

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERRI DE TIZI-OUZOU



FACULTÉ DE GÉNIE ÉLECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE  
DÉPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

## Mémoire de Fin d'Études de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Électrotechnique

Spécialité : **Electrotechnique industrielle**

*Présenté par*

**Lamia Makhloufi**  
**Kamelia Mansouri**

Thème

# Indentification des paramètres d'une machine à courant continu par la méthode de Pasek

*Mémoire soutenu publiquement le 19 /06 /2024 devant le jury composé de :*

**M Madjid SI BRAHIM**

MCA, UMMTO, Président

**M Salah HADDAD**

Professeur, UMMTO, Encadrant

**M Fatma LOUNNAS-LOUNIS**

MCB, UMMTO, Examinatrice

**M Rabah ROUAS**

MCB, UMMTO, Examineur

2023/2024





## *Remerciements*

D'abord, nous remercions **Dieu**, de nous avoir donné la force et la patience pour pouvoir mener ce travail à terme.

Nous tenons à exprimer toute notre gratitude et notre profond respect à notre promoteur « **HADDAD Salah** »

Nous tenons à remercier les **membres du jury** de nous avoir fait l'honneur d'évaluer ce mémoire.

Nous n'oublions sans doute pas de remercier les membres de nos familles qui nous ont soutenues et encouragées.

Nous tenons à présenter notre profonde gratitude

Enfin, nous tenons à remercier également toute personne (enseignants, étudiants, et autres), ayant participé de près ou de loin à l'aboutissement de notre travail.

 *Merci à toutes et à tous*



# Dédicaces

J'ai Le grand plaisir de dédier  
ce travail tout  
particulièrement

A mes parents qui ont tout  
fait pour me guider vers le  
chemin de la réussite.

A mes chères Sœurs

Mon cher binôme **Kamelia** qui m'a aidé  
pour la réussite de ce travail et sa  
famille.

A mes meilleures amies

 **M.Lamia**



# Dédicaces

*Au nom d'Allah, le seul et unique sans lui  
rien de tout cela n'aurait pu être*

*Je dédie ce modeste travail de fin d'études  
aux personnes les plus chères à mon  
cœur:*

*Mes très chers parents ma raison de vivre que  
dieu les protège pour moi pour leurs soutiens et  
prière pour moi, Mon cher frère, mes chères  
sœurs*

*Mes chères amies qui m'ont soutenu tout au long de ce  
travail*

*Ma chère binôme **Lamia** qui m'a aidé pour la réussite  
de ce travail et sa famille.*

*Et enfin à toutes les personnes qui m'ont soutenu et qui  
ont participé à l'élaboration de ce travail.*

 **M.Kamelia**



**Liste des  
tableaux, figures  
et annexes**

## Liste des tableaux

N° de tableau	Titre de tableau	Page de tableau
Tableau II.1	Résultats de mesure de la résistance de l'enroulement d'induit	17
Tableau II.2	Résultats de mesure de la résistance de l'enroulement d'inducteur	17
Tableau II.3	Résultats de mesure de l'impédance de l'enroulement d'induit	18
Tableau II.4	Résultats de mesure de l'impédance de l'enroulement d'inducteur	18
Tableau II.5	Résultats des essais pour la mesure de l'inductance mutuelle $M_{fd}$	19
Tableau II.6	Résultats des essais pour la mesure du couple statique $C_s$ et du coefficient de frottements $f$	20
Tableau III.1	Résultats de l'identification en appliquant la procédure citée précédemment en 3.6.1	33
Tableau IV.1	Résultats de l'identification en appliquant la procédure citée précédemment en 4.6	47
Tableau V.1	Les résultats des paramètres de la méthode classique	48
Tableau V.2	Les résultats des paramètres de la méthode Pasek sans tenir compte des frottements	49
Tableau V.3	Les résultats des paramètres de la méthode Pasek tenant compte des frottements	49

## Liste des figures

N° de figure	Titre de figure	Page de figure
<b>Figure I.1</b>	Constitution d'une machine à courant continu.	<b>3</b>
<b>Figure I.2</b>	Rotor d'une machine à courant continu avec collecteur	<b>6</b>
<b>Figure I.3</b>	Dispositif porte balais monté sur la partie fixe d'une MCC.	<b>7</b>
<b>Figure I.4</b>	Principe de l'obtention de la force de Laplace dans un moteur à courant continu	<b>8</b>
<b>Figure I.5</b>	Principe de l'obtention d'une Fém dans une génératrice à courant continu.	<b>9</b>
<b>Figure I.6</b>	Machine à courant continu à excitation séparée.	<b>10</b>
<b>Figure II.1</b>	Essai pour mesure de résistances	<b>12</b>
<b>Figure II.2</b>	Essai pour mesure d'inductances propres	<b>13</b>
<b>Figure II.3</b>	Essai pour mesure de l'inductance mutuelle $M_{fd}$	<b>13</b>
<b>Figure II.4</b>	Caractéristique mécanique et identification des couples de frottements	<b>15</b>
<b>Figure II.5</b>	Caractéristique $V_q$ en fonction du courant $I_f$ .	<b>19</b>
<b>Figure II.6</b>	: Couple en fonction de la vitesse.	<b>20</b>
<b>Figure II.7</b>	Vitesse en fonction du temps lors de l'essai de ralentissement	<b>21</b>
<b>Figure III.1</b>	Schéma de montage de l'essai de Pasek	<b>29</b>
<b>Figure III.2</b>	Allure du courant d'induit	<b>29</b>
<b>Figure IV.1</b>	Courant d'induit en fonction du temps	<b>43</b>

## Liste des annexes

---

<b>N° l'annexe</b>	<b>Titre de l'annexe</b>
<b>Annexe 1</b>	<b>Démonstration de l'égalité</b>
<b>Annexe 2</b>	<b>Détails des formules utilisées</b>
<b>Annexe 3</b>	<b>Programme Matlab de l'identification des paramètres d'un moteur à courant continu à excitation séparée par la méthode classique</b>
<b>Annexe 4</b>	<b>Programme Matlab de l'identification des paramètres d'un moteur à courant continu à excitation séparée par la méthode de Pasek sans tenir compte des frottements</b>
<b>Annexe 5</b>	<b>Programme Matlab de l'identification des paramètres d'un moteur à courant continu à excitation séparée par la méthode de Pasek en tenant compte des frottements</b>
<b>Annexe 6</b>	<b>Recherche de la solution de l'équation <math>\delta(\lambda) - \delta^* = 0</math></b>



# **Sommaire**

<b>Remerciements.....</b>	<b>.....</b>
<b>Dédicaces .....</b>	<b>.....</b>
<b>Liste des tableaux, figures et annexes .....</b>	<b>.....</b>
<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>

## Chapitre I :

### Constitution, principe de fonctionnement et modélisation du moteur à courant continu

<b>Introduction .....</b>	<b>2</b>
<b>I. Première partie, Constitution : .....</b>	<b>2</b>
I.1. Principaux éléments d'une machine à courant continu : .....	2
I.2. Principe de fonctionnement : .....	7
I.3. Deuxième partie, Modélisation.....	9
<b>Conclusion : .....</b>	<b>11</b>

## Chapitre II :

### Identification des paramètres du moteur à courant continue par la méthode classique

<b>Introduction .....</b>	<b>12</b>
<b>II.1. Identification des paramètres électriques : .....</b>	<b>12</b>
II.1.1 . Mesure des résistances des enroulements d'induit $R_q$ et l'inducteur $R_f$ : .....	12
II.1.2 Mesure des inductances propres des enroulements d'induit $L_q$ et d'inducteur $L_f$ : ..	12
II.1.3. Identification de l'inductance mutuelle entre l'induit et l'inducteur $M_{fd}$ : .....	13
<b>II.2. Détermination des paramètres mécaniques : .....</b>	<b>14</b>
II.2.1. Identification des couples de frottements secs $C_s$ et visqueux $f \cdot \omega_r$ : .....	14
<b>II.3. Essais expérimentaux.....</b>	<b>17</b>
II.3.2. Détermination des inductances $L_q$ et $L_f$ : .....	18
II.3.3. Identification de l'inductance mutuelle entre l'induit et l'inducteur $M_{fd}$ : .....	19
II.3.4. Identification du couple statique $C_s$ et du coefficient de frottements $f$ : .....	20
II.3.5. Détermination de l'inertie des masses tournantes : .....	21
<b>Conclusion : .....</b>	<b>22</b>

## Chapitre III :

### Identification des paramètres du moteur à courant continu par la méthode Pasek en négligeant les frottements

<b>Introduction .....</b>	<b>23</b>
<b>III.1. Modèle simplifié de la machine à courant continu à excitation séparée : .....</b>	<b>23</b>
<b>III.2. Bases théoriques de la méthode de Pasek : .....</b>	<b>24</b>
<b>III.3. Démarche à suivre pour l'identification des paramètres du moteur à courant continu par la méthode graphique: .....</b>	<b>27</b>

<b>III.4. Mise en œuvre expérimentale de la méthode de Pasek .....</b>	<b>28</b>
<b>III.5. Application de la procédure de Pasek : .....</b>	<b>29</b>
III.5.1 Automatisation de la procédure de Pasek : .....	30
<b>Conclusion : .....</b>	<b>33</b>

## **CHAPITRE IV :**

### **Identification des paramètres du moteur à courant continu par la méthode de Pasek en tenant compte des frottements**

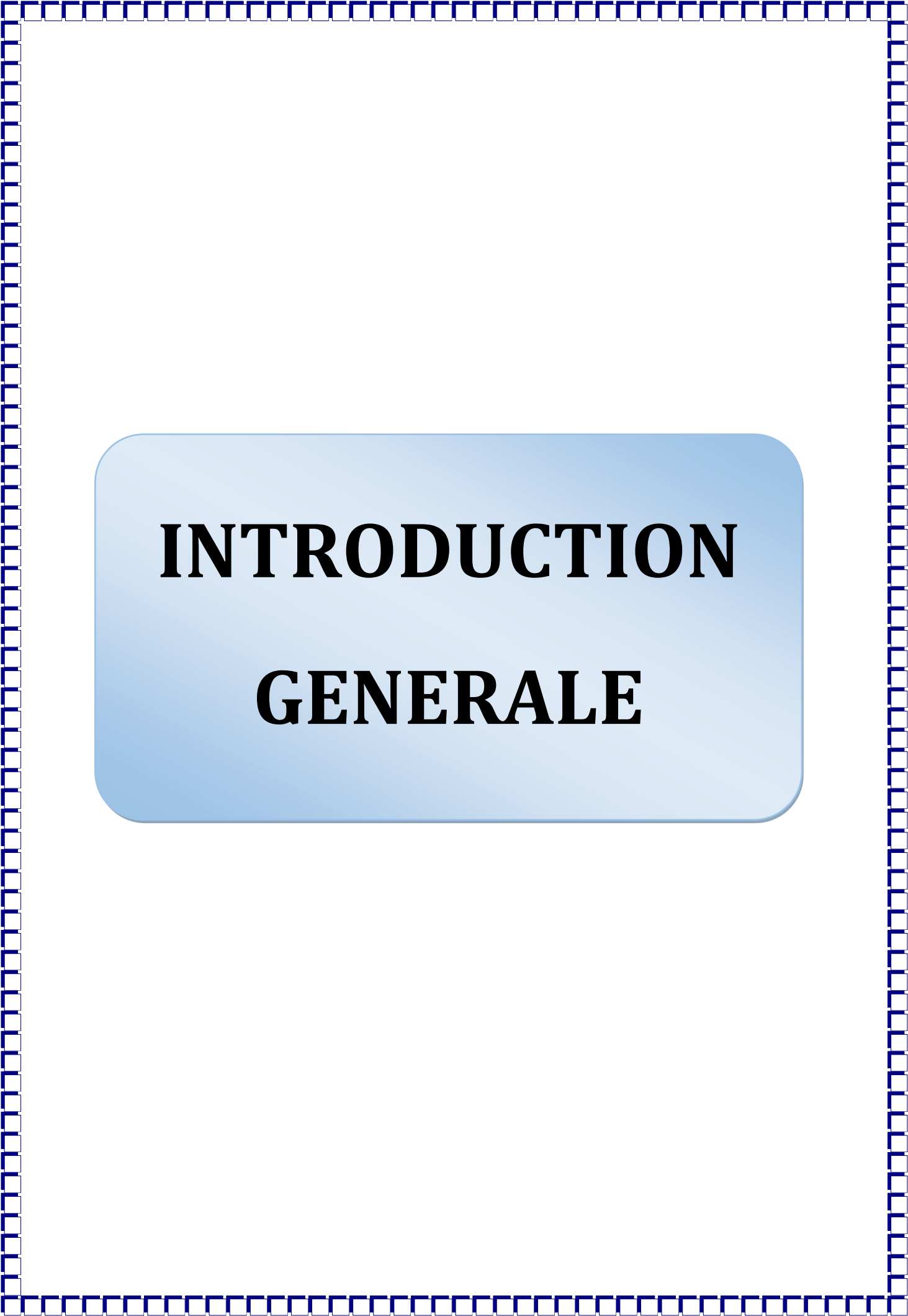
<b>Introduction .....</b>	<b>34</b>
<b>IV.1. Modèle de la machine à courant continu à excitation séparée : .....</b>	<b>34</b>
<b>IV.2. Bases théoriques de la méthode de Pasek modifiée : .....</b>	<b>35</b>
IV.2.1. Expression temporelle du courant d'induit : .....	38
IV.2.2. Expression temporelle de la vitesse de rotation : .....	39
IV.2.3. Calcul de l'instant de passage du courant par son maximum : .....	40
<b>IV.3. Procédure graphique à suivre pour l'identification des paramètres du moteur à courant continu : .....</b>	<b>41</b>
<b>IV.4. Mise en œuvre expérimentale de la méthode de Pasek.....</b>	<b>43</b>
<b>IV.5. Automatisation de la procédure de Pasek en tenant compte des frottements pour l'identification des paramètres du moteur à courant continu : .....</b>	<b>44</b>
<b>IV.6. Résultats de l'identification : .....</b>	<b>46</b>
<b>Conclusion : .....</b>	<b>47</b>

## **Chapitre V :**

### **Validation des résultats**

<b>Introduction .....</b>	<b>48</b>
<b>V. Comparaison des résultats des trois méthodes : .....</b>	<b>48</b>
V.1 Méthode Classique : .....	48
V.2 Méthode de Pasek sans tenir compte des frottements : .....	49
V.3 Méthode de Pasek en tenant compte des frottements : .....	49
<b>Conclusion : .....</b>	<b>50</b>
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>52</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>67</b>

**Annexes**



**INTRODUCTION**

**GENERALE**

La modélisation est une étape importante dans la conception, la fabrication et la commande des machines électriques. Les modèles construits doivent reproduire fidèlement le comportement statique et dynamique des machines réelles. Si tel est le cas, on peut remplacer tous les essais expérimentaux par des essais virtuels et l'on pourra soumettre la machine à diverses contraintes et régimes sévères sans pour autant l'endommager.

Pour être correctement exploités, les modèles font appel à un ensemble de paramètres, ces derniers doivent être identifiés avec une précision suffisante.

Dans une entreprise de fabrication de moteurs électriques (telle que l'ENEL), après la fabrication de chaque série de machines, un test de contrôle qualité est effectué sur un échantillon. Ce test est constitué d'une série de mesures des paramètres électriques et mécaniques de la machine construite. Les valeurs des paramètres identifiés doivent être contenues dans une certaine fourchette prédéfinie. Si tel est le cas, la série est déclarée conforme, mais dans le cas contraire, un défaut de fabrication est probable et la série est renvoyée pour des investigations plus profondes.

Dans ce contexte, on recherche toujours à gagner du temps et par conséquent de l'argent et les méthodes qui permettent l'identification de tous les paramètres d'une machine électrique à partir d'un seul essai sont très recherchées.

Dans notre travail, il s'agit précisément de l'une de ces méthodes, elle s'appelle « méthode de Pasek », et elle s'applique à l'identification des tous les paramètres d'une machine à courant continu à excitation indépendante, à partir d'un seul essai.

Notre mémoire est subdivisé en 5 chapitres, nous présentons leurs contenus dans ce qui suit.

Le premier chapitre traite de la constitution, du principe de fonctionnement et de la modélisation de la machine à courant continu à excitation indépendante.

Le second chapitre est consacré à la méthode classique d'identification des paramètres de la machines à courant continu à excitation indépendante.

Le troisième chapitre est réservé aux fondements théoriques et à l'application de la méthode de Pasek en négligeant les frottements.

Le quatrième chapitre est une extension du troisième chapitre pour tenir compte des frottements.

Le cinquième et dernier chapitre regroupe les résultats des trois méthodes appliquées pour une comparaison et une vue d'ensemble des méthodes appliquées.

Et on termine avec une conclusion générale.

# **Chapitre I :**

**Constitution, principe de  
fonctionnement et  
modélisation du moteur à  
courant continu**

# Chapitre I : Constitution, principe de fonctionnement et modélisation du moteur à courant continu

---

## Introduction

Une machine à courant continu est un dispositif électromécanique utilisé pour convertir l'énergie électrique en énergie mécanique (cas d'un moteur) ou vice versa (cas d'un générateur). On dit que la machine à courant continu est totalement réversible du fait que pour la même conception, elle peut être utilisée soit comme moteur soit comme générateur. La construction est donc la même pour les deux types de fonctionnement. Les machines à courant continu sont très utilisées dans l'industrie pour les entraînements à vitesse variable.

Dans ce chapitre, nous présentons dans une première partie les principaux composants de la machine à courant continu et dans une seconde partie le modèle de la machine à courant continu et nous terminons par dresser une liste des paramètres à identifier par différentes méthodes que nous exposerons dans les chapitres suivants.

## I. Première partie, Constitution :

### I.1. Principaux éléments d'une machine à courant continu :

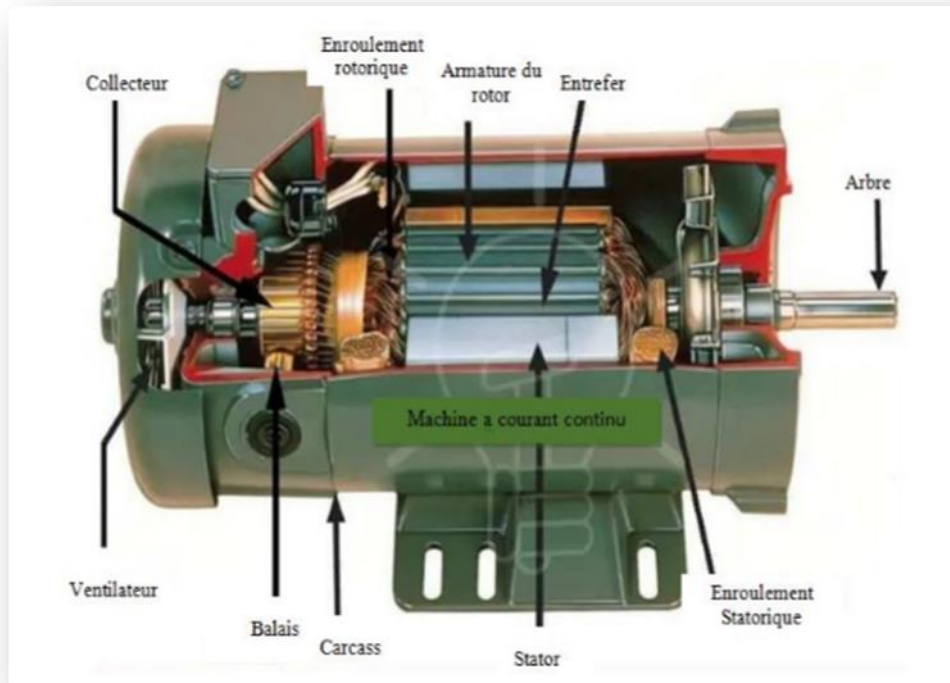
Une machine à courant continu comprend deux parties principales [1-5] (Figure I.1) :

- 1) Une partie fixe appelée stator destinée surtout à créer le flux magnétique principal, et elle comprend :
  - Les pôles principaux destinés à créer le flux magnétique principal.
  - Les pôles auxiliaires installés entre les pôles principaux et destinés à éliminer les étincelles sous les balais (dans les machines de très faible puissance, vu le manque de place, on ne prévoit pas de pôles auxiliaires).
  - La carcasse.
  
- 2) Une partie mobile appelée rotor abritant l'enroulement d'induit (dans laquelle a lieu la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique ou inversement). Le rotor comporte :
  - Une armature dentée ;
  - Un enroulement placé sur cette armature

# Chapitre I : Constitution, principe de fonctionnement et modélisation du moteur à courant continu

- Un collecteur sur lequel viendront se frotter des balais.

Les parties fixe et mobile sont séparées l'une de l'autre par un entrefer. La machine comporte également des porte-balais et des balais. Nous donnons dans ce qui suit une description sommaire des principales parties d'une machine à courant continu.



**Figure I.1** : Constitution d'une machine à courant continu.

## a. Pôles principaux :

La figure I.1 montre une coupe d'une machine à courant continu permettant de montrer clairement ses principaux et leurs emplacements.

Le pôle principal comprend un noyau en tôles d'acier électromagnétique de 1 mm d'épaisseur. Du côté dirigé vers l'induit le noyau a un épanouissement polaire servant à faciliter le passage du flux magnétique par l'entrefer. On place sur le noyau du pôle une bobine de l'enroulement d'excitation par laquelle passe un courant continu. La bobine est enroulée sur un fourreau fabriqué soit en tôle d'acier de 2 mm d'épaisseur sur laquelle est collé un carton électrotechnique de 2ou 3 mm d'épaisseur, soit en manière plastique ou en

# Chapitre I : Constitution, principe de fonctionnement et modélisation du moteur à courant continu

---

papier bakéliné. Dans les machines de faible et de moyenne puissance les bobines de pôles sont souvent fabriquées sans fourreau. Afin de réduire l'hygroscopicité et d'augmenter la conduction de la chaleur, les bobines sont compoundées ou imprégnées à plusieurs reprises de vernis chauds et sont ensuite séchées au four. Pour assurer un meilleur refroidissement on divise souvent la bobine en deux ou plusieurs parties en hauteur entre lesquelles on laisse des canaux de ventilation de largeur suffisante. Les pôles sont fixés à la carcasse à l'aide de boulons spéciaux.

## b. Pôles auxiliaires :

Le pôle auxiliaire comme le pôle principal comprend un noyau qui s'achève par un épanouissement polaire de telle ou autre forme et une bobine enroulée sur le noyau. Les pôles auxiliaires sont installés exactement au milieu de la distance qui sépare les pôles principaux et sont fixés à la carcasse par des boulons. Généralement, les pôles auxiliaires sont pleins mais dans les machines travaillant sous une charge variant brusquement ils sont feuilletés (en tôles d'acier). Leur rôle est d'équilibrer le champ magnétique afin de résoudre le problème de commutation. Cette dernière se traduit par l'apparition des étincelles plus ou moins fortes au contact balais-collecteur.

## c. Carcasse :

On appelle carcasse la partie de la machine sur laquelle sont fixés les pôles principaux et auxiliaires et à l'aide de laquelle la machine est réunie à la fondation. Une partie de la carcasse qui sert au passage du flux produit par les pôles principaux et auxiliaires est appelée culasse.

La carcasse est en fonte ou en acier et peut être divisée en deux parties en fonction du type et de la puissance de la machine. Si le diamètre de l'induit ne dépasse pas 45 cm on fixe aussi à la carcasse les boucliers dans lesquels se trouvent les paliers.

