



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de génie électrique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
Génie électrique  
Electromécanique

Réf. :

---

Présenté et soutenu par :  
**Dehamnia Islam & Guergazi Elhoucine**

Le : lundi 2 juin 2025

## Identification des paramètres électriques d'un moteur à courant continu par l'algorithme d'optimisation par essaim de particule

---

### Jury :

|    |                        |    |                   |            |
|----|------------------------|----|-------------------|------------|
| M. | CHENOUI Halim          | Dr | Université Biskra | Président  |
| M. | DENDOUGA Abdelhakim    | Pr | Université Biskra | Examineur  |
| M. | MEGHERBI Ahmed Chaouki | Pr | Université Biskra | Rapporteur |



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de génie électrique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
Génie électrique  
Electromécanique

Réf :

---

## Identification des paramètres électriques d'un moteur à courant continu par l'algorithme d'optimisation par essaim de particule

Le : .....

**Présenté par :**

DEHAMNIA Islam  
&  
GUERGAZI Elhoucine

**Avis favorable de l'encadreur :**

Pr MEGHERBI Ahmed Chaouki

**Signature Avis favorable du Président du Jury**

**Cachet et signature**

---

# Dédication

---

*Je dédie ce modeste travail :*

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

---

# Dédication

---

*Je dédie ce modeste travail :*

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

" Guergazi Elhoucine "

---

# Remerciement

---

Nous tenons à exprimer nôtre profonde gratitude et nos sincères remerciements à nôtre encadreur Mr Megherbi Ahmed Chaouki 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 lhonneur de juger ce modeste travail.

---

# Table des matières

---

|                                                            |           |
|------------------------------------------------------------|-----------|
| Dédication                                                 | 1         |
| Dédication                                                 | 1         |
| Remerciement                                               | 2         |
| Notations                                                  | 6         |
| Introduction                                               | 10        |
| <b>1 Rappel théorique sur la machine à courant continu</b> | <b>11</b> |
| 1.1 Introduction . . . . .                                 | 11        |
| 1.2 Définition machine à courant continu . . . . .         | 12        |
| 1.3 Applications de moteurs à courants continu . . . . .   | 12        |
| 1.3.1 Moteur à courant continu : . . . . .                 | 12        |
| 1.3.2 Génératrice à courant continu : . . . . .            | 12        |
| 1.4 Constitution du moteur à courant continu . . . . .     | 12        |
| 1.4.1 L'inducteur : . . . . .                              | 13        |
| 1.4.2 L'induit . . . . .                                   | 15        |
| 1.4.3 L'entrefer . . . . .                                 | 16        |
| 1.5 Principe de fonctionnement . . . . .                   | 16        |
| 1.6 Bilan de puissance . . . . .                           | 17        |
| 1.6.1 La puissance électrique absorbée . . . . .           | 17        |
| 1.6.2 Puissance électromagnétique . . . . .                | 18        |

|          |                                                                                                |           |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1.6.3    | La puissance électrique utile . . . . .                                                        | 18        |
| 1.6.4    | La puissance mécanique . . . . .                                                               | 18        |
| 1.6.5    | Couple électromagnétique . . . . .                                                             | 18        |
| 1.6.6    | Les pertes . . . . .                                                                           | 19        |
| 1.6.7    | Le rendement . . . . .                                                                         | 19        |
| 1.6.8    | La vitesse de rotation . . . . .                                                               | 19        |
| 1.7      | Mode d'excitation . . . . .                                                                    | 19        |
| 1.7.1    | Excitation séparée ou indépendante . . . . .                                                   | 19        |
| 1.7.2    | Excitation série . . . . .                                                                     | 20        |
| 1.7.3    | Excitation dérivation ou shunt . . . . .                                                       | 20        |
| 1.7.4    | Excitation composée (compound) . . . . .                                                       | 20        |
| 1.8      | Les avantages et les inconvénients . . . . .                                                   | 21        |
| 1.8.1    | les avantages . . . . .                                                                        | 21        |
| 1.8.2    | les inconvénients . . . . .                                                                    | 21        |
| 1.9      | Conclusion . . . . .                                                                           | 21        |
| <b>2</b> | <b>Modélisation d'un moteur à courant continu</b>                                              | <b>23</b> |
| 2.1      | Introduction . . . . .                                                                         | 23        |
| 2.2      | Modélisation d'un moteur à courant continu : . . . . .                                         | 23        |
| 2.3      | Les hypothèses . . . . .                                                                       | 24        |
| 2.4      | Modèle de connaissance . . . . .                                                               | 24        |
| 2.5      | Les équations régissant la machine à courant continu . . . . .                                 | 24        |
| 2.5.1    | Les équations électriques du modèle dynamique . . . . .                                        | 24        |
| 2.5.2    | L'équation mécanique . . . . .                                                                 | 25        |
| 2.5.3    | Les équations électromécaniques dans le domaine de Laplace . . . . .                           | 25        |
| 2.6      | Moteur à excitation séparée . . . . .                                                          | 26        |
| 2.6.1    | Les équations Mécaniques : . . . . .                                                           | 27        |
| 2.6.2    | Les équations Magnétiques : . . . . .                                                          | 27        |
| 2.7      | Les paramètres de la machine à simuler . . . . .                                               | 27        |
| 2.8      | Le schéma bloc du moteur à excitation séparée . . . . .                                        | 28        |
| 2.8.1    | Les caractéristiques à vide du moteur à courant continu . . . . .                              | 28        |
| 2.8.2    | Les caractéristiques en charge du moteur à courant continu . . . . .                           | 30        |
| 2.9      | Identification des paramètres d'un moteur à courant continu par La méthode classique . . . . . | 32        |
| 2.9.1    | Détermination de la résistance d'induit $R_a$ : ( La méthode voltampérométrique) . . . . .     | 32        |
| 2.9.2    | Détermination de la résistance d'inducteur $R_e$ . . . . .                                     | 33        |
| 2.9.3    | Détermination des inductances $L_a$ et $L_e$ . . . . .                                         | 33        |

|          |                                                                                                     |           |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.9.4    | Détermination de la constante électromagnétique K . . . . .                                         | 34        |
| 2.9.5    | Détermination du coefficient de frottement visqueux f . . . . .                                     | 35        |
| 2.9.6    | Détermination le moment d'inertie J . . . . .                                                       | 35        |
| 2.10     | Conclusion . . . . .                                                                                | 36        |
| <b>3</b> | <b>Identification des paramètres électriques d'un moteur à courant continu par l'algorithme PSO</b> | <b>37</b> |
| 3.1      | Introduction . . . . .                                                                              | 37        |
| 3.2      | Méthode méta-heuristique . . . . .                                                                  | 38        |
| 3.3      | Définition de l'optimisation . . . . .                                                              | 38        |
| 3.4      | PSO (Optimisation par les méthodes dessaims de particules) . . . . .                                | 38        |
| 3.5      | Fonction objectif . . . . .                                                                         | 40        |
| 3.6      | Principe de la PSO . . . . .                                                                        | 40        |
| 3.6.1    | Formulation mathématique du pso . . . . .                                                           | 41        |
| 3.7      | Configuration des paramètres . . . . .                                                              | 41        |
| 3.8      | L'algorithme d'optimisation PSO . . . . .                                                           | 42        |
| 3.9      | Schéma bloc de l'algorithme de PSO . . . . .                                                        | 43        |
| 3.10     | Avantages et inconvénients de la technique PSO . . . . .                                            | 43        |
| 3.10.1   | Les avantages . . . . .                                                                             | 43        |
| 3.10.2   | Les inconvénients : . . . . .                                                                       | 44        |
| 3.11     | Identification des paramètres électriques par méthode PSO . . . . .                                 | 44        |
| 3.12     | Conclusion . . . . .                                                                                | 49        |
|          | <b>Conclusion</b>                                                                                   | <b>51</b> |



---

# Notations

---

- $B$  = Un champ magnétique .
- $E$  = Force électromotrice (V).
- $K$  = la constante de la F.E.M
- $K'$  = La constante du couple (est égale  $K.\phi$ )
- $K_{moy}$  = La constante électromagnétique moyenne.
- $P_a$  = Puissance électrique absorbée.(w).
- $P_{je}$  = les pertes joules statorique (j).
- $P_{jR}$  = les pertes joules rotorique (j).
- $P_{em}$  = puissance électromagnétique.(w).
- $T_{em}$  = couple électromagnétique de la machine(N.m).
- $P_m$  = les pertes mécaniques.(j).
- $P_F$  = les pertes fer(j).
- $P_c$  = les pertes collectives (j).
- $P_u$  = la puissance utile (w)
- $T_u$  = Couple utile (N.m)
- $T_R$  = Couple résistant (N.m).
- $U_a$  = Tension d'induit (V) .
- $I_a$  = Courant d'induit (A).
- $L_a$  = Inductance propre de l'induit (H).
- $R_a$  = Résistance de l'induit ( $\Omega$ )
- $R_{am}$  = Résistance moyenne de l'induit ( $\Omega$ ) .
- $U_e$  = Tension de l'inducteur (V).
- $R_e$  = Résistance de l'inducteur ( $\Omega$ )

- $L_e$  = Inductance propre de l'inducteur (H).
- $I_e$  = Courant d'excitation (A).
- $I_q$  = Courant d'induit sur l'axe q (A).
- $E$  = Force électromotrice généré par l'induit (V).
- $E_e$  = Force électromotrice généré par l'inducteur (V)
- $F$  = Force de l'aplace
- $\Omega$  = vitesse de rotation de l'induit (rad /s).
- $\phi$  = flux sous un pôle d'inducteur (wb).
- $f$  = coefficient de frottement (J.s) .
- $j$  = Moment d'inertie du rotor ( $Kg.m^2$ ).
- $P$  = Nombre de pôle .
- $\eta$  = le rendement de moteur
- $\phi_f$  = Flux magnétique de la bobine d'excitation(enroulement séparée) (Wb).
- $\phi_q$  = Flux magnétique du rotor sur l'axe q (Wb).
- $\phi_d$  = Flux magnétique du rotor sur l'axe d (Wb).
- $M_{fd}$  = Inductance mutuelle entre induit et inducteur (enroulement séparée) (H).
- $T_m$  = Couple mécanique (N.m).
- $V_a$  = Tension d'alimentation alternative au rotor (V) .
- $V_e$  = Tension d'alimentation alternative à l'inducteur (V) .
- $Z_a$  = Impédance d'induit ( $\Omega$ ) .
- $Z_e$  = Impédance d'inducteur ( $\Omega$ ) .
- $Z_{am}$  = Impédance moyenne de l'induit ( $\Omega$ ) .
- $Z_{em}$  = Impédance moyenne de l'inducteur ( $\Omega$ ) .
- $P_{meca}$  = Puissance mécanique (W) .
- $U_{aux}$  = Tension de l'enroulement auxiliaire (V) .
- $U_c$  = Tension d'enroulement de compensation (V).
- $U_q$  = Tension d'induit sur l'axe q (V).
- $U_f$  = Tension de l'enroulement d'excitation (enroulement séparée) (V).
- $U_a$  = Tension du circuit de l'induit (V).
- **Acronymes**
- $MCC$  = Machine à courant continu.
- $GWO$  = L'optimisation du loup gris(Grey wolf optimization (ENG)).
- $PSO$  = optimisation par essaim de particule (particule swarm optimization (ENG))
- $GA$  = Algorithme génétique .

---

# Table des figures

---

➤ **Chapiter 01 :**

- I.1. Schéma de composant d'un machine à courant continu .
- I.2. Schéma de l'inducteur à aimant permanent .
- I.3. Inducteur d'un machine à courant continu .
- I.4. Carcasse d'un machine à courant continu.
- I.5. Schéma de composant d'inducteur .
- I.6. Schéma de composant de l'induit .
- I.7. Schéma d'un encoche .
- I.8. le Schéma de balais .
- I.9. Collecteur d'un machine à courant continu .
- I.10. Schéma principe de fonctionnement d'un moteur à courant continu.
- I.11. Bilan de puissance de moteur à courant continu.
- I.12. Illustration de la production d'un couple électromagnétique .
- I.13. Modèle électrique du MCC à excitation séparée .
- I.14. Modèle électrique du MCC à excitation série .
- I.15. Modèle électrique du MCC à excitation shunte.
- I.16. Modèle électrique du MCC à excitation compound.

➤ **Chapiter02 :**

- II.1. Modèle équivalent du moteur à courant continu.
- II.2. Schéma équivalent de l'induit .
- II.3. Schéma bloc du moteur à courant continu .
- II.4. Schéma équivalent d'un moteur à excitation séparée .

- II.5. Le schéma bloc de la MCC à excitation séparée à vide.
- II.6. Courbe de courant d'induit
- II.7. Courbe de Couple électromagnétique.
- II.8. Courbe de Vitesse de rotation du moteur.
- II.9. le schéma bloc de la MCC à excitation séparée en charge .
- II.10. Courbe de courant induit du moteur .
- II.11. Courbe de couple électromagnétique.
- II.12. Courbe de vitesse de rotation du moteur .
- II.13. Montage de la méthode de mesure de la voltampérométrie
- II.14. Montage de mesure du courant et de la tension  $I_a$  et  $V_a$  d'induit .
- II.15. Montage de mesure du courant et de la tension  $I_e$  et  $V_e$  de l'inducteur.
- II.16. Courbe de couple électromagnétique  $T_{em}$  en fonction de vitesse  $\Omega$  .
- **Chapiter 03 :**
- III.1. Groupe de : (a)oiseaux, (b)poissons, (c)fourmis, (d)abeilles
- III.2. Illustration de déplacement de la particule.
- III.3. Organigramme de l'algorithme de PSO.
- III.4. Schéma de l'application de l'algorithme PSO pour identifier les paramètres électriques du MCC.
- III.5. Schéma bloc général expliquant le fonctionnement de PSO.
- III.6. Courbe de fonction objective (Fitness).
- III.7. Courbe de résistance de l'induit  $R_a$ .
- III.8. Courbe d'inductance de l'induit  $L_a$ .
- III.9. Courbe de résistance de l'inducteur  $R_e$ .
- III.10. Courbe d'inductance de l'inducteur  $L_e$ .
- III.11. Les courbes de vitesse de MCC réelle et modèle de PSO.
- III.12. Les courbes de courant de l'induit du MCC réel et du modèle PSO.

---

# Introduction

---

Les moteurs à courant continu, convertisseurs d'énergie électrique en énergie mécanique, jouent un rôle prépondérant dans l'industrie[25], en particulier dans des applications de traction électrique telles que les locomotives et les tramways, où la maîtrise de la vitesse est cruciale. Cette facilité de réglage et de modification de leur vitesse représente d'ailleurs un atout majeur de ces moteurs. L'objectif de cette étude est d'identifier les paramètres d'un moteur à courant continu à l'aide d'une méthode métaheuristique appelée l'algorithme PSO. Ce travail s'articule autour de trois chapitres :

- ✓ Le premier offre un aperçu général du moteur à courant continu, de ses applications et de son historique, sans omettre sa conception et son principe de fonctionnement. Nous y analysons le bilan de puissance, en détaillant les différents types de puissances, les pertes, les couples, etc. Le chapitre se conclut par une présentation des modes d'excitation ainsi que des avantages et inconvénients de ce type de moteur.

- ✓ Le chapitre 2 est consacré à la modélisation d'un moteur à courant continu à excitation séparée. En nous appuyant sur les équations électriques et mécaniques, nous simulons un modèle afin d'examiner son comportement à travers l'étude du courant d'induit, du couple électromagnétique et de la vitesse.

- ✓ Enfin, le chapitre 3 traite de l'identification des paramètres d'un moteur à courant continu via l'algorithme PSO, en explicitant son concept, son fonctionnement et les éléments qui s'y rapportent. Nous y abordons les paramètres de cet algorithme et son schéma opératoire, sans oublier ses points forts et ses limites. La partie applicative de ce dernier chapitre illustre notre démarche : nous y avons simulé les paramètres d'un modèle de moteur à courant continu et les avons confrontés à ceux d'un moteur réel, dans le but de rapprocher le comportement du modèle de celui du moteur réel en analysant l'erreur.

---

# Rappel théorique sur la machine à courant continu

---

## 1.1 Introduction

Les moteurs à courant continu sont des dispositifs qui convertissent l'énergie électrique en énergie mécanique. Leur conception est similaire à celle des génératrices, ce qui permet à une même machine de fonctionner indifféremment comme moteur ou comme générateur. Ces machines sont largement utilisées dans de nombreux secteurs industriels et sont intrinsèquement à vitesse variable. Parmi leurs nombreuses applications, on trouve notamment la traction électrique, comme les locomotives et les tramways.

