4i_a^2 + 72i_f^2 + 2i_a + 91,189K_{st}i_a^2\omega^2 + K_h i_f^2\omega \quad (III.1)$$

Où K_{st} et K_h sont les deux paramètres à identifier du modèle de pertes.

La méthode d'optimisation par algorithmes génétiques sera utilisée pour déterminer le modèle de pertes de puissance à travers l'identification de ses deux paramètres en vue d'un calcul précis des pertes dans le moteur.

III.5.1 Essai expérimental du moteur à courant continu

Les données de l'essai du moteur sont utilisées pour identifier les valeurs des coefficients du modèle des pertes de puissance dans l'équation (III.1). Le schéma et la plateforme expérimentale pour les essais sont représentés dans la figure (III.2) et la figure (III.3) respectivement. La plateforme expérimentale contient essentiellement ; un pupitre d'alimentation en courant continu, un moteur à courant continu à excitation séparée couplé à une génératrice de charge qui débite sur un banc de charge résistive, et des appareils de mesure pour relever les tensions, les courant, la vitesse et le couple.

Les données de la plaque signalétique du moteur à courant continu à excitation séparée utilisé sont résumées dans le tableau (III.1).

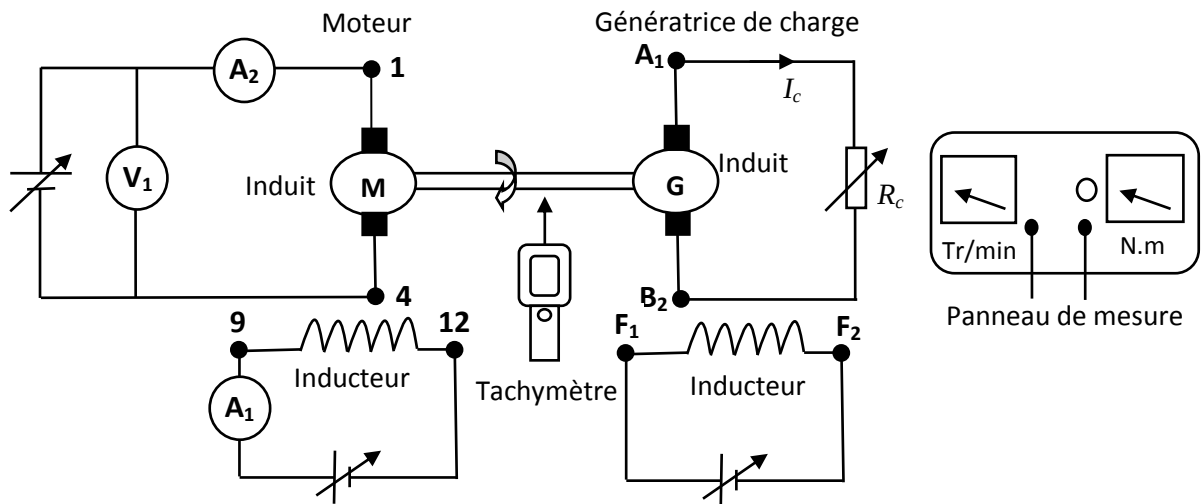


Figure III.2: Schéma de montage de l'essai du moteur à courant continu



Figure III.3: Plate forme expérimentale pour l'essai du moteur à courant continu

Tableau III.1 : Caractéristiques du moteur à courant continu

	Tension [V]	Courant [A]	Vitesse [tr/min]	Résistance [Ω]	Puissance [kW]
Inducteur	120	1.33	-----	72	3
Induit	220	16	1500	1.4	

Nous avons utilisé six valeurs de vitesse d'essai tel que 70%, 80%, 90%, 100%, 110% et 120% de la vitesse nominale.

Le procédé conventionnel pour commander la vitesse du moteur à courant continu à excitation séparée se divise en deux cas, la commande de la vitesse inférieure à la vitesse nominale est le premier cas. Le réglage de la tension d'induit où la tension d'excitation est constante est utilisé pour commander la vitesse dans ce cas. Le deuxième cas est la commande de vitesse supérieure à la vitesse nominale. La commande de vitesse pour ce cas utilise l'ajustement de la tension d'excitation tandis que la tension d'induit est constante.