Les paliers se trouvant dans le bouclier sont à billes ou à rouleaux. Ceux fixés dans des chaises sont le plus souvent des paliers de glissement.

Dans les machines dont l'induit a un grand diamètre on fixe à la carcasse la couronne avec les porte-balais.

# Chapitre I : Constitution, principe de fonctionnement et modélisation du moteur à courant continu

---

## d. Armature d'induit :

Les induits pleins en forme de T, de disque ou d'anneau utilisés initialement ne présentent à l'heure actuelle qu'un intérêt historique. On utilise aujourd'hui exclusivement des induits en tambour exécutés en tôles d'acier magnétique de 0.5 mm d'épaisseur pour une fréquence de cycles d'aimantation de l'induit normale pour les machines à courant continu (20 à 60Hz). Les tôles d'acier sont fixées dans le sens axial de la machine et pour réduire les pertes par courants de Foucault on les isole au vernis ou papier de 0.03 à 0.05mm d'épaisseur. Les machines à courant continu de faible puissance ont généralement un système de ventilation axial, tandis que les machines d'une puissance relativement grande ont un système de ventilation radial. Dans ce dernier cas l'armature de l'induit comporte deux ou plusieurs paquets de tôles dont les dimensions de chacun dans le sens axial sont compris entre 4 et 10 mm ; la largeur du canal de ventilation entre les paquets est de 8 à 10mm. L'armature de l'induit est serrée de deux côtés à l'aide de dispositifs de serrage fixés de façon spéciale sur l'arbre ou serrés par boulons. Pour améliorer le refroidissement, les machines de faible puissance sont dotées d'ailettes ; dans les machines de grande puissance on cale un ventilateur sur l'arbre.

## e. Enroulement d'induit :

L'enroulement d'induit d'une machine à courant continu a également évolué. Les enroulements d'un induit en tambour utilisés actuellement se composent de sections fabriquées le plus souvent sur des gabarits spéciaux et placées dans les rainures de l'armature d'induit.

## f. Collecteur :

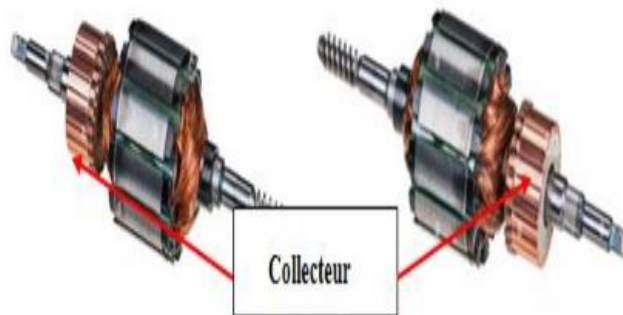
L'enroulement de l'induit est connecté au collecteur dont l'exécution dépend surtout de la puissance de la machine et de sa vitesse de rotation. Généralement le collecteur est en lames de forme trapézoïdale isolées l'une de l'autre et de la masse par des cales et des manchons en micanite. Les lames du collecteur sont fixées de différentes façons par des queues d'aronde et après serrage à chaud. Si la différence entre le diamètre de l'induit et celui

# Chapitre I : Constitution, principe de fonctionnement et modélisation du moteur à courant continu

---

de collecteur n'est pas grande, les extrémités des sections de l'enroulement d'induit sont soudées directement aux lames du collecteur. Lorsque la différence entre ces diamètres est grande, la connexion se fait à l'aide des ailettes. Les machines de grande puissance et de vitesse de rotation normale ont souvent un double collecteur. Un tel collecteur comprend deux moitiés serrées par boulons et réunies par barrettes de cuivre qui jouent le rôle de ventilateur supplémentaire.

Dans les machines rapides dont la puissance est de 15 kW et plus, prévues pour des grandes vitesses de rotation (3000 tr/mn et plus), le collecteur est fixé à l'aide des anneaux de frettage afin de prévenir le bombement des lames du collecteur. Dans des cas spéciaux, pour prévenir la vibration des balais à grande vitesse de rotation du collecteur, on réalise le collecteur en forme de disque dont la surface de contact est perpendiculaire à l'axe de rotation.



**Figure 1.2 :** Rotor d'une machine à courant continu avec collecteur. [1-5]

## **g. Dispositif à balais :**

Pour évacuer le courant du collecteur tournant et pour amener le courant au collecteur on utilise un dispositif spécial comprenant : des balais, des porte-balais, des tiges de fixation des porte-balais, une couronne, des barres collectrices.

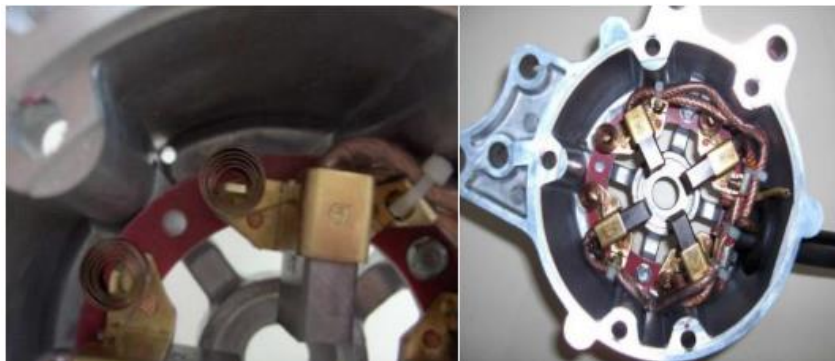
La construction type d'un porte-balais d'une machine à courant continu est indiquée dans la figure 1.3. Dans les machines modernes on utilise exclusivement des balais en graphite ou des balais en métal-charbon (ces derniers sont employés dans des machines à courant continu de basse tension). Le balai se trouve dans le porte-balais et est pressé par un ressort sur le collecteur avec une force de 1.5 à 2.5 N/cm<sup>2</sup> . Le porte-balais est fixé sur une

# Chapitre I : Constitution, principe de fonctionnement et modélisation du moteur à courant continu

---

tige et maintient le balai dans une position déterminée par rapport au collecteur. Le porte-balais le plus répandu est celui qui assure au balai une position radiale et lui permet de se déplacer dans la gaine du porte-balais. Le courant passe des balais à la tige du porte-balais par un câble souple spécial. Sur chaque tige sont généralement placés deux ou plusieurs balais fonctionnant en parallèle.

Les tiges de porte-balais sont de forme cylindrique ou prismatique ; elles sont fixées dans la couronne et isolées de cette dernière par des manchons isolants. La couronne est montée sur les paliers dans des machines de faible et moyenne puissance ou est fixée à la carcasse dans les machines de grande puissance. Tous les balais de même polarité sont réunis entre eux par des barres desquelles partent des câbles vers les bornes de la machine. [1-5]



**Figure I.3 :** Dispositif porte balais monté sur la partie fixe d'une MCC.

## I.2. Principe de fonctionnement :

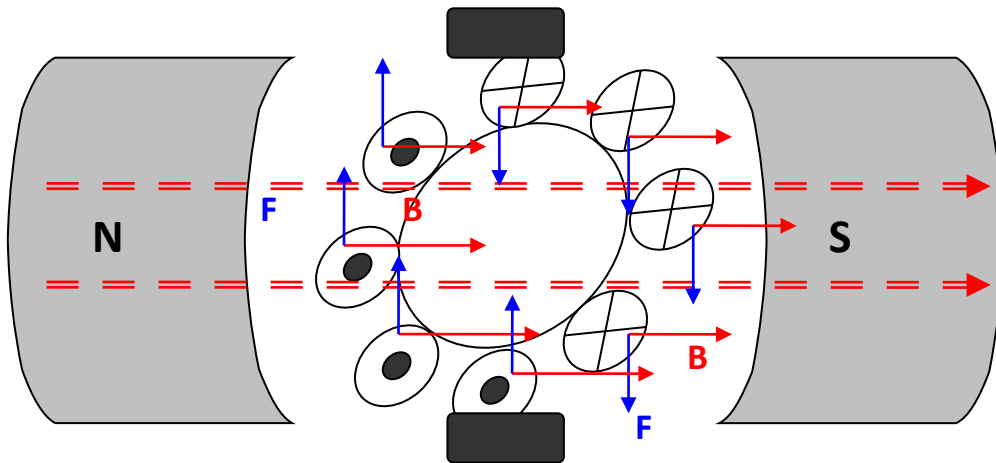
Le principe de fonctionnement d'une machine à courant continu repose sur l'interaction entre un champ magnétique fixe et un courant électrique circulant dans une ou plusieurs bobines, créant un champ magnétique variable.

### I.2.1. Fonctionnement en mode moteur :

Son fonctionnement repose sur le principe de la force de Laplace (Figure I.4), où un courant électrique circulant dans les bobines du rotor crée un champ magnétique. Ce champ magnétique interagit avec le champ magnétique fixe produit par les bobines du stator, générant ainsi une force qui entraîne le rotor en rotation. La direction de cette force est déterminée par la règle de la main gauche de la force de Laplace, où le pouce indique la

# Chapitre I : Constitution, principe de fonctionnement et modélisation du moteur à courant continu

direction du courant, les doigts la direction du champ magnétique et la paume la direction de la force. Cette force produite entraîne le rotor dans le sens de la rotation, permettant ainsi d'utiliser la machine à courant continu comme un moteur pour effectuer diverses tâches, telles que la propulsion dans les véhicules électriques, le fonctionnement des ventilateurs, des pompes, ou des machines-outils, entre autres applications. Le moteur continuera de tourner tant que le courant électrique continuera à alimenter les bobines du rotor, maintenant ainsi la production de champ magnétique et la force qui maintiennent le mouvement du rotor.

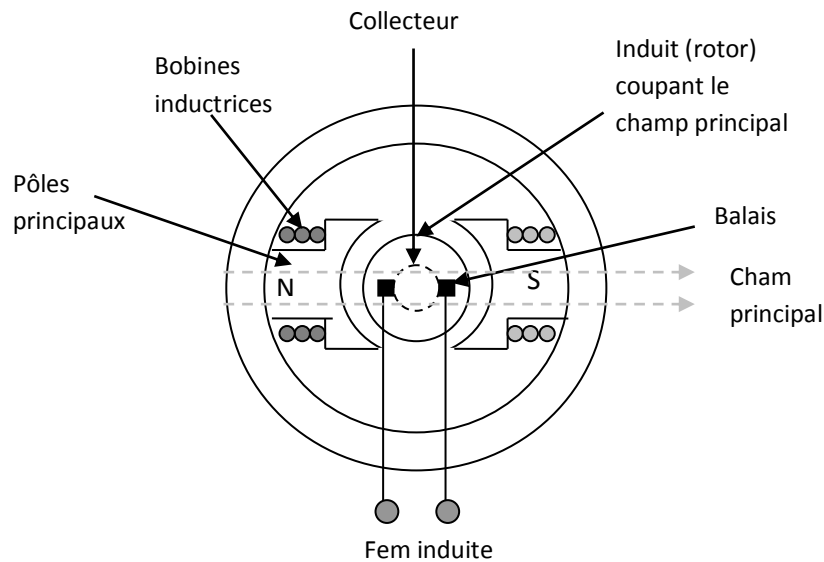


**Figure I.4 :** Principe de l'obtention de la force de Laplace dans un moteur à courant continu

## I.2.2. Fonctionnement en mode générateur :

Son fonctionnement repose sur le principe de l'induction électromagnétique (Figure I.5), où un flux magnétique variable génère une force électromotrice ( $F_{ém}$ ) dans les bobines du stator. Lorsque le rotor est entraîné en rotation, il crée un flux magnétique variable dans les bobines du stator en coupant les lignes de flux magnétique. Selon la loi de Faraday de l'induction électromagnétique, ce flux variable induit une  $F_{ém}$  dans les bobines du stator, créant ainsi un courant électrique. Ce courant peut être utilisé pour alimenter des appareils électriques, être stocké dans des batteries, ou être injecté dans un réseau électrique. En résumé, en mode générateur, la machine à courant continu convertit l'énergie mécanique en énergie électrique grâce à l'induction électromagnétique, produisant ainsi un courant électrique exploitable.

# Chapitre I : Constitution, principe de fonctionnement et modélisation du moteur à courant continu



**Figure I.5 :** Principe de l'obtention d'une FEM dans une génératrice à courant continu.

## I.3. Deuxième partie, Modélisation

La modélisation des machines à courant continu est un outil essentiel pour les ingénieurs et les chercheurs, car elle permet de comprendre, concevoir, optimiser et contrôler ces machines de manière efficace et précise. Le modèle de la machine à courant continu doit reproduire fidèlement son comportement électrique et mécanique aussi bien en régime stationnaire qu'en régime dynamique. Quel que soit le mode d'excitation de la machine à courant continu, son modèle repose sur deux types d'équations :

- Les équations électriques appliquées aux enroulements d'induit et d'inducteur.
- Les équations mécaniques regroupant l'expression du couple électromagnétique et l'équation du mouvement. Dans notre mémoire, nous nous limiterons à la machine à courant continu à excitation indépendante (ou séparée) [7].

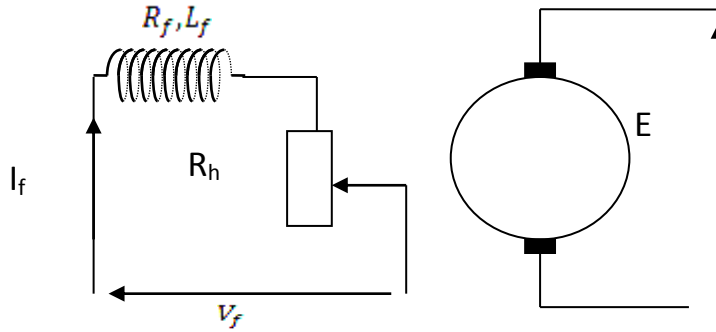
### I.3.1. Modèle de la machine à courant continu à excitation séparée :

La machine à excitation indépendante (Figure I.6) est appelée ainsi car son circuit inducteur puise son énergie d'une source indépendante de celle de l'induit. Elle nécessite

# Chapitre I : Constitution, principe de fonctionnement et modélisation du moteur à courant continu

---

donc deux sources à courant continu, contrairement à la machine à excitation parallèle et série qui n'en nécessitent qu'une seule.



**Figure I.6 :** Machine à courant continu à excitation séparée.

### Equations électriques :

Equation électrique de l'induit :  $v_q = R_q i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + M_{fd} \cdot \omega_r \cdot i_f$  (I.1)

Equation électrique de l'inducteur :  $v_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt}$  (I.2)

### Equations mécaniques :

Expression du couple électromagnétique :  $C_{sm} = M_{fd} \cdot i_f \cdot i_q$  (I.3)

Equation de mouvement :  $M_{fd} \cdot i_f \cdot i_q - C_r = J \frac{d\omega_r}{dt} + f \cdot \omega_r$  (I.4)

Quand la machine fonctionne à excitation constante, l'équation (I.2) est inutile et les équations (I.1, I.3 et I.4) se simplifient en effectuant les regroupements des termes suivants :

$$K = M_{fd} \cdot i_{f0} \tag{I.5}$$

Le modèle de la machine à courant continu à excitation indépendante devient donc :

Equation électrique de l'induit :  $v_q = R_q i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + K \cdot \omega_r$  (I.6)

# Chapitre I : Constitution, principe de fonctionnement et modélisation du moteur à courant continu

---

Expression du couple électromagnétique :  $C_{em} = K \cdot i_q$  (I.7)

Equation de mouvement :  $K \cdot i_q - C_r = J \frac{d\omega_r}{dt} + f \cdot \omega_r$  (I.8)

Si l'on néglige les frottements, l'équation (I.8) se simplifie comme suit :

$$K \cdot i_q - C_r = J \frac{d\omega_r}{dt} \quad (I.9)$$

## I.3.2. Paramètres du modèle de la machine à courant continu à excitation séparée :

Les paramètres du modèle d'une machine à courant continu à excitation indépendante sont les suivants :

1. Résistance de l'enroulement d'induit ( $R_q$ ).
2. Inductance propre de l'enroulement d'induit ( $L_q$ ).
3. Inertie des masses tournantes ( $J$ ).
4. Couple résistant ( $C_r$ ).
5. Coefficient de frottement ( $f$ ).
6. La constante du couple ( $K$ ).
7. La constante de temps électrique ( $T_e$ ).

## Conclusion :

Dans ce chapitre, nous nous sommes familiarisés avec les constitutions de la machine à courant continu et nous nous sommes intéressés au comportement de cette machine, pour cela nous avons eu recours à la modélisation pour connaître les relations qui existent entre les grandeurs d'entrées et les grandeurs de sortie. L'identification des paramètres de la machine fera l'objet d'étude des chapitres qui suivent. On y présentera quelques méthodes d'identification, notamment la méthode classique et la méthode de Pasek.

**Chapitre II :**

**Identification des  
paramètres du moteur  
à courant continue par  
la méthode classique**

# Chapitre II : Identification des paramètres du moteur à courant continu par la méthode classique

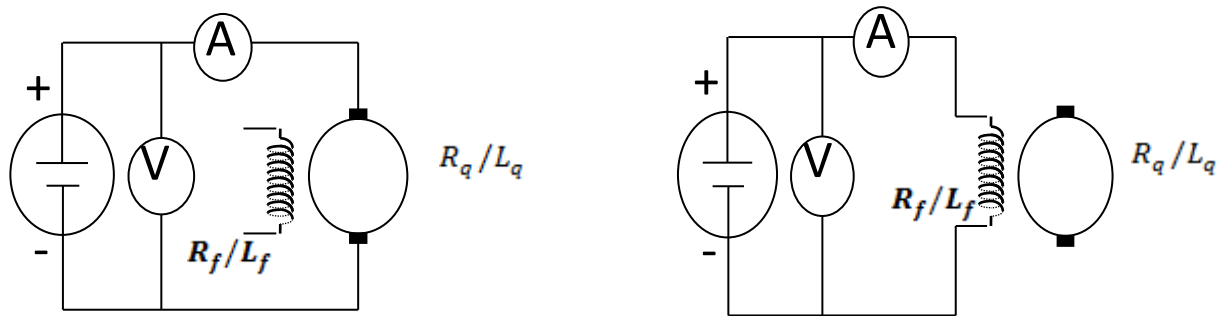
## Introduction

L'identification des paramètres du modèle d'une machine à courant continu est une première étape incontournable pour l'exploitation des modèles et la prédiction des comportements. Sans les valeurs de leurs paramètres, les modèles sont inutilisables et sans les valeurs des paramètres des moteurs à courant continu, le calcul des régulateurs devient impossible. Nous consacrons ce premier chapitre à l'identification des paramètres électriques et mécanique d'une machine à courant continu à excitation séparée d'une puissance de 3kW.

## II.1. Identification des paramètres électriques :

### II.1.1. Mesure des résistances des enroulements d'induit $R_q$ et l'inducteur $R_f$ :

Les résistances de l'induit et de l'inducteur sont mesurées à chaud par la méthode volt-ampérométrique, les mesures s'effectuent à différentes valeurs de l'intensité (Figure II.1).



a- Mesure de résistance d'induit

b – Mesure de résistance d'inducteur

Figure II.1 : Essai pour mesure de résistances

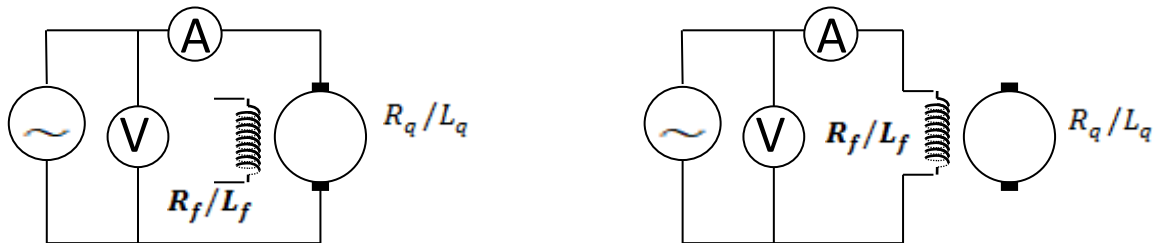
### II.1.2 Mesure des inductances propres des enroulements d'induit $L_q$ et d'inducteur $L_f$ :

L'alimentation en courant alternatif de l'induit à inducteur ouvert et inversement donne directement les inductances propres de chaque enroulement (Figure II.2)

On mesure ainsi l'impédance de chaque enroulement et on déduit l'inductance propre en connaissant la résistance par les relations ci-dessous.

## Chapitre II : Identification des paramètres du moteur à courant continu par la méthode classique

$$L_q = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{V_q}{I_q}\right)^2 - R_q^2} \quad L_f = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{V_f}{I_f}\right)^2 - R_f^2} \quad ; \quad \omega = 2\pi f \quad (\text{II.1})$$



a- Mesure de l'inductance d'induit

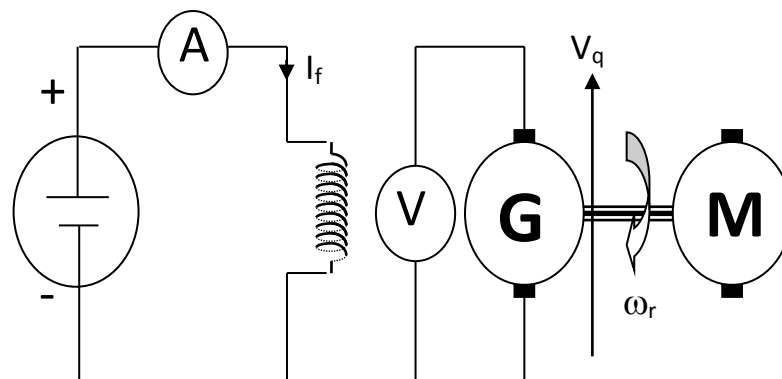
b – Mesure de l'inductance d'inducteur

**Figure II.2 :** Essai pour mesure d'inductances propres

### II.1.3. Identification de l'inductance mutuelle entre l'induit et l'inducteur

$M_{fd}$  :

L'inductance mutuelle entre les deux enroulements d'induit et d'inducteur se mesure en faisant fonctionner la machine à courant continu en génératrice. La génératrice est entraînée à la vitesse  $\omega_r$  par un moteur (Figure II.3) puis elle est excitée à un courant  $I_f$  que l'on fait varier pour relever la caractéristique à vide  $V_q(I_f)$ . Pente de la partie linéaire de cette caractéristique que l'on divise par la vitesse de rotation exprimée en rad/s donne l'inductance mutuelle recherchée, en vertu de la relation :  $V_q = M_{fd} \cdot \omega_r \cdot I_f$  (II.2)



**Figure II.3 :** Essai pour mesure de l'inductance mutuelle  $M_{fd}$

## Chapitre II : Identification des paramètres du moteur à courant continue par la méthode classique

---

### II.2. Détermination des paramètres mécaniques :

L'équation différentielle de mouvement régissant le fonctionnement dynamique d'un moteur électrique entraînant une charge est exprimée par :

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = C_m - C_s - f \cdot \omega_r \quad (\text{II.3})$$

Avec :

$J$  : Moment d'inertie des masses tournantes.

$f$  : Coefficient de frottements visqueux.

$C_s$  : Couple de frottements secs.