Dans ce chapitre, nous aborderons les aspects fondamentaux des moteurs à courant continu, en traitant notamment des points suivants : sa définition, sa fonction et son évolution historique. Ensuite, nous étudions sa constitution, en détaillant la structure du rotor et de l'inducteur. Puis, nous passons au principe de fonctionnement du moteur à courant continu, son bilan de puissance et les quatre principaux modes d'excitation pour ce type de moteur : excitation séparée, shunt, série et composée. Pour conclure, nous exposerons certains avantages et inconvénients de cette machine.

## 1.2 Définition machine à courant continu

Un moteur à collecteur à courant continu, conçu pour convertir l'énergie électrique continue en énergie mécanique, est constitué d'un induit, d'un collecteur et de pôles magnétique.

Ces derniers peuvent être alimentés par une source de courant ou être des aimants permanents[1].

## 1.3 Applications de moteurs à courants continu

### 1.3.1 Moteur à courant continu :

On trouve des moteurs à courant continu dans de nombreuses applications :

1. les moteurs à courant continu sont présents dans de nombreux véhicules électriques comme les trains, les métros, les tramways et les trolleybus.
2. On utilise souvent des moteurs à courant continu pour les commandes d'appareils de levage et de manutention.
3. Les laminoirs (slabbings, bloomings) utilisent des moteurs à courant continu très puissants (jusqu'à 12000 KW).
4. En métallurgie, on utilise aussi beaucoup de moteurs à courant continu pour régler la vitesse de machines.
5. De grands moteurs à courant continu font tourner les hélices des navires électrique.
6. Voitures, tracteurs, avions et autres véhicules électriques utilisent des moteurs à courant continu pour leurs équipements électriques.
7. On trouve de petits moteurs à courant continu dans divers systèmes d'automatisation[2].

### 1.3.2 Génératrice à courant continu :

1. Ces machines alimentent en courant continu à basse tension des installations industrielles comme les usines de galvanisation et d'électrolyse.
2. On utilise aussi des générateurs à courant continu spéciaux pour le soudage, l'éclairage des trains et d'autres applications[2].

## 1.4 Constitution du moteur à courant continu

Comme les autres machines rotatives. Le moteur à courant continu est composé d'un stator et d'un rotor séparés par un entrefer. Cependant, il nécessite un dispositif spécifique pour fonctionner : le collecteur et les balais [1]. Les principaux composants d'un moteur à courant continu sont illustrés dans la figure I.1.

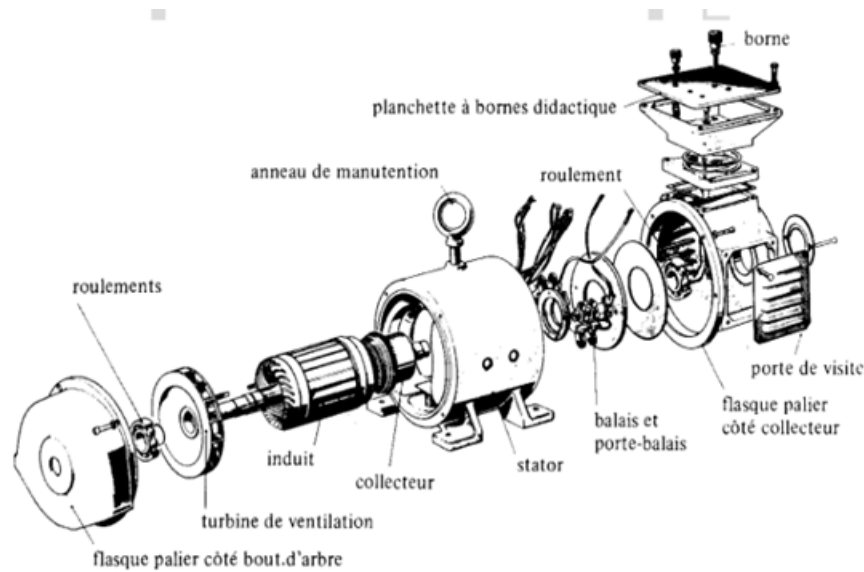


Figure I.1.Schéma de composant dun machine à courant continu[5].

#### 1.4.1 L'inducteur :

l'inducteur est doté de pôles saillants munis d'enroulements alimentés en courant continu pour générer un champ magnétique. Des aimants permanents peuvent remplacer ces enroulement dans les petites machines. Entre les pôles principaux, on trouve parfois des pôles de commutation. Le nombre totale de pôles, toujours pair, est généralement exprimé en nombre de paires de pôles (P)[1]. La figure I.2 représente un inducteur à aimant permanent :

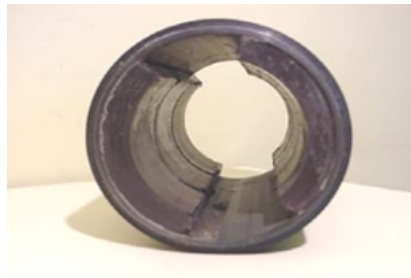


Figure I.2.Schéma de l'inducteur à aimant permanent [15].

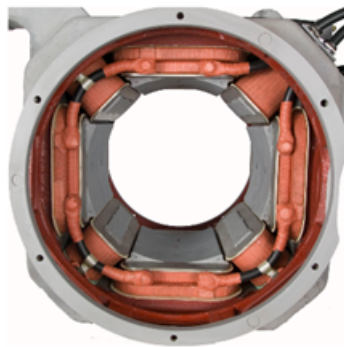


Figure I.3.Inducteur d'un machine à courant continu[11].

- 1.5.1.1 le carcasse (culasse)



La figure I.4 représente la carcasse de la machine à courant continu, faite de fonte ou d'acier pour minimiser les pertes par courants de foucault, comporte des éléments de fixation. Les pôles principaux et l'enroulement inducteur sont fixés sur cette carcasse[4].



Figure I.4.Carcasse d'un machine à courant continu[11].

#### • 1.5.1.2 les pôles inducteurs

Le rôle des pôles inducteurs est de produire le flux magnétique (constant). Ce flux généré par des aimants ou des enroulements et constant dans les pôles, est canalisé par des matériaux ferromagnétique[5].

#### • 1.5.1.3 les pôles auxiliaires (bobine de compensation)

pour limiter les étincelles au niveau des balais, des pôles auxiliaires sont intercalés entre les pôles principaux. notamment dans les machines de faible puissance[6].

La figure I.5 représente les composants de l'inducteur d'un moteur à courant continu :

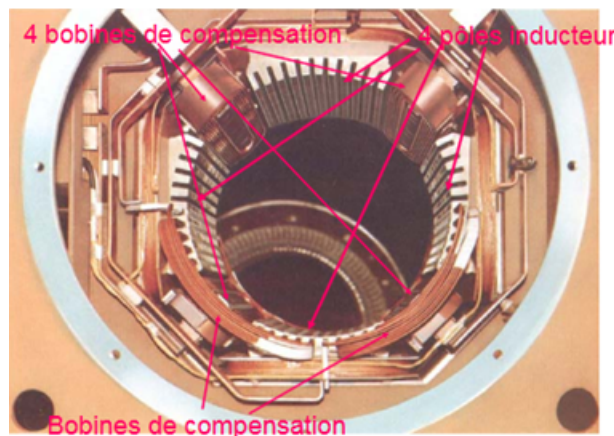


Figure I.5.Schéma de composant d'inducteur [15].

### 1.4.2 L'induit

La figure I.6 représente la partie mobile de la machine à courant continu, appelée induit, est un cylindre magnétique constitué de tôles isolées entre elles (les encoches). Des conducteurs sont logés dans des rainures pratiquées dans ce cylindre et sont reliés entre eux pour former un circuit fermé, calé sur le rotor se trouve le collecteur[7].

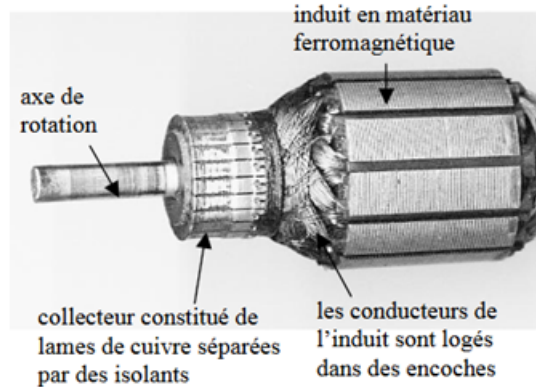


Figure I.6. Schéma de composant de l'induit [12].

#### • 1.5.2.1 Un armature dentée de l'induit (encoche)

Le rotor est constitué de tôles empilées, montées soit directement sur l'arbre par ajustement à chaud, soit assemblées par queue d'aronde pour les grandes machines. Les encoches, de forme arrondie ou rectangulaire et fermées par des bords, reçoivent un ou deux faisceaux de fils. Les encoches ouvertes, utilisées pour les grandes machines, accueillent un bobinage en barres rigides préformées[8]. La figure I.7 représente les encoches de la machine à courant continu :



Figure I.7. Schéma d'un encoche [11].

#### • 1.5.2.2 l'enroulement d'induit

Des clavettes en bois ou en autre isolant rigide fixent les sections de l'enroulement dans les encoches. L'imprégnation des enroulements de la machine avec des vernis isolants et des composés permet une meilleure dissipation thermique, une isolation renforcée et une plus grande rigidité mécanique[4].

#### • 1.5.2.3 les balais-collecteurs

Les balais fixés au stator sont frottés contre le collecteur relié au rotor et le bobinage d'induit est relié au collecteur constitué de pale(lames en cuivre) conductrices isolées entre elles[1].

La figure I.8 et la figure I.9 illustrent respectivement les balais et le collecteur d'un moteur à courant continu :

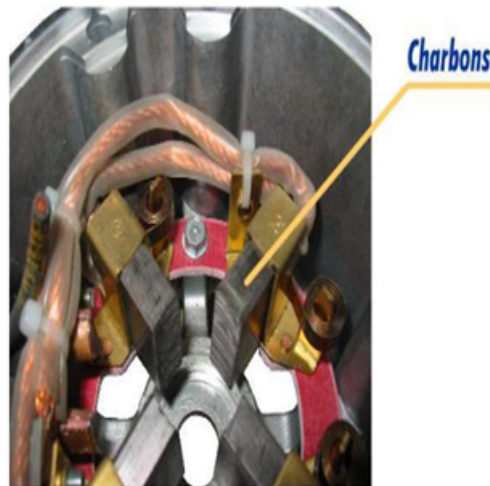


Figure I.8. Le schéma de balais [9].



Figure I.9. Collecteur d'une machine à courant continu [11]

### 1.4.3 L'entrefer

L'espace entre l'inducteur et l'induit doit être petit (de l'ordre du millimètre au centimètre) pour optimiser le couplage électromagnétique et réduire la consommation d'énergie de l'inducteur[3].

## 1.5 Principe de fonctionnement

Le stator (L'inducteur), qui peut être fait d'aimants ou d'enroulement (figure I.10), produit un champ magnétique fixe  $B$ .

Des conducteurs du rotor, parcourus par un courant continu, ces spires, soumises à des forces (force de Laplace), entraînent la rotation du rotor.

La variation du champ magnétique à travers chaque spire crée une tension (f.e.m) qui est redressée par le collecteur et les balais. Cette tension  $E$  est proportionnelle à la vitesse de rotation  $\Omega_r$ , au flux magnétique maximal et à une constante  $K$  liée à la construction du moteur[9]. La figure I.10 illustre le principe de fonctionnement d'un moteur à courant continu :

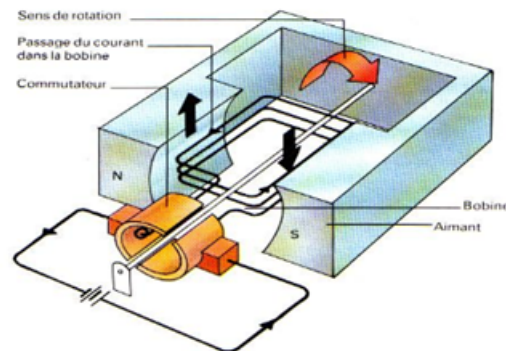


Figure I.10. schéma principe de fonctionnement d'un moteur à courant continu [13].

## 1.6 Bilan de puissance

La figure I.11 représente le bilan de puissance d'un moteur à courant continu :

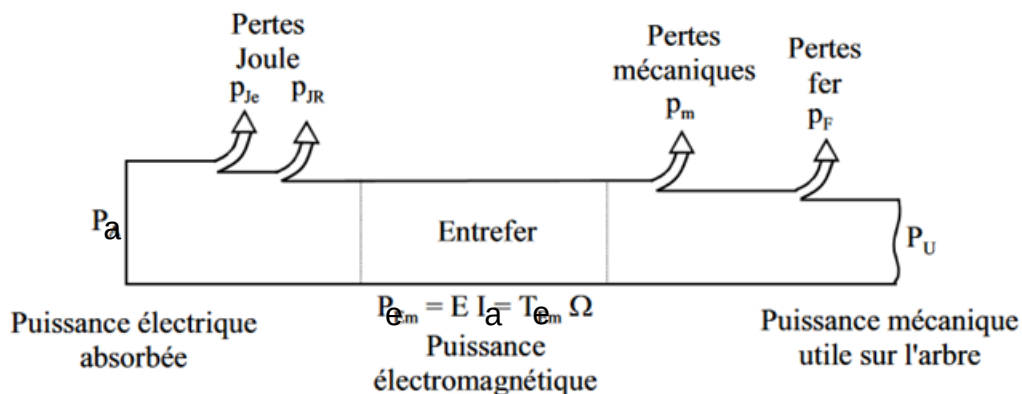


Figure I.11. Bilan de puissance de moteur à courant continu [7].

### 1.6.1 La puissance électrique absorbée

C'est la puissance absorbée par un moteur à courant continu et est donnée par la relation suivante : [7].

$$P_a = U_a \cdot I_a + U_e \cdot I_e \dots \dots (I.1)$$

### 1.6.2 Puissance électromagnétique

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

$$P_{em} = E.I_a \dots \dots \dots (I.2)$$

D'après le principe de conservation de l'énergie cette puissance est égale à la puissance développée par le couple électromagnétique : [10].

$$P_{em} = T_{em}.\Omega = E.I_a \dots \dots \dots (I.3)$$

### 1.6.3 La puissance électrique utile

La puissance fournie à la charge est la puissance utile : [7].

$$P_u = T_u.\Omega \dots \dots \dots (I.4)$$

### 1.6.4 La puissance mécanique

La puissance mécanique fournie par le moteur est donné par l'équation : [14].

$$P_{meca} = T_m.\Omega \dots \dots \dots (I.5)$$

### 1.6.5 Couple électromagnétique

La figure I.12 montre un schéma de la production du couple électromagnétique d'un moteur à courant continu, pour une spire : les deux brins d'une spire placés dans le champ magnétique  $B$ , subissent des forces de Laplace  $F_1$  et  $F_2$  formant un couple de force.

Donc le couple électromagnétique est : [10].

$$T_{em} = K.\phi.I_a \dots \dots \dots (I.6)$$

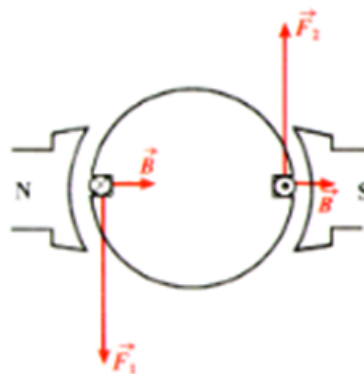


Figure I.12. Illustration de la production d'un couple électromagnétique

### 1.6.6 Les pertes

L'induit subit des pertes d'énergie à cause de l'effet joule et est donnée par la relation suivante :[7].

$$p_{JR} = R_a \cdot I_a^2 \dots \dots \dots (I.7)$$

L'inducteur subit des pertes d'énergie à cause de l'effet joule et est donnée par la relation suivante :[7].

$$p_{je} = R_e I_e^2 = \frac{U_e^2}{R_e} = U_e I_e \dots \dots \dots (I.8)$$

### 1.6.7 Le rendement

Le rendement d'un moteur à courant continu est le rapport entre sa puissance utile et la puissance absorbée.

La relation du rendement d'un moteur à courant continu est :[7] .