Les résultats des tests sont présentés dans le tableau III.2. Les résultats sont divisés en deux groupes, le premier groupe est le résultat de l'essai à 70%, 90%, 100%, et 120% du régime nominal. Les données du premier groupe sont utilisées pour l'identification et le deuxième groupe sont les résultats de l'essai à 80% et 110% de la vitesse nominale, et les données de ce groupe sont utilisées pour la validation.

Tableau III.2 : Les résultats de tests du moteur à courant continu

Vitesse [tr/mn]		v_a(V)	i_a(A)	v_f(V)	i_f(A)	T_L(N.m)	p_{in}(W)	P_{out}(W)	P_{loss}(W)
70 %	1050	156	11.5	102	1.33	14.6	1975.6	1594.3	381.6
80%	1200	188	12.5	107	1.33	16.6	2492	2071.6	420.4
90%	1352	210	14.1	107	1.33	18.3	3103	2569.3	533.7
100%	1500	220	15.1	99	1.2	18.5	3440.8	2886	554.8
110%	1650	220	16.4	88	1.1	18.3	3704.8	3140.3	564.5
120%	1800	220	16	80	1	16.1	3600	3070	530

Dans le tableau (III.2), la puissance d'entrée (P_{in}) et la puissance de sortie (P_{out}) sont calculées en utilisant l'équation (III.2) et (III.3) respectivement. La tension d'induit (V_a) et la tension d'excitation (V_f) sont mesurées par les voltmètres, le courant d'induit (i_a) et le courant d'excitation (i_f) sont mesurés par les ampèremètres, alors que le couple de charge (T_L) est mesuré le couple mètre. Par la suite, les pertes de puissance (P_{loss}) du moteur à courant continu à excitation séparée seront calculées par l'équation (III.4).

$$P_{in} = v_a i_a + v_f i_f \quad (III.2)$$

$$P_{out} = T_L \omega \quad (III.3)$$

$$P_{loss} = P_{in} - P_{out} \quad (III.4)$$

III.5.2 Application de l'algorithme génétique à l'identification du modèle

A partir de l'équation (III.1) donnant le modèle de pertes, il y a quatre paramètres importants dans cette équation à savoir (R_a), (R_f), (K_{st}) et (K_h). Les valeurs de (R_a) et (R_f) sont déterminées à partir de mesures directes à l'ohmmètre. Dans cette essai, (R_a) et (R_f) sont égales à ($1,4 \Omega$) et (72Ω), respectivement. Par conséquent, les paramètres inconnue de l'équation (III.1) sont (K_{st}) et (K_h). Ces valeurs de Paramètre dépendent des matériaux constituant le moteur, par conséquent, il est difficile d'identifier ces paramètres.

L'algorithme génétique est appliqué à la recherche des paramètres appropriés. L'organigramme de la figure (III.3) montre la procédure d'optimisation par algorithme génétique appliqué pour l'identification des pertes de puissance du moteur à courant continu à excitation séparée. A partir des données de l'algorithme génétique telles que les limites inférieur et supérieur des paramètres recherchés (LB, UB), les paramètres de dimensionnement comme la taille de la population (T_p) et le nombre de générations (N_g), les critères d'arrêt...etc., l'algorithme génétique choisi aléatoirement une population d'individus (paramètres) avec lesquels il va calculer les pertes en utilisant l'équation (III.1). Ensuite, la fonction d'adaptation ou la fonction coût (fonction à minimiser) donnée par l'équation (III.5) ci-dessous est utilisée pour évaluer les solutions de l'algorithme génétique.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum |P_{loss(expérimentale)}^2 - P_{loss(calculée)}^2|}{n}} \quad (III.5)$$

La valeur de n dans l'équation (III.5) est le nombre total de données expérimentales utilisé. Le but de la recherche par algorithme génétique ici est la valeur minimale $RMSE$ (Root Mean Square Error = racine de l'erreur quadratique moyenne) calculée. Si les critères d'arrêt sont satisfaits l'algorithme génétique donne les résultats (paramètres identifiés et représentation graphique) si non, l'algorithme applique les différents opérateurs génétiques pour la création de la population d'individus pour l'itération suivante. L'algorithme effectue une recherche intelligente sur l'ensemble de l'espace de recherche et retourne une solution améliorée à chaque itération. L'algorithme s'arrête dès que le nombre limite de génération est atteint et retourne le résultat final qui correspond à la dernière itération.