$\omega_r$  : vitesse de rotation

$f \cdot \omega_r$  : Couple de frottements visqueux

$C_m$  : Couple moteur (couple électromagnétique)

#### II.2.1. Identification des couples de frottements secs $C_s$ et visqueux $f \cdot \omega_r$ :

A vide, et en régime permanent, le couple électromagnétique est égal à la somme du couple des frottements secs  $C_s$  et du couple de frottements visqueux  $f \cdot \omega_r$  :

$$C_m = C_s + f \cdot \omega_r \quad (\text{II.4})$$

Sachant que le couple électromagnétique est proportionnel au produit du courant de l'induit et de celui de l'inducteur.

$$C_m = M_{fd} \cdot I_q \cdot I_f \quad (\text{II.5})$$

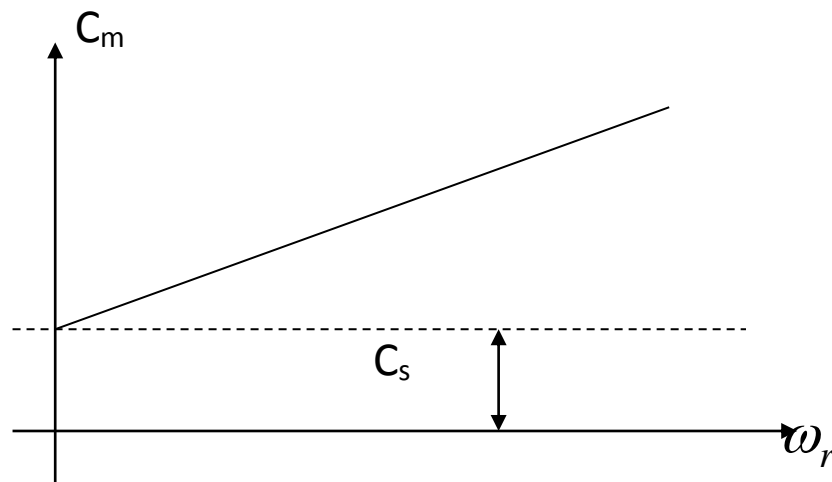
On aura :

$$M_{fd} \cdot I_q \cdot I_f = C_s + f \cdot \omega_r \quad (\text{II.6})$$

## Chapitre II : Identification des paramètres du moteur à courant continue par la méthode classique

On fait fonctionner le moteur à vide sous tension d'induit variable et sous excitation constante. On trace la caractéristique mécanique  $C_m(\omega_r)$ . Le couple est calculable par la formule (II.5) et la vitesse est mesurée par un tachymètre à chaque valeur de la tension d'induit.

La caractéristique mécanique  $C_m(\omega_r)$  est une droite qui ne passe pas par l'origine, le prolongement de cette droite jusqu'à l'axe des ordonnées ( $\omega_r = 0$ ) donne la valeur du couple de frottements secs, comme le montre la figure II.4 ci-dessous. La pente de la droite donne le coefficient des frottements visqueux.



**Figure II.4 :** Caractéristique mécanique et identification des couples de frottements

### II.2.2. Identification du moment d'inertie :

Pour identifier le moment d'inertie, nous utilisons l'essai de ralentissement que nous expliquons comme suit : après avoir démarré le moteur à courant continu, la tension est réglé à sa valeur nominale. On coupe l'alimentation de l'induit, l'inducteur reste alimenté en excitation séparée.

On note à  $t = 0$ , les grandeurs suivantes :  $V_{q0} = V_{qn}, I_{q0}, \omega_{r0}$  et on enregistre également le temps que prend le moteur pour s'arrêter  $T$ .

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = C_m - C_s - f \cdot \omega_r$$

## Chapitre II : Identification des paramètres du moteur à courant continue par la méthode classique

---

Quand on coupe l'alimentation :  $C_m = M_{fd} \cdot I_q \cdot I_f = 0$  , puisque

$$I_q = 0$$

$$J \frac{d\omega_r}{dt} + f \cdot \omega_r = -C_s$$

**a. Première méthode** : sans tenir compte des frottements

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = -C_s \Rightarrow J \int_{\omega_{r0}}^0 d\omega_r = -C_s \int_0^T dt \Rightarrow J = \frac{-C_s \int_0^T dt}{\int_{\omega_{r0}}^0 d\omega_r} = \frac{C_s \cdot T}{\omega_{r0}}$$

Sachant que le couple statique est le couple des pertes (à vide) :

$$C_s \cdot \omega_{r0} = E_{q0} \cdot I_{q0} = (V_{q0} - R_q \cdot I_{q0}) I_{q0} \rightarrow C_s = \frac{(V_{q0} - R_q \cdot I_{q0}) I_{q0}}{\omega_{r0}}$$

$$J = \frac{C_s \cdot T}{\omega_{r0}} = \frac{(V_{q0} - R_q \cdot I_{q0}) I_{q0} \cdot T}{\omega_{r0}^2} \quad (II.7)$$

**b. Deuxième méthode** : Avec prise en compte des frottements

$$J \frac{d\omega_r}{dt} + f \cdot \omega_r = -C_s$$

$$\frac{J}{f} \int_{\omega_{r0}}^0 \frac{d\left(\omega_r + \frac{C_s}{f}\right)}{\left(\omega_r + \frac{C_s}{f}\right)} = - \int_0^T dt$$

$$\ln\left(\frac{C_s}{f}\right) - \ln\left(\omega_{r0} + \frac{C_s}{f}\right) = - \frac{f}{J} \cdot T$$

$$J = - \frac{f \cdot T}{\ln\left(\frac{C_s}{f}\right) - \ln\left(\omega_{r0} + \frac{C_s}{f}\right)} = - \frac{f \cdot T}{\ln\left(\frac{\frac{C_s}{f}}{\omega_{r0} + \frac{C_s}{f}}\right)} = - \frac{f \cdot T}{\ln\left(\frac{C_s}{f \cdot \omega_{r0} + C_s}\right)} = \frac{f \cdot T}{\ln\left(\frac{f \cdot \omega_{r0} + C_s}{C_s}\right)}$$

## Chapitre II : Identification des paramètres du moteur à courant continue par la méthode classique

---

$$J = \frac{f.T}{\ln\left(\frac{f.\omega_{r0} + C_s}{C_s}\right)} \quad (II.8)$$

Avec :  $C_s = \frac{(V_{q0} - R_q \cdot I_{q0})I_{q0}}{\omega_{r0}}$

### II.3. Essais expérimentaux

#### II.3.1 Détermination des résistances $R_q$ et $R_f$ :

Les tableaux II.1 et II.2 donnent les résultats des mesures des résistances des enroulements de l'induit et de l'inducteur respectivement.

$V_q$ mesurée(V)	4.25	6	10
$I_q$ mesuré(A)	1.7	2.5	5.2
$R_q$ calculée( $\Omega$ )	2.5	2.4	1.92

$$R_q = \frac{V_q}{I_q}$$

**Tableau II.1 :** Résultats de mesure de la résistance de l'enroulement d'induit

$V_f$ mesurée(V)	33	52	90
$I_f$ mesuré(A)	0.41	0.6	1.1
$R_f$ calculée( $\Omega$ )	80.4	86.6	81.8

$$R_f = \frac{V_f}{I_f}$$

**Tableau II.2 :** Résultats de mesure de la résistance de l'enroulement d'inducteur

Les valeurs moyennes des résistances d'induit et d'inducteur sont :

Résistance d'induit :  $R_q = 2.27 \Omega$  ; Résistance d'inducteur :  $R_f = 82.9 \Omega$

## Chapitre II : Identification des paramètres du moteur à courant continue par la méthode classique

---

### II.3.2. Détermination des inductances $L_q$ et $L_f$ :

Les tableaux II.3 et II.4 donnent les résultats des mesures des impédances des enroulements de l'induit et de l'inducteur respectivement.

V <sub>q</sub> mesurée (V)	4	6.6	9.5
I <sub>q</sub> mesuré (A)	1.25	2.5	3.9
Z <sub>q</sub> calculée (Ω)	3.2	2.64	2.43

$$Z_q = \frac{V_q}{I_q}$$

**Tableau II.3 :** Résultats de mesure de l'impédance de l'enroulement d'induit

V <sub>f</sub> mesurée (V)	90	100	110
I <sub>f</sub> mesuré (A)	0.034	0.037	0.041
Z <sub>f</sub> calculée (Ω)	2647	2702.7	2682.9

$$Z_f = \frac{V_f}{I_f}$$

**Tableau II.4 :** Résultats de mesure de l'impédance de l'enroulement d'inducteur

La valeur moyenne des impédances de l'induit et de l'inducteur sont respectivement :

$$Z_q = 2.75 \, \Omega \quad ; \quad Z_f = 2677.5 \, \Omega$$

Le calcul des inductances se fait en utilisant les relations suivantes :

$$L_q = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{V_q}{I_q}\right)^2 - R_q^2} \quad ; \quad L_f = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{V_f}{I_f}\right)^2 - R_f^2}$$

Les calculs donnent :

Inductance propre de l'induit  $L_q = 0.0049 \, \text{H}$

## Chapitre II : Identification des paramètres du moteur à courant continue par la méthode classique

Inductance propre de l'inducteur  $L_f = 8.52 \text{ H}$

### II.3.3. Identification de l'inductance mutuelle entre l'induit et l'inducteur

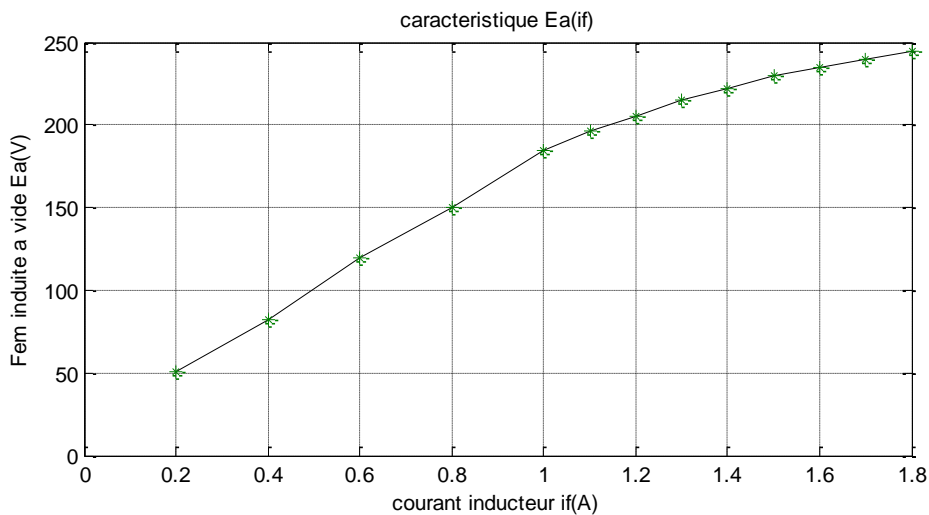
$M_{fd}$  :

Le tableau II.5 dresse les résultats de l'essai effectué à une vitesse de  $\omega_r = 1434 \text{ (tr /min)}$

I <sub>f</sub> (A)	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8
V <sub>q</sub> mesurée (V)	50.5	82	120	150	185	196	205	215	222	230	235	240	245

**Tableau II.5** : Résultats des essais pour la mesure de l'inductance mutuelle  $M_{fd}$

Les résultats du tableau II.5 sont tracés dans la caractéristique de la figure II.4



**Figure II.5** : Caractéristique  $V_q$  en fonction du courant  $I_f$ .

La pente de la courbe donne la valeur de  $M_{fd} \cdot \omega_r$  pour trouver la valeur de  $M_{fd}$  il suffit de diviser cette valeur par  $\omega_r = 1434 \text{ tr/min} = 150 \text{ rad/s}$

$$\tan(\alpha) = \frac{82 - 50.5}{0.4 - 0.2} = 157.5 = M_{fd} \cdot \omega_r = M_{fd} * 150 \Rightarrow M_{fd} = \frac{157.5}{150} = 1.1 \text{ H}$$

## Chapitre II : Identification des paramètres du moteur à courant continue par la méthode classique

On trouve :  $M_{fd} = 1.1 \text{ H}$

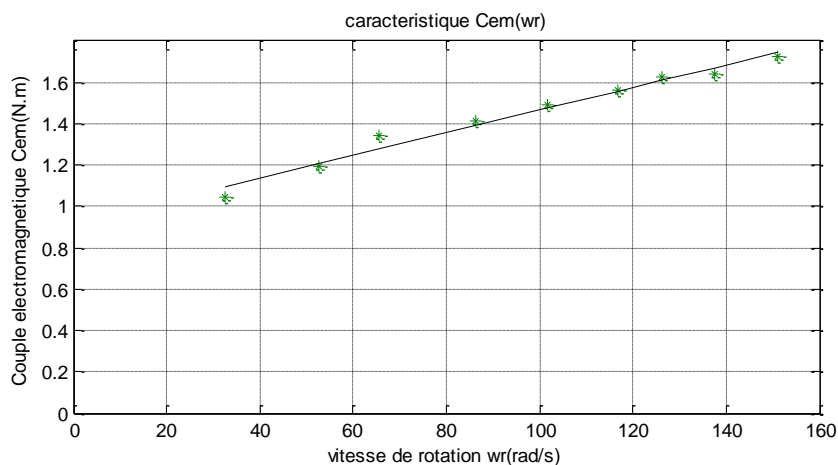
### II.3.4. Identification du couple statique $C_s$ et du coefficient de frottements $f$ :

Les résultats de l'essai sont résumés dans le tableau II.6 suivant :

$V_q \text{ (V)}$	52	80	100	130	152	175	190	202	220
$I_q \text{ (A)}$	0.7	0.8	0.9	0.95	1	1.05	1.09	1.1	1.16
$\omega_r \text{ (rd/s)}$	32.46	52.75	65.52	86.2	101.5	116.8	126.2	137.5	150.9
$C_{em} \text{ (N.m)}$	1.17	1.34	1.51	1.59	1.68	1.76	1.83	1.84	1.94

**Tableau II.6** : Résultats des essais pour la mesure du couple statique  $C_s$  et du coefficient de frottements  $f$

A partir du tableau II.6 on trace le graphe de la figure II.5 du couple en fonction de la vitesse.



**Figure II.6** : Couple en fonction de la vitesse.

Le prolongement de la caractéristique  $C_m(\omega_r)$  à l'origine coupe l'axe des ordonnées en un point. Ce dernier désigne la valeur du couple statique  $C_s$ .

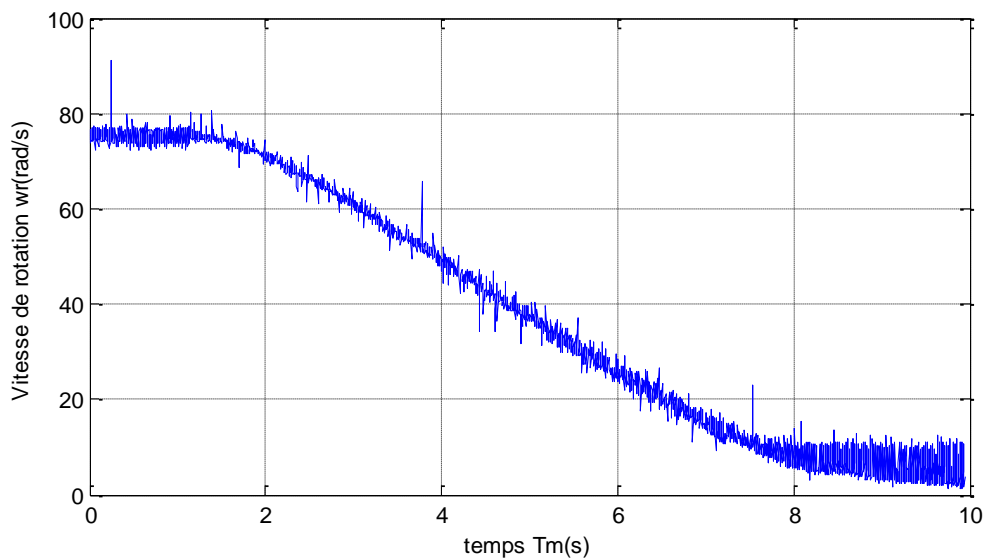
## Chapitre II : Identification des paramètres du moteur à courant continue par la méthode classique

Après exploitation de la courbe de la figure II.5, on trouve les valeurs du coefficient des frottements et du couple statique comme suit :

$$f = 0.0055 \text{ Nm.s/rd} \quad ; \quad C_s = 0.92 \text{ Nm}$$

### II.3.5. Détermination de l'inertie des masses tournantes :

La figure II.6 ci-dessous donne l'allure de la vitesse de rotation lors de l'essai de ralentissement. Cette courbe donne par la méthode de la tangente directement la valeur de la constante de temps mécanique.



**Figure II.7 :** Vitesse en fonction du temps lors de l'essai de ralentissement

A partir de la courbe de ralentissement enregistrée par l'oscilloscope à mémoire, on peut identifier la constante de temps mécanique :  $T_m = 8\text{s}$

On déduit la valeur de l'inertie  $J$  par la relation suivante :

$$T_m = \frac{J}{f} \rightarrow T_m \cdot f = 8 * 0.0055 = 0.044 \text{ kg.m}^2$$

## Chapitre II : Identification des paramètres du moteur à courant continu par la méthode classique

---

### Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté et appliqué les méthodes classiques d'identification des paramètres électriques et mécaniques d'une machine à courant continu d'une puissance de 3kW. Ces méthodes sont efficaces et donnent des résultats assez précis. Mais pour chaque paramètre, il faut parfois effectuer plusieurs essais et certains nécessitent même de tracer une caractéristique.

La possibilité d'identifier plusieurs paramètres avec un seul essai représente un gain de temps appréciable dans le processus de contrôle qualité lors de la fabrication des machines électriques. C'est l'objet du prochain chapitre.

## **Chapitre III :**

**Identification des paramètres  
du moteur à courant continu  
par la méthode Pasek en  
négligeant les frottements**

# Chapitre III : Identification des paramètres du moteur à courant continu par la méthode Pasek en négligeant les frottements

## Introduction

L'objet de ce chapitre est de développer les fondements théoriques puis de mettre en œuvre expérimentalement une procédure d'identification de tous les paramètres du modèle simplifié d'une machine à courant continu à excitation indépendante.

Le modèle simplifié suppose que le courant d'excitation est constant et que les frottements sont négligeables.

### III.1. Modèle simplifié de la machine à courant continu à excitation séparée :

Le modèle d'une machine à courant continu à excitation séparée est représenté par les équations suivantes :

$$\text{Equation électrique de l'induit : } v_q = R_q \cdot i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + M_{fd} \cdot \omega_r \cdot i_f$$

$$\text{Equation électrique de l'inducteur : } v_f = R_f \cdot i_f + L_f \frac{di_f}{dt}$$

$$\text{Equation de mouvement : } M_{fd} \cdot i_f \cdot i_q - C_r = J \frac{d\omega_r}{dt} + f \omega_r$$

Si l'on suppose que le courant d'excitation est constant, on peut opérer le regroupement de termes suivant :  $K = M_{fd} \cdot i_{f0}$  et le modèle de la machine à courant continu à excitation séparée se simplifie comme suit :

$$v_q = R_q \cdot i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + K \cdot \omega_r$$

$$K \cdot i_q - C_r = J \frac{d\omega_r}{dt}$$

## Chapitre III : Identification des paramètres du moteur à courant continu par la méthode Pasek en négligeant les frottements

### III.2. Bases théoriques de la méthode de Pasek :

La méthode de Pasek suppose que le moteur à courant continu à excitation séparée démarre d'un point de fonctionnement connu en régime établi et le courant d'excitation est supposé constant [8-10]. Ce point de fonctionnement est caractérisé par les grandeurs  $i_{q0}$ ,  $v_{q0}$ ,  $i_{f0}$  et  $\omega_{r0}$  et vérifie les équations :

$$v_{q0} = R_q \cdot i_{q0} + K \cdot \omega_{r0} \quad \text{et} \quad K \cdot i_{q0} = C_{r0} \quad \text{avec} \quad K = M_{fd} \cdot i_{f0}$$

On applique une variation en échelon d'amplitude  $E$  de la tension d'induit  $V_q$ . Sachant que le couple résistant reste constant et que les frottements sont négligeables.

Montrons que les deux racines du courant et de la vitesse de rotation s'expriment par :

$$p_1 = -\frac{1}{2T_e}(1+\alpha) \quad \text{et} \quad p_2 = -\frac{1}{2T_e}(1-\alpha)$$

$$\Delta v_q(p) = K \cdot \Delta \omega_r(p) + (R_q + L_q \cdot p) \cdot \Delta i_q(p)$$

$$K \cdot \Delta i_q(p) = J \cdot p \cdot \Delta \omega_r(p)$$

$$\Rightarrow \Delta i_q(p) = \frac{J \cdot p \cdot \Delta v_q(p)}{J \cdot p \cdot (R_q + L_q \cdot p) + K^2}$$

$$\Rightarrow \Delta \omega_r(p) = \frac{K \cdot \Delta v_q(p)}{J \cdot p \cdot (R_q + L_q \cdot p) + K^2}$$

Sachant que :

$$\Delta v_q(p) = \frac{E}{p}$$

$$\Delta i_q(p) = \frac{J \cdot p \cdot \frac{E}{p}}{J \cdot p \cdot (R_q + L_q \cdot p) + K^2} = \frac{J \cdot E}{J \cdot p \cdot (R_q + L_q \cdot p) + K^2} = \frac{J \cdot E}{J \cdot L_q \cdot p^2 + J \cdot R_q \cdot p + K^2} \quad (\text{III.1})$$

## Chapitre III : Identification des paramètres du moteur à courant continu par la méthode Pasek en négligeant les frottements

---

$$\Delta\omega_r(p) = \frac{K \cdot \frac{E}{p}}{J \cdot p \cdot (R_q + L_q \cdot p) + K^2} = \frac{K \cdot E}{p \cdot (J \cdot p \cdot (R_q + L_q \cdot p) + K^2)} = \frac{K \cdot E}{p \cdot (J \cdot L_q \cdot p^2 + J \cdot R_q \cdot p + K^2)}$$

$$\Delta i_q(p) = \frac{J \cdot E}{J \cdot L_q \cdot (p^2 + \frac{R_q}{L_q} \cdot p + \frac{K^2}{J \cdot L_q})} = \frac{E}{L_q} \cdot \frac{1}{(p^2 + \frac{1}{T_e} p + \frac{1}{T_e \cdot T_{em}})}$$

$$\Delta\omega_r(p) = \frac{K \cdot E}{J \cdot L_q} \frac{1}{p \cdot (p^2 + \frac{1}{T_e} p + \frac{1}{T_e \cdot T_{em}})} \quad \text{(III.2)}$$

Cherchons les racines de l'équation caractéristique :  $(p^2 + \frac{1}{T_e} p + \frac{1}{T_e \cdot T_{em}})$

Le discriminant  $\Delta$  vaut :  $(\frac{1}{T_e})^2 - 4 \cdot \frac{1}{T_e \cdot T_{em}}$  et si  $T_{em} = \lambda \cdot T_e$  alors  $\Delta = \frac{1}{T_e^2} - \frac{4}{\lambda T_e^2}$

La racine de ce discriminant est  $\sqrt{\Delta} = \frac{1}{T_e} \cdot \sqrt{(1 - \frac{4}{\lambda})} = \frac{\alpha}{T_e}$

Les deux racines de cette équation s'écrivent enfin :

$$p_1 = \frac{(-\frac{1}{T_e} - \frac{\alpha}{T_e})}{2} = -\frac{1}{2T_e}(1 + \alpha) \quad ; \quad p_2 = \frac{(-\frac{1}{T_e} + \frac{\alpha}{T_e})}{2} = -\frac{1}{2T_e}(1 - \alpha)$$