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_a - (p_{Je} + p_{JR} + p_c)}{P_a} \dots \dots \dots (I.9)$$

### 1.6.8 La vitesse de rotation

L'association de la loi d'ohm et de l'expression de la force électromotrice (fém) donne : [7].

$$\Omega = \frac{U_a - R_a I_a}{K \cdot \phi} \dots \dots \dots (I.10)$$

## 1.7 Mode d'excitation

### 1.7.1 Excitation séparée ou indépendante

La figure I.13 illustre le modèle électrique du MCC à excitation séparée, Les enroulements d'excitation et d'induit sont électriquement indépendants. On parle également de machine à excitation séparée, à flux constant ou à excitation constante [3].

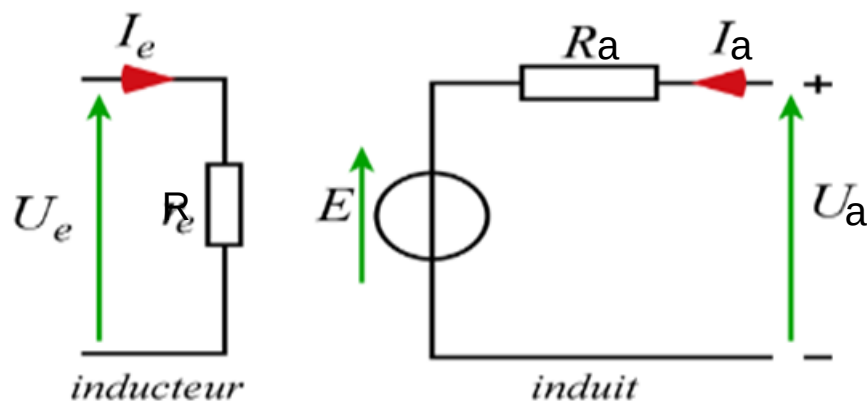


Figure I.13. Modèle électrique du MCC à excitation séparée [14].

### 1.7.2 Excitation série

La figure I.14 illustre le modèle électrique du MCC à excitation série, L'inducteur et l'induit sont branchés en série : une seule source d'alimentation est nécessaire.

Le sens de rotation est inversé en permutant les connexions de l'induit et de l'inducteur[7].

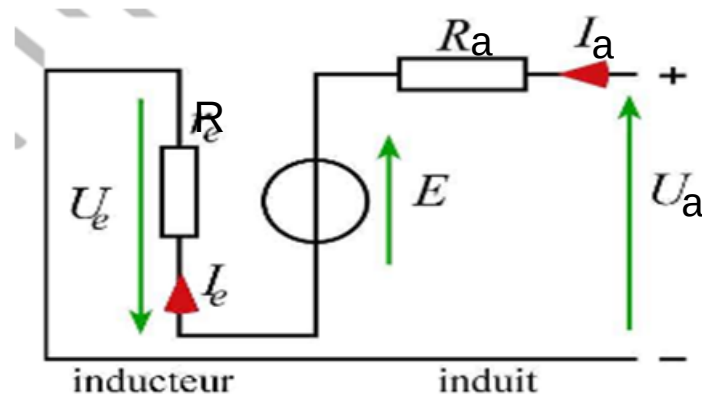


Figure I.14. Modèle électrique du MCC à excitation série [15].

### 1.7.3 Excitation dérivation ou shunt

la figure I.15 représente le modèle électrique du MCC à excitation shunt, Les moteurs à excitation shunt sont les plus couramment utilisés. Ils sont fondamentalement des moteurs à excitation séparée, mais avec l'enroulement d'excitation alimenté par la même source d'énergie que l'induit[4].

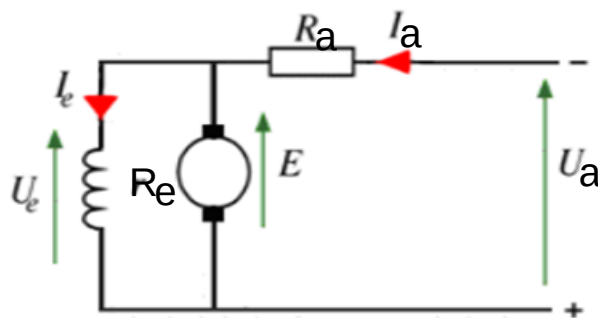


Figure I.15. Modèle électrique du MCC à excitation shunt [14].

### 1.7.4 Excitation composée (compound)

La figure I.16 représente le modèle électrique du MCC à excitation composée, Un premier inducteur est en série avec l'induit et un second inducteur est en parallèle :[1].



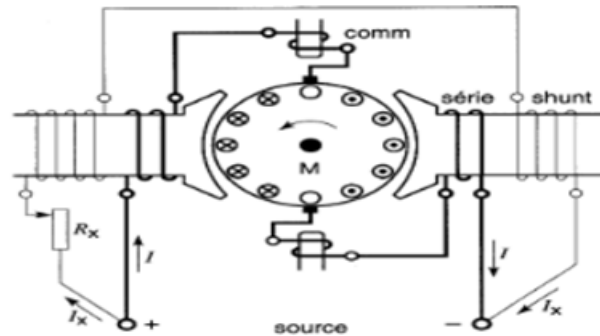


Figure I.16. Modèle électrique du MCC à excitation Compound [14].

## 1.8 Les avantages et les inconvénients

### 1.8.1 les avantages

1. On se sert de moteur à courant continu quand on veut pouvoir changer la vitesse facilement, ou pour obtenir des vitesses très importantes[4].
2. Ces moteurs offrent une large plage de vitesses, un rendement élevé et des propriétés mécaniques répondant à des conditions spéciales[2].
3. Un avantage des moteurs à courant continu réside dans leur adaptation aisées aux dispositifs permettant d'ajuster ou de modifier leur vitesse, leur couple et leur sens de rotation : les variateurs de vitesse.
4. Leur connexion directe à une source d'alimentation, comme des batteries d'accumulateurs et des piles, constitue également un atout[24].

### 1.8.2 les inconvénients

1. Un inconvénient des moteurs à courant continu est la complexité de fabrication de leur collecteur[4].
2. Son coût élevé et l'entretien requis en raison de l'usure des balais sur le collecteur[1].
3. Le principal problème est le système collecteur-balais. Il cause des difficultés de commutation, des étincelles, limite la vitesse et demande beaucoup d'entretien[1].
4. Les moteurs à courant continu sont plus coûteux que les autres[1].

## 1.9 Conclusion

La théorie du moteur à courant continu, comprenant sa structure physique élémentaire, son fonctionnement et ses divers modes d'excitation, a été présentée dans ce chapitre. La machine à courant continu a longtemps été l'actionneur de choix pour les applications à vitesse variable. En effet, le contrôle de sa vitesse de rotation peut être aisément réalisé en agissant sur la force



---

électromotrice induite de l'induit ou sur le flux inducteur, ajusté par le courant d'excitation [14].

---

# Modélisation d'un moteur à courant continu

---

## 2.1 Introduction

La machine à courant continu se compose d'une partie statique, l'inducteur, dont la fonction est de produire un champ magnétique stable grâce à des bobinages ou des aimants permanents. Il intègre également une partie rotative, le rotor, qui constitue un circuit magnétique doté d'encoches accueillant des conducteurs axiaux traversés par un courant électrique.

L'étude de son modèle est essentielle pour appréhender les propriétés et le comportement de cette machine. Ce chapitre est dédié à l'analyse du modèle du moteur à courant continu à excitation indépendante, à travers l'établissement et l'exploitation de ses équations électriques et mécaniques. Il est primordial de connaître les performances de ce moteur avant son utilisation. Ainsi, en s'appuyant sur ce modèle et une simulation sous Matlab/Simulink.

## 2.2 Modélisation d'un moteur à courant continu :

Les dynamos à courant continu, autrefois omniprésentes, sont aujourd'hui délaissées au profit de redresseurs à semi-conducteurs pour la production d'électricité.

Cependant, les moteurs à courant continu restent très répandus dans l'automobile (ventilateurs, lève-vitres, etc), l'électroménager et l'outillage, souvent sous la forme de " moteurs universals ". Leur modélisation relativement simple constitue un avantage supplémentaire[16].

## 2.3 Les hypothèses

- ✓ La température n'a pas d'influence sur les résistances et les inductances.
- ✓ On néglige les pertes dans le fer.
- ✓ L'influence de la réaction d'induit est négligeable.
- ✓ L'ensemble des enroulements d'induit, des pôles auxiliaire et de compensation est représenté par une inductance et une résistance équivalentes.
- ✓ On ne considère la saturation du circuit magnétique que dans la culasse statorique[17].

## 2.4 Modèle de connaissance

Le moteur à courant continu peut être vu comme un système électrique où la tension de commande contrôle la vitesse de rotation de l'arbre. L'induit est représenté par une résistance, une inductance et une force contre-électromotrice en série. Le modèle de connaissance du moteur est donné par la figure (II.1) :

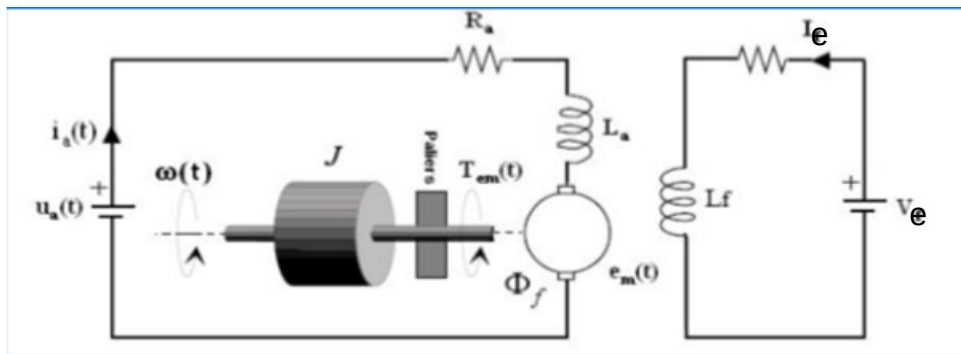


Figure II.1. Modèle équivalent du moteur à courant continu [18].

## 2.5 Les équations régissant la machine à courant continu

### 2.5.1 Les équations électriques du modèle dynamique

Pour l'induit

L'équation électrique de l'induit est donnée par la relation (II.1) : [7].

$$U_a(t) = E(t) + R_a i_a(t) + \frac{L_a di_a(t)}{dt} \dots\dots\dots (II.1)$$

La figure II.2 illustre le schéma équivalent de l'induit :

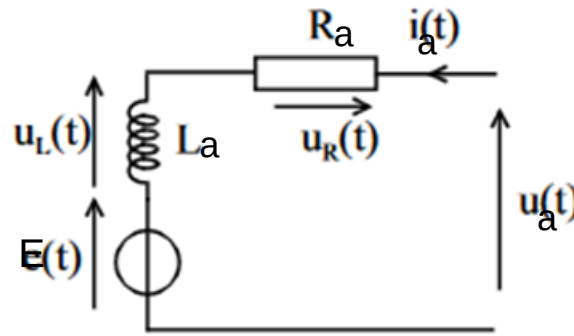


Figure II.2. Schéma équivalent de l'induit [7].

Pour ce modèle, l'excitation est considérée comme constante ( $\phi = \text{cst}$ ) [18].

$$E(t) = k' \cdot \Omega(t) \dots \dots \dots (\text{II.2})$$

$$T_{em(t)} = k' \cdot I_a(t) \dots \dots \dots (\text{II.3}) [19].$$

### Pour l'excitation

L'équation électrique de l'inducteur est donnée par la relation (II.4) : [18].

$$U_e = R_e \cdot I_e + L_e \cdot \frac{dI_e}{dt} + E_e \dots \dots \dots (\text{II.4})$$

### 2.5.2 L'équation mécanique

$$J \cdot \frac{d\Omega(t)}{dt} + f \cdot \Omega(t) = T_{em(t)} - T_R(t) \dots \dots \dots (\text{II.5}) [19].$$

### 2.5.3 Les équations électromécaniques dans le domaine de Laplace

#### Pour l'induit

$$U_a(p) = E(p) + R_a I_a(p) + L_a \cdot p \cdot I_a(p) \dots \dots \dots (\text{II.6}) [20].$$

$$I_a(p) = \frac{U_a(p) - E(p)}{L_a \cdot p + R_a} \dots \dots \dots (\text{II.7}) [21].$$

$$E(p) = K \cdot \Omega(p) \dots \dots \dots (\text{II.8}) [20].$$

#### Pour l'équation mécanique

$$T_{em}(p) - T_R(p) = p \cdot J \cdot \Omega(p) + f \cdot \Omega(p) \dots \dots \dots (\text{II.9}) [22].$$

A partir des équations (II.6) et (II.9), on aura le schéma bloc suivant :

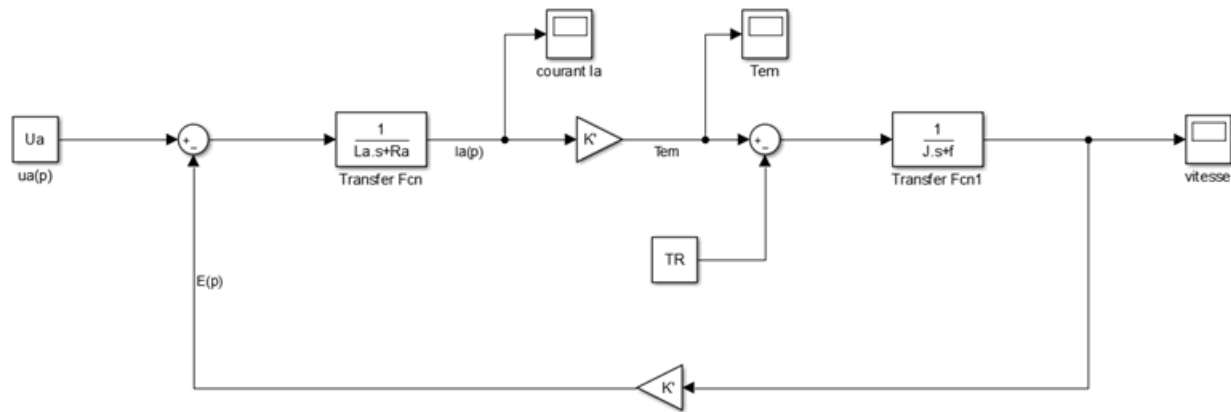


Figure II.3. Schéma bloc du moteur à courant continu [17].

## 2.6 Moteur à excitation séparée

- ✓ L'enroulement shunt représenté par l'indicateur f.
- ✓ Les indices q, aux et c sont utilisés pour identifier respectivement les enroulements d'induit, auxiliaire et de compensation.
- ✓ L'axe interpolaire des pôles inducteurs est l'emplacement des pôles auxiliaire. [23].
- ✓ Par rapport à l'axe q, les enroulements auxiliaire et de compensation sont montés en série avec l'enroulement de l'induit.
- ✓ Par souci de simplification, et comme les balais sont positionnés uniquement sur l'axe q, la composante d'induit selon l'axe d n'est pas représentée sur la figure suivante. Il est cependant essentiel de considérer l'inductance mutuelle entre l'induit et le circuit d'excitation [23].

La figure II.4 représente le schéma équivalent d'un moteur à courant continu à excitation séparée :

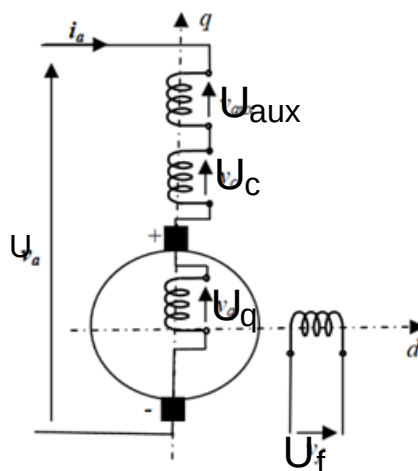


Figure II.4. Schéma équivalent d'un Moteur à excitation séparée [16].