La solution optimale retournée par l'algorithme est le résultat d'amélioration des individus (solutions) de génération en génération.

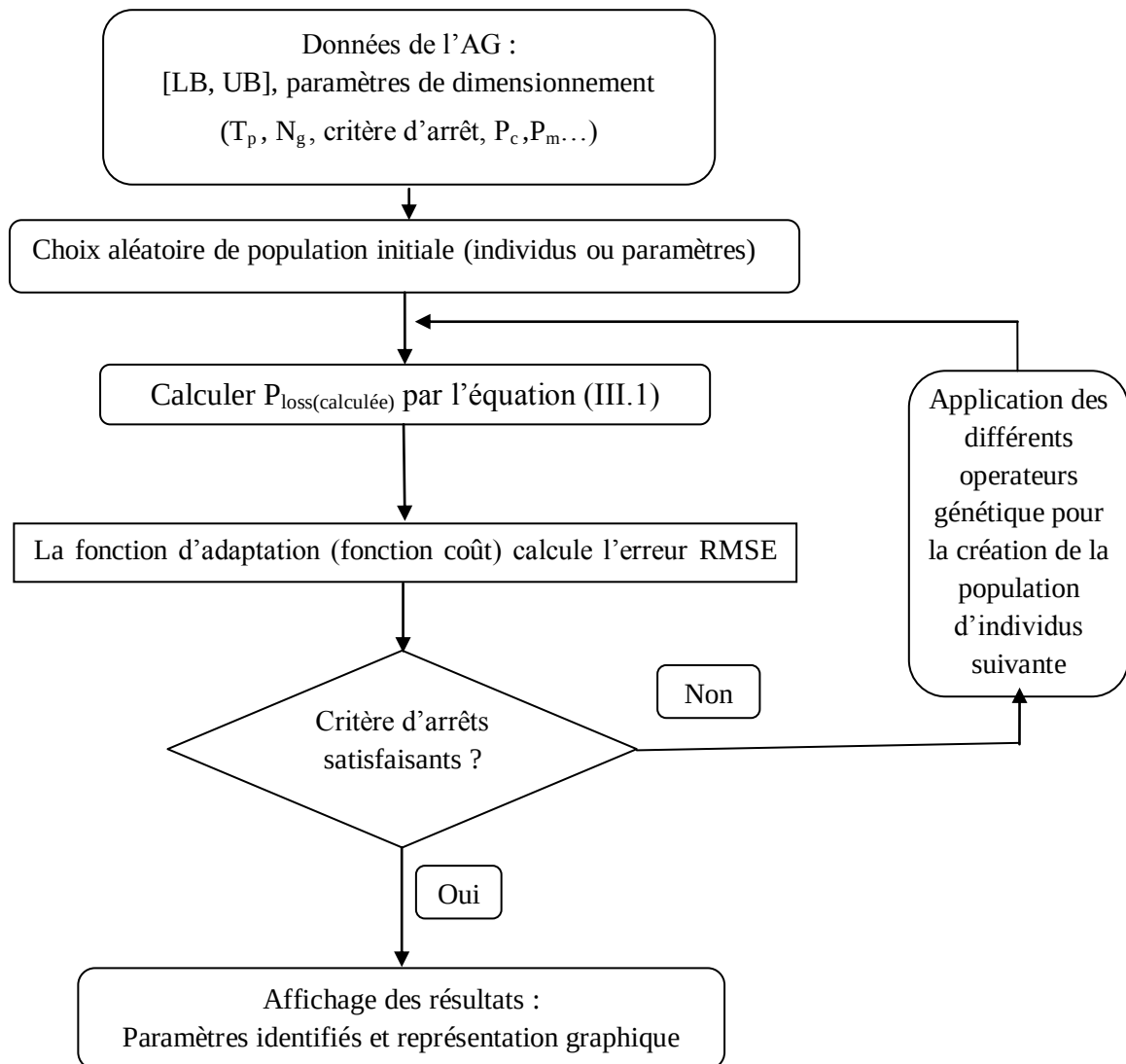


Figure III.3: Organigramme d'identification des paramètres du modèle de pertes par AG

III.5.3 Résultats d'identification des paramètres du modèle de pertes

L'algorithme a été exécuté pour différentes valeurs limites inférieur et supérieur des paramètres. Les résultats sont donnés dans le tableau (III.3).