Et si l'on pose :  $T_1 = \frac{2T_e}{1 + \alpha}$  et  $T_2 = \frac{2T_e}{1 - \alpha}$  alors les deux racines s'expriment par :

$$p_1 = -\frac{1}{T_1} \quad \text{et} \quad p_2 = -\frac{1}{T_2}$$

La variation du courant s'écrit maintenant :  $\Delta i_q(p) = \frac{E}{L_q} \cdot \frac{1}{(p + \frac{1}{T_1})(p + \frac{1}{T_2})}$  (III.3)

## Chapitre III : Identification des paramètres du moteur à courant continu par la méthode Pasek en négligeant les frottements

La transformée inverse de Laplace donne :

$$\Delta i_q(t) = \frac{E}{L_q} \cdot \frac{1}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}} (e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}}) = \frac{E.T_1.T_2}{L_q(T_1 - T_2)} (e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}})$$

$$\frac{T_1.T_2}{T_1 - T_2} = \frac{\frac{2.T_e}{1+\alpha} \cdot \frac{2.T_e}{1-\alpha}}{\frac{2.T_e}{1+\alpha} - \frac{2.T_e}{1-\alpha}} = 2.T_e \cdot \frac{1}{\frac{(1+\alpha).(1-\alpha)}{(1-\alpha)-(1+\alpha)}} = -\frac{T_e}{\alpha}$$

$$\Rightarrow \boxed{\Delta i_q(t) = \frac{E.T_e}{\alpha.L_q} (e^{-\frac{t}{T_2}} - e^{-\frac{t}{T_1}})}$$
 (III.4)

$$\Delta i_q(0) = \frac{E.T_e}{\alpha.L_q} (e^{-0} - e^{-0}) = 0 \quad \text{et} \quad \Delta i_q(\infty) = \frac{E.T_e}{\alpha.L_q} (e^{-\infty} - e^{-\infty}) = 0, \quad \text{le courant passe donc par}$$

un maximum

Calculons l'instant de passage du courant par son maximum :

$$\frac{d}{dt}(\Delta i_q(t)) = \frac{d}{dt} \left( \frac{E.T_e}{\alpha.L_q} (e^{-\frac{t}{T_2}} - e^{-\frac{t}{T_1}}) \right) = 0 \Rightarrow \frac{d}{dt} (e^{-\frac{t}{T_2}} - e^{-\frac{t}{T_1}}) = 0 \Rightarrow \frac{1}{T_2} e^{-\frac{t}{T_2}} = \frac{1}{T_1} e^{-\frac{t}{T_1}}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{e^{-\frac{t_1}{T_2}}}{e^{-\frac{t_1}{T_1}}} = e^{-\frac{t_1}{T_2} + \frac{t_1}{T_1}} = e^{-t_1(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1})} = e^{-t_1(\frac{T_1 - T_2}{T_1.T_2})} \Rightarrow \text{Log} \frac{T_2}{T_1} = -t_1 \left( \frac{T_1 - T_2}{T_1.T_2} \right) = t_1 \left( \frac{T_2 - T_1}{T_1.T_2} \right)$$

$$\Rightarrow t_1 = \frac{T_1.T_2}{T_2 - T_1} \cdot \text{Log} \frac{T_2}{T_1}$$

$$\Rightarrow \boxed{t_1 = \frac{T_e}{\alpha} \cdot \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}}$$
 (III.5)

Des résultats (III.4 et III.5), on calcule  $\delta = \frac{\Delta i_q(2t_1)}{\Delta i_q(t_1)}$  et  $\frac{t_1}{T_e}$  en fonction de  $\lambda$

- On construit deux abaques qui donnent  $\delta$  et  $\frac{t_1}{T_e}$  en fonction de  $\lambda$

## Chapitre III : Identification des paramètres du moteur à courant continu par la méthode Pasek en négligeant les frottements

Avec  $\alpha = \sqrt{1 - \frac{4}{\lambda}}$  et sachant que  $\Delta i_q(t) = \frac{E.T_e}{\alpha.L_q} (e^{-\frac{t}{T_2}} - e^{-\frac{t}{T_1}})$  et  $(\frac{t_1}{T_e} = \frac{1}{\alpha} \cdot \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha})$ .

Expression de la vitesse de rotation :

$$\Delta \omega_r(p) = \frac{K.E}{J.L_q} \frac{1}{p.(p^2 + \frac{1}{T_e} p + \frac{1}{T_e.T_{em}})} = \frac{K.E}{J.L_q} \frac{1}{p.(p + \frac{1}{T_1})(p + \frac{1}{T_2})}$$

$$\Delta \omega_r(t) = \frac{K.E}{J.L_q} T_1.T_2 \left( 1 - \frac{\frac{1}{T_1} e^{-\frac{1}{T_2} t} - \frac{1}{T_2} e^{-\frac{1}{T_1} t}}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}} \right) = \frac{K.E}{J.L_q} T_1.T_2 \left( 1 - \frac{T_2 \cdot e^{-\frac{1}{T_2} t} - T_1 e^{-\frac{1}{T_1} t}}{T_1 - T_2} \right)$$

$$T_1.T_2 = \frac{2.T_e}{1+\alpha} * \frac{2.T_e}{1-\alpha} = \frac{4T_e^2}{1-\alpha^2} = \frac{4T_e^2}{1-1-\frac{4}{\lambda}} = \lambda T_e^2 = T_e.T_{em} = \frac{J.L_q}{K^2}$$

$$\Rightarrow \Delta \omega_r(t) = \frac{E}{K} \cdot \left( 1 - \frac{T_1 \cdot e^{-\frac{1}{T_1} t} - T_2 e^{-\frac{1}{T_2} t}}{T_1 - T_2} \right) \quad \text{(III.6)}$$

### III.3. Démarche à suivre pour l'identification des paramètres du moteur à courant continu par la méthode graphique:

Les mesures de  $t_1$ ,  $i_q(t_1)$  et  $i_q(2t_1)$  donnent les paramètres du moteur grâce à la démarche suivante [8-10] :

1- On calcule  $\delta = \frac{\Delta i_q(2t_1)}{\Delta i_q(t_1)}$  et un abaque donne  $\lambda$  ; un deuxième abaque donne

$\frac{t_1}{T_e}$  correspondant à ce  $\lambda$ , on en déduit  $T_e$ .

2- On peut démontrer (voir **annexe 1**) que :  $\delta = \frac{\Delta i_q(t_1)}{\Delta I_m} = \frac{\Delta i_q(2t_1)}{\Delta i_q(t_1)}$  avec :  $\Delta I_m = \frac{\Delta V_q}{R_q}$

## Chapitre III : Identification des paramètres du moteur à courant continu par la méthode Pasek en négligeant les frottements

Connaissant  $\Delta i_q(t_1)$  et  $\Delta i_q(2t_1)$  on déduit  $\Delta I_m$  par la relation :  $\Delta I_m = \frac{\Delta i_q(t_1)^2}{\Delta i_q(2t_1)}$ ,

On déduit ensuite  $R_q$  de la relation :  $R_q = \frac{\Delta V_q}{\Delta I_m}$

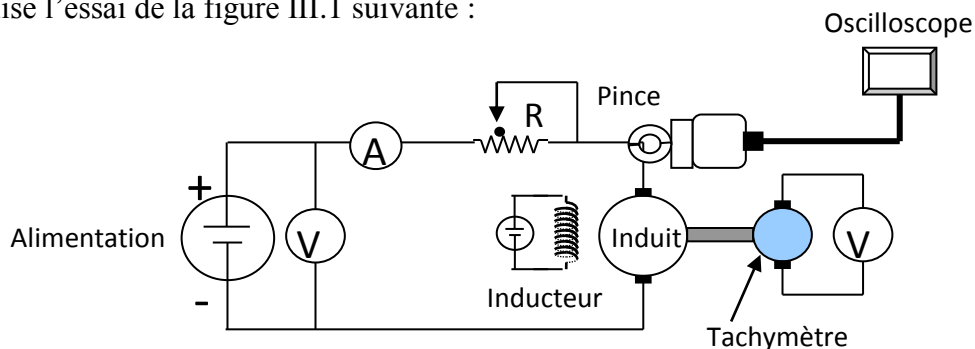
3- Connaissant  $T_e$  on déduit  $L_q$  par la relation :  $T_e = \frac{L_q}{R_q}$

4- On identifie la constante  $K$  par la relation  $K = \frac{\Delta V_q(\infty)}{\Delta \omega_r(\infty)}$ , sachant que  $\Delta V_q(\infty)$  est l'amplitude de l'échelon de tension et que  $\Delta \omega_r(\infty)$  est la différence des deux valeurs de la vitesse en régime permanent après et avant d'avoir appliqué l'échelon de tension.

5- Connaissant  $K$  et  $T_{em} = \lambda.T_e$  on identifie l'inertie  $J$  à partir de la relation  $T_{em} = \frac{J.R_q}{K^2}$

### III.4. Mise en œuvre expérimentale de la méthode de Pasek

On réalise l'essai de la figure III.1 suivante :



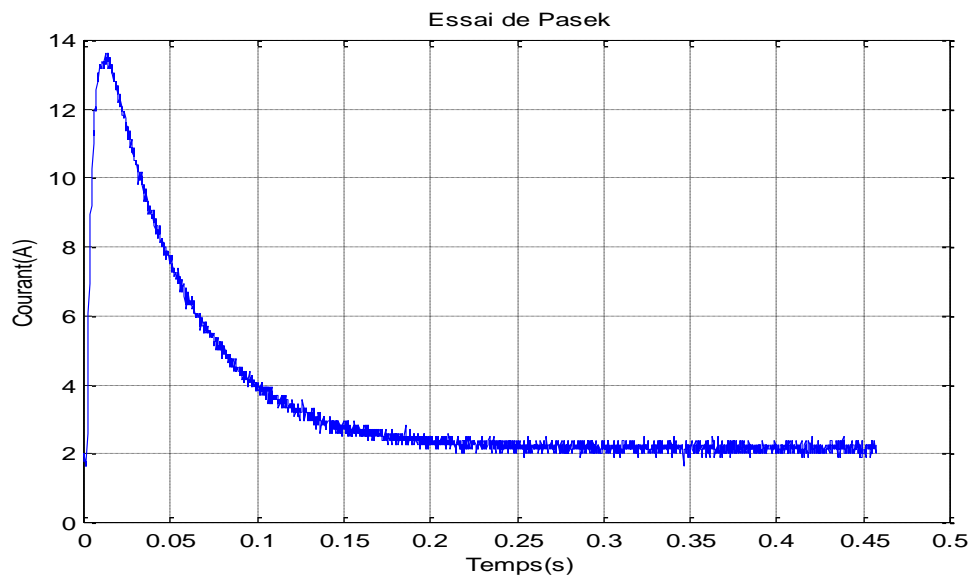
**Figure III.1** : Schéma de montage de l'essai de Pasek

On excite le moteur et on le démarre à travers une résistance de démarrage variable à plots. Dès que le moteur atteint son régime établi, on court-circuite la résistance de démarrage, on réalise ainsi une augmentation en échelon de la tension d'induit. On dimensionne la résistance de façon que l'amplitude de l'échelon de tension d'induit soit suffisante pour obtenir une courbe de courant exploitable. On enregistre l'évolution du

## Chapitre III : Identification des paramètres du moteur à courant continu par la méthode Pasek en négligeant les frottements

courant d'induit à l'oscilloscope à mémoire et on note les deux valeurs de la vitesse de rotation avant et après avoir court-circuité la résistance.

La figure III.2 donne l'allure du courant après court-circuit de la résistance R.



**Figure III.2 :** Allure du courant d'induit

### III.5. Application de la procédure de Pasek :

A partir de l'expérience que nous avons réalisée au sein de l'équipe de « **Qualité de l'énergie et commande des machines** » du Laboratoire des Technologies Avancées du Génie Electrique (**LATAGE**), nous disposons de l'enregistrement du courant d'induit et donc d'un vecteur courant d'induit et d'un vecteur temps que nous avons importé de l'oscilloscope à mémoire vers Matlab.

Nous disposons également de la mesure de la vitesse de rotation avant et après court-circuit de la résistance R et de l'amplitude de l'échelon de tension.

Pour identifier les paramètres du moteur à courant continu par la méthode de Pasek, on peut procéder graphiquement tel que dicté par cette méthode. Dans ce mémoire, nous avons programmé cette méthode sous environnement Matlab et nous avons rendu cette méthode automatique sans aucun tracé graphique.

## Chapitre III : Identification des paramètres du moteur à courant continu par la méthode Pasek en négligeant les frottements

Pour rendre automatique la procédure de Pasek, il suffit de trouver la fonction inverse de la fonction :

$$\delta(\lambda) = \frac{\sqrt{\lambda}}{\sqrt{\lambda-4}} \left( \frac{\sqrt{\lambda} + \sqrt{\lambda-4}}{\sqrt{\lambda} - \sqrt{\lambda-4}} \right)^{-\frac{\sqrt{\lambda}}{2\sqrt{\lambda-4}}} \left\{ \left( \frac{\sqrt{\lambda} + \sqrt{\lambda-4}}{\sqrt{\lambda} - \sqrt{\lambda-4}} \right)^{\frac{1}{2}} - \left( \frac{\sqrt{\lambda} + \sqrt{\lambda-4}}{\sqrt{\lambda} - \sqrt{\lambda-4}} \right)^{-\frac{1}{2}} \right\} \quad (\text{III.7})$$

C'est-à-dire qu'il faut chercher la fonction inverse  $\lambda(\delta)$ , car tout le reste de la procédure est soit algébrique, soit facile à programmer sous Matlab.

Comme nous pouvons le constater, la fonction  $\delta(\lambda)$  est fortement non linéaire et de forme très complexe. L'obtention de la forme analytique de la fonction inverse ;  $\lambda(\delta)$  est très problématique. La solution est de procéder par voie numérique et dans ce cas, plusieurs solutions sont possibles.

- 1- La première consiste à tracer la courbe  $\lambda(\delta)$ , puisqu'on peut calculer les deux vecteurs  $\lambda$  et  $\delta$  par la formule (III.7). On cherche ensuite la meilleure interpolation de cette courbe en utilisant la fonction « polyfit » de Matlab.
- 2- La deuxième consiste à résoudre numériquement l'équation  $\delta(\lambda) - \delta^* = 0$  puisqu'en réalité nous ne cherchons pas exactement la fonction inverse  $\lambda(\delta)$ , mais nous cherchons plutôt la valeur qu'il faut attribuer à  $\lambda$  pour trouver un  $\delta$  donné en appliquant la relation (III.7). Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour résoudre numériquement l'équation  $\delta(\lambda) - \delta^* = 0$ , on peut citer la méthode de Dichotomie, la méthode de Newton Raphson ou la méthode de Jacobi. Les méthodes de Newton Raphson et de Jacobi nécessitent de trouver la dérivée de la fonction (III.7) qui n'est pas chose aisée. C'est pour cela que nous nous bornons à n'utiliser que la méthode de l'interpolation « polyfit » et la méthode numérique de Dichotomie.

### III.5.1 Automatisation de la procédure de Pasek :

1- Connaissant les deux vecteurs  $\Delta i_q$  et  $t$ , on peut calculer le maximum du vecteur  $\Delta i_q$  en utilisant la fonction « max » de Matlab ou en construisant une boucle de recherche d'un

## Chapitre III : Identification des paramètres du moteur à courant continu par la méthode Pasek en négligeant les frottements

maximum. L'instant correspondant à ce maximum est obtenu en même temps. On note  $\Delta i_q(t_1)$  ce maximum et  $t_1$  l'instant de passage du courant par son maximum. La valeur du courant correspondant à  $2*t_1$  peut être obtenu en même temps que les deux valeurs précédentes, on note cette valeur  $\Delta i_q(2t_1)$ .

2- On calcule la valeur de  $\delta$  par la formule  $\delta = \frac{\Delta i_q(2t_1)}{\Delta i_q(t_1)}$

3- On calcule  $\Delta I_m$  par la formule  $\Delta I_m = \frac{\Delta i_q(t_1)^2}{\Delta i_q(2t_1)}$

4- On identifie la résistance de l'induit  $R_q$  par la relation :  $R_q = \frac{\Delta V_q}{\Delta I_m}$

5- A partir de la valeur de  $\delta$  calculée en 2, on détermine la valeur de  $\lambda$  correspondant, soit par la méthode de l'interpolation, soit par la méthode de Dichotomie.

6- On calcule  $\frac{t_1}{T_e}$  par la relation :  $\frac{t_1}{T_e} = \frac{\sqrt{\lambda}}{\sqrt{\lambda-4}} \cdot \text{Log} \frac{\sqrt{\lambda} + \sqrt{\lambda-4}}{\sqrt{\lambda} - \sqrt{\lambda-4}}$ , on déduit la constante de temps électrique  $T_e$  puisque nous connaissons déjà  $t_1$ .

7- On identifie la valeur de l'inductance propre de l'induit  $L_q$  par la relation  $T_e = \frac{L_q}{R_q}$

8- On identifie la valeur de la constante  $K$  par la relation :  $K = \frac{\Delta V_q(\infty)}{\Delta \omega_r(\infty)}$  sachant que nous

connaissons  $\Delta V_q(\infty)$  et  $\Delta \omega_r(\infty)$  à partir de l'essai expérimental.  $\Delta V_q(\infty)$  est l'amplitude de l'échelon de tension et  $\Delta \omega_r(\infty)$  est la différence des deux valeurs de la vitesse de rotation en régime permanent après et avant d'avoir appliqué l'échelon de tension.

9- On identifie la valeur de la constante de temps électromécanique  $T_{em}$  à partir de la relation :

$$T_{em} = \lambda.T_e$$

## Chapitre III : Identification des paramètres du moteur à courant continu par la méthode Pasek en négligeant les frottements

---

10- On identifie l'inertie  $J$  du moteur à partir de la relation :  $T_{em} = \frac{J.R_q}{K^2}$

Nous donnons en annexe le programme Matlab de la procédure de Pasek.

### III.5.2. Résultats de l'identification :

Les résultats de l'identification en appliquant la procédure citée précédemment en 3.6.1 sont regroupés dans le tableau ci-dessous :

Paramètre	Désignation	Valeur
$\Delta V_q(\infty)$	Echelon de tension (V)	57.4
$\Delta \omega_r(\infty)$	Variation de la vitesse en régime permanent (Rad/s)	40.2124
$\Delta i_q(t_1)$	Valeur de maximum du courant (A)	13.644
$t_1$	Instant du passage du courant par son maximum (s)	0.0123
$\Delta i_q(2t_1)$	Valeur du courant correspondant à $2*t_1$ (A)	11.604
$\delta$	Coefficient	0.8505
$T_e$	Constante de temps électrique de l'induit (s)	0.0044
$R_q$	Résistance de l'induit ( $\Omega$ )	3.578
$L_q$	Inductance propre de l'induit (H)	0.0099
$K$	Constante de la $F_{cem}$ (V.s/rad)	1.4274
$T_{em}$	Constante de temps électromécanique (s)	0.0822
$J$	Inertie du moteur ( $Kg.m^2$ )	0.0468

**Tableau III.1** : Résultats de l'identification en appliquant la procédure citée précédemment en 3.6.1

## Chapitre III : Identification des paramètres du moteur à courant continu par la méthode Pasek en négligeant les frottements

---

### Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté en détail la méthode de Pasek pour l'identification des paramètres d'une machine à courant continu à excitation indépendante. Cette méthode a le principal avantage d'obtenir tous les paramètres d'une machine à courant continu avec un seul essai. La méthode de Pasek est graphique, elle repose sur l'utilisation de deux abaques.

Dans ce mémoire, nous avons proposé une automatisation de cette méthode en utilisant Matlab. Cette nouvelle procédure repose sur deux solutions :

- Soit trouver une fonction inverse d'une fonction de forme complexe en utilisant la fonction « polyfit » de Matlab.
- Soit utiliser une méthode numérique récurrente (méthode de Dichotomie) pour trouver une valeur particulière qui annule une équation non linéaire.

Dans ce chapitre, nous avons mis en œuvre et exécuté ces deux méthodes. Elles ont donné le même résultat à deux chiffres après la virgule.

La méthode de Dichotomie nécessite quelques itérations (dans notre cas 23 itérations) mais elle est générale reste la même pour toutes les équations non linéaires. Il suffit d'indiquer la forme de la fonction et les deux bornes de l'intervalle de recherche de la racine.

La méthode de la fonction inverse donne le résultat immédiatement, mais celle-ci est spécifique à une fonction donnée, il faut s'assurer d'abord que la fonction inverse trouvée par la méthode « polyfit » est bien correcte.

# **CHAPITRE IV :**

**Identification des paramètres  
du moteur à courant continu  
par la méthode de Pasek en  
tenant compte des frottements**

# **Chapitre IV : Identification des paramètres du moteur à courant continu par la méthode de Pasek en tenant compte des frottements**

## **Introduction**

L'objet de ce chapitre est de développer les fondements théoriques de la méthode de Pasek et de la modifier pour tenir compte des frottements [9]. Il s'agit ensuite de mettre en œuvre expérimentalement cette nouvelle procédure d'identification de tous les paramètres du modèle d'une machine à courant continu à excitation indépendante.

Le modèle suppose uniquement que le courant d'excitation est constant.

### **IV.1. Modèle de la machine à courant continu à excitation séparée :**

Le modèle d'une machine à courant continu à excitation séparée est représenté par les équations suivantes :

$$\text{Equation électrique de l'induit : } v_q = R_q \cdot i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + M_{fd} \cdot \omega_r \cdot i_f$$

$$\text{Equation électrique de l'inducteur : } v_f = R_f \cdot i_f + L_f \frac{di_f}{dt}$$

$$\text{Equation de mouvement : } M_{fd} \cdot i_f \cdot i_q - C_r = J \frac{d\omega_r}{dt} + f \cdot \omega_r$$

Si l'on suppose que le courant d'excitation est constant, on peut effectuer le regroupement de termes suivant :  $K = M_{fd} \cdot i_{f0}$  et le modèle de la machine à courant continu à excitation séparée se simplifie comme suit :

$$v_q = R_q \cdot i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + K \cdot \omega_r$$

$$K \cdot i_q - C_r = J \frac{d\omega_r}{dt} + f \cdot \omega_r$$

# Chapitre IV : Identification des paramètres du moteur à courant continu par la méthode de Pasek en tenant compte des frottements

## IV.2. Bases théoriques de la méthode de Pasek modifiée :

La méthode de Pasek suppose que le moteur à courant continu à excitation séparée démarre d'un point de fonctionnement connu en régime établi et le courant d'excitation est supposé constant. Ce point de fonctionnement est caractérisé par les grandeurs  $i_{q0}$ ,  $v_{q0}$ ,  $i_{f0}$  et  $\omega_{r0}$  et vérifie les équations :

$$v_{q0} = R_q \cdot i_{q0} + K \cdot \omega_{r0} \quad \text{et} \quad K \cdot i_{q0} = C_{r0} + f \cdot \omega_{r0} \quad \text{avec} \quad K = M_{fd} \cdot i_{f0}$$

On applique une variation en échelon d'amplitude  $E$  de la tension d'induit  $v_q$ . Sachant que le couple résistant reste constant.