### 2.6.1 Les équations Mécaniques :

Le couple :

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

$$T_{em} = K \cdot \phi \cdot I_a \dots \dots \dots (II.10) [24].$$

si  $\phi$  constant alors :

$$T_{em} = K \cdot \phi \cdot I_a = k' \cdot I_a \dots \dots \dots (II.11) [14].$$

Il s'écrit également ainsi :

$$T_{em} = M_{fd} \cdot I_f \cdot I_a \dots \dots \dots (II.12) [25].$$

L'équation mécanique :

$$T_{em} - T_R = \frac{J \cdot d\omega_r}{dt} + f \cdot \omega_r \dots \dots \dots (II.13) [22].$$

### 2.6.2 Les équations Magnétiques :

$$\phi_f = L_f \cdot i_f \dots \dots \dots (II.14)$$

$$\phi_q = L \cdot i_q + M_{qc} \cdot i_c + M_{qaux} \cdot i_{aux} \dots \dots \dots (II.15)$$

$$\phi_d = M_{df} \cdot i_f \dots \dots \dots (II.16) [22].$$

$$\phi_{aux} = L_{aux} \cdot i_{aux} + M_{auxq} \cdot i_q + M_{auxc} \cdot i_c \dots \dots \dots (II.17)$$

$$\phi_c = L_c \cdot i_c + M_{cq} \cdot i_q + M_{caux} \cdot i_{aux} \dots \dots \dots (II.18)$$

## 2.7 Les paramètres de la machine à simuler

|                                       |                    |
|---------------------------------------|--------------------|
| Résistance de l'induit                | $R_a = 0,78\Omega$ |
| Inductance de l'induit                | $L_a = 0.016H$     |
| Le gain                               | $K' = 2$           |
| Résistance de l'inducteur             | $R_e = 150\Omega$  |
| Inductance de l'inducteur             | $L_e = 112,5H$     |
| Coefficient de frottement             | $f = 0.01J.s$      |
| Moment d'inertie                      | $J = 0.05Kg.m^2$   |
| Tension d'alimentation du rotor       | $U_a = 40V$        |
| Tension d'alimentation de l'inducteur | $U_e = 40V$        |

## 2.8 Le schéma bloc du moteur à excitation séparée

La figure II.5 illustre le schéma bloc d'un moteur à courant continu à excitation séparée à vide :

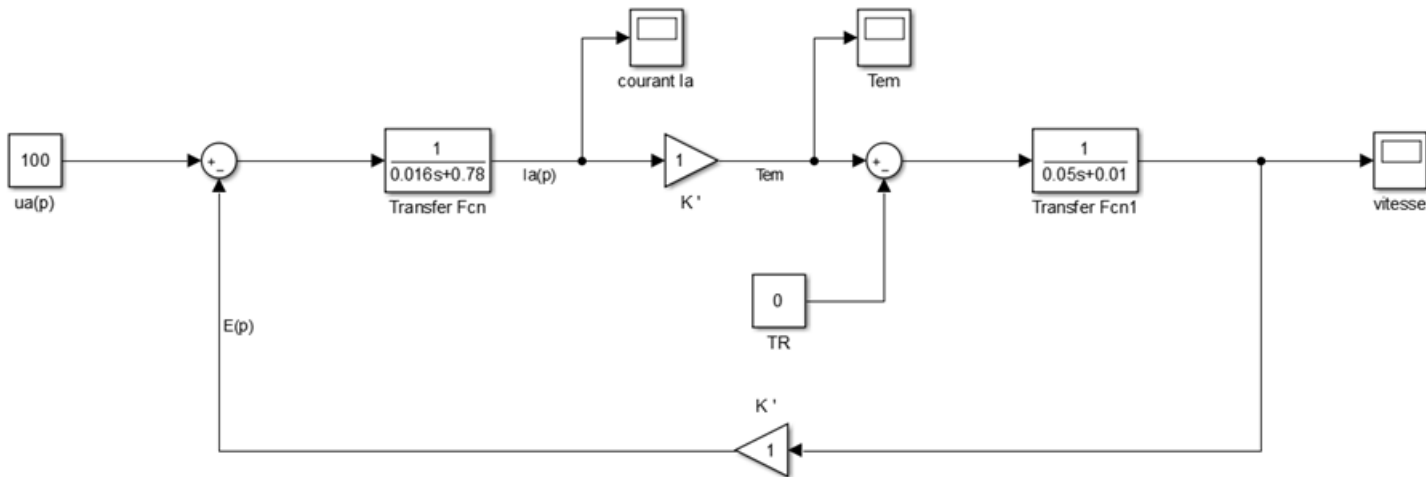


Figure II.5. Le schéma bloc de la MCC à excitation séparée à vide [14] .

### 2.8.1 Les caractéristiques à vide du moteur à courant continu

Les courbes suivantes représentent les variations du courant d'induit, du couple électromagnétique et de la vitesse d'un moteur à courant continu à vide en fonction du temps :

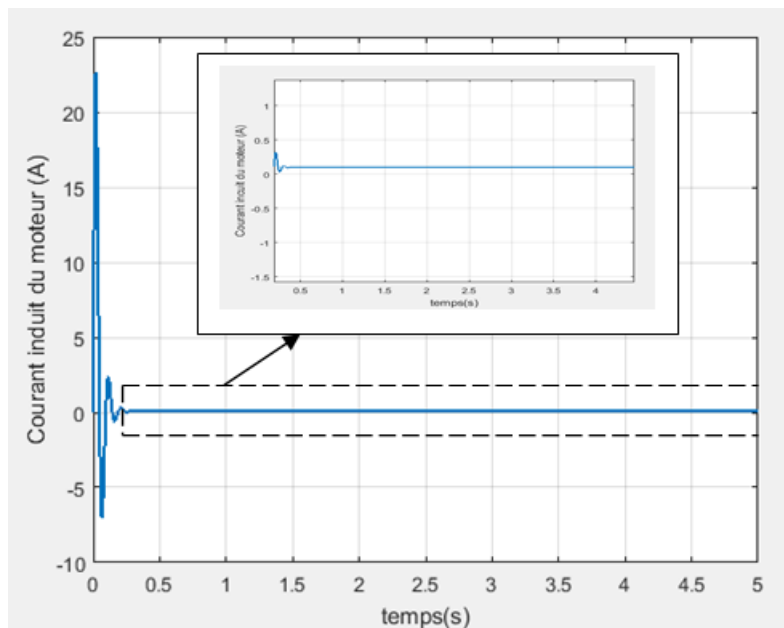


Figure II.6. Courbe de Courant d'induit .

✓ Au démarrage ( $t = 0$ ), c'est-à-dire lorsque le moteur s'arrête, on observe une très forte augmentation du courant d'induit (courant de démarrage). Ce courant atteint une valeur proche

de 85 ampères en raison de l'absence de force contre-électromotrice et du dépassement de l'inertie. Ensuite, le courant d'induit chute rapidement et quelques oscillations sont enregistrées. Cette diminution s'explique par la rotation du moteur, qui provoque la croissance de la force contre-électromotrice qui s'oppose au courant provenant de la source externe. Après un certain temps, le courant se stabilise à une valeur basse d'environ 1 A, indiquant un fonctionnement stable du moteur à sa vitesse nominale constante.

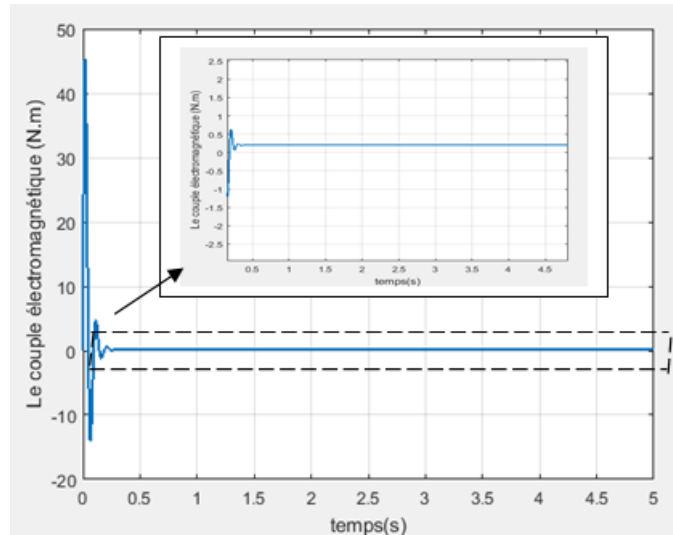


Figure II.7. Courbe de couple électromagnétique.

✓ Au moment de démarrage ( $t = 0$ ), un couple électromagnétique important d'environ 83 N.m apparaît, ce qui est nécessaire pour démarrer le mouvement ou la rotation à partir d'un état de repos. Le couple chute alors rapidement et les vibrations deviennent perceptibles.

✓ À partir de 0,5 seconde environ, le couple se stabilise autour de 1 Nm, indiquant que le moteur fonctionne à vide et ne nécessite qu'un petit couple pour compenser les frottements et les pertes.

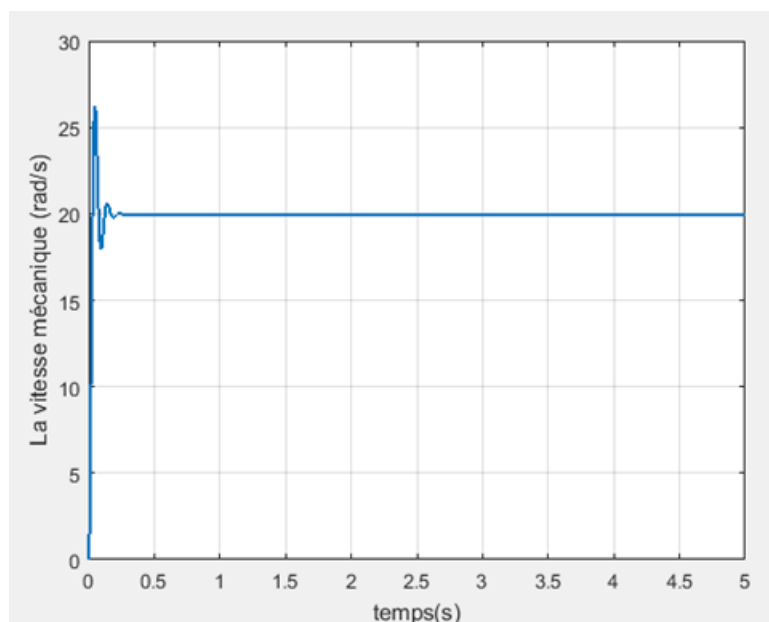


Figure II.8. Courbe de la vitesse de rotation du moteur .



✓ Au démarrage ( $t = 0$ ), la vitesse mécanique du moteur à courant continu commence à augmenter très rapidement jusqu'à atteindre une valeur légèrement supérieure à 100 rad/s, indiquant que le moteur cherche à atteindre sa vitesse stationnaire. Ensuite, le régime moteur chute avec quelques oscillations. C'est parce que lorsque le moteur essaie d'atteindre sa vitesse constante après le démarrage, il ne l'atteint pas directement et complètement en douceur, mais plutôt avec de légères variations ou vibrations de sa vitesse. Après une courte période d'oscillation, la vitesse mécanique du moteur se stabilise à une valeur constante inférieure à 100 rad/s, indiquant que le moteur a atteint un état de fonctionnement stable.

### 2.8.2 Les caractéristiques en charge du moteur à courant continu

La figure (II.9) représente le schéma bloc de la MCC à excitation séparée en charge.

Le couple de charge  $T_R = 20 N.m$  à  $t = 0s$ .

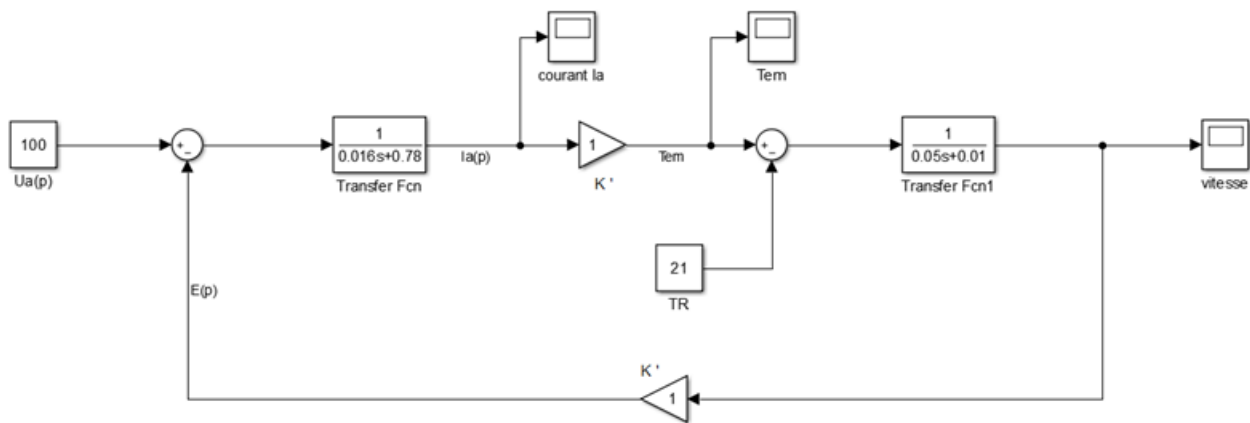
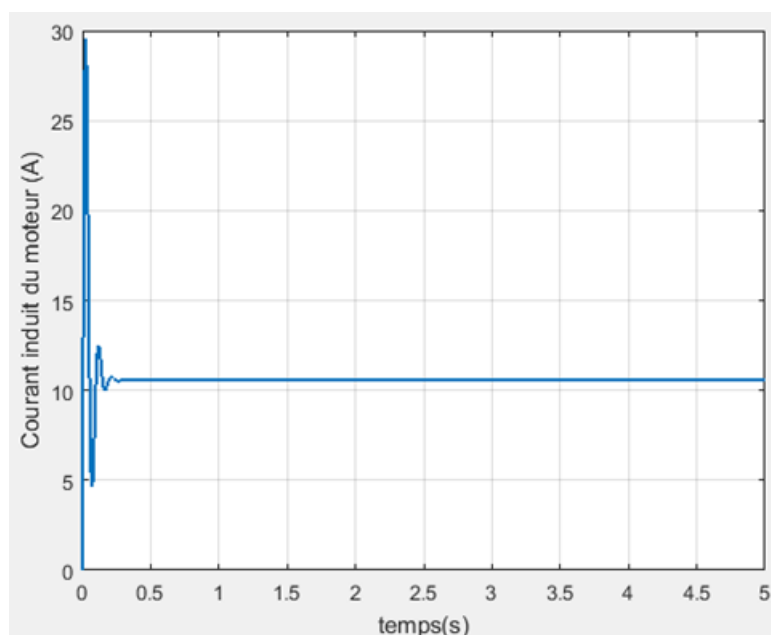


Figure II.9. Le schéma bloc de la MCC à excitation séparée en charge.

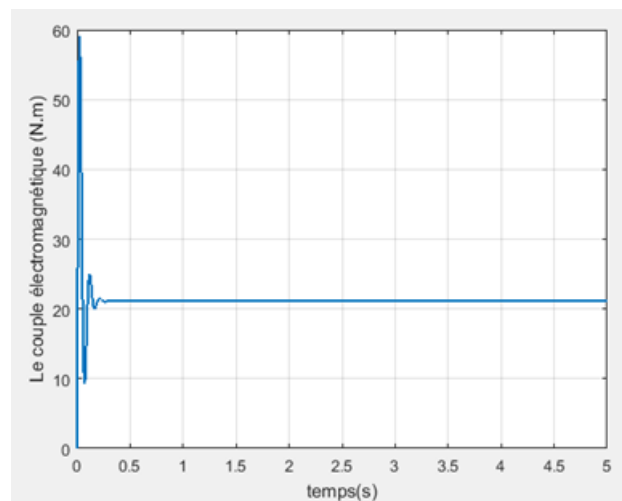
Les courbes suivantes représentent les variations du courant d'induit, du couple électromagnétique et de la vitesse d'un moteur à courant continu en charge en fonction du temps :



**Figure II.10. Courbe de courant induit du moteur.**

✓ Au démarrage, on observe une augmentation soudaine et brutale de la valeur du courant d'induit de sortie, atteignant environ 90 A. Cela s'explique par le fait que le moteur est initialement au repos, où la vitesse et la force contre-électromotrice sont nulles, ce qui permet à un courant important de circuler à partir de la source d'alimentation externe. Cependant, la valeur atteinte par le courant d'induit est supérieure à la valeur atteinte à vide, car le moteur a besoin de plus de couple pour surmonter la charge et son inertie. Après cette hausse initiale, la valeur actuelle fluctue brièvement avant de baisser progressivement. Cette diminution se produit en raison de la rotation du moteur et de la création d'une force électromotrice s'opposant au courant provenant de la source, ce qui provoque sa diminution.

✓ Après environ 0,5 seconde, le courant d'induit se stabilise à une valeur constante proche de 22 A, qui est supérieur à celui observé à vide. Cette valeur de courant à l'état stationnaire reflète le besoin du moteur de produire un couple suffisant pour surmonter la charge mécanique appliquée au moteur.