Tableau III.3 : les résultats de la recherche par l'algorithme génétique

Cas	Paramètres				
	K_{st}		K_h		$RMSE$
	Limites	Résultat	Limites	Résultat	
1 ^{er}	$[1.10^{-8}, 1.10^{-5}]$	$8,8473.10^{-8}$	$[1.10^{-5}, 1.10^{-1}]$	$9,5907.10^{-5}$	2,9006
2 ^{ème}	$[1.10^{-7}, 1.10^{-6}]$	1.10^{-7}	$[1.10^{-6}, 1.10^{-3}]$	1.10^{-6}	7,6721
3 ^{ème}	$[1.10^{-8}, 1.10^{-6}]$	$8,6154.10^{-8}$	$[1.10^{-6}, 1.10^{-4}]$	$1,4842.10^{-6}$	1,9301
4 ^{ème}	$[1.10^{-8}, 1.10^{-6}]$	$8,1820.10^{-8}$	$[1.10^{-7}, 1.10^{-5}]$	$1,2940.10^{-7}$	0,1325
5 ^{ème}	$[1.10^{-8}, 1.10^{-6}]$	$7,9043.10^{-8}$	$[1.10^{-6}, 1.10^{-5}]$	$9,9978.10^{-6}$	1,0182
6 ^{ème}	$[1.10^{-9}, 1.10^{-6}]$	$8,8258.10^{-8}$	$[1.10^{-5}, 1.10^{-4}]$	$1,07115.10^{-5}$	2,8034

A partir de ce tableau, on peut constater que la valeur minimale de la fonction coût $RMSE$ corresponde au 4^{ème} cas avec les paramètres $K_{st} = 8,1820.10^{-8}$ et $K_h = 1,2940.10^{-7}$

Par conséquent, le modèle des pertes de puissance (équation III.1) dans notre moteur à courant continu à excitation séparée sera représenté par l'équation (III.6) ci-dessous :

$$P_{loss} = 1,4i_a^2 + 72i_f^2 + 2i_a + (7,4610.10^{-6})i_a^2\omega^2 + (1,2940.10^{-7})i_f^2\omega \quad (III.6)$$

La figure (III.4) donne un exemple de la représentation graphique des résultats après une exécution de l'algorithme génétique.