Cherchons les expressions du courant et de la vitesse en régime transitoire suite à l'application de l'échelon de tension d'induit :

On pose :

$$T_e = \frac{L_q}{R_q} \quad \text{Constante de temps électriques}$$

$$T_m = \frac{J}{f} \quad \text{Constante de temps mécanique}$$

Calculons les expressions deux racines du courant et de la vitesse de rotation :

$$\Delta v_q(p) = K \cdot \Delta \omega_r(p) + (R_q + L_q \cdot p) \cdot \Delta i_q(p)$$

$$K \cdot \Delta i_q(p) = (J \cdot p + f) \Delta \omega_r(p)$$

$$\Rightarrow \Delta i_q(p) = \frac{(J \cdot p + f) \cdot \Delta v_q(p)}{(J \cdot p + f) \cdot (R_q + L_q \cdot p) + K^2} \quad (\text{IV.1})$$

$$\Rightarrow \Delta \omega_r(p) = \frac{K \cdot \Delta v_q(p)}{(J \cdot p + f) \cdot (R_q + L_q \cdot p) + K^2} \quad (\text{IV.2})$$

## Chapitre IV : Identification des paramètres du moteur à courant continu par la méthode de Pasek en tenant compte des frottements

Sachant que :  $\Delta v_q(p) = \frac{E}{p}$

$$\Delta i_q(p) = \frac{(J \cdot p + f) \cdot \frac{E}{p}}{(J \cdot p + f) \cdot (R_q + L_q \cdot p) + K^2} = \frac{(J \cdot p + f) \frac{E}{p}}{J \cdot L_q \cdot p^2 + (J \cdot R_q + f \cdot L_q) \cdot p + f \cdot R_q + K^2}$$

$$\Delta i_q(p) = \frac{J \cdot (p + \frac{f}{J}) \frac{E}{p}}{J \cdot L_q \cdot \left\{ p^2 + \left( \frac{R_q}{L_q} + \frac{f}{J} \right) \cdot p + \frac{f}{J} \cdot \frac{R_q}{L_q} + \frac{K^2}{J \cdot L_q} \right\}} = \frac{J \cdot (p + \frac{1}{T_m}) \frac{E}{p}}{J \cdot L_q \cdot \left\{ p^2 + \left( \frac{1}{T_e} + \frac{1}{T_m} \right) \cdot p + \frac{1}{T_m} \cdot \frac{1}{T_e} + \frac{K^2}{J \cdot L_q} \right\}}$$

On pose au dénominateur :  $T_m = \lambda T_e$

$$\Delta i_q(p) = \frac{J \cdot (p + \frac{1}{T_m}) \frac{E}{p}}{J \cdot L_q \cdot \left\{ p^2 + \left( \frac{1}{T_e} + \frac{1}{\lambda T_e} \right) \cdot p + \frac{1}{\lambda T_e} \cdot \frac{1}{T_e} + \frac{K^2}{J \cdot L_q} \right\}} = \frac{(p + \frac{1}{T_m}) \frac{E}{p}}{L_q \cdot \left\{ p^2 + \frac{1}{T_e} \left( 1 + \frac{1}{\lambda} \right) \cdot p + \frac{1}{\lambda T_e^2} + \frac{K^2}{J \cdot L_q} \right\}}$$

Le dénominateur  $p^2 + \frac{1}{T_e} \left( 1 + \frac{1}{\lambda} \right) \cdot p + \frac{1}{\lambda T_e^2} + \frac{K^2}{J \cdot L_q}$  est du second ordre et son discriminant vaut :

$$\Delta = \left\{ \frac{1}{T_e} \left( 1 + \frac{1}{\lambda} \right) \right\}^2 - \frac{4}{\lambda T_e^2} - \frac{4 \cdot K^2}{J \cdot L_q} = \left\{ \frac{1}{T_e} \left( 1 - \frac{1}{\lambda} \right) \right\}^2 - \frac{4 \cdot K^2}{J \cdot L_q}$$

On pose :  $\beta^2 = \Delta = \left\{ \frac{1}{T_e} \left( 1 - \frac{1}{\lambda} \right) \right\}^2 - \frac{4 \cdot K^2}{J \cdot L_q}$

Les deux racines du dénominateur sont donc :

$$p_1 = - \left\{ \frac{\frac{1}{T_e} \left( 1 + \frac{1}{\lambda} \right) + \beta}{2} \right\} ; \quad p_2 = - \left\{ \frac{\frac{1}{T_e} \left( 1 + \frac{1}{\lambda} \right) - \beta}{2} \right\}$$

## Chapitre IV : Identification des paramètres du moteur à courant continu par la méthode de Pasek en tenant compte des frottements

$$p_1 = -\frac{1}{2T_e} \left\{ \left(1 + \frac{1}{\lambda}\right) + T_e \cdot \beta \right\} \quad ; \quad p_2 = -\frac{1}{2T_e} \left\{ \left(1 + \frac{1}{\lambda}\right) - T_e \cdot \beta \right\}$$

On sait que la constante de temps électrique  $T_e$  est de l'ordre de la milliseconde et la constante de temps mécanique  $T_m$  est de l'ordre de la seconde. Donc le paramètre  $\lambda$  est de l'ordre de 1000. On peut donc négliger  $\frac{1}{\lambda}$  devant 1.

On pose  $\beta_1 = T_e \cdot \beta$  et les deux racines du dénominateur deviennent alors :

$$p_1 = -\frac{1 + \beta_1}{2T_e} \quad ; \quad p_2 = -\frac{1 - \beta_1}{2T_e}$$

Les expressions opérationnelles du courant et de la vitesse deviennent alors :

$$\Delta i_q(p) = \frac{\left(p + \frac{1}{T_m}\right) \frac{E}{p}}{L_q \cdot \left(p + \frac{1 + \beta_1}{2T_e}\right) \left(p + \frac{1 - \beta_1}{2T_e}\right)}$$

On pose :

$$T_1 = -\frac{1}{p_1} \quad \text{et} \quad T_2 = -\frac{1}{p_2}$$

Les deux racines du dénominateur s'expriment enfin en fonction de  $T_1$  et  $T_2$  :

$$T_1 = \frac{2T_e}{1 + \beta_1} \quad ; \quad T_2 = \frac{2T_e}{1 - \beta_1}$$

$$\Delta i_q(p) = \frac{E}{L_q} \frac{1}{\left(p + \frac{1}{T_1}\right) \left(p + \frac{1}{T_2}\right)} + \frac{E}{L_q T_m} \frac{1}{p \cdot \left(p + \frac{1}{T_1}\right) \left(p + \frac{1}{T_2}\right)} \quad (\text{IV.3})$$

$$\Delta \omega_r(p) = \frac{K \cdot E}{J \cdot L_q} \frac{1}{p \cdot \left(p + \frac{1}{T_1}\right) \left(p + \frac{1}{T_2}\right)} \quad (\text{IV.4})$$

## Chapitre IV : Identification des paramètres du moteur à courant continu par la méthode de Pasek en tenant compte des frottements

Les expressions temporelles du courant et de la vitesse s'obtiennent en appliquant les transformées inverses de Laplace aux deux expressions opérationnelles précédentes.

### IV.2.1. Expression temporelle du courant d'induit :

$$\Delta i_q(t) = \frac{E}{L_q} \cdot \frac{1}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}} (e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}}) + \frac{E}{L_q \cdot T_m} \cdot \frac{1}{\frac{1}{T_1} \cdot \frac{1}{T_2}} \left(1 - \frac{\frac{1}{T_2} e^{-\frac{t}{T_1}} - \frac{1}{T_1} e^{-\frac{t}{T_2}}}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}}\right)$$

$$\Delta i_q(t) = \frac{E}{L_q} \cdot \left\{ \frac{T_1 \cdot T_2}{T_1 - T_2} (e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}}) + \frac{T_1 \cdot T_2}{T_m} \cdot \left(1 - \frac{T_1 \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} - T_2 \cdot e^{-\frac{t}{T_2}}}{T_1 - T_2}\right) \right\}$$

$$\Delta i_q(t) = \frac{E}{L_q} \cdot \frac{T_1 \cdot T_2}{T_m} + \frac{E}{L_q} \cdot \frac{T_1 \cdot T_2}{T_1 - T_2} \left\{ (e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}}) + \left(-\frac{T_1 \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} - T_2 \cdot e^{-\frac{t}{T_2}}}{T_m}\right) \right\}$$

$$\Delta i_q(t) = \frac{E}{L_q} \cdot \frac{T_1 \cdot T_2}{T_m} + \frac{E}{L_q} \cdot \frac{T_1 \cdot T_2}{T_1 - T_2} \left\{ e^{-\frac{t}{T_1}} \cdot \left(1 - \frac{T_1}{T_m}\right) - e^{-\frac{t}{T_2}} \cdot \left(-e^{-\frac{t}{T_2}} \left(1 - \frac{T_2}{T_m}\right)\right) \right\}$$

$$\Delta i_q(t) = \frac{E}{L_q} \cdot \frac{T_1 \cdot T_2}{T_m} + \frac{E}{L_q} \cdot \frac{T_1 \cdot T_2}{T_m \cdot (T_1 - T_2)} \left\{ (T_m - T_1) \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} - (T_m - T_2) \cdot e^{-\frac{t}{T_2}} \right\}$$

$$\Delta i_q(t) = \frac{E}{L_q} \cdot \frac{T_1 \cdot T_2}{T_m} \left\{ 1 + \frac{1}{T_1 - T_2} \left( (T_m - T_1) \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} - (T_m - T_2) \cdot e^{-\frac{t}{T_2}} \right) \right\}$$

Si l'on admet que :  $(T_m - T_1) \approx (T_m - T_2)$  alors l'expression temporelle du courant est :

$$\boxed{\Delta i_q(t) = \frac{E}{L_q} \cdot \frac{T_1 \cdot T_2}{T_m} \left\{ 1 + \frac{T_m - T_1}{T_1 - T_2} \left( e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right) \right\}} \quad (IV.5)$$

## Chapitre IV : Identification des paramètres du moteur à courant continu par la méthode de Pasek en tenant compte des frottements

### IV.2.2. Expression temporelle de la vitesse de rotation :

$$\Delta\omega_r(p) = \frac{K.E}{J.L_q} \frac{1}{p.(p + \frac{1}{T_1})(p + \frac{1}{T_2})} \Rightarrow \Delta\omega_r(t) = \frac{K.E}{J.L_q} \cdot \frac{1}{\frac{1}{T_1} \cdot \frac{1}{T_2}} \left(1 - \frac{\frac{1}{T_2} e^{-\frac{t}{T_1}} - \frac{1}{T_1} e^{-\frac{t}{T_2}}}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}}\right)$$

$$\Delta\omega_r(t) = \frac{K.E}{J.L_q} T_1 T_2 \left(1 - \frac{T_1 e^{-\frac{t}{T_1}} - T_2 e^{-\frac{t}{T_2}}}{T_1 - T_2}\right)$$

$$\Delta\omega_r(t) = \frac{K.E}{J.L_q} T_1 T_2 \left(1 - \frac{T_1 e^{-\frac{t}{T_1}} - T_2 e^{-\frac{t}{T_2}}}{T_1 - T_2}\right)$$

$$T_1 T_2 = \frac{2.T_e}{1 + \beta_1} \cdot \frac{2.T_e}{1 - \beta_1} = \frac{4.T_e^2}{1 - \beta_1^2} = \frac{4.T_e^2}{1 - (T_e \cdot \beta)^2} = \frac{4.T_e^2}{1 - T_e^2 \cdot \beta^2}$$

$$\beta^2 = \left\{ \frac{1}{T_e} \left(1 - \frac{1}{\lambda}\right) \right\}^2 - \frac{4.K^2}{J.L_q}$$

$$T_1 T_2 = \frac{4.T_e^2}{1 - T_e^2 \cdot \beta^2} = \frac{4.T_e^2}{1 - T_e^2 \cdot \left\{ \left( \frac{1}{T_e} \left(1 - \frac{1}{\lambda}\right) \right)^2 - \frac{4.K^2}{J.L_q} \right\}} \approx \frac{4.T_e^2}{1 - T_e^2 \cdot \left\{ \left( \frac{1}{T_e} (1) \right)^2 - \frac{4.K^2}{J.L_q} \right\}} = \frac{4.T_e^2}{1 - \left\{ 1 - \frac{T_e^2 4.K^2}{J.L_q} \right\}}$$

$$T_1 T_2 = \frac{4.T_e^2}{\frac{T_e^2 4.K^2}{J.L_q}} = \frac{J.L_q}{K^2}$$

$$\Delta\omega_r(t) = \frac{K.E}{J.L_q} \cdot \frac{J.L_q}{K^2} \left(1 - \frac{T_1 e^{-\frac{t}{T_1}} - T_2 e^{-\frac{t}{T_2}}}{T_1 - T_2}\right) = \frac{E}{K} \cdot \left(1 - \frac{T_1 e^{-\frac{t}{T_1}} - T_2 e^{-\frac{t}{T_2}}}{T_1 - T_2}\right)$$

$$\Delta\omega_r(t) = \frac{E}{K} \cdot \left(1 - \frac{T_1 e^{-\frac{t}{T_1}} - T_2 e^{-\frac{t}{T_2}}}{T_1 - T_2}\right)$$

(IV.6)

## Chapitre IV : Identification des paramètres du moteur à courant continu par la méthode de Pasek en tenant compte des frottements

### IV.2.3. Calcul de l'instant de passage du courant par son maximum :

$$\frac{d}{dt}(\Delta i_q(t)) = \frac{d}{dt} \left\{ \frac{T_m - T_1}{T_1 - T_2} \left( e^{-\frac{t_1}{T_1}} - e^{-\frac{t_1}{T_2}} \right) \right\} = 0 \Rightarrow \left( -\frac{1}{T_1} e^{-\frac{t_1}{T_1}} + \frac{1}{T_2} e^{-\frac{t_1}{T_2}} = 0 \right)$$

$$\Rightarrow \frac{1}{T_1} e^{-\frac{t_1}{T_1}} = \frac{1}{T_2} e^{-\frac{t_1}{T_2}} \Rightarrow \frac{e^{-\frac{t_1}{T_1}}}{e^{-\frac{t_1}{T_2}}} = \frac{T_1}{T_2} \Rightarrow e^{-\frac{t_1}{T_1} + \frac{t_1}{T_2}} = \frac{T_1}{T_2} \Rightarrow e^{t_1 \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)} = \frac{T_1}{T_2}$$

$$\Rightarrow t_1 \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) = \ln \frac{T_1}{T_2} \Rightarrow t_1 \left( \frac{T_1 - T_2}{T_1 T_2} \right) = \ln \frac{T_1}{T_2} \Rightarrow t_1 = \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \ln \frac{T_1}{T_2}$$

$$\boxed{\Rightarrow t_1 = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{T_2}{T_1}} \quad (IV.7)$$

On remplace  $T_1$  et  $T_2$  par leurs expressions :  $T_1 = \frac{2T_e}{1 + \beta_1}$  ;  $T_2 = \frac{2T_e}{1 - \beta_1}$

$$\Rightarrow t_1 = \frac{\frac{2T_e}{1 + \beta_1} \cdot \frac{2T_e}{1 - \beta_1}}{\frac{2T_e}{1 - \beta_1} - \frac{2T_e}{1 + \beta_1}} \ln \frac{\frac{2T_e}{1 - \beta_1}}{\frac{2T_e}{1 + \beta_1}} \Rightarrow t_1 = \frac{\frac{4T_e^2}{1 - \beta_1^2}}{2T_e \frac{1 + \beta_1 - (1 - \beta_1)}{1 - \beta_1^2}} \ln \frac{1 + \beta_1}{1 - \beta_1}$$

$$\Rightarrow t_1 = \frac{4T_e^2}{2T_e \cdot 2\beta_1} \ln \frac{1 + \beta_1}{1 - \beta_1} \Rightarrow t_1 = \frac{T_e}{\beta_1} \ln \frac{1 + \beta_1}{1 - \beta_1}$$

$$\boxed{\Rightarrow \frac{t_1}{T_e} = \frac{1}{\beta_1} \ln \frac{1 + \beta_1}{1 - \beta_1}} \quad (IV.8)$$

## Chapitre IV : Identification des paramètres du moteur à courant continu par la méthode de Pasek en tenant compte des frottements

On calcule également :

$$\frac{t_1}{T_1} = \frac{1 + \beta_1}{2\beta} \ln \frac{1 + \beta_1}{1 - \beta_1} \quad (\text{IV.9})$$

$$\frac{t_1}{T_2} = \frac{1 - \beta_1}{2\beta} \ln \frac{1 + \beta_1}{1 - \beta_1} \quad (\text{IV.10})$$

On peut démontrer (voir annexe 2) que :  $\delta = \frac{\Delta i_{q_1}(2t_1)}{\Delta i_{q_1}(t_1)} = \frac{\Delta i_{q_1}(t_1)}{\Delta I_m}$

### IV.3. Procédure graphique à suivre pour l'identification des paramètres du moteur à courant continu :

Les mesures de  $t_1$ ,  $\Delta i_{q_1}(t_1)$  et  $\Delta i_{q_1}(2t_1)$  donnent les paramètres du moteur grâce à la procédure suivante :

1- On calcule  $\delta = \frac{\Delta i_{q_1}(2t_1)}{\Delta i_{q_1}(t_1)}$  et un abaque donne  $\beta_1 \left\{ \delta = \frac{2}{1 + \beta_1} \left( \frac{1 + \beta_1}{1 - \beta_1} \right)^{\frac{\beta_1 - 1}{2\beta_1}} \right\}$ ; un autre

abaque donne  $\frac{t_1}{T_e} \left\{ \frac{t_1}{T_e} = \frac{1}{\beta_1} \ln \frac{1 + \beta_1}{1 - \beta_1} \right\}$  correspondant à ce  $\beta_1$ .

2- On peut démontrer que :  $\delta = \frac{\Delta i_{q_1}(t_1)}{\Delta I_m} = \frac{\Delta i_{q_1}(2t_1)}{\Delta i_{q_1}(t_1)}$  avec :  $\Delta I_m = \frac{\Delta V_q}{R_q}$

Connaissant  $\Delta i_{q_1}(t_1)$  et  $\Delta i_{q_1}(2t_1)$  on déduit  $\Delta I_m$  par la relation :  $\Delta I_m = \frac{\Delta i_{q_1}(t_1)^2}{\Delta i_{q_1}(2t_1)}$

On déduit ensuite  $R_q$  de la relation :  $R_q = \frac{\Delta V_q}{\Delta I_m}$

3- Connaissant  $T_e$  on déduit  $L_q$  par la relation :  $T_e = \frac{L_q}{R_q}$

## Chapitre IV : Identification des paramètres du moteur à courant continu par la méthode de Pasek en tenant compte des frottements

4- On identifie la constante  $K$  par la relation  $K = \frac{\Delta V_q(\infty)}{\Delta \omega_r(\infty)}$  et à partir de la courbe de la vitesse en régime permanent.

5- Connaissant  $\beta_1$  à partir des abaques  $\frac{t_1}{T_1}$  et  $\frac{t_1}{T_2}$ , on mesure  $T_1$  et  $T_2$  connaissant  $t_1$ .

$$\text{On rappelle que : } \frac{t_1}{T_1} = \frac{1+\beta_1}{2\beta} \ln \frac{1+\beta_1}{1-\beta_1} \quad \text{et} \quad \frac{t_1}{T_2} = \frac{1-\beta_1}{2\beta} \ln \frac{1+\beta_1}{1-\beta_1}$$

6- On mesure  $\Delta I_0$  à partir de la courbe du courant, C'est la différence en régime permanent des deux valeurs du courant d'induit avant et après l'application de l'échelon de tension.

On déduit la constante de temps mécanique  $T_m$  à partir de la relation :  $\Delta I_0 = \frac{E}{L_q} \cdot \frac{T_1 T_2}{T_m}$

7- Connaissant  $T_e$  et  $T_m$  on calcule  $\lambda$  ;  $\lambda = \frac{T_m}{T_e}$

8- On calcule  $\beta$  à partir de la relation  $\beta = \frac{\beta_1}{T_e}$  et on identifie l'inertie  $J$  à partir de la relation :

$$\beta^2 = \left\{ \frac{1}{T_e} \left(1 - \frac{1}{\lambda}\right) \right\}^2 - \frac{4.K^2}{J.L_q} \Rightarrow \frac{4.K^2}{J.L_q} = \left\{ \frac{1}{T_e} \left(1 - \frac{1}{\lambda}\right) \right\}^2 - \beta^2 \Rightarrow J = \frac{4.K^2}{L_q \cdot \left\{ \left( \frac{1}{T_e} \left(1 - \frac{1}{\lambda}\right) \right)^2 - \beta^2 \right\}}$$

$$J = \frac{4.K^2}{L_q \cdot \left\{ \left( \frac{1}{T_e} \left(1 - \frac{1}{\lambda}\right) \right)^2 - \left( \frac{\beta_1}{T_e} \right)^2 \right\}} = \frac{4.K^2.T_e^2}{L_q \cdot \left\{ \left(1 - \frac{1}{\lambda}\right)^2 - (\beta_1)^2 \right\}} \quad \text{(IV.11)}$$

9- Connaissant  $T_m$  et  $J$  on identifie le coefficient de frottement  $f$  par la relation

$$T_m = \frac{J}{f} \Rightarrow f = \frac{J}{T_m}$$

## Chapitre IV : Identification des paramètres du moteur à courant continu par la méthode de Pasek en tenant compte des frottements

10- On identifie le couple statique  $C_{r0}$  à partir de l'un des deux points de fonctionnement en régime permanent (avant ou après l'application de l'échelon de tension), selon les relations :

$$K.I_{q0} = C_{r0} + f.\omega_{r0} \quad (IV.12)$$

$$K.I_q(\infty) = C_{r0} + f.\omega_r(\infty) \quad (IV.13)$$

Notons que cette procédure graphique peut être entièrement programmée, il suffit pour cela d'identifier la fonction  $\beta_1(\delta)$  connaissant la fonction  $\delta(\beta_1) = \frac{2}{1+\beta_1} \left( \frac{1+\beta_1}{1-\beta_1} \right)^{\frac{\beta_1-1}{2\beta_1}}$ , la détermination de  $t_1$ ,  $\Delta i_{q1}(t_1)$  et  $\Delta i_{q1}(2t_1)$  est très facilement programmable et les autres relations sont toutes algébriques.

### IV.4. Mise en œuvre expérimentale de la méthode de Pasek

L'essai est le même que celui décrit dans la figure III.1 du chapitre précédent. L'enregistrement du courant est donné dans la figure IV.1 ci-dessous.

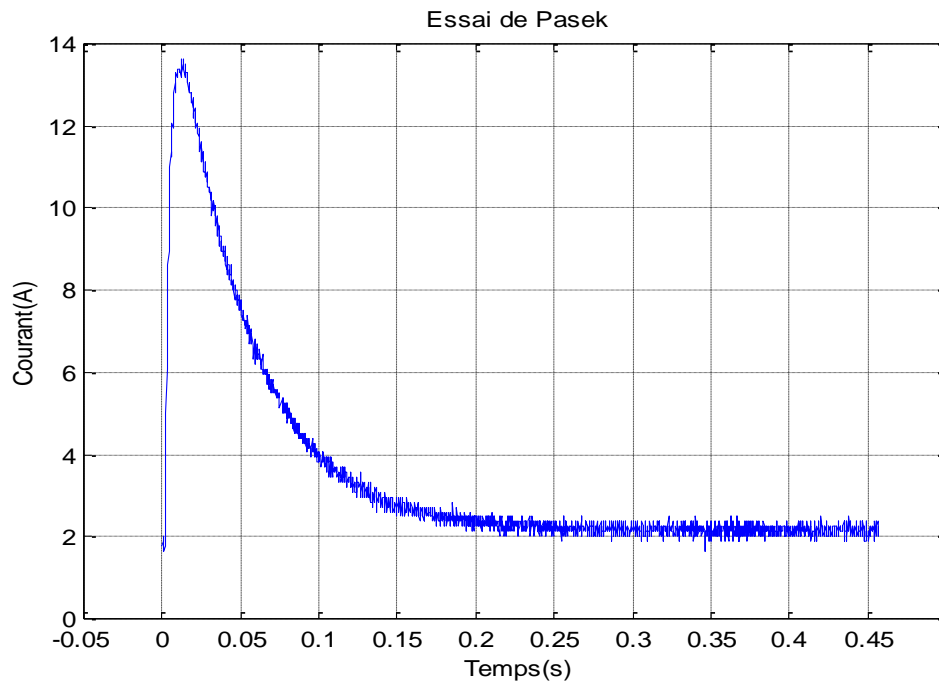


Figure IV.1 : Courant d'induit en fonction du temps

## **Chapitre IV : Identification des paramètres du moteur à courant continu par la méthode de Pasek en tenant compte des frottements**

L'essai a été réalisé avec un échelon de tension d'amplitude  $\Delta V_q(\infty) = 57,4 V$

Nous avons noté les valeurs en régime permanent du courant d'induit et de la vitesse de rotation avant et après avoir court-circuité la résistance additionnelle R.