**Figure II.11. Courbe de couple électromagnétique .**

✓ Initialement, pendant moins de 0,5 seconde, on observe une forte augmentation de la valeur du couple électromagnétique jusqu'à environ 90 N.m, ce qui est bien plus grand qu'à vide. Ce couple élevé est nécessaire pour surmonter la stabilité et l'inertie du moteur et pour surmonter la charge mécanique. On observe alors une fluctuation de la valeur du couple avant qu'elle ne commence à diminuer progressivement. Cette diminution est provoquée par la rotation du moteur et l'augmentation de la force contre-électromotrice ; Toute diminution de la valeur du courant provenant de la source externe et donc une diminution du couple. Après environ 0,5 seconde, le couple électromagnétique se stabilise à une valeur presque constante proche de 22 N.m, ce qui est bien plus élevé que celui observé pendant le fonctionnement à vide. Cette valeur

représente la puissance nécessaire pour maintenir le moteur en marche et équilibrer la charge mécanique ; Ainsi, plus la charge est élevée, plus la valeur de couple est élevée.

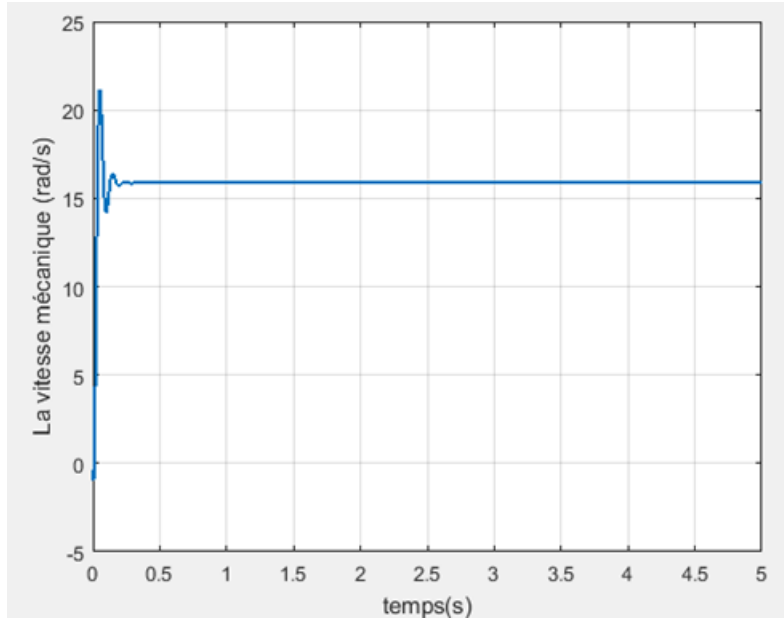


Figure II.12. Courbe de la vitesse de rotation du moteur .

✓Initialement (à l'instant  $t = 0$ ) le moteur est complètement immobile et sa vitesse est nulle. Lorsqu'il démarre, il doit travailler plus fort pour surmonter le poids de la charge et commencer à tourner. Ceci explique l'augmentation rapide de sa vitesse au début, atteignant environ 86 rad/s. Après cette accélération initiale, la vitesse diminue puis se stabilise à environ 83 rad/s, indiquant que la vitesse de charge a un effet sur le régime moteur.

## 2.9 Identification des paramètres d'un moteur à courant continu par La méthode classique

### 2.9.1 Détermination de la résistance d'induit $R_a$ : ( La méthode volt-ampérométrique)

Dans cette méthode, les tests sont effectués en continu et avec un rotor bloqué :

$$\Omega = 0; E = 0 \text{ et } \frac{di_a}{dt} = 0$$

La machine fonctionne au courant nominal pour éviter la surchauffe et les mesures sont prises à basse tension. Après chaque application de la tension  $U_a$  au rotor, le courant rotorique correspondant  $I_a$  est mesuré et la résistance rotorique  $R_a$  est calculée selon la formule  $\frac{U_a}{I_a}$ . La valeur moyenne de résistance du rotor  $R_{am}$  est ensuite déterminée en divisant la somme des valeurs de résistance obtenues après chaque mesure par le nombre de résistances obtenues[40].

### 2.9.2 Détermination de la résistance d'inducteur $R_e$

Afin de déterminer la résistance de l'inducteur, on alimente la machine et par la méthode voltampérométrique, on effectue la mesure de la tension et du courant conformément à ce qui est illustré dans la figure(II.13) :

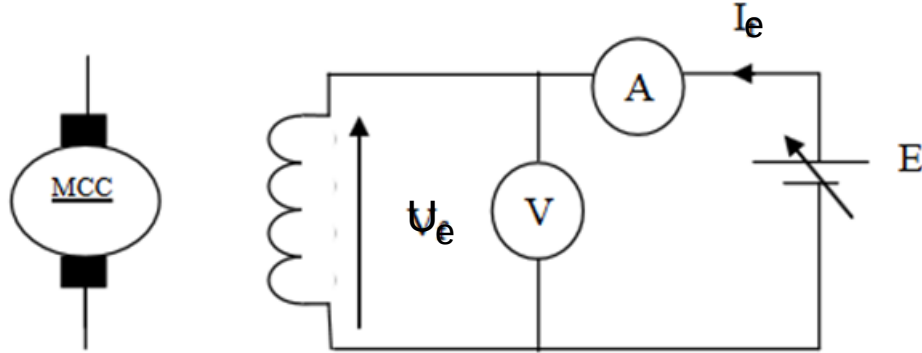


Figure II.13.Montage de la méthode de mesure de la voltampérométrie [25].

À chaque mesure de courant et de tension,nous déterminons la résistance instantanée  $R_e$  via la loi d'ohm  $R_e = \frac{U_e}{I_e}$ .

La résistance moyenne  $R_{em}$  est ensuite obtenue en divisant la somme de ces valeurs de  $R_e$  par le nombre de mesures effectuées.

### 2.9.3 Détermination des inductances $L_a$ et $L_e$

En appliquant une tension alternative à l'induit d'un moteur à courant continu (tension alternative aux bornes d'induit  $V_a$ ) et en mesurant différentes valeurs de tension  $V_a$  et de courant  $I_a$ , nous déterminons l'inductance de l'induit  $L_a$  en calculant son impédance moyenne  $Z_{am}$  . Une démarche similaire est adoptée pour l'inducteur, comme illustré dans le schéma la figure (II.14) :

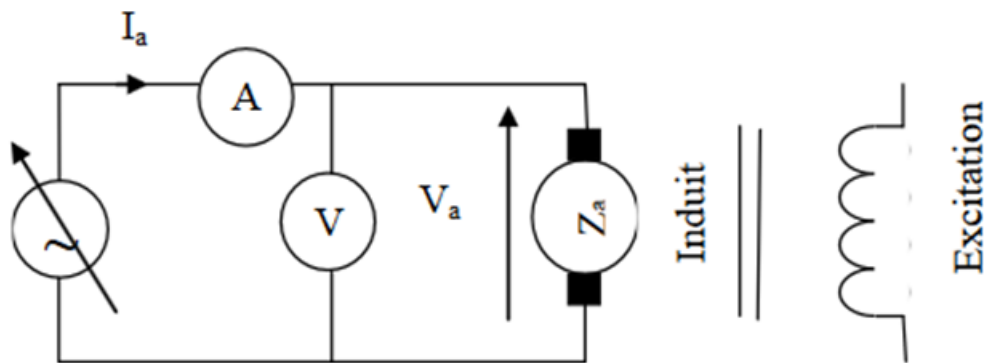


Figure II.14.Montage de mesure du courant et de la tension  $I_a$  et  $V_a$  d'induit .

La figure II.15 représente le montage de mesure du courant et de la tension  $I_e$  et  $V_e$  de l'inducteur :

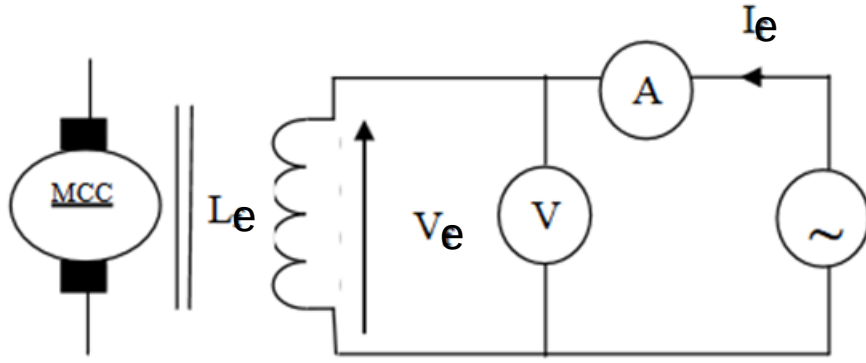


Figure II.15.Montage de mesure du courant et de la tension  $I_e$  et  $V_e$  de l'inducteur [25].

Afin de déterminer les inductances d'induit et de l'inducteur, nous effectuons des mesures de tension et de courant. Pour chaque mesure, nous calculons l'impédance correspondante en appliquant la loi d'ohm :  $Z_a = \frac{V_a}{I_a}$  pour le rotor et  $Z_e = \frac{V_e}{I_e}$  pour l'inducteur. La moyenne de l'impédance  $Z_{em}$  de l'inducteur et de l'impédance  $Z_{am}$  du rotor est obtenue en divisant la somme des valeurs de cette impédance pour l'inducteur ou pour le rotor par le nombre de mesures d'impédance.

**Pour l'induit :**

Nous avons l'expression de l'impédance du rotor  $L_a$  comme suit :

$$Z_a = \sqrt{(R_a^2) + (L_a \cdot \omega)^2} \dots \dots \dots (II.19)$$

On peut déduire la valeur de l'inductance du rotor  $L_a$  et obtenir l'expression suivante :

$$L_a = \frac{1}{2\pi \cdot f} \sqrt{(Z_a^2 - R_a^2)} \dots \dots \dots (II.20)$$

**Pour l'inducteur :**

Nous avons l'expression de l'impédance de l'inducteur  $L_e$  comme suit :

$$Z_e = \sqrt{(R_e^2) + (L_e \cdot \omega)^2} \dots \dots \dots (II.21)$$

On peut déduire la valeur de l'inductance de l'inducteur et obtenir l'expression suivante :

$$L_e = \frac{1}{2\pi \cdot f} \sqrt{(Z_e^2 - R_e^2)} \dots \dots \dots (II.22)$$

### 2.9.4 Détermination de la constante électromagnétique K

Pour mesurer la constante électromagnétique K, on réalise un essai en génératrice. La tension à vide de la machine est relevée en fonction de la vitesse [14], donc :

$$K' = \frac{E}{\Omega} \dots \dots \dots (II.23)$$

Après chaque mesure, nous constatons que chaque vitesse  $\Omega$  a une tension à vide correspondante pour le générateur E, et nous trouvons ainsi la valeur de K dans chaque mesure ( $K = \frac{E}{\Omega}$ ).

Quant à la valeur de Kmoy, on constate qu'elle est égale à la somme des valeurs de K obtenues à chaque mesure divisée par leur nombre.

### 2.9.5 Détermination du coefficient de frottement visqueux f

En situation de vide (absence de charge), le couple électromagnétique se présente sous la forme suivante :

$$T_{em} = C_c + f.\Omega \dots \dots \dots (II.24)$$

$C_c$  = couple constant (constant)

$f.\Omega$  = couple de frottement

Pour déterminer la valeur de  $f$  qui représente la pente, la vitesse de la machine est modifiée et les valeurs de couple qui correspondent à la vitesse sont enregistrées à chaque mesure. Nous pouvons alors tracer la courbe  $T_{em} = f.(\Omega)$  et en déduire la valeur de f, qui représente la pente de la courbe. La figure (II.16) montre un exemple illustratif :[40].

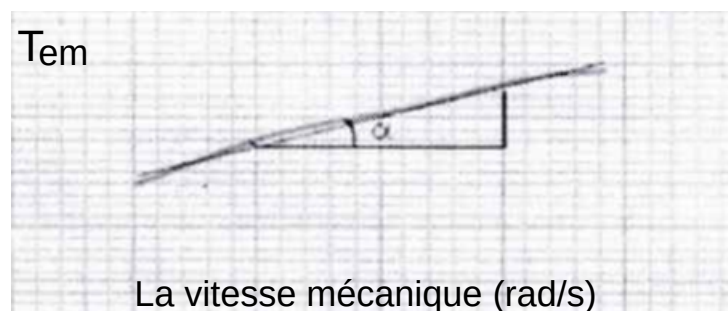


Figure II.16. Courbe de couple électromagnétique  $T_{Em}$  en fonction de la vitesse  $\Omega$ .

### 2.9.6 Détermination le moment d'inertie J

L'évaluation de l'inertie d'un moteur à courant continu nécessite de le lancer jusqu'à sa vitesse nominale  $\Omega_0$ . Une fois cette vitesse stabilisée, on coupe l'alimentation. Le moteur entame alors une phase de ralentissement progressif durant laquelle on chronomètre le temps total nécessaire à son arrêt complet, noté  $t$ .

#### Équation de décélération

$$\Omega(t) = \Omega_0 \cdot \exp \frac{-t}{\tau_m} \dots \dots \dots (II.25)$$

$$\tau_m = \frac{J}{f} \dots \dots \dots (II.26)$$

Pour  $\Omega(t) = \frac{\Omega_0}{2}$ , substituant dans l'équation (1), on trouve :

$$\frac{\Omega_0}{2} = \Omega_0 \cdot \exp^{\frac{-t}{\tau_m}} \dots\dots\dots (\text{II.27})$$

Donc  $\tau_m = \frac{t}{\ln 2}$

Nous avons la valeur de t donc nous pouvons calculer la constante de temps  $\tau_m$ .

Donc  $J = f \cdot \tau_m$

## 2.10 Conclusion

L'étude du comportement et des caractéristiques d'une machine est une étape préalable indispensable à son utilisation. Ainsi, la modélisation par un schéma fonctionnel, basée sur les équations électriques et mécaniques propres au type d'excitation, s'avère essentielle pour analyser ces caractéristiques par simulation à l'aide de Matlab/Simulink.

---

# Identification des paramètres électriques d'un moteur à courant continu par l'algorithme PSO

---

## 3.1 Introduction

Ce chapitre s'ouvre sur une discussion concernant l'application de l'optimisation par essaim de particules (PSO), une approche de résolution de problèmes qui s'inspire des comportements intelligents collectifs observés chez les animaux, notamment les oiseaux et les poissons en quête de nourriture[34].

Notre exploration débutera par une introduction aux concepts de métaheuristiques et d'optimisation. Par la suite, notre attention se portera sur l'algorithme PSO, dont nous examinerons le principe fondamental ainsi que les travaux de recherche associés. Nous détaillerons également son fonctionnement, les équations mathématiques, et les divers paramètres qu'il utilise. Avant d'aborder les spécificités de son application, nous présenterons les étapes essentielles de sa mise en uvre, puis nous analyserons ses bénéfices et ses limitations.

Pour terminer ce chapitre, nous étudierons un exemple concret d'application de l'algorithme PSO pour identification des paramètres d'un moteur à courant continu.



## 3.2 Méthode méta-heuristique

Les méthodes métaheuristiques, qui ont émergé au début des années 1980, offrent la possibilité de trouver des solutions de qualité satisfaisante dans des délais de calcul raisonnables, sans pour autant garantir que la solution obtenue soit optimale. Ces méthodes englobent un ensemble d'algorithmes d'optimisation conçus pour résoudre des problèmes d'optimisation complexes. Elles s'inspirent fréquemment de systèmes naturels, qu'il s'agisse de phénomènes physiques (comme le recuit simulé), de processus d'évolution biologique (comme les algorithmes génétiques) ou de comportements animaux (comme les algorithmes de colonies de fourmis ou l'optimisation par essaims de particules[27].

Il existe différents types de méthodes métaheuristiques, parmi lesquelles :

Les algorithmes génétiques sont des méthodes d'optimisation basées sur les mécanismes de l'évolution biologique, notamment la sélection naturelle, le croisement génétique et la mutation[27].

La méthode d'optimisation GWO, proposée par Mirjalili et son équipe en 2014, reproduit la dynamique de leadership et les tactiques de chasse collective des loups gris pour résoudre des problèmes d'optimisation[38].

L'algorithme PSO, étant une méta-heuristique, offre la capacité de localiser l'optimum d'une fonction dans un temps de calcul acceptable. Toutefois, pour les problèmes de grande taille, la forte intensité des calculs scientifiques implique un temps de traitement considérablement plus long[36].