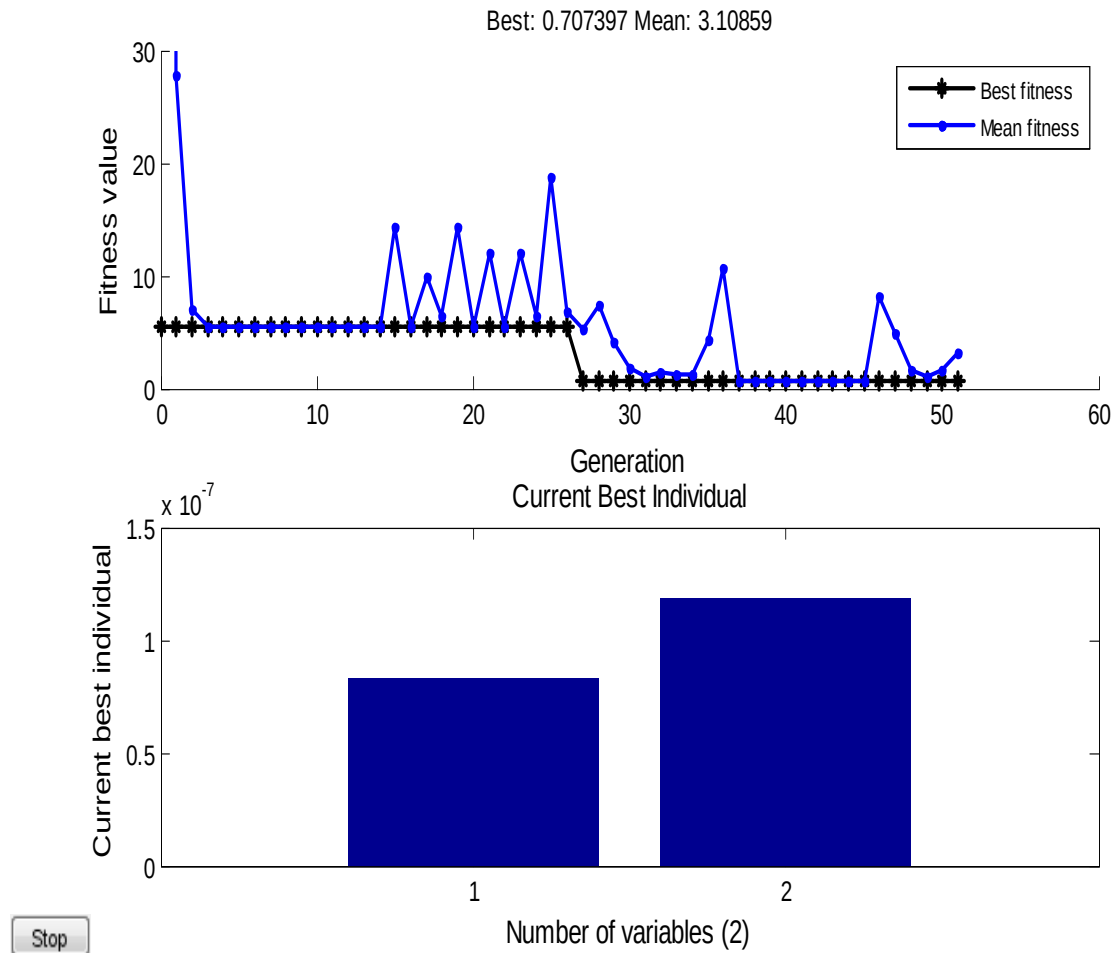


Figure III.4 : Exemple de résultats graphiques de l'algorithme génétique (fonction coût et paramètres).

III.5.4 Validation du modèle de pertes identifié

Après avoir ces résultats on donne une comparaison entre les deux pertes au niveau de quelque points de références et cela pour mettre en relie le degré de précision des paramètres optimisés et calculer l'erreur relative commise au niveau de ces points.

Le modèle des pertes de puissance (III.6) est validé par comparaison avec les données de l'essai expérimental pour des vitesses de rotation de 90% et 110% de la vitesse nominale. Les résultats de la validation de l'équation (III.6) sont présentés dans le tableau (III.4).

Tableau III.4 : Comparaison entre P_{loss} expérimentale et P_{loss} calculée pour le groupe de validation

% de la vitesse nominale	$P_{\text{loss (experimental)}} (W)$	$P_{\text{loss (calculée)}} (W)$	Erreur (%)
80%	420.4	389.5208	7.34
110%	564.5	556.3771	1.43

On remarque que le modèle est plus précis pour une vitesse de rotation de 110 % de la vitesse nominale.

Le tableau (III.5) donne une comparaison entre les pertes calculées par le modèle (III.6) et les pertes mesurées avec un calcul d'erreur pour l'ensemble des vitesses mesurées.

Tableau III.5 : Comparaison des pertes pour l'ensemble des vitesses mesurées

% de la vitesse nominale	$P_{\text{loss (experimentale)}} (W)$	$P_{\text{loss (calculée)}} (W)$	Erreur(%)
70 %	381.6	347.4408	8.95
80 %	420.4	389.5205	7.34
90 %	533.7	463.6290	13.13
100 %	554.8	495.07	10.76
110 %	564.5	556.3768	1.43
120 %	530	530.2655	0.05

Les courbes de la figure (III.5) montre la différence entre les pertes calculées par le modèle et les pertes mesurées expérimentalement, et cela pour l'ensemble des mesures.