Courant d'induit en régime permanent avant le court-circuit de la résistance R : 0,6 A

Courant d'induit en régime permanent après le court-circuit de la résistance R : 0,75 A

Vitesse de rotation avant le court-circuit de la résistance R : 53,4071 Rad/s

Vitesse de rotation après le court-circuit de la résistance R : 93,6195 Rad/s

### **IV.5. Automatisation de la procédure de Pasek en tenant compte des frottements pour l'identification des paramètres du moteur à courant continu :**

1- Connaissant les deux vecteurs  $\Delta i_q$  et  $t$ , on peut calculer le maximum du vecteur  $\Delta i_q$  en construisant une boucle de recherche d'un maximum. L'instant correspondant à ce maximum est obtenu en même temps. On note  $\Delta i_q(t_1)$  ce maximum et  $t_1$  l'instant de passage du courant par son maximum. La valeur du courant correspondant à  $2 * t_1$  peut être obtenu en même temps que les deux valeurs précédentes, on note cette valeur  $\Delta i_q(2t_1)$ .

2- On calcule la valeur de  $\delta$  par la formule  $\delta = \frac{\Delta i_q(2t_1)}{\Delta i_q(t_1)}$

3- On calcule  $\Delta I_m$  par la formule  $\Delta I_m = \frac{\Delta i_q(t_1)^2}{\Delta i_q(2t_1)}$

4- On identifie la résistance de l'induit  $R_q$  par la relation :  $R_q = \frac{\Delta V_q}{\Delta I_m}$

## Chapitre IV : Identification des paramètres du moteur à courant continu par la méthode de Pasek en tenant compte des frottements

5- A partir de la valeur de  $\delta$  calculée en 2, on détermine la valeur de  $\beta_1$  correspondant, soit

en cherchant la fonction inverse de la fonction  $\left\{ \delta = \frac{2}{1+\beta_1} \left( \frac{1+\beta_1}{1-\beta_1} \right)^{\frac{\beta_1-1}{2\beta_1}} \right\}$  par la méthode de l'interpolation, soit par la méthode de Dichotomie.

6- On calcule  $\frac{t_1}{T_e}$  par la relation :  $\left\{ \frac{t_1}{T_e} = \frac{1}{\beta_1} \ln \frac{1+\beta_1}{1-\beta_1} \right\}$ , on déduit la constante de temps électrique  $T_e$  puisque nous connaissons déjà  $t_1$ .

7- On identifie la valeur de l'inductance propre de l'induit  $L_q$  par la relation  $T_e = \frac{L_q}{R_q}$

8- On identifie la valeur de la constante  $K$  par la relation :  $K = \frac{\Delta V_q(\infty)}{\Delta \omega_r(\infty)}$  sachant que nous connaissons  $\Delta V_q(\infty)$  et  $\Delta \omega_r(\infty)$  à partir de l'essai expérimental.  $\Delta V_q(\infty)$  est l'amplitude de l'échelon de tension et  $\Delta \omega_r(\infty)$  est la différence des deux valeurs de la vitesse de rotation en régime permanent après et avant d'avoir appliqué l'échelon de tension.

9- Connaissant  $\beta_1$ , on calcule  $\frac{t_1}{T_1}$  et  $\frac{t_1}{T_2}$ , à partir des formules  $\frac{t_1}{T_1} = \frac{1+\beta_1}{2\beta} \ln \frac{1+\beta_1}{1-\beta_1}$  et  $\frac{t_1}{T_2} = \frac{1-\beta_1}{2\beta} \ln \frac{1+\beta_1}{1-\beta_1}$  sachant que l'on connaît déjà l'instant  $t_1$ .

10- On mesure  $\Delta I_0$  à partir de la courbe du courant, c'est la différence en régime permanent des deux valeurs du courant d'induit avant et après l'application de l'échelon de tension.

On déduit la constante de temps mécanique  $T_m$  à partir de la relation :  $\Delta I_0 = \frac{E}{L_q} \cdot \frac{T_1 T_2}{T_m}$

11- Connaissant  $T_e$  et  $T_m$  on calcule  $\lambda$  ;  $\lambda = \frac{T_m}{T_e}$

## Chapitre IV : Identification des paramètres du moteur à courant continu par la méthode de Pasek en tenant compte des frottements

12- On calcule  $\beta$  à partir de la relation  $\beta = \frac{\beta_1}{T_e}$  et on identifie l'inertie  $J$  à partir de la relation :

$$\beta^2 = \left\{ \frac{1}{T_e} \left(1 - \frac{1}{\lambda}\right) \right\}^2 - \frac{4.K^2}{J.L_q} \Rightarrow \frac{4.K^2}{J.L_q} = \left\{ \frac{1}{T_e} \left(1 - \frac{1}{\lambda}\right) \right\}^2 - \beta^2 \Rightarrow J = \frac{4.K^2}{L_q \cdot \left\{ \left( \frac{1}{T_e} \left(1 - \frac{1}{\lambda}\right) \right)^2 - \beta^2 \right\}}$$

$$J = \frac{4.K^2}{L_q \cdot \left\{ \left( \frac{1}{T_e} \left(1 - \frac{1}{\lambda}\right) \right)^2 - \left( \frac{\beta_1}{T_e} \right)^2 \right\}} = \frac{4.K^2.T_e^2}{L_q \cdot \left\{ \left(1 - \frac{1}{\lambda}\right)^2 - (\beta_1)^2 \right\}}$$

1- Connaissant  $T_m$  et  $J$  on identifie le coefficient de frottement  $f$  par la relation

$$T_m = \frac{J}{f} \Rightarrow f = \frac{J}{T_m}$$

14- On identifie le couple statique  $C_{r0}$  à partir de l'un des deux points de fonctionnement en régime permanent (avant ou après l'application de l'échelon de tension), selon les relations :

$$K.I_{q1} = C_r + f.\omega_{r1}$$

$$K.I_{q2} = C_r + f.\omega_{r2}$$

### IV.6. Résultats de l'identification :

Les résultats de l'identification en appliquant la procédure citée précédemment en 4.6 sont regroupés dans le tableau ci-dessous

Paramètre	Désignation	Valeur
$\Delta V_q(\infty)$	Echelon de tension (V)	57.4
$\Delta \omega_r(\infty)$	Variation de la vitesse en régime permanent (Rad/s)	40.2124
$\Delta i_q(t_1)$	Valeur de maximum du courant (A)	13.644
$t_1$	Instant du passage du courant par son maximum (s)	0.0123

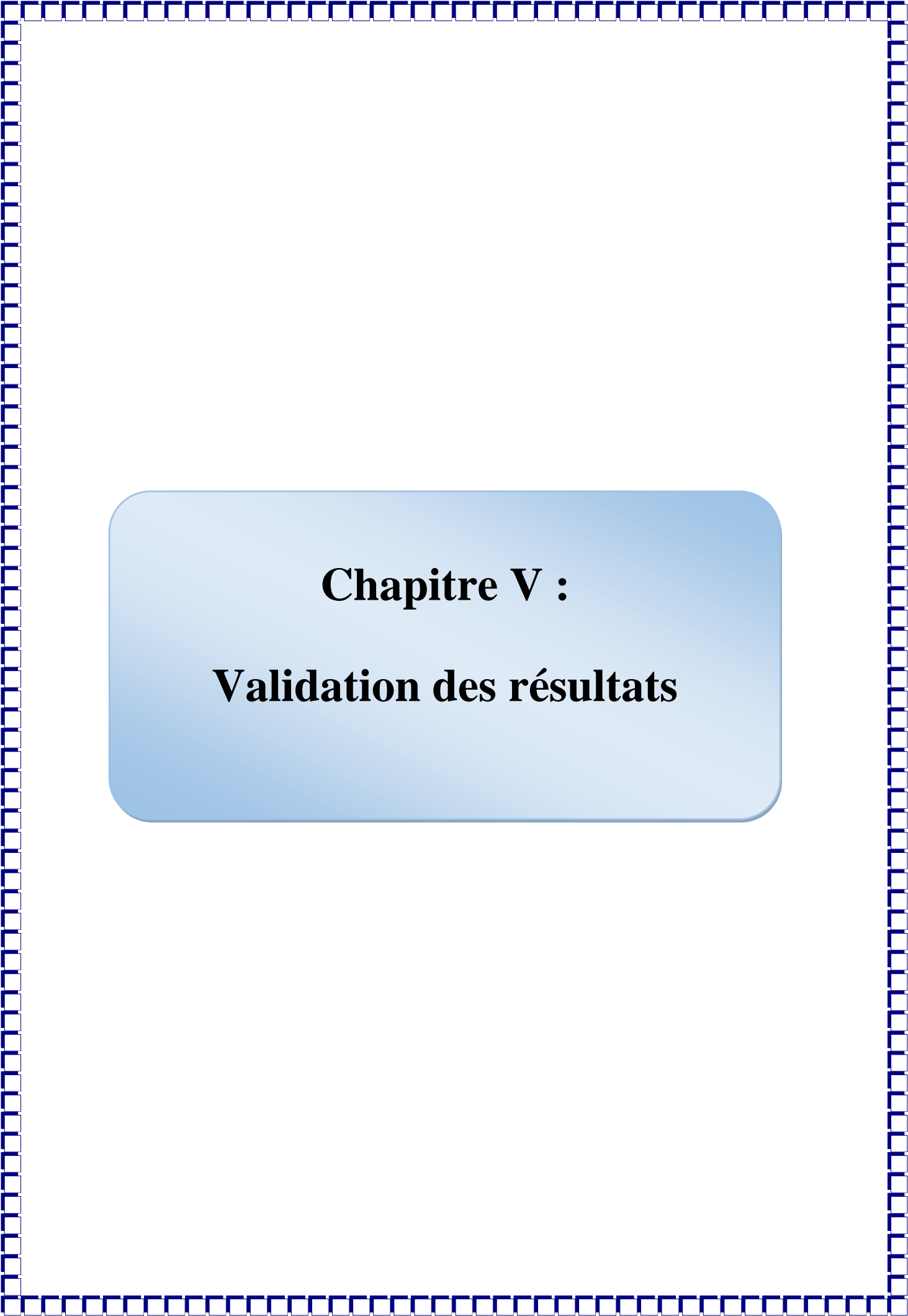
## Chapitre IV : Identification des paramètres du moteur à courant continu par la méthode de Pasek en tenant compte des frottements

$\Delta i_q(2t_1)$	Valeur du courant correspondant à $2*t_1$ (A)	11.604
$\delta$	Coefficient	0.8505
$T_e$	Constante de temps électrique de l'induit (s)	0.0044
$R_q$	Résistance de l'induit ( $\Omega$ )	3.578
$L_q$	Inductance propre de l'induit (H)	0.0099
$K$	Constante de la $F_{cem}$ (V.s/rad)	1.4274
$T_{em}$	Constante de temps électromécanique (s)	0.0825
$J$	Inertie du moteur ( $\text{Kg.m}^2$ )	0.047
$f$	Coefficient de frottements (N.m.s/rad)	0.0053
$C_s$	Couple statique (N.m)	0.57

**Tableau IV.1:** Résultats de l'identification en appliquant la procédure citée précédemment en 4.6

### Conclusion :

Ce chapitre a introduit une extension significative de la méthode de Pasek pour l'identification des paramètres d'une machine à courant continu à excitation indépendante, en tenant compte des frottements. En se basant sur les fondements théoriques établis dans le chapitre III précédent et sur quelques simplifications justifiées, nous avons abouti à des équations qui nécessitent les mêmes démonstrations que dans le chapitre précédent. La nouvelle procédure ainsi mise au point et qui tient compte des frottements à été automatisée en utilisant comme au chapitre précédent la fonction inverse avec « polyfit » et la méthode de Dichotomie. Ces deux méthodes donnent le même résultat.



**Chapitre V :**  
**Validation des résultats**

## Introduction

Dans ce chapitre, nous allons procéder à la comparaison des résultats d'identification des paramètres d'un moteur à courant continu à excitation séparée, obtenus par les trois méthodes pour conclure sur la précision de la méthode de Pasek.

## V. Comparaison des résultats des trois méthodes :

Les résultats des trois méthodes d'identification sont regroupés dans les trois tableaux ci-dessous.

### V.1 Méthode Classique :

Paramètre	Désignation	Valeur
$R_q$	Résistance de l'induit ( $\Omega$ )	2.27
$L_q$	Inductance propre de l'induit (H)	0.0049
$R_f$	Résistance de l'inducteur ( $\Omega$ )	82.9
$L_f$	Inductance propre de l'inducteur (H)	8.52
$M_{fd}$	Inductance mutuelle entre induit et inducteur (H)	1.1
$K$	Constante de la $F_{cem}$ (V.s/rad)	1.489
$T_e$	Constante de temps électrique de l'induit (s)	0.0022
$T_m$	Constante de temps mécanique (s)	8
$J$	Inertie du moteur ( $\text{Kg.m}^2$ )	0.044
$f$	Coefficient de frottements (N.m.s/rad)	0.0055
$C_s$	Couple statique (N.m)	0.92

Tableau V.1 : Les résultats des paramètres de la méthode classique

### V.2 Méthode de Psek sans tenir compte des frottements :

Paramètre	Désignation	Valeur
$T_e$	Constante de temps électrique de l'induit (s)	0.0044
$R_q$	Résistance de l'induit ( $\Omega$ )	3.578
$L_q$	Inductance propre de l'induit (H)	0.0099
$K$	Constante de la $F_{cem}$ (V.s/rad)	1.4274
$T_{em}$	Constante de temps électromécanique (s)	0.0822
$J$	Inertie du moteur ( $\text{Kg.m}^2$ )	0.0468

**Tableau V.2 :** Les résultats des paramètres de la méthode Psek sans tenir compte des frottements

### V.3 Méthode de Psek en tenant compte des frottements :

Paramètre	Désignation	Valeur
$T_e$	Constante de temps électrique de l'induit (s)	0.0044
$R_q$	Résistance de l'induit ( $\Omega$ )	3.578
$L_q$	Inductance propre de l'induit (H)	0.0099
$K$	Constante de la $F_{cem}$ (V.s/rad)	1.4274
$T_{em}$	Constante de temps électromécanique (s)	0.0825
$J$	Inertie du moteur ( $\text{Kg.m}^2$ )	0.047
$f$	Coefficient de frottements (N.m.s/rad)	0.0053
$C_s$	Couple statique (N.m)	0.57

**Tableau V.3 :** Les résultats des paramètres de la méthode Psek tenant compte des frottements

Si nous comparons les résultats des trois méthodes, nous trouverons qu'ils sont proches les uns des autres à l'exception de la résistance de l'induit qui est surestimée par la méthode de Pasek. Nous pensons que cela est dû aux résistances de contact (puisque cette résistance est faible). Nous pensons également que cela peut être dû à l'imperfection de l'échelon de tension. Notre échelon de tension est réalisé par simple élimination d'une résistance. La valeur de la résistance de l'induit a bien sur un impact direct sur celle de l'inductance propre de l'induit et sa surestimation est due aux mêmes raisons. Nous pensons que si nous utilisons un générateur de tension capable de délivrer un échelon de tension parfait, cela donnera un résultat plus précis.

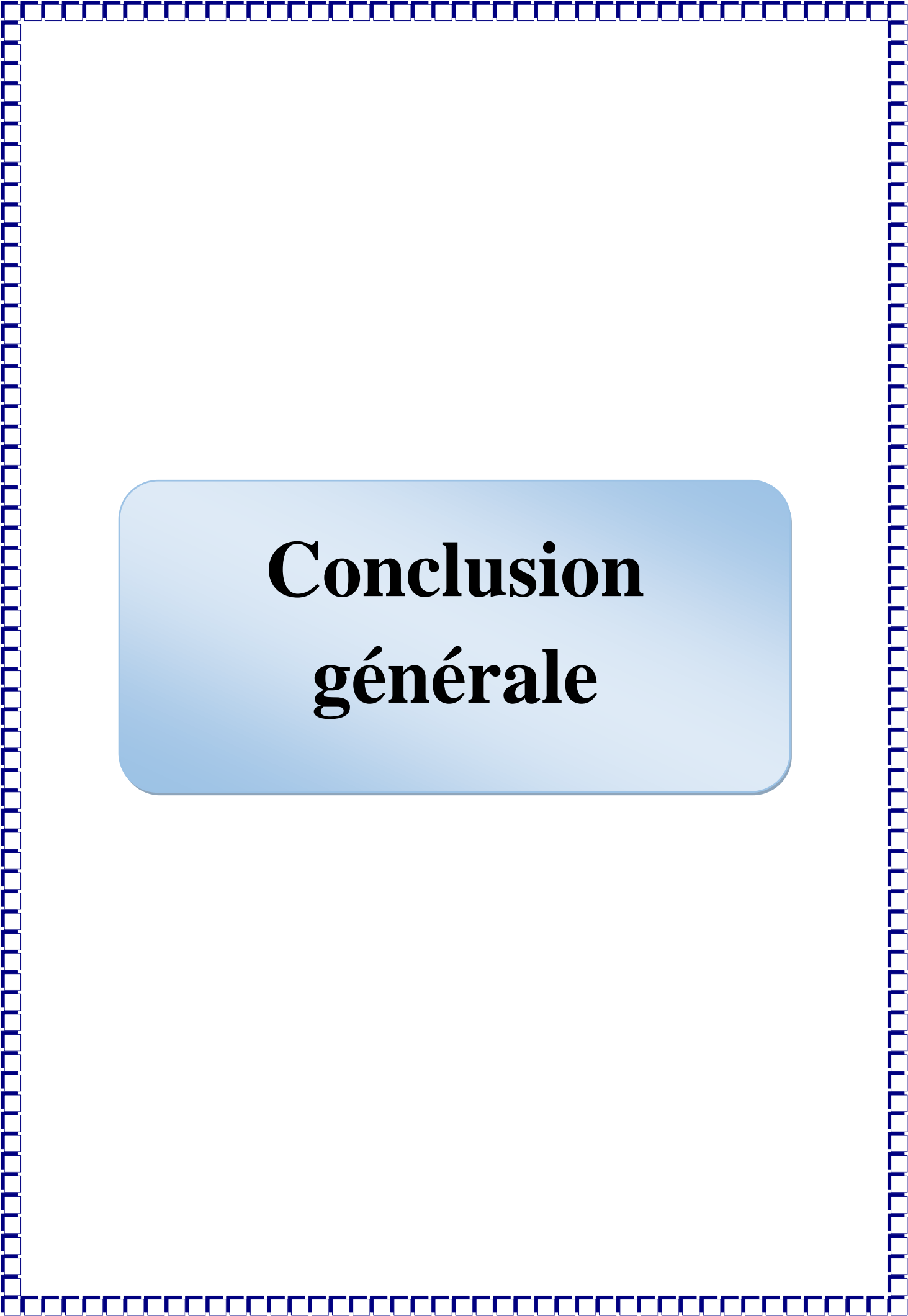
### **Conclusion :**

En conclusion, ce chapitre a présenté une comparaison des résultats d'identification des paramètres d'un moteur à courant continu à excitation séparée obtenus par trois méthodes différentes : la méthode classique, la méthode de Pasek sans tenir compte des frottements, et la méthode de Pasek en tenant compte des frottements. Les résultats ont été regroupés dans des tableaux pour une analyse comparative.

La comparaison des résultats a révélé une cohérence générale entre les trois méthodes, avec des valeurs similaires pour la plupart des paramètres. Cependant, une différence notable a été observée concernant la résistance de l'induit, qui a été surestimée par la méthode de Pasek, en particulier lorsqu'elle prend en compte les frottements. Cette surestimation peut être attribuée aux résistances de contact et à l'imperfection de l'échelon de tension utilisé dans l'expérience.

Malgré cette différence, les résultats obtenus par la méthode de Pasek restent globalement cohérents avec ceux de la méthode classique. Cela souligne l'efficacité de la méthode de Pasek dans l'identification des paramètres d'une machine à courant continu à excitation indépendante, en particulier lorsqu'elle est adaptée pour tenir compte des frottements.

En conclusion, la méthode de Pasek, avec ou sans prise en compte des frottements, offre une approche précise et efficace pour l'identification des paramètres des machines à courant continu. Cependant, il est important de prendre en considération les sources potentielles d'erreurs, telles que les résistances de contact, pour interpréter correctement les résultats et garantir leur précision.



**Conclusion  
générale**

L'objet de notre projet de fin d'études a été l'identification des paramètres d'une machine à courant continu à partir d'un seul essai.

Le premier chapitre est consacré à la constitution, au principe de fonctionnement et à la modélisation de la machine à courant continu à excitation séparée.

Dans un second chapitre, nous avons présenté le principe de la méthode classique d'identification des paramètres d'une machine à courant continu à excitation indépendante. Dans cette méthode, chaque paramètre est identifié avec un essai. Dans ce chapitre, nous avons appliqué cette méthode pour l'identification des paramètres d'un moteur à courant continu à excitation séparée d'une puissance de 3kW. Les résultats de cette méthode sont regroupés dans un tableau et vont servir de base de validation des autres méthodes.

Dans le troisième chapitre, nous avons développé les bases théoriques de la méthode de Pasek. C'est une méthode qui introduit des simplifications puisqu'elle ne prend pas en compte les frottements, mais elle permet l'identification de l'ensemble des paramètres avec un seul essai. Dans ce chapitre, nous avons fourni toutes les démonstrations nécessaires et les détails sont renvoyés aux annexes.

Il convient de noter que la méthode de Pasek est graphique, elle est basée sur l'exploitation graphique de deux abaques. Dans ce mémoire, nous avons rendu cette méthode automatique, qui ne nécessite aucun tracé graphique, il suffit d'enregistrer les résultats de l'essai expérimental puis d'exécuter un programme « Matlab Script ».

Cette automatisation a été rendue possible grâce à l'utilisation de deux procédures numériques :

- La première consiste à trouver la fonction inverse d'une fonction de forme complexe en utilisant la fonction « polyfit » de Matlab.
- La seconde utilise une méthode numérique récurrente (méthode de Dichotomie) pour trouver la racine qui annule une équation non linéaire.