## 3.3 Définition de l'optimisation

On appelle problème d'optimisation la tâche de déterminer la valeur optimale (soit le minimum, soit le maximum) d'une fonction donnée. Par ailleurs, certains problèmes d'optimisation impliquent que les variables de la fonction à optimiser doivent respecter certaines limites et évoluer dans une zone spécifique de l'espace de recherche. Ces situations constituent une catégorie particulière désignée sous le terme de problèmes d'optimisation avec contraintes[35].

## 3.4 PSO (Optimisation par les méthodes dessaims de particules)

L'optimisation par essaims de particules (PSO) est une technique d'optimisation globale heuristique, introduite par Kennedy et Eberhart en 1995. Inspirée par l'intelligence collective des essaims, elle simule le comportement des volées d'oiseaux et des bancs de poissons. Cet algorithme est efficace pour résoudre des problèmes d'optimisation complexes. Sa simplicité de mise en uvre et son efficacité le rendent largement applicable dans divers domaines, notamment

l'optimisation de fonctions. Il repose sur un ensemble de particules (solutions potentielles) qui se déplacent dans l'espace de recherche à la recherche de la meilleure solution.

Chaque particule tient compte de la meilleure solution trouvée par elle-même (pbest) et de la meilleure solution globale trouvée par l'ensemble des particules (gbest) pour ajuster sa trajectoire. Ainsi, la position actuelle, la vitesse actuelle, la distance à pbest et la distance à gbest influencent le mouvement de chaque particule dans l'espace de recherche[28].

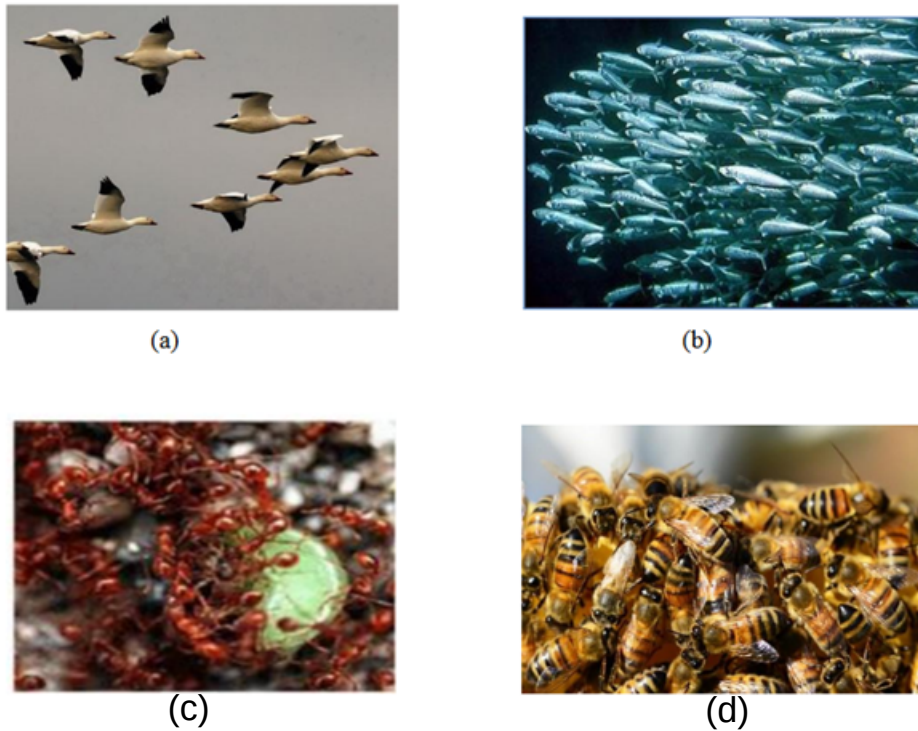


Figure III.1. Groupe de : (a) oiseaux, (b) poissons, (c) fourmis, (d) abeilles [29]

Plusieurs composantes influencent la particule, notamment :

**Composante d'inertie** : La particule suit généralement son sens de déplacement actuel.

**Composante cognitive** : La particule suit généralement la direction du meilleur site qu'elle a déjà exploré.

**Composante sociale** : La particule suit généralement l'exemple de ses congénères et ainsi, se dirige vers le meilleur site déjà exploré par les autres[31].

La structure d'un réseau social est définie par son voisinage. Le voisinage d'un élément, tel qu'une particule ou un individu, détermine ses connexions et donc avec qui il peut interagir. On distingue principalement deux types de voisinages :

1. **Le voisinage géographique** : La proximité géographique définit ce type de voisinage, une notion naturelle pour les essaims particuliers où les voisins sont les particules les plus proches. Néanmoins, à chaque étape, les voisins doivent être recalculés selon une distance prédéterminée dans l'espace de recherche. Ce voisinage dynamique nécessite donc une mise à jour à chaque itération, et c'est celui que nous avons adopté dans notre travail.

2. **Le voisinage social** : Ici, le voisinage est défini par la proximité sociale, c'est-à-dire par l'échange d'informations, et non par la distance. Les voisins sont fixés dès le début et ne

changent pas. Une fois le réseau social constitué, aucune mise à jour n'est nécessaire, ce qui caractérise un voisinage statique[36].

## 3.5 Fonction objectif

Face à un problème d'optimisation, l'approche consiste à définir une ou plusieurs fonctions objectives. Ces dernières jouent un rôle crucial en permettant de distinguer efficacement une solution de qualité d'une solution moins satisfaisante. De manière concrète, ces fonctions sont appliquées à l'ensemble des solutions envisageables au sein de l'espace de recherche défini. À chaque étape du processus, les valeurs résultant de ces fonctions sont comparées à des valeurs optimales de référence établies au préalable. L'atteinte de ces valeurs optimales (ou une approximation très proche dans le contexte d'une garantie de performance) marque la conclusion du processus et identifie la solution recherchée.

Le principe fondamental d'une métaheuristique repose sur l'opération de minimisation ou de maximisation de ces fonctions objectives. Cette action a pour effet de réduire le nombre de solutions potentielles à considérer, et par conséquent, de diminuer le temps de calcul nécessaire. Lorsqu'une unique fonction objective est utilisée pour évaluer les solutions, on parle de problème d'optimisation mono-objectif. Inversement, la présence de plusieurs fonctions objectives caractérise un problème d'optimisation multi-objectif [35].

## 3.6 Principe de la PSO

L'algorithme PSO de base fonctionne en utilisant un groupe de solutions potentielles, appelé essaim, où chaque solution est une particule. Ces particules sont initialement placées de manière aléatoire dans l'espace où l'on cherche la meilleure valeur de la fonction objectif. Le mouvement de chaque particule est influencé par deux éléments : sa meilleure position personnelle atteinte jusqu'à présent (expérience individuelle) et la meilleure position trouvée par l'ensemble des particules (expérience globale)[32].

Au début de l'algorithme, un groupe de particules est initialisé aléatoirement dans l'espace de recherche, chacune avec une vitesse aléatoire. Ensuite, à chaque pas de temps :

1. Chaque particule a la capacité d'évaluer la qualité de son positionnement et de sauvegarder sa meilleure performance.
2. Chaque particule est capable de consulter certaines de ses voisines et d'obtenir de chacune d'elles leur meilleure performance.
3. À chaque itération, chaque particule sélectionne la meilleure performance connue, ajuste sa vitesse en fonction de cette information et de ses propres données, puis se déplace en conséquence.

4. En utilisant les quelques informations à sa disposition, une particule doit choisir comment se déplacer ensuite, c'est-à-dire décider de sa nouvelle vitesse. Pour y parvenir, elle combine trois éléments d'information :

- ✓ Sa vitesse actuelle.
- ✓ Sa meilleure position actuelle.
- ✓ La meilleure performance (vitesse et position) de ses voisines.

La figure III.2 illustre la stratégie utilisée pour déplacer la particule :

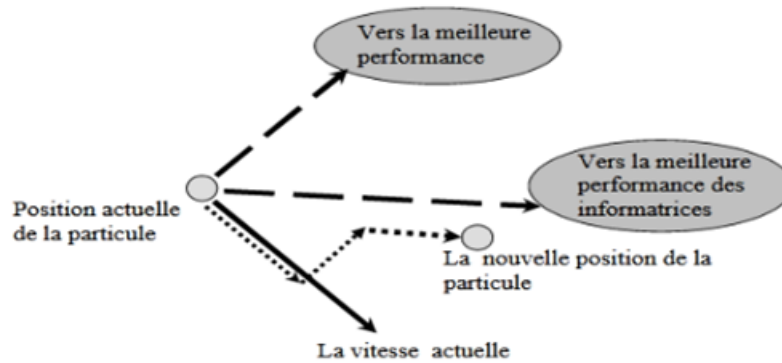


Figure III.2. Illustration de déplacement de la particule [29].

### 3.6.1 Formulation mathématique du pso

Les équations 1,2 décrivent la manière dont la position  $x_i(t)$  et la vitesse  $v_i(t)$  d'une particule  $P_i$  sont actualisées.

$$V_i(t+1) = \alpha \cdot V_i(t) + c_1 r_1 \cdot [p_{besti}(t) - x_i(t)] + c_2 r_2 \cdot [g_{besti}(t) - x_i(t)] \dots \dots \dots (III.1)$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \dots \dots \dots (III.2) \text{ [30].}$$

$X_i(t)$  = la position de la particule i au temps t.

$X_i(t+1)$  = la position de la particule i au temps t+1.

$V_i(t)$  = la vitesse de la particule i à l'instant t.

$V_i(t+1)$  = la vitesse de la particule i à l'instant t+1.

$p_{besti}(t)$  = la meilleure position individuelle (locale) de la particule i.

$g_{besti}(t)$  = la meilleure position globale (de toutes les particules de l'essaim).

$\alpha$  = coefficient d'inertie (Constante).

$r_1$  et  $r_2$  = nombres aléatoires entre 0 et 1.

$c_1$  et  $c_2$  = coefficients d'accélération (constantes) [31].

## 3.7 Configuration des paramètres

La performance de la méthode PSO est tributaire de divers paramètres qui l'influencent. Le choix de ces derniers est essentiel et varie généralement en fonction du problème considéré. On

compte parmi ces paramètres :[36].

#### Nombre de particules :

Pour résoudre le problème, le nombre de particules à utiliser est principalement déterminé par deux aspects : la taille de l'espace de recherche et le compromis entre la puissance de calcul de la machine et le temps de recherche maximal autorisé. Étant donné qu'il n'existe pas de règle établie pour fixer ce paramètre, faire de nombreux essais permet de se doter de l'expérience nécessaire à l'appréhension de ce paramètre. En général le choix se fait aléatoirement[37].

#### Vitesse maximale :

Dans le but d'empêcher certaines particules de quitter le domaine de recherche (l'espace de recherche) du fait d'une vitesse trop élevée, un seuil maximal arbitraire, désigné par  $V_{max}$ , est établi. De ce fait, la vitesse  $V_i(t)$  d'une particule est définie comme suit :

$$V_{max} \text{ si } V_i(t) > V_{max} \text{ et } -V_{max} \text{ si } V_i(t) < -V_{max}.$$

Par contre, la grandeur de  $V_{max}$  doit être suffisamment importante pour ne pas risquer de se stabiliser dans un minimum local [32].

#### Coefficient d'inertie :

Le facteur d'inertie, noté  $\alpha$ , présent dans la formule que nous avons examinée précédemment (III.1), joue un rôle déterminant dans la capacité de chaque particule à explorer l'espace de recherche, contribuant ainsi à améliorer la convergence de la méthode. Ce facteur  $\alpha$ , a été introduit pour contrôler l'effet de l'orientation de la particule sur le déplacement futur.

Le réglage de ce paramètre  $w$  implique donc de trouver un équilibre entre une exploration globale ( $\alpha > 1$ ) et une exploration locale ( $\alpha < 1$ ).

Les résultats des études indiquent qu'une meilleure convergence est observée pour des valeurs de  $\alpha$  allant de 0.8 à 1.2 .[36][30]

#### Coefficients de confiance :

Les coefficients  $c_1 r_1$  et  $c_2 r_2$  de l'équation (III.1), désignés comme coefficients de confiance, servent à ajuster l'importance accordée aux tendances des particules à persévérer dans leur trajectoire ou à suivre l'ensemble du groupe. Les termes  $r_1$  et  $r_2$  sont des variables aléatoires tirées à chaque itération selon une loi uniforme sur l'intervalle  $[0,1]$ , tandis que  $c_1$  et  $c_2$  sont des constantes soumises à la condition  $c_1 + c_2 \leq 4$  [30].

## 3.8 L'algorithme d'optimisation PSO

L'algorithme d'optimisation PSO est présenté comme suit :

**Etape 01 :** Configurer les coefficients d'accélération  $C_1$  et  $C_2$ , le facteur d'inertie  $w$ , créer une population de particules aléatoires et définir le critère d'arrêt.[27][38]

**Etape 02 :** Calculer la valeur de la fonction objectif pour chaque particule.

**Etape 03 :** Actualiser la meilleure position individuelle  $p_{best}$  de chaque particule et la position optimale globale  $g_{best}$  de l'ensemble des particules (population).

**Etape 04 :** Calculer les nouvelles valeurs (mettre à jour) de la position et de la vitesse en utilisant les équations (III.1) et (III.2).

**Etape 05 :** incrémentation du nombre d'itération  $t = t + 1$  [27].

**Etape 06 :** Si le critère d'arrêt est vérifié, alors avancer à l'étape 7. Sinon, recommencer à l'étape 2 [38].

**Etape 07 :** La position sauvegardée représente la solution optimale [27].

## 3.9 Schéma bloc de l'algorithme de PSO

La figure III.3 représente le schéma bloc de l'algorithme de PSO :

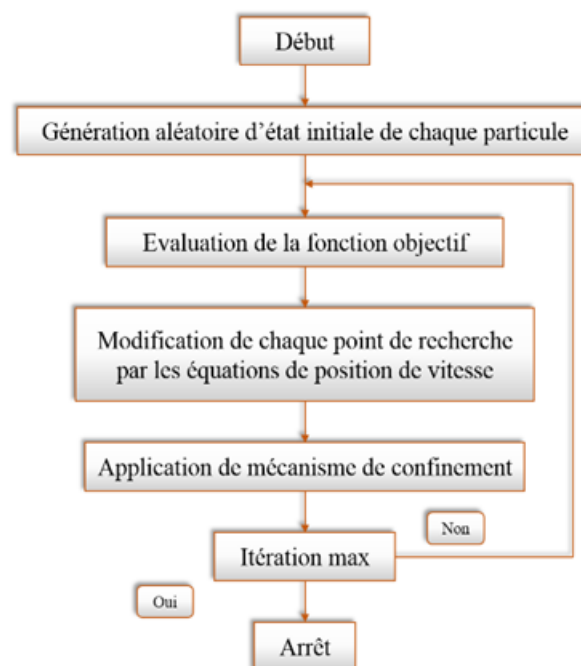


Figure III.3.Schéma bloc de l'algorithme de PSO [38]

## 3.10 Avantages et inconvénients de la technique PSO

### 3.10.1 Les avantages

- ✓Facilité d'application et de mise en oeuvre.
- ✓Obtenir de très bons résultats et des solutions rapidement et aisément (converger rapidement)[38].
- ✓Mises en oeuvre faciles, avec un nombre limité de paramètres.
- ✓Polyvalence : permet de résoudre une multitude de problèmes différents[39].
- ✓L'algorithme PSO est une méthode d'optimisation qui ne nécessite pas le calcul de dérivées[32].

### 3.10.2 Les inconvénients :

- ✓ L'algorithme s'arrête à la première solution locale.
- ✓ Problème de dépendance : Modifier un seul de ses paramètres peut avoir des conséquences sur le fonctionnement de l'algorithme et la solution finale[38].
- ✓ Aptitude à une convergence rapide, mais potentiellement trop hâtive, vers des solutions optimales.
- ✓ Choix des paramètres d'optimisation, généralement spécifiques à chaque type de problème.
- ✓ La vitesse de convergence est faible durant la phase de recherche locale approfondie (capacité limitée de recherche locale)[39].