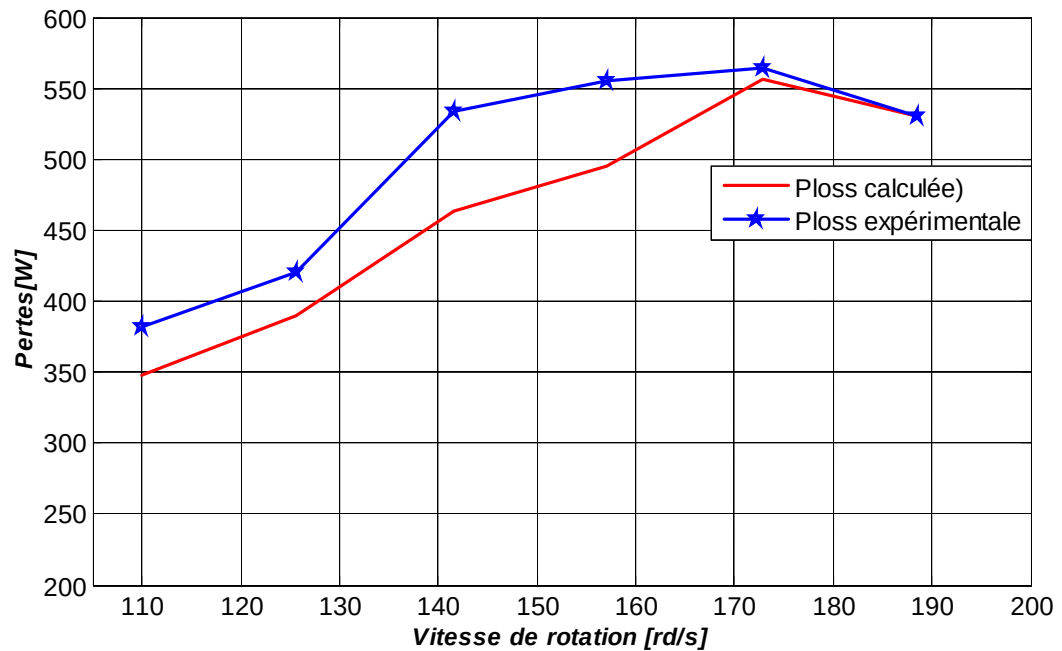


Figure III.5 : Validation par comparaison des pertes calculées et pertes mesurées

III.5.5 Interprétation des résultats

A partir des résultats obtenus, on peut remarquer que la précision du modèle des pertes dans le moteur à courant continu à excitation séparée que nous avons étudié varie avec la vitesse de rotation. On peut distinguer trois zones différentes, la première concerne les vitesses inférieures à 90% de la vitesse nominale. Dans cette zone, le modèle des pertes présente une précision moyenne avec une erreur inférieure à 10 %. La deuxième zone est située entre 90 % et 100 % de la vitesse nominale où l'erreur entre les pertes calculées et les pertes mesurées est supérieure à 10 %, ce qui veut dire que le modèle des pertes identifié est moins précis. Au-delà de 100 % de la vitesse nominale (la troisième zone), le modèle des pertes présente une bonne précision dans le calcul des pertes dans le moteur avec une erreur minimale de 0.05 % pour une vitesse de 120 % de la vitesse nominale.

La précision du modèle des pertes identifié peut être améliorée en tenant compte des conditions de l'essai expérimental (précision des appareils de mesures tel que le couple mètre), de tenir compte d'autres types de pertes qui ont été négligés, ou bien utilisé d'autres méthodes d'optimisation plus performantes.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'application de l'algorithme génétique pour identifier le modèle des pertes de puissance dans un moteur à courant continu à excitation séparée d'une puissance de 3 kW. Les résultats obtenus peuvent être jugés acceptable et ils confirment que la méthode de l'algorithme génétique peut fournir le modèle précis des pertes de puissance.

Conclusion générale

Les entraînements électriques à base de moteurs à courant continu sont très nombreux à travers plusieurs domaines d'application tels que la traction, le levage, la propulsion des sous marins, les machines outils, et d'autres industries. Une quantité importante d'énergie peut encore être économisée en minimisant les pertes dans ces moteurs.

Dans le cadre de ce travail, nous avons présenté les différentes pertes de puissance dans les machines à courant continu d'une manière générale, pour aboutir à la fin à un modèle pour le calcul des pertes. Ce modèle est caractérisé par des paramètres liés aux matériaux qui constituent le moteur.

Pour l'identification des paramètres caractérisant le modèle des pertes de puissance dans un moteur à courant continu à excitation séparée, nous avons utilisé la méthode d'optimisation par algorithmes génétiques sous environnement Matlab.

Le résultat d'identification nous permis d'avoir un modèle de pertes de puissance qui a été validé par comparaison avec les relevées expérimentales des pertes dans le moteur étudié.

Les résultats obtenus peuvent être jugés acceptable et ils confirment que la méthode de l'algorithme génétique peut fournir le modèle précis des pertes de puissance.