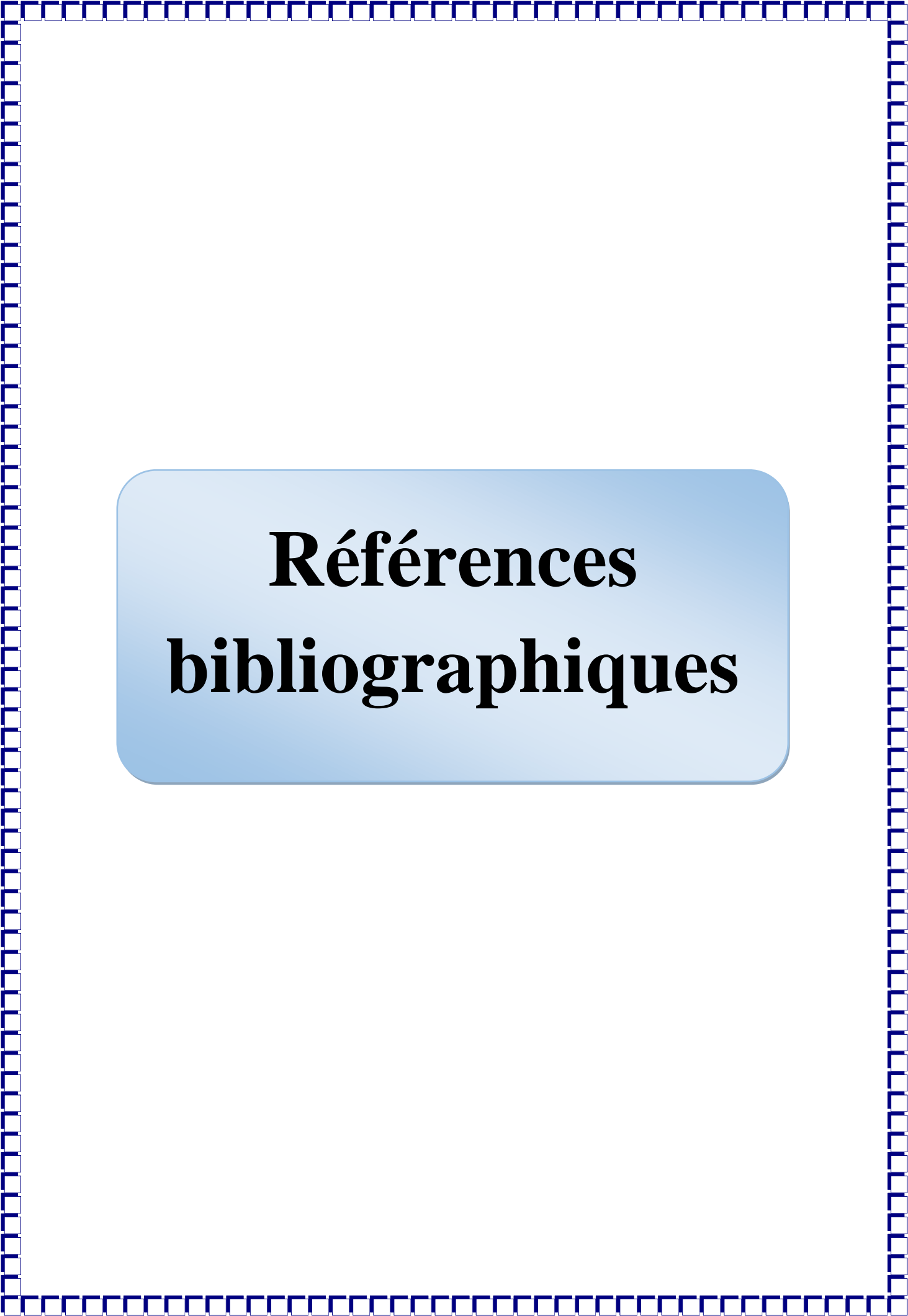
Dans le quatrième chapitre, nous avons généralisé la méthode de Pasek pour tenir compte des frottements. Grâce à quelques simplifications justifiées, nous avons abouti à des systèmes d'équations de formes identiques à celles du précédent chapitre qui ne tient pas compte des frottements. Les démonstrations sont par conséquent les mêmes. Dans ce chapitre, nous avons également proposé une procédure automatique pratiquement similaire à celle du chapitre précédent.

Le cinquième et dernier chapitre contient un regroupement des résultats des trois méthodes appliquées. Nous avons constaté que les résultats des trois méthodes sont proches à l'exception de la résistance de l'enroulement d'induit. Les deux méthodes de Pasek ont tendance à surestimer cette valeur. Nous pensons que cela est dû à l'imperfection de l'échelon de tension que nous avons réalisé par un simple court-circuit manuel d'une résistance.

Nous pensons qu'un générateur de tension capable de délivrer un échelon de tension plus précis que celui que nous avons réalisé, donnera un résultat plus précis.

Dans l'avenir, il serait intéressant de concevoir un banc d'essai expérimental entièrement automatisé qui consiste à acquérir en temps réel tous les résultats de l'essai de Pasek et à les exploiter pour donner en temps réel les valeurs de tous les paramètres.

Il serait également intéressant de penser dans l'avenir de modéliser un échelon de tension imparfait (à défaut de réaliser un échelon de tension parfait) et à introduire ce modèle dans les équations du courant d'induit et de la vitesse de rotation et de réactualiser toutes les démonstrations nécessaires.



# **Références bibliographiques**

## Références bibliographiques

---

- [1] M. KOSTENKO et L. PIOTROVSKI, « Machines Electriques », tome I, Editions Mir.Moscou, 1969, pp 48-59.
- [2] M. Kostenko, L.Piotrovski, « Machines à courant continu et transformateurs », 3eme Edition Mir.Moscou, 1979.
- [3] F. MILSANT, « Cours d'électrotechnique, tome II : machines à courant continu », PARIS, 1981.
- [4] T.Wildi, G. Sybille, « Electrotechnique », Editions de Boeck, 2005.
- [5] F.Bernot, « Machines à courant continu construction », Techniques de l'Ingénieur, D 3556.
- [6] P. Barret, « Régimes transitoires des machines tournantes électriques », Edition Eyrolles, 1982.
- [7] Jean-Paul LOUIS, Bernard MULTON, Yvan BONNASSIEUX, Michel LAVABRE, « Identification du modèle dynamique d'une MCC à excitation séparée », Techniques de l'ingénieur, 2002.
- [8] M. ZEGARI, A. BADRI, B.OUKARFI, « Identification par la méthode du modèle des paramètres d'une machine à courant continu », 3rd International Conférence Sciences of Electronic, Technologies of Information and Télécommunications, SETIT 2005, March, 27-31,2005, TUNISIA.
- [9] FEKID.Hayat, « Identification des paramètres de la machine à courant continu », Projet de fin d'études d'ingénieur, UMMTO, 2011.
- [10] Mohammed Lamine HAMIDA, Farid KADI, « Identification et contrôle de la machine à courant continu par la Dspace 1103 », Mémoire de Master en Electrotechnique, Spécialité Machines Electriques, UMMTO, 2015.



# **Annexes**

**Annexe 1 : Démonstration de l'égalité**

$$\frac{\Delta i_q(t_1)}{\Delta I_m} = \frac{\Delta i_q(2t_1)}{\Delta i_q(t_1)}$$

Calculons d'abord  $\frac{\Delta i_q(t_1)}{\Delta I_m}$  puis  $\frac{\Delta i_q(2t_1)}{\Delta i_q(t_1)}$  et comparons les deux résultats :

Calcul de  $\frac{\Delta i_q(t_1)}{\Delta I_m}$  :

$$\Delta i_q(t_1) = \frac{E.T_e}{\alpha.L_q} (e^{-\frac{t_1}{T_2}} - e^{-\frac{t_1}{T_1}})$$

$$\Delta V_q = E \quad ; \quad \Delta I_m = \frac{E}{R_q} \quad \Rightarrow \quad \frac{\Delta i_q(t_1)}{\Delta I_m} = \frac{1}{\alpha} (e^{-\frac{t_1}{T_2}} - e^{-\frac{t_1}{T_1}})$$

$$\frac{t_1}{T_e} = \frac{1}{\alpha} . \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha} \quad ; \quad T_1 = \frac{2.T_e}{1+\alpha} \quad ; \quad T_2 = \frac{2.T_e}{1-\alpha}$$

$$\frac{t_1}{T_1} = \frac{1+\alpha}{2.\alpha} . \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha} \quad ; \quad \frac{t_1}{T_2} = \frac{1-\alpha}{2.\alpha} . \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}$$

$$\frac{\Delta i_q(t_1)}{\Delta I_m} = \frac{1}{\alpha} (e^{-\frac{1-\alpha}{2.\alpha} . \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}} - e^{-\frac{1+\alpha}{2.\alpha} . \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}})$$

$$\boxed{\frac{\Delta i_q(t_1)}{\Delta I_m} = \frac{1}{\alpha} e^{-\frac{1}{2.\alpha} . \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}} (e^{\frac{1}{2} . \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}} - e^{-\frac{1}{2} . \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}})} \quad (A1.1)$$

Calcul de  $\frac{\Delta i_q(2t_1)}{\Delta i_q(t_1)}$  :

$$\Delta i_q(2.t_1) = \frac{E.T_e}{\alpha.L_q} (e^{-\frac{2.t_1}{T_2}} - e^{-\frac{2.t_1}{T_1}})$$

$$\Delta i_q(2.t_1) = \frac{E.T_e}{\alpha.L_q} e^{-\frac{1}{\alpha} . \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}} (e^{\text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}} - e^{-\text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}})$$

$$\Delta i_q(t_1) = \frac{E.T_e}{\alpha.L_q} e^{-\frac{1}{2.\alpha} . \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}} (e^{\frac{1}{2} . \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}} - e^{-\frac{1}{2} . \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}})$$

$$\frac{\Delta i_q(2.t_1)}{\Delta i_q(t_1)} = \frac{\frac{ET_e}{\alpha.L_q} e^{-\frac{1}{\alpha} \cdot \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}} \left( e^{\frac{\text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}}{2}} - e^{-\frac{\text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}}{2}} \right)}{\frac{ET_e}{\alpha.L_q} e^{-\frac{1}{2\alpha} \cdot \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}} \left( e^{\frac{1}{2} \cdot \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}} - e^{-\frac{1}{2} \cdot \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}} \right)}$$

$$\frac{\Delta i_q(2.t_1)}{\Delta i_q(t_1)} = e^{-\frac{1}{2\alpha} \cdot \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}} \frac{\left( e^{\frac{\text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}}{2}} - e^{-\frac{\text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}}{2}} \right)}{\left( e^{\frac{1}{2} \cdot \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}} - e^{-\frac{1}{2} \cdot \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}} \right)} \quad (\text{A1.2})$$

Comparons les résultats (A1.1) et (A1.2) :

$$\frac{\Delta i_q(t_1)}{\Delta I_m} = \frac{1}{\alpha} e^{-\frac{1}{2\alpha} \cdot \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}} \left( e^{\frac{1}{2} \cdot \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}} - e^{-\frac{1}{2} \cdot \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}} \right)$$

$$\frac{\Delta i_q(2.t_1)}{\Delta i_q(t_1)} = e^{-\frac{1}{2\alpha} \cdot \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}} \frac{\left( e^{\frac{\text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}}{2}} - e^{-\frac{\text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}}{2}} \right)}{\left( e^{\frac{1}{2} \cdot \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}} - e^{-\frac{1}{2} \cdot \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}} \right)}$$

$$\frac{\Delta i_q(2.t_1)}{\Delta i_q(t_1)} = \frac{e^{-\frac{1}{2\alpha} \cdot \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}} \left( e^{\frac{\text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}}{2}} - e^{-\frac{\text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}}{2}} \right)}{\left( e^{\frac{1}{2} \cdot \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}} - e^{-\frac{1}{2} \cdot \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}} \right)}$$

$$\frac{\Delta i_q(2.t_1)}{\Delta I_m} = \frac{1}{\alpha} e^{-\frac{1}{2\alpha} \cdot \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}} \left( e^{\frac{1}{2} \cdot \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}} - e^{-\frac{1}{2} \cdot \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}} \right)$$

$$\frac{\Delta i_q(2.t_1)}{\Delta i_q(t_1)} = \alpha \frac{\left( e^{\frac{\text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}}{2}} - e^{-\frac{\text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}}{2}} \right)}{\left( e^{\frac{1}{2} \cdot \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}} - e^{-\frac{1}{2} \cdot \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}} \right)} = \alpha \frac{\frac{1+\alpha}{1-\alpha} - \frac{1-\alpha}{1+\alpha}}{\sqrt{1-\alpha} - \sqrt{1+\alpha}}$$

$$\frac{\Delta i_q(t_1)}{\Delta I_m} = \alpha \frac{\frac{1+\alpha}{1-\alpha} - \frac{1-\alpha}{1+\alpha}}{\sqrt{1-\alpha} - \sqrt{1+\alpha}}$$

$$\frac{\Delta i_q(2.t_1)}{\Delta i_q(t_1)} = \alpha \frac{\frac{1+\alpha}{1-\alpha} - \frac{1-\alpha}{1+\alpha}}{\left( \sqrt{1-\alpha} - \sqrt{1+\alpha} \right) \left( \sqrt{1-\alpha} - \sqrt{1+\alpha} \right)}$$

$$\frac{\frac{\Delta i_q(2.t_1)}{\Delta i_q(t_1)}}{\frac{\Delta i_q(t_1)}{\Delta I_m}} = \alpha \frac{\frac{(1+\alpha)^2 - (1-\alpha)^2}{1-\alpha^2}}{\frac{\frac{1+\alpha}{1-\alpha} + \frac{1-\alpha}{1+\alpha} - 2}} = \alpha \frac{\frac{(1+2\alpha+\alpha^2) - (1-2\alpha+\alpha^2)^2}{1-\alpha^2}}{\frac{(1+2\alpha+\alpha^2) + (1-2\alpha+\alpha^2) - 2(1-\alpha^2)}{1-\alpha^2}}$$

$$\frac{\frac{\Delta i_q(2.t_1)}{\Delta i_q(t_1)}}{\frac{\Delta i_q(t_1)}{\Delta I_m}} = \alpha \frac{\frac{(1+\alpha)^2 - (1-\alpha)^2}{1-\alpha^2}}{\frac{\frac{1+\alpha}{1-\alpha} + \frac{1-\alpha}{1+\alpha} - 2}} = \alpha \frac{4\alpha}{4\alpha^2} = 1$$

Ce qui démontre que :  $\frac{\Delta i_q(t_1)}{\Delta I_m} = \frac{\Delta i_q(2t_1)}{\Delta i_q(t_1)}$

Annexe 2 : Détails des formules utilisées

$$T_1 = \frac{2.T_e}{1+\alpha}$$

$$T_2 = \frac{2.T_e}{1-\alpha}$$

$$t_1 = \frac{T_1.T_2}{T_2 - T_1} . \text{Log} \frac{T_2}{T_1}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{\frac{2.T_e}{1-\alpha}}{\frac{2.T_e}{1+\alpha}} = \frac{1+\alpha}{1-\alpha}$$

$$T_1.T_2 = \frac{2.T_e}{1+\alpha} . \frac{2.T_e}{1-\alpha} = \frac{4.T_e^2}{1-\alpha^2}$$

$$T_2 - T_1 = \frac{2.T_e}{1-\alpha} - \frac{2.T_e}{1+\alpha} = 2.T_e \frac{1+\alpha - (1-\alpha)}{1-\alpha^2} = \frac{4.\alpha.T_e}{1-\alpha^2}$$

$$\frac{T_1.T_2}{T_2 - T_1} = \frac{\frac{4.T_e^2}{1-\alpha^2}}{\frac{4.\alpha.T_e}{1-\alpha^2}} = \frac{4.T_e^2}{4.\alpha.T_e} = \frac{T_e}{\alpha}$$

$$\frac{t_1}{T_e} = \frac{1}{\alpha} . \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}$$

$$\alpha = \sqrt{1 - \frac{4}{\lambda}}$$

$$\frac{t_1}{T_e} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{4}{\lambda}}} . \text{Log} \frac{1 + \sqrt{1 - \frac{4}{\lambda}}}{1 - \sqrt{1 - \frac{4}{\lambda}}} = \frac{\sqrt{\lambda}}{\sqrt{\lambda - 4}} . \text{Log} \frac{\sqrt{\lambda} + \sqrt{\lambda - 4}}{\sqrt{\lambda} - \sqrt{\lambda - 4}}$$

$$\frac{t_1}{T_e} = \frac{\sqrt{\lambda}}{\sqrt{\lambda - 4}} . \text{Log} \frac{\sqrt{\lambda} + \sqrt{\lambda - 4}}{\sqrt{\lambda} - \sqrt{\lambda - 4}}$$

$$\Delta i_q(t_1) = \frac{E.T_e}{\alpha.L_q} (e^{-\frac{t_1}{T_2}} - e^{-\frac{t_1}{T_1}})$$

$$t_1 = \frac{T_1.T_2}{T_2 - T_1} . \text{Log} \frac{T_2}{T_1}$$

$$t_1 = \frac{T_e}{\alpha} . \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}$$

$$T_1 = \frac{2.T_e}{1+\alpha}$$

$$T_2 = \frac{2.T_e}{1-\alpha}$$

$$\frac{t_1}{T_2} = \frac{\frac{T_e}{\alpha} . \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}}{\frac{2.T_e}{1-\alpha}} = \frac{1-\alpha}{2.\alpha} \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}$$

$$\frac{t_1}{T_2} = \frac{1-\alpha}{2.\alpha} \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}$$

$$\frac{t_1}{T_1} = \frac{1+\alpha}{2.\alpha} \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}$$

$$\Delta i_q(t_1) = \frac{E.T_e}{\alpha.L_q} (e^{-\frac{t_1}{T_2}} - e^{-\frac{t_1}{T_1}}) = \frac{E. \frac{L_q}{R_q}}{\alpha.L_q} (e^{-\frac{t_1}{T_2}} - e^{-\frac{t_1}{T_1}}) = \frac{E}{\alpha.R_q} (e^{-\frac{t_1}{T_2}} - e^{-\frac{t_1}{T_1}})$$

$$\Delta i_q(t_1) = \frac{E}{\alpha.R_q} (e^{-\frac{t_1}{T_2}} - e^{-\frac{t_1}{T_1}})$$

$$\Delta I_m = \frac{E}{R_q}$$

$$\frac{\Delta i_q(t_1)}{\Delta I_m} = \frac{\frac{E}{\alpha.R_q} (e^{-\frac{t_1}{T_2}} - e^{-\frac{t_1}{T_1}})}{\frac{E}{R_q}} = \frac{1}{\alpha} (e^{-\frac{t_1}{T_2}} - e^{-\frac{t_1}{T_1}})$$

$$\frac{\Delta i_q(t_1)}{\Delta I_m} = \frac{1}{\alpha} (e^{-\frac{t_1}{T_2}} - e^{-\frac{t_1}{T_1}})$$

$$\frac{\Delta i_q(t_1)}{\Delta I_m} = \frac{1}{\alpha} (e^{-\frac{t_1}{T_2}} - e^{-\frac{t_1}{T_1}}) = \frac{1}{\alpha} (e^{-\frac{1-\alpha}{2\alpha} \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}} - e^{-\frac{1+\alpha}{2\alpha} \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}})$$

$$\frac{\Delta i_q(t_1)}{\Delta I_m} = \frac{1}{\alpha} e^{-\frac{1}{2\alpha} \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}} \left( e^{\frac{1}{2} \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}} - e^{-\frac{1}{2} \text{Log} \frac{1+\alpha}{1-\alpha}} \right)$$

$$\frac{\Delta i_q(t_1)}{\Delta I_m} = \frac{1}{\alpha} \left( \frac{1+\alpha}{1-\alpha} \right)^{-\frac{1}{2\alpha}} \left\{ \left( \frac{1+\alpha}{1-\alpha} \right)^{\frac{1}{2}} - \left( \frac{1+\alpha}{1-\alpha} \right)^{-\frac{1}{2}} \right\}$$

$$\frac{\Delta i_q(t_1)}{\Delta I_m} = \frac{1}{\alpha} \left\{ \left( \frac{1+\alpha}{1-\alpha} \right)^{-\frac{1}{2\alpha} + \frac{1}{2}} - \left( \frac{1+\alpha}{1-\alpha} \right)^{-\frac{1}{2\alpha} - \frac{1}{2}} \right\}$$

$$\frac{\Delta i_q(t_1)}{\Delta I_m} = \frac{1}{\alpha} \left\{ \left( \frac{1+\alpha}{1-\alpha} \right)^{\frac{1-\alpha}{2\alpha}} - \left( \frac{1+\alpha}{1-\alpha} \right)^{-\frac{1+\alpha}{2\alpha}} \right\}$$

$$\alpha = \sqrt{1 - \frac{4}{\lambda}} = \frac{\sqrt{\lambda-4}}{\sqrt{\lambda}}$$

$$\frac{1+\alpha}{1-\alpha} = \frac{1 + \frac{\sqrt{\lambda-4}}{\sqrt{\lambda}}}{1 - \frac{\sqrt{\lambda-4}}{\sqrt{\lambda}}} = \frac{\sqrt{\lambda} + \sqrt{\lambda-4}}{\sqrt{\lambda} - \sqrt{\lambda-4}}$$

$$\frac{1-\alpha}{2\alpha} = \frac{1 - \frac{\sqrt{\lambda-4}}{\sqrt{\lambda}}}{2 \cdot \frac{\sqrt{\lambda-4}}{\sqrt{\lambda}}} = \frac{\sqrt{\lambda} - \sqrt{\lambda-4}}{2\sqrt{\lambda-4}}$$

$$\frac{1+\alpha}{2\alpha} = \frac{1 + \frac{\sqrt{\lambda-4}}{\sqrt{\lambda}}}{2 \cdot \frac{\sqrt{\lambda-4}}{\sqrt{\lambda}}} = \frac{\sqrt{\lambda} + \sqrt{\lambda-4}}{2\sqrt{\lambda-4}}$$

$$\frac{\Delta i_q(t_1)}{\Delta I_m} = \frac{1}{\frac{\sqrt{\lambda-4}}{\sqrt{\lambda}}} \left\{ \left( \frac{\sqrt{\lambda} + \sqrt{\lambda-4}}{\sqrt{\lambda} - \sqrt{\lambda-4}} \right)^{-\frac{\sqrt{\lambda} - \sqrt{\lambda-4}}{2\sqrt{\lambda-4}}} - \left( \frac{\sqrt{\lambda} + \sqrt{\lambda-4}}{\sqrt{\lambda} - \sqrt{\lambda-4}} \right)^{-\frac{\sqrt{\lambda} + \sqrt{\lambda-4}}{2\sqrt{\lambda-4}}} \right\}$$

$$\frac{\Delta i_q(t_1)}{\Delta I_m} = \frac{\sqrt{\lambda}}{\sqrt{\lambda-4}} \left( \frac{\sqrt{\lambda} + \sqrt{\lambda-4}}{\sqrt{\lambda} - \sqrt{\lambda-4}} \right)^{-\frac{\sqrt{\lambda}}{2\sqrt{\lambda-4}}} \left\{ \left( \frac{\sqrt{\lambda} + \sqrt{\lambda-4}}{\sqrt{\lambda} - \sqrt{\lambda-4}} \right)^{\frac{1}{2}} - \left( \frac{\sqrt{\lambda} + \sqrt{\lambda-4}}{\sqrt{\lambda} - \sqrt{\lambda-4}} \right)^{-\frac{1}{2}} \right\}$$

$$\delta = \frac{\sqrt{\lambda}}{\sqrt{\lambda-4}} \left( \frac{\sqrt{\lambda} + \sqrt{\lambda-4}}{\sqrt{\lambda} - \sqrt{\lambda-4}} \right)^{-\frac{\sqrt{\lambda}}{2\sqrt{\lambda-4}}} \left\{ \left( \frac{\sqrt{\lambda} + \sqrt{\lambda-4}}{\sqrt{\lambda} - \sqrt{\lambda-4}} \right)^{\frac{1}{2}} - \left( \frac{\sqrt{\lambda} + \sqrt{\lambda-4}}{\sqrt{\lambda} - \sqrt{\lambda-4}} \right)^{-\frac{1}{2}} \right\}$$

$$\delta = \frac{1}{\alpha} \left( \frac{1+\alpha}{1-\alpha} \right)^{-\frac{1}{2\alpha}} \left\{ \left( \frac{1+\alpha}{1-\alpha} \right)^{\frac{1}{2}} - \left( \frac{1+\alpha}{1-\alpha} \right)^{-\frac{1}{2}} \right\}$$