## 3.11 Identification des paramètres électriques par méthode PSO

La figure (III.4) expose le principe d'application de l'algorithme PSO afin d'identifier les paramètres électriques du MCC. Le courant réel  $I_a$  de la machine est comparé au courant estimé  $I_a^*$  et la vitesse réelle  $\Omega$  de la machine est comparée à la vitesse estimée  $\Omega^*$ . Ainsi, le résultat de chaque comparaison représente une valeur d'erreur, et la somme de ces valeurs d'erreur représente la fonction objective (Fitness) selon l'expression suivante :

$$\text{Fitness(Fonction Objective)} = [\alpha_1(I_a - I_a^*)^2 + \alpha_2(\Omega - \Omega^*)^2]$$

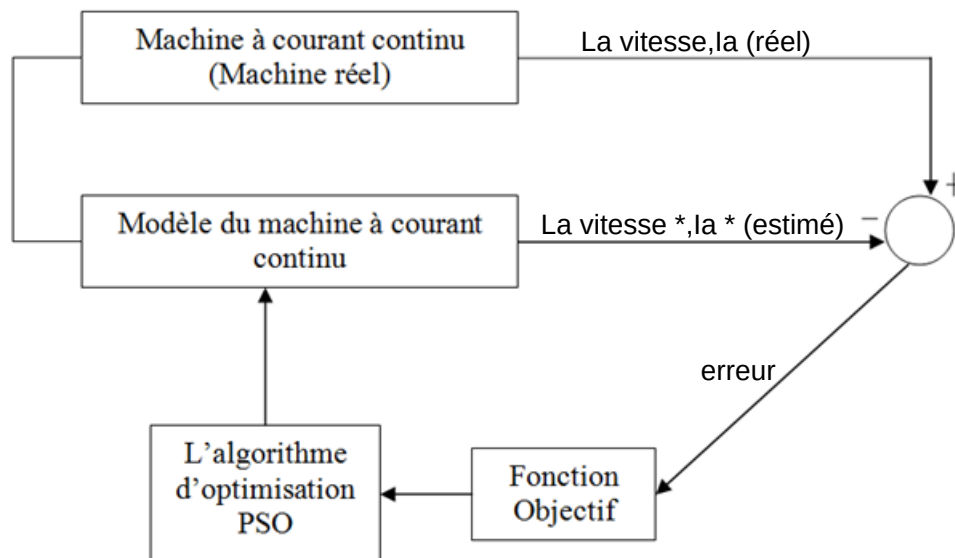


Figure III.4. Schéma de l'application de l'algorithme PSO pour identifier les paramètres électriques du MCC.

La figure ( III.5) illustre le schéma bloc général de la simulation dans MATLAB/Simulink pour comprendre le principe de fonctionnement de la méthode PSO.



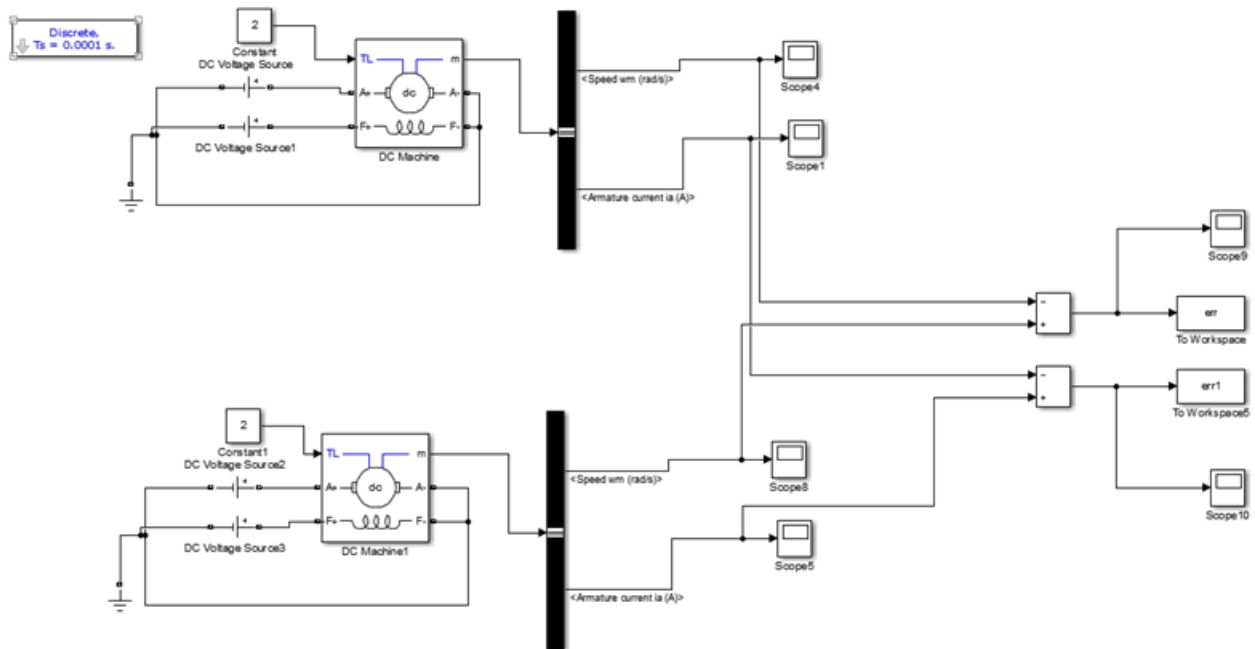


Figure III.5. Schéma bloc général expliquant le fonctionnement de PSO.

Les figures suivantes montrent les variations de la fonction objectif et des paramètres électriques  $[R_a, L_a, R_e, L_e]$  en fonction du nombre d'itérations.

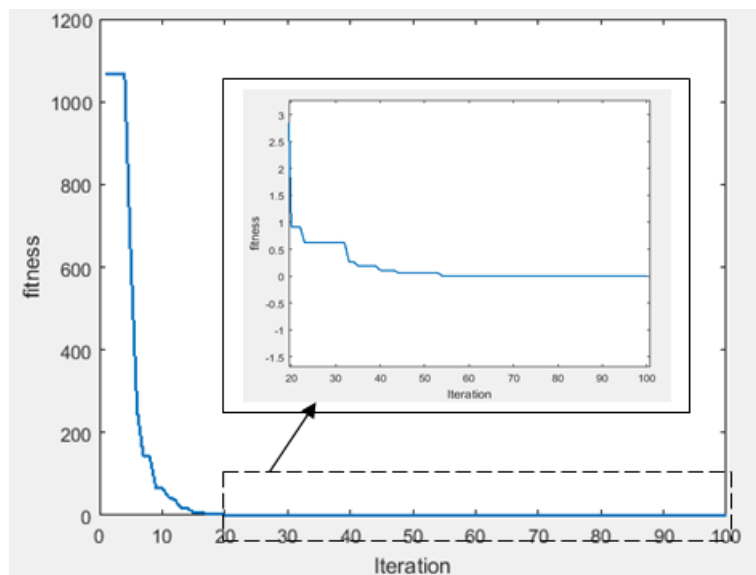


Figure III.6. Courbe de fonction objective (Fitness).

✓ De l'itération 1 jusqu'à environ l'itération 8, nous observons une diminution importante et rapide de la valeur de la fonction objective. Cela explique pourquoi l'algorithme PSO trouve rapidement des régions où les valeurs des paramètres du modèle de moteur à courant continu sont légèrement proches des valeurs réelles des paramètres du moteur à courant continu par rapport à celui-ci. Ces particules se déplacent collectivement vers la meilleure solution qui a été découverte.

✓ Ensuite, de l'itération 8 à l'itération 15 environ, on remarque que la fonction objective diminue, mais progressivement et plus lentement qu'auparavant, ce qui explique pourquoi l'al-



gorithme se rapproche de la solution optimale. Les particules commencent à explorer les régions où se trouvent les meilleures solutions et les affinent avec une plus grande précision.

✓ Enfin, de l'itération 15 à l'itération 100 environ, on remarque que la valeur de la fonction objective est devenue relativement stable et que la diminution est devenue légère, ce qui indique que l'algorithme a commencé à se rapprocher de plus en plus de la bonne solution ou l'a atteinte, sachant que la fonction objectif minimale  $f_{obj-min} = 2.3693 \exp^{-06}$ .

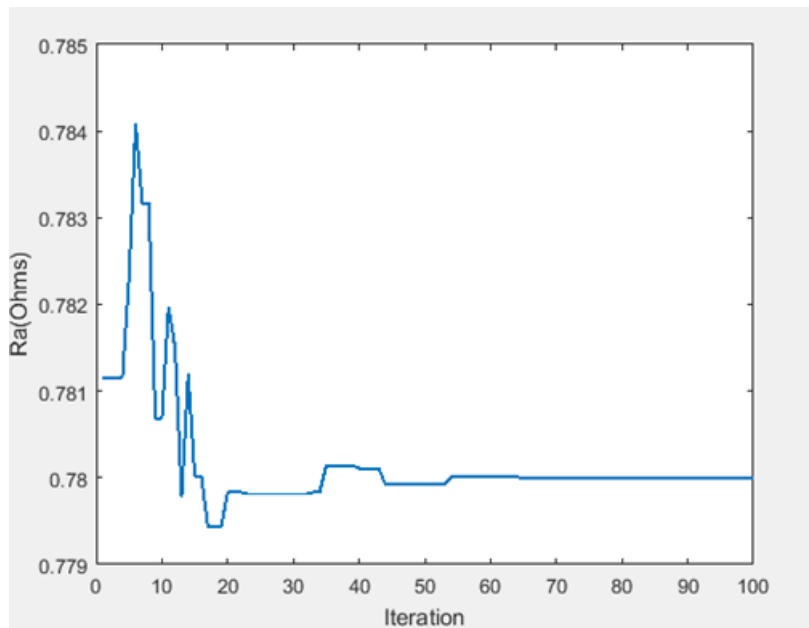
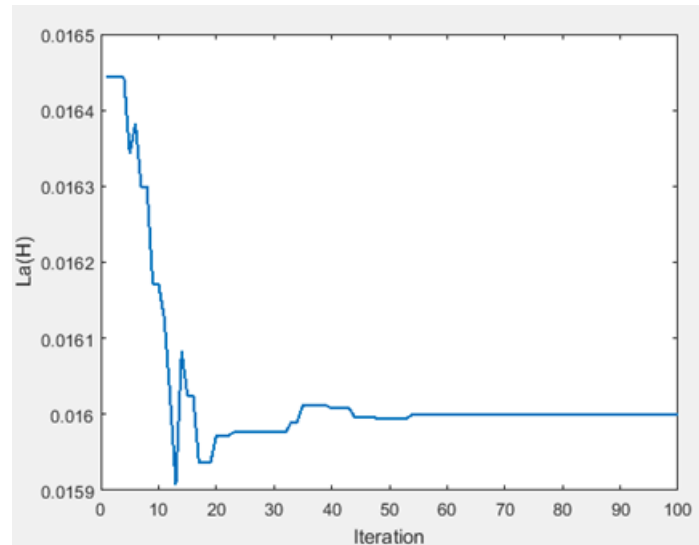


Figure III.7. Courbe de résistance de l'induit  $R_a$ .

✓ De 0 à environ 25 itérations, la courbe de résistance du rotor  $R_a$  est loin de la valeur réelle de  $R_a$ , ce qui signifie que l'erreur est importante.

✓ D'environ 25 à environ 65 itérations, les résultats se rapprochent légèrement de la valeur réelle de  $R_a$ .

✓ D'environ 65 à 100 itérations, les résultats se stabilisent à des valeurs relativement proches de la valeur réelle de  $R_a$ , ce qui explique pourquoi la valeur d'erreur est plus petite qu'auparavant et plus proche de zéro.

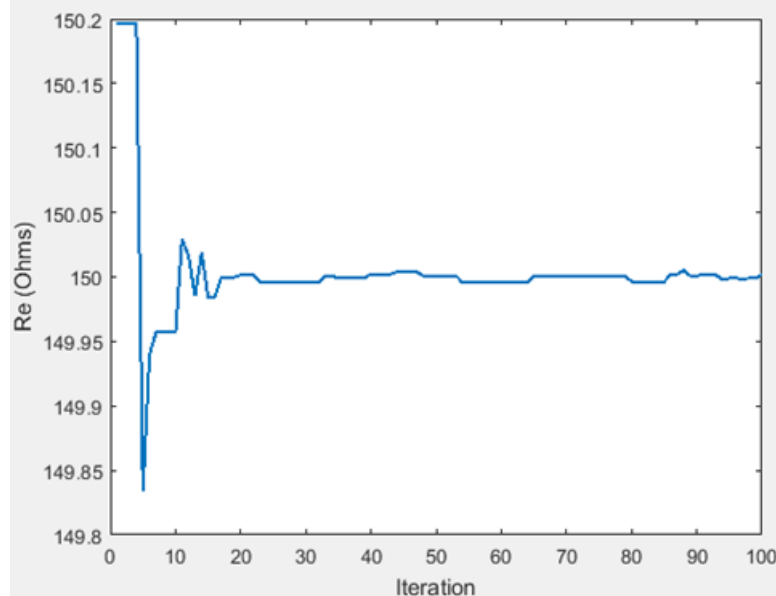


**Figure III.8. Courbe d'inductance de l'induit  $L_a$ .**

✓ De 0 à environ 20 itérations, la courbe d'inductance du rotor  $L_a$  est loin de  $L_a$  valeur réelle (valeur réelle = 0,016), ce qui signifie que l'erreur est importante.

✓ Après environ 20 à 55 itérations, les résultats convergent légèrement vers la valeur réelle de  $L_a$ .

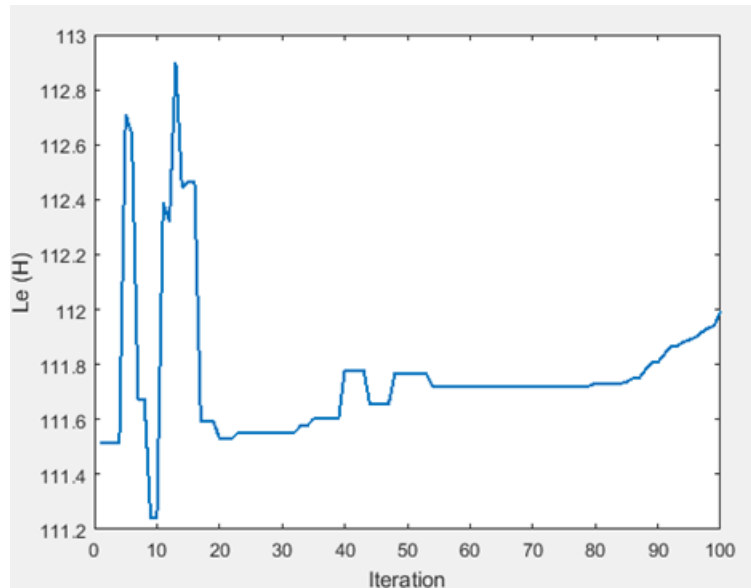
✓ Après environ 55 itérations, les résultats se stabilisent à des valeurs relativement proches de la valeur réelle de  $L_a$ , ce qui signifie que la valeur d'erreur est beaucoup plus faible qu'avant et plus proche de zéro.



**III.9. Courbe de résistance de l'inducteur  $R_e$**

✓ De 0 à environ 20 itérations, la courbe de résistance de l'inducteur  $R_e$  est loin de la valeur réelle, ce qui explique la grande erreur.

✓ Après environ 25 itérations, les résultats se stabilisent à des valeurs relativement proches de la valeur réelle de  $R_e$ , ce qui signifie que l'erreur est beaucoup plus faible qu'avant et plus proche de zéro.



III.10. Courbe d'inductance de l'inducteur  $L_e$ .

✓ De 0 à environ 15 itérations, la courbe d'inductance  $L_e$  est très perturbée, elle monte et descend donc rapidement, indiquant que l'algorithme explore toujours l'espace de recherche, donc la valeur d'erreur est grande.

✓ De 15 à environ 55 itérations, la valeur de la courbe diminue puis se stabilise relativement temporairement à environ 111,8 H, ce qui est loin de la valeur réelle de  $L_e$  ( $L_f$  réelle = 112,5 H), ce qui explique pourquoi la valeur d'erreur est assez grande.

✓ À partir d'environ 55 itérations, les résultats se stabilisent temporairement puis commencent à augmenter progressivement, ce qui explique le début de convergence vers la valeur réelle de  $L_e$  jusqu'à atteindre environ 112 H à l'itération 100, ce qui explique que la valeur d'erreur a commencé à diminuer progressivement.