Annexe :Listing du programme développé sous Matlab utilisant la fonction ag (Algorithmes génétiques)

```
function [x fval] = LSE_loss_Minimisation()
    options = optimset('OutputFcn', @myoutput);
    LB=[1e-7 1e-6];
    UB=[1e-5 1e-4];
    % [x fval] = ga(@objfun,2,[],[],[],[],LB,UB,[],options);
    [x fval] = ga(@Pertes,2,[],[],[],[],LB,UB,[],options);
    disp('les valeurs de x optimal :');
    disp(x);
    disp('la valeur de la fonction objectif est : ');
    disp(fval);
    Pertes( x);
end
% La fonction objective a minimiser est la racine de la moyenne de l'erreur
% des moindres carrés RMSE (Root Mean Square Error)

function [ RMSE ycal] = Pertes( x)

xexp=[ 1.0996e+002  1.4158e+002  1.5708e+002  1.8850e+002];
yexp=[381.6 533.7  554.8 530];

LSE=0;
for i=1:4
    Ra=1.4;Rf=72;
    If=[1.33  1.33 1.2 1];
    Ia=[11.5 14.1 15.1 16];
    N=[1050 1352 1500 1800];
    W=(2*pi/60).*N;

    ycal(i)=(Ra.*Ia(i).^2+Rf.*If(i).^2+2.*Ia(i)+(60^2/(4*pi^2))*x(1)*Ia(i)^2*W(
i)^2+If(i)^2*W(i)*x(2));
    RMSE=sqrt(LSE+((yexp(i)-ycal(i)).^2/length(yexp)));

    i=i+1;
end

disp('RMSE :');
disp(RMSE);

end
```

References bibliographiques

- [01] S. Udosuk et al., "Power Loss Identification Of Separately Excited DC Motor Using Adaptive Tabu Search", European scientific research, issn 1450-216x, vol.60 N° 4, 2011, pp. 470-479.
- [02] T. Wildi, G. Sybille, "Electrotechnique", de boeck, 4^{ème} Edition, 2005.
- [03] G. Seguiet, F. Notelet, "Electrotechnique Industrielle", Technique et Documentation, 2^{ème} Edition, 1994.
- [04] M. Hadjeras, M. Belbey, "Etude des caractéristiques d'un moteur à c.c à différents types d'excitation", Mémoire de fin d'étude de licence Professionnelle en Electrotechnique Industrielle, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012.
- [05] F. Hayet, "Identification des paramètres d'une Machine à Courant Continu", Mémoire de fin d'étude d'Ingénieur, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2011.
- [06] C. Chevassu, "Machines Electriques", Manuel libre sur <http://mach.elec.free.fr>. Janvier 2012.
- [07] A. Miouat, "Identification-Optimisation Paramétrique Et Quantification des Pertes dans les Matériaux Ferromagnétiques Doux", Mémoire de magister en électrotechnique, Université Hadj Lekhdar de Batna, Février 2006.
- [08] N.Mancer, "Contribution à l'optimisation de la puissance réactive en présence de dispositifs de compensation dynamique (FACTS)", Mémoire de magister en électrotechnique, option réseaux électrique. Université Mohamed Khider-Biskra. Janvier 2012 .
- [09] L . Piotrovski et M . Kostenko, " machines électriques", 3^{em} edition, Mir, Moscou 1997 .

Résumé

Les entraînements électriques à base de moteurs à courant continu sont très nombreux à travers plusieurs domaines d'application tels que la traction, le levage, la propulsion des sous-marins, les machines outils, et d'autres industries. Une quantité importante d'énergie peut encore être économisée en minimisant les pertes dans ces moteurs.

Dans le cadre de ce travail, nous avons présenté les différentes pertes de puissance dans les machines à courant continu d'une manière générale, pour aboutir à la fin à un modèle pour le calcul des pertes. Ce modèle est caractérisé par des paramètres liés aux matériaux qui constituent le moteur.

Pour l'identification des paramètres caractérisant le modèle des pertes de puissance dans un moteur à courant continu à excitation séparée, nous avons utilisé la méthode d'optimisation par algorithmes génétiques sous environnement Matlab.

Le résultat d'identification nous permis d'avoir un modèle de pertes de puissance qui a été validé par comparaison avec les relevées expérimentales des pertes dans le moteur étudié.

Mots clés :

Machine à courant continu, moteur à courant continu à excitation séparée, les pertes de puissance, modèle de pertes de puissance, algorithme génétique, identification, optimisation.