Le tableau ci-dessous représente la différence entre les valeurs des paramètres électriques de la machine réelle et du modèle (PSO) :

| Les paramètres | réelle       | PSO                | Erreur relative %   |
|----------------|--------------|--------------------|---------------------|
| $R_a$          | $0.78\Omega$ | $0.779997\Omega$   | $3,8 \cdot 10^{-4}$ |
| $L_a$          | $0.016H$     | $0.016000H$        | 0                   |
| $R_e$          | $150\Omega$  | $150.001729\Omega$ | 0.001               |
| $L_e$          | $112.5H$     | $111.994509H$      | 0.45                |

Les figures suivantes illustrent la différence entre les courbes de vitesse et de courant de la machine réelle et du modèle par la méthode PSO.

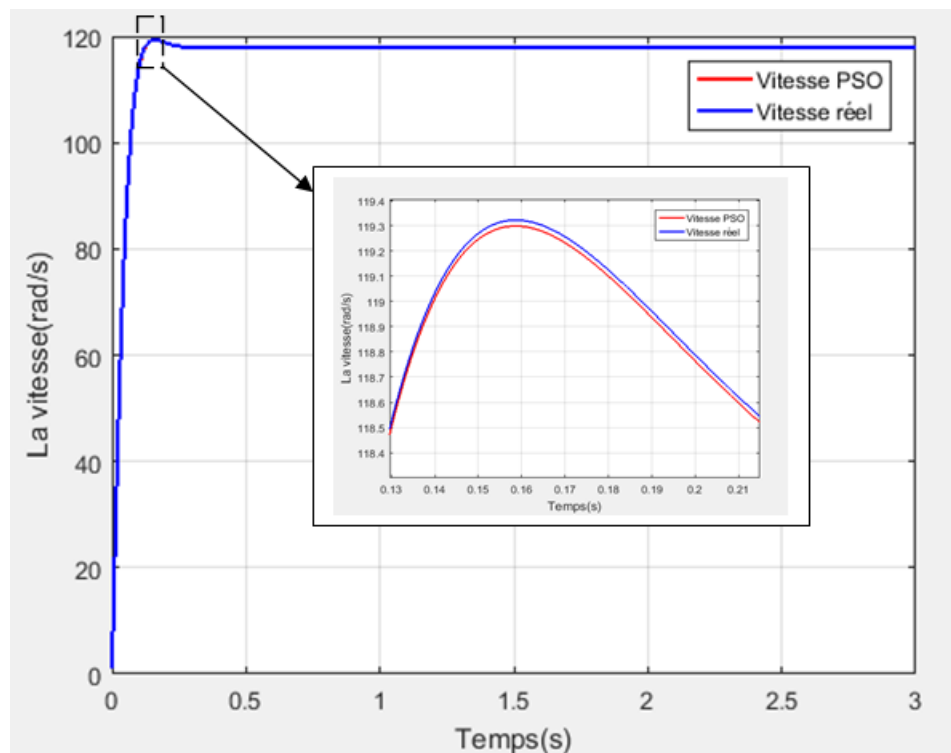


Figure III.11. Les courbes de vitesse de MCC réelle et modèle de PSO.

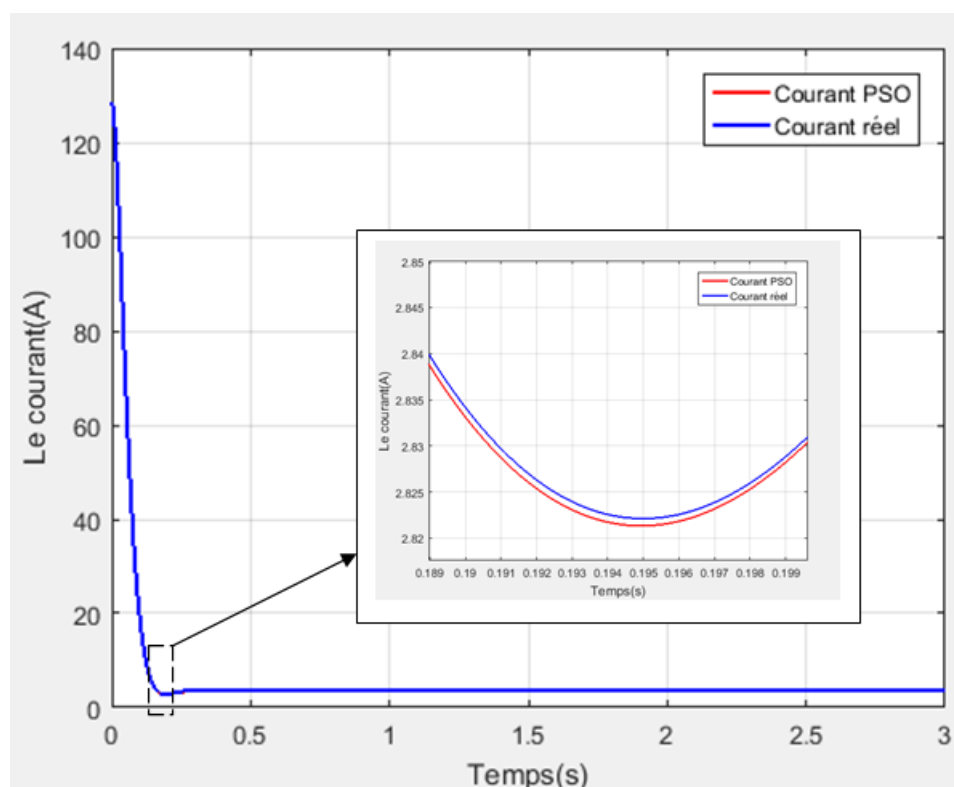


Figure III.12. Les courbes de courant de l'induit du MCC réel et du modèle PSO.

### 3.12 Conclusion

Les problèmes d'optimisation sont variés et leurs méthodes de résolution nombreuses, mais l'algorithme PSO offre une approche simple.

Ce chapitre a étudié son concept, son fonctionnement, son exécution et son application sur MATLAB, ainsi que l'essentiel à son sujet, avant de conclure par la détermination des paramètres d'un moteur à courant continu par MATLAB/SIMULINK.

---

# Conclusion

---

Le travail que nous avons présenté dans ce manuscrit était de déterminer les paramètres électriques ( $R_a$ ,  $L_a$ ,  $R_e$  et  $L_e$ ) d'un moteur à courant continu à l'aide de l'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO).

On a présenté dans la première partie de ce travail (le premier et le deuxième chapitre) des généralités couvrant la présentation et le principe de fonctionnement du moteur à courant continu avec le bilan de puissance d'un moteur à excitation indépendante, nous avons également passé en revue ses différents modes d'excitation.

Ensuite dans une étape d'identification, nous avons établi un modèle de moteur à courant continu basé sur ses équations différentielles de base tout en l'implémentant dans l'environnement Matlab/Simulink. En passant aussi en revue sur la méthode classique pour identifier les paramètres électriques et mécaniques en se basant sur certains essais qui sont bien présentés à la fin du deuxième chapitre.

Dans le troisième chapitre, nous avons appliqué une méthode métaheuristique (l'algorithme d'optimisation par essaim de particule, PSO en anglais) pour déterminer les paramètres électriques  $R_a$ ,  $L_a$ ,  $R_e$  et  $L_e$  d'un moteur à courant continu. Les résultats obtenus sont très encourageants et montrent l'intérêt de l'utilisation de cette méthode métaheuristique :

La fonction objective montre la convergence de cette méthode à partir de la 15<sup>ème</sup> itération. Une meilleure solution optimale a été obtenue à 100 itérations où les paramètres électriques identifiés sont obtenus avec une meilleure précision.

---

# Bibliographie

---

- [1] MAYE "Aide-Electrotechnique"-2e éd. Dunod, 2014.
- [2] A.Ivanov-Smolensky."Machines Électriques(Vol 2)". Éditions Mir Moscou.
- [3] Brenders, P., Sauzeix, M., Douchet, L." Électrotechnique conversion de puissance". PSI. Editions Bréal,2004.
- [4] BLAJKINE, A. ; GRANOVSKI, V. ; KOLIMÉEV, V. "Électrotechnique générale". Editions Mir, 1977.
- [5] Philippe LE BRUN,"Cours sur La machine à courant continu", Lycée Louis ARMAND, Janvier 2000.
- [6] KOSTENKO, Mikhail Polievktovich ; PIOTROVSKI, L. M. "Machines électriques". 1979.
- [7] CHATEIGNER, Guy, et al." Manuel de génie électrique : Rappels de cours, méthodes, exemples et exercices corrigés". Dunod, 2006.
- [8] ANOUAR HALILA, "Étude des machines à courant continu", sciences (M.Sc.), Mémoire maître ès, Département de génie électrique et de génie informatique, Université Laval, 2001.
- [9] Bensaoula Mohamed Amine, "Conception du Contrôleur PID pour le Moteur à Courant Continu (MCC) à Excitation indépendante Simulation sous Matlab/Simulink", ,Mémoire Master, Département : Électromécanique, UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA,2019.
- [10] Claude Divoux,"Cours sur la machine à courant continu", Terminale STI,1999.
- [11] [ITEEM1\\_02\\_mcc.pdf](#)

- [12] Claude CHEVASSU, "cours sur la machine à courant continu", O1MM 2ème année, école nationale supérieure maritime, 2014.
- [13] Michel Piou, "cours sur la machine à courant continu", 2015.
- [14] Maamra Ali et KhennabvNouredine, "Modélisation et identification des paramètres du moteur à courant continu", Mémoire licence académique, Contrôle et Diagnostic des Systèmes Électriques, Génie Électrique, Faculté des Sciences et de Technologies, Université d'EL-Oued, 2013.
- [15] Pr CHAOUCH.S, "cours sur la machine à courant continu mcc", ELT2 2ème licence, université batna 02, 2020.
- [16] Dr. BOUNADJA Elhadj, "cours sur modélisation des machines électriques", première année master, Machines électriques, Hassiba Ben Bouali université de chlef, 2019.
- [17] Djitni Theldja, "modélisation et identification des paramètres d'une machine à courant continu", mémoire de master académique, commande des machines électriques, génie électrique, université 8 mai 1945-Guelma, 2012.
- [18] Rezgui Maroua et Zelghi Aya, "commande adaptative d'un moteur à courant continu", mémoire de master, commande électrique, département de génie électrique, Université Mohamed Khider de Biskra, 2022.
- [19] "cours sur modélisation du moteur à courant continu", Électrotechnique, Lycée Gustave Eiffel de Dijon, 2016-2017.
- [20] MAMERI Sabrina et LEGHIMA Massinissa, "asservissement de vitesse d'un moteur à courant continu", mémoire de master, électronique Industriel, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2018.
- [21] ROUABHI Riyadh et NEGUEZ Said, "Commande d'un moteur à courant continu à l'aide d'un hacheur à transistor", Diplôme D'ingénieur d'état en génie électrotechnique, département d'électrotechnique, université de msila, 2009.
- [22] FEKID Hayat, "identification des paramètres d'une machine à courant continu", diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique, Département d'Electrotechnique, Université Mouloud MAMMERI, Tizi-Ouzou, 2011.
- [23] Rachid ABESSEMED, "Modélisation et simulation des machines électriques". Editions Technosup, France, mai 2011.
- [24] HAMITOCHE AKLI, SELMANI MOHAMED ET ZAMOUM MANSOUR, "Identification par Algorithmes Génétiques des Pertes dans un Moteur à Courant Continu à Excitation Séparée", Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique, Département d'Electrotechnique, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2013.



- [25] Mohamed Lamine HAMIDA ET Farid KADI," Identification et contrôle de la machine à courant continu par la Dspace 1103", Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE, DEPARTEMENT DELECTROTECHNIQUE, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU,2015.
- [26] JULIEN FLAMANT,"cour sur Machine à courant continu : identification de ses paramètres physiques, boucle de courant, asservissement de vitesse."
- [27] TROUDI Walid et TOURECHE Ayoub, "Amélioration de la sélectivité des relais à maximum de courant par utilisation des méthodes métaheuristiques",mémoire de master, Département de Génie Électrique, Université Mohamed Khider de Biskra,2022.
- [28] M : BENAÏSSA Brahim," Identification paramétrique dun panneau photovoltaïque par lalgorithme FireFly", Mémoire de Master, Automatique et systèmes, UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA,2019.
- [29] Mlle.DRISSI Khadidja et Mme.BAYOUCHE Fatiha," Identification des paramètres d'une machine asynchrone en vue de leur commande", Mémoire de Master, Electrotechnique, Université Ahmed Draïa Adrar,2022.
- [30] BELLOUMI Rabie,"Optimisation par Essaim de Particules Application à un système complexe, MAGISTER en Électronique", Département d'Électronique, Université Batna 2.
- [31] Ghiloubi Imam Barket," Poursuite du point de puissance maximale MPPT dun système photovoltaïque sous les conditions PSC basée sur lalgorithme PSO", MÉMOIRE DE MASTER, Département de génie électrique, Université Mohamed Khider de Biskra,2020.
- [32] LABED Chahira et BRAHIMI Bedra, "Recalage d'images utilisant la technique PSO", MEMOIRE MASTER ACADEMIQUE,Système Télécommunication, Département Délectronique, Université kasdi merbah de ouargla,2018.
- [33] M.BAZI Smail, "Contribution à la Commande Robuste dune Machine Asynchrone par la Technique PSO nParticle Swarm Optimizationz", En vue de lobtention de diplôme de Magister en Electrotechnique, Département dElectrotechnique, Université de Batna,2009.
- [34] MAHBOUBI THEMER, "Une approche intelligente pour un problème doptimisation multicritère",mémoire de master, Département dInformatique, Université de 8 Mai 1945Guelma, Juillet2019.
- [35] BELARABI HADJER et OTMANE AMEL, "Identification des paramètre dune machine asynchrone par méthode PSO (particle swarm optimization)",mémoire de master, DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem,2021.

- [36] Maria Zemzami, Norelislam Elhami, Abderahman Makhoulfi, Mhamed Itmi, Nabil Hmina, "cour sur Application dun modèle parallèle de la méthode PSO au problème de transport d'électricité."
- [37] Nabila Nouaouria, "Une approche d'optimisation par essaim de particules" pour la recherche en mémoire de cas, Thèse de doctorat, informatique cognitive, Université du Québec À Montréal, Novembre 2013.
- [38] Mr. KIMOUCHE Mohammed Amine et Mr. BENZID Moussa, "Les méthodes métaheuristiques pour l'optimisation en génie électrique", mémoire de master, Département D'Électrotechnique, Université Mohamed Seddik Ben Yahia-Jijel, 2019.
- [39] Ben Alia Mohamed Lamine et Telli Ali Tadjeddine, "Identification des paramètres dun moteur asynchrone par essaim de particule (PSO)", mémoire de master, génie électrique, Université Mohamed Khider de Biskra, 2024.
- [40] Boudjemai Hamza, Ardjoun Sid Ahmed El Mehdi, Chafouk Houcine and Denai Mouloud, "A new Method for the Parametric Identification of DC Machines Using MATLAB Identification Toolbox and Experimental Measurements ", université Djillali Liabes, Sidi Bel-Abbes Algeria

### abstract

This memoire addresses the theoretical review of the direct current motor, where it examines its constituent components and what relates to them in terms of torques, powers, losses, and excitation modes, while mentioning its advantages and disadvantages. The practical side involves creating a model of this motor and studying its behavior based on differential equations and using simulation in the Matlab/Simulink environment.

This work aims at the identification of the DC motor parameters using the PSO algorithm, based on the comparison of the electrical parameters of the motor model with the electrical parameters of a real DC motor and on the study of the error value between them. In this memoire, we have achieved the extraction of the curves of the electrical parameters of the model and the study of their degree of convergence and the value of the error compared to the electrical parameters of the real DC motor.

### résumé

Ce mémoire aborde le rappel théorique du moteur à courant continu, où il examine ses composants constitutifs et ce qui s'y rapporte en termes de couples, puissances, pertes et modes d'excitation, tout en mentionnant ses avantages et ses inconvénients. Le côté pratique consiste à créer un modèle de ce moteur et à étudier son comportement sur la base d'équations différentielles et en utilisant la simulation dans l'environnement Matlab/Simulink.

Ce travail vise à l'identification des paramètres du moteur à courant continu en utilisant l'algorithme PSO, en se basant sur la comparaison des paramètres électriques du modèle du moteur avec les paramètres électriques d'un moteur à courant continu réel et sur l'étude de la valeur de l'erreur entre eux. Nous avons abouti dans ce mémoire à l'extraction des courbes des paramètres électriques du modèle et à l'étude de leur degré de convergence et de la valeur de l'erreur par rapport aux paramètres électriques du moteur à courant continu réel.

*.Matlab/Simulink* . . . . .