## Annexe 3 :

### Programme Matlab de l'identification des paramètres d'un moteur à courant continu à excitation séparée par la méthode classique

```
%  
% Identification des paramètres d'un moteur à courant continu  
%  
% à excitation indépendante par la méthode classique  
%  
% *****  
%  
f=50;  
w=2*pi*f;  
% Mesure de la résistance de l'induit  
Va=[4.25 6 10];  
Ia=[1.7 2.5 5.2];  
Ra=Va./Ia;  
Ra_Moy=mean(Ra)  
% Mesure de l'inductance propre de l'induit  
Va=[4 6.6 9.5];  
Ia=[1.25 2.5 3.9];  
Za=Va./Ia;  
Za_Moy=mean(Za);  
La=sqrt(Za_Moy^2-Ra_Moy^2)/w  
% Mesure de la résistance de l'inducteur  
Vf=[33 52 90];  
If=[0.41 0.6 1.1];  
Rf=Vf./If;  
Rf_Moy=mean(Rf)  
% Mesure de l'inductance propre de l'inducteur  
Vf=[90 100 110];
```

```
If=[0.034 0.037 0.041];
Zf=Vf./If;
Zf_Moy=mean(Zf);
Lf=sqrt(Zf_Moy^2-Rf_Moy^2)/w

% Mesure de l'inductance mutuelle entre l'induit et l'inducteur
% *****
%
% Tracé de la caractéristique à vide E (If)
% -----
wr=7.17*(1000/5)*(pi/30);
Ifa=[0.2 0.4 0.6 0.8 1.0 1.1 1.2 1.3 1.4 1.5 1.6 1.7 1.8];
Ea=[50.5 82 120 150 185 195 205 215 222 230 235 240 245];
figure(1)
plot(Ifa,Ea,'*r')
grid on
axis([0 2 0 250])
xlabel(' Courant inducteur (A)')
ylabel(' Fem induite (V)')
title(' Caracteristique electrique ')
%Ifa1=[0.2 0.4 0.6 0.8 1.0];
%Ifa2=diff(Ifa1);
%Ea1=[50.5 82 120 150 185];
%Ea2=diff(Ea1);
%Mfd=Ea2./(Ifa2*wr);
dIfa=diff(Ifa(1:5));
dEa=diff(Ea(1:5));
Mfd=dEa/(dIfa*wr);
Mfd_Moy=mean(Mfd)
```

% Identification du coefficient de frottements et du couple statique

% \*\*\*\*\*

%

% Tracé de la caractéristique mécanique

% -----

Va=[52 80 100 130 152 175 190 202 220];

Ia=[0.7 0.8 0.9 0.95 1.0 1.05 1.09 1.1 1.16];

wr=[1.55 2.52 3.13 4.12 4.85 5.58 6.03 6.57 7.21];

wr=wr\*(1000/5)\*(pi/30);

Ifmoy=1.33;

Cem=Mfd\_Moy\*Ifmoy.\*Ia;

%

## Annexe 4 :

### Programme Matlab de l'identification des paramètres d'un moteur à courant continu à excitation séparée par la méthode de Pasek sans tenir compte des frottements

```
% -----  
% Programme d'identification des paramètres d'un moteur à courant continu  
%   à excitation indépendante, excitation constante  
%   et frottements négligeables  
% -----  
%  
clc  
  
disp(' Avant de lancer ce programme il faut lancer le programme iq_exp')  
  
plot(t,iq)  
  
grid on  
  
xlabel(' Temps(s)')  
  
ylabel(' Courant(A)')  
  
title(' Essai de Pasek')  
  
% Recherche du courant maximal et de son instant  
  
nn=length(iq);  
  
iqmax=iq(1);  
  
iqmax2=iq(1);  
  
dt=1e-5;  
  
for ii=1:nn  
  
    if(iq(ii)>iqmax)  
  
        iqmax=iq(ii);  
  
        tmax=t(ii);  
  
    end  
  
end  
  
for jj=1:nn  
  
    if(t(jj)<tmax*2+dt & t(jj)>tmax*2-dt)
```

```
iqmax2=iq(jj)

end

end

disp(' courant iq maximal');iqmax

disp(' temps du passage de iq par son maximum');tmax

disp(' courant de iq a 2 fois tmax'); iqmax2

%Vq=input(' donner la valeur de l'echelon de tension')

%wr1=input(' donner la valeur initiale de la vitesse de rotation')

%wr2=input(' donner la valeur finale de la vitesse de rotation')

%delta_wr=wr2-wr1;

Vq=136-78.6;

wr1=2.55*(1000/5)*(pi/30);

wr2=4.47*(1000/5)*(pi/30);

delta_wr=wr2-wr1;

delta=iqmax2/iqmax

%

% La fonction Lambda(delta) est obtenue par polyfit de la fonction delta(Lambda)

%

Lam=4.5:0.5:30;

a1=sqrt(Lam);

b1=sqrt(Lam-4);

aa=a1+b1;

bb=a1-b1;

ab=log(aa)-log(bb);

t1=(a1./b1).*ab;

Delta=exp(-t1/2).*a1;

% Interpolation par une fonction polynomiale d'ordre 6

cc=polyfit(Delta,Lam,6);

%
```

$\text{Lambda} = \text{cc}(1) * \text{delta}^6 + \text{cc}(2) * \text{delta}^5 + \text{cc}(3) * \text{delta}^4 + \text{cc}(4) * \text{delta}^3 + \text{cc}(5) * \text{delta}^2 + \text{cc}(6) * \text{delta} + \text{cc}(7);$

$\text{alpha} = \sqrt{1 - (4/\text{Lambda})};$

$\text{t1surTe} = (\log((1 + \text{alpha})/(1 - \text{alpha}))) / \text{alpha};$

$\text{Te} = \text{tmax} / \text{t1surTe}$

$\text{dim} = \text{iqmax} * \text{iqmax} / \text{iqmax}^2;$

$\text{Rq} = \text{Vq} / \text{dim}$

$\text{cc} = (1 + \text{alpha}) / (1 - \text{alpha});$

$\text{cc1} = \log(\text{cc});$

$\text{iq0} = \exp(-\text{cc1} / (2 * \text{alpha}));$

$\text{iq1} = \exp(\text{cc1} / 2);$

$\text{iq2} = \exp(-\text{cc1} / 2);$

$\text{iq3} = \text{iq0} * (\text{iq1} - \text{iq2});$

$\text{Rq1} = \text{iq3} * \text{Vq} / (\text{alpha} * \text{iqmax})$

$\text{Rq} = 2.27;$

$\text{Lq} = \text{Rq} * \text{Te}$

$\text{Km} = \text{Vq} / \text{delta\_wr}$

$\text{iqp1} = 1.75 / 3;$

$\text{iqp2} = 2.20 / 3;$

$\text{diqp} = \text{iqp2} - \text{iqp1};$

$\text{Kf} = \text{Km} * \text{diqp} / \text{delta\_wr}$

$\text{Tem} = \text{Lambda} * \text{Te}$

$\text{J} = (\text{Km}^2) * \text{Tem} / \text{Rq}$

### Annexe 5 : Programme Matlab de l'identification des paramètres d'un moteur à courant continu à excitation séparée par la méthode de Pasek en tenant compte des frottements

```
% -----*
% Programme d'identification des paramètres d'un moteur à courant continu
%   à excitation indépendante, excitation constante
%   en tenant compte des frottements
% -----*
%
clc
disp(' Avant de lancer ce programme il faut lancer le programme iq_exp')
figure (1)
plot(t,iq)
axis([-0.05 0.5 0 14])
grid on
xlabel(' Temps(s)')
ylabel(' Courant(A)')
title(' Essai de Pasek')
% Recherche du courant maximal et de son instant
nn=length(iq);
iqmax=iq(1);
iqmax2=iq(1);
dt=1e-5;
for ii=1:nn
    if(iq(ii)>iqmax)
        iqmax=iq(ii);
        tmax=t(ii);
    end
end
for jj=1:nn
```

```
if(t(jj)<tmax*2+dt & t(jj)>tmax*2-dt)
    iqmax2=iq(jj);
end
end
disp(' courant iq maximal');iqmax
disp(' temps du passage de iq par son maximum');tmax
disp(' courant de iq a 2 fois tmax'); iqmax2
%Vq=input(' donner la valeur de l'echelon de tension')
%wr1=input(' donner la valeur initiale de la vitesse de rotation')
%wr2=input(' donner la valeur finale de la vitesse de rotation')
%delta_wr=wr2-wr1;
Vq=136-78.6;
iqp1=0.6;
iqp2=0.75;
wr1=2.55*(1000/5)*(pi/30);
wr2=4.47*(1000/5)*(pi/30);
delta_wr=wr2-wr1;
delta=iqmax2/iqmax;
%
% La fonction Beta(Delta) est obtenue par interpolation « polyfit » %
Beta=0.1:0.001:0.99;
aa=(1+Beta)./(1-Beta);
Delta1=exp(-log(aa)./(2*Beta));
Delta2=exp(log(aa))-exp(-log(aa));
Delta3=exp(log(aa)/2)-exp(-log(aa)/2);
Delta=Delta1.*Delta2./Delta3;
%
% Interpolation par un polynôme d'ordre 7
% -----
```

```
cc=polyfit(Delta,Beta,7);

Beta1=cc(1)*delta^7+cc(2)*delta^6+cc(3)*delta^5+cc(4)*delta^4+cc(5)*delta^3+cc(6)*delta^2+cc(7)*delta+cc(8);

%

aa1=(1+Beta1)/(1-Beta1);

t1surTe=log(aa1)/Beta1;

Te=tmax/t1surTe

dim=iqmax*iqmax/iqmax2;

Rq=Vq/dim

Rq=2.27;

Lq=Rq*Te

Km=Vq/delta_wr

iqp0=iqp2-iqp1;

t1surT1=log(aa1)*(1+Beta1)/(2*Beta1);

T1=tmax/t1surT1

t1surT2=log(aa1)*(1-Beta1)/(2*Beta1);

T2=tmax/t1surT2

Tm=Vq*T1*T2/(Lq*iqp0)

lambda=Tm/Te;

Beta2=Beta1/Te;

Denom1=(1-(1/lambda));

Denom2=Denom1^2/(Te^2);

Denom3=Denom2-Beta2^2

J=4*Km^2/(Lq*Denom3)

Kf=J/Tm

Cr1=Km*iqp1-Kf*wr1

Cr2=Km*iqp2-Kf*wr2
```

### Annexe 6 : Recherche de la solution de l'équation $\delta(\lambda) - \delta^* = 0$

Nous cherchons dans cette section la valeur particulière de  $\lambda$  pour que la fonction  $\delta(\lambda)$  soit égale à une valeur donnée ; nommée  $\delta^*$ . La solution à ce problème ne peut se faire que numériquement. Dans ce cas, nous proposons les deux solutions suivantes :

#### A-6.1 : Recherche de la fonction inverse de la fonction $\delta(\lambda)$ .

La fonction  $\delta(\lambda)$  est donnée par l'équation ci-dessous.

$$\delta = \frac{\sqrt{\lambda}}{\sqrt{\lambda-4}} \left( \frac{\sqrt{\lambda} + \sqrt{\lambda-4}}{\sqrt{\lambda} - \sqrt{\lambda-4}} \right)^{-\frac{\sqrt{\lambda}}{2\sqrt{\lambda-4}}} \left\{ \left( \frac{\sqrt{\lambda} + \sqrt{\lambda-4}}{\sqrt{\lambda} - \sqrt{\lambda-4}} \right)^{\frac{1}{2}} - \left( \frac{\sqrt{\lambda} + \sqrt{\lambda-4}}{\sqrt{\lambda} - \sqrt{\lambda-4}} \right)^{-\frac{1}{2}} \right\} \quad \text{A-6.1}$$

La figure A-6.1 montre l'évolution de  $\delta$  en fonction de  $\lambda$  en appliquant l'équation A-6.1 ci-dessus.

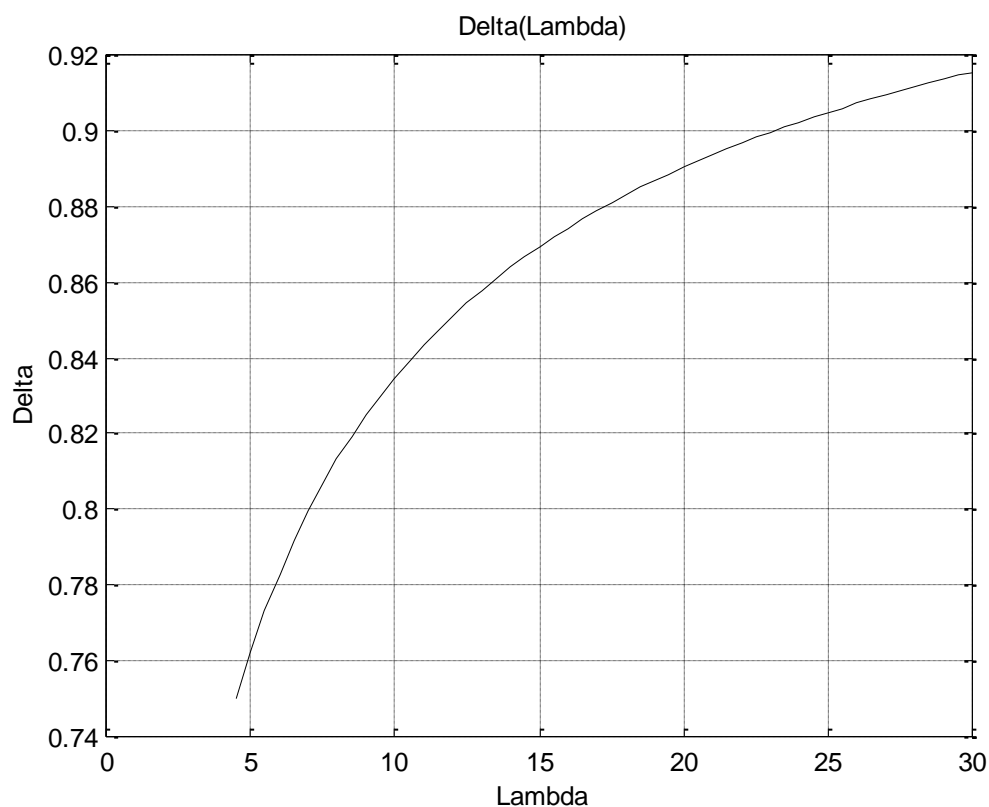


Figure A-6.1 : Evolution de  $\delta$  en fonction de  $\lambda$

Pour trouver l'interpolation polynomiale qui approxime au mieux la courbe représentant la fonction inverse  $\lambda(\delta)$  donnée nous utilisons la fonction « polyfit » de Matlab à l'ordre 6.

La figure A-6.2 montre l'évolution de la courbe  $\lambda$  en fonction de  $\delta$  et son approximation polynomiale d'ordre 6.

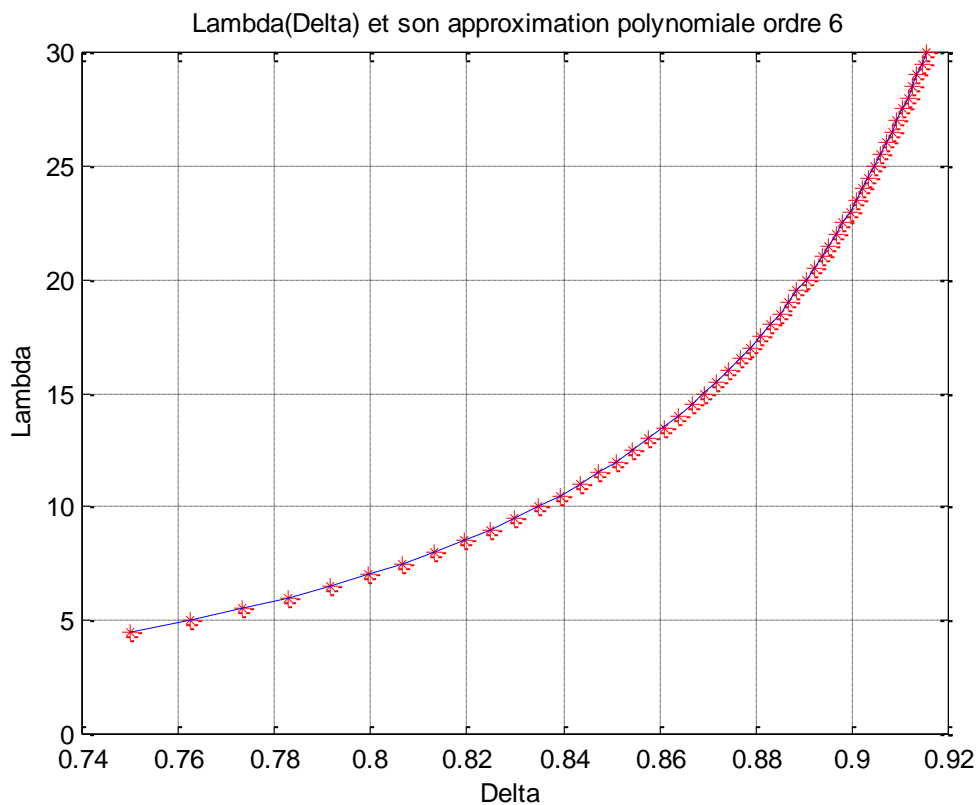


Figure A-6.1 : Evolution de  $\lambda$  en fonction de  $\delta$  et son approximation par un polynôme d'ordre 6

Le polynôme proposé par l'exécution la fonction « polyfit » de Matlab est le suivant :

$$\lambda(\delta) = 10^7 * (0,2648.\delta^6 - 1,2880.\delta^5 + 2,6115.\delta^4 - 2,8243.\delta^3 + 1,7182.\delta^2 - 0,5575.\delta + 0,0753)$$

### A-6.2 : Utilisation de la méthode de Dichotomie pour résoudre l'équation $\delta(\lambda) - \delta^* = 0$

La méthode de Dichotomie consiste à diviser l'intervalle d'évolution de  $\lambda$  par 2 jusqu'à trouver la solution à une précision  $\varepsilon$  près. La méthode de Dichotomie est résumée par l'algorithme ci-dessous.

Calculer

Tant que  $(|a-b|) \geq \varepsilon$  Faire

$$c = (a+b)/2$$

```

Si (f(a)*f(b)≤0) alors
    b=c
Sinon
    a=c
Fin si
Fin Tant que
r=c

```

a et b sont les bornes inférieure et supérieure de l'intervalle d'évolution de  $\lambda$

f est l'équation  $\delta(\lambda) - \delta^*$

Nous donnons ci-dessous les programmes Matlab des deux méthodes citées précédemment.

### Programme 1 : « Recherche de l'approximation polynomiale » :

```

%
% Approximation polynomiale de la Fonction inverse
% -----
Lam=4.5:0.5:30;
a1=sqrt(Lam);
b1=sqrt(Lam-4);
aa=a1+b1;
bb=a1-b1;
ab=log(aa)-log(bb);
t1=(a1./b1).*ab;
Delta=exp(-t1/2).*a1;
figure (1)
plot(Lam,Delta,'k')
grid on
xlabel(' Lambda')
ylabel(' Delta')
title(' Delta(Lambda)')

```

```
%  
% La fonction Lambda(delta) est obtenue par polyfit d'ordre 6 de la  
%      fonction delta(Lambda)  
% -----  
cc=polyfit(Delta,Lam,6)  
%  
Lam_Fit=cc(1).*Delta.^6+cc(2).*Delta.^5+cc(3).*Delta.^4+cc(4).*Delta.^3+cc(5).*Delta.^2+cc(6).*Delta+cc(7);  
figure (2)  
plot(Delta,Lam,'r*')  
hold on  
plot(Delta,Lam_Fit)  
grid on  
xlabel('Delta ')  
ylabel(' Lambda')  
title(' Lambda(Delta) et son approximation polynomiale ordre 6')
```

### Programme 2 : « Méthode de Dichotomie » :

```
% Programme sous Matlab de la méthode de Dichotomie  
% -----  
a=4.5;  
b=30;  
epsilon=1.e-5;  
ii=1;  
while abs(a-b)>=epsilon;  
    c=(a+b)/2;  
    Tc(ii)=c;  
    Fa=Fonc(a,delta);  
    Fc=Fonc(c,delta);  
    if (Fa*Fc)<=0;  
        b=c;
```

```

else
    a=c;
end
ii=ii+1;
end
disp(' la racine est r=')
r=c
disp(' le nombre d''iterations =')
nbit=ii
plot(Tc)
xlabel('itération ii')
ylabel('racine r')
title('La racine r en fonction de itération (ii)')
function [Fx]=Fonc(x,y)
a1=sqrt(x);
b1=sqrt(x-4);
aa=a1+b1;
bb=a1-b1;
ab=log(aa)-log(bb);
t1=(a1/b1)*ab;
[Fx]=(exp(-t1/2)*a1)-y;

```

### A-6.3 : Résultats de l'exécution des deux méthodes :

Nous avons appliqué les deux méthodes citées précédemment pour trouver le paramètre  $\lambda$

correspondant à la valeur particulière de  $\delta = \frac{\Delta i_q(2t_1)}{\Delta i_q(t_1)} = 0,8505$

La méthode de Dichotomie donne  $\lambda = 11,9312$  après 23 itérations.

La méthode de l'interpolation polynomiale donne un résultat immédiatement  $\lambda = 11,9350$

On peut dire que les deux méthodes donnent le même résultat à 2 chiffres après la virgule.

**Résumé :**

La modélisation est une étape importante dans la conception, la fabrication et la commande des machines électriques. Les modèles construits doivent reproduire fidèlement le comportement statique et dynamique des machines réelles.

Dans une entreprise de fabrication de moteurs électriques (telle que l'ENEL), après la fabrication de chaque série de machines, un test de contrôle qualité est effectué sur un échantillon. Ce test est constitué d'une série de mesures des paramètres électriques et mécaniques de la machine construite. Les valeurs des paramètres identifiés doivent être contenues dans une certaine fourchette prédéfinie. Si tel est le cas, la série est déclarée conforme, mais dans le cas contraire, un défaut de fabrication est probable et la série est renvoyée pour des investigations plus profondes.

Dans ce contexte, les méthodes qui permettent l'identification de tous les paramètres d'une machine électrique à partir d'un seul essai sont très recherchées.

Dans notre travail, il s'agit précisément de l'une de ces méthodes, elle s'appelle « méthode de Pasek », et elle s'applique à l'identification des tous les paramètres d'une machine à courant continu à excitation indépendante, à partir d'un seul essai.

**Abstract :**

Modeling is an important step in the design, manufacturing and control of electrical machines. The models constructed must faithfully reproduce the static and dynamic behavior of real machines.

In an electric motor manufacturing company (such as ENEL), after each series of machines is manufactured, a quality control test is carried out on a sample. This test consists of a series of measurements of the electrical and mechanical parameters of the machine built. The values of the identified parameters must be contained within a certain predefined range. If this is the case, the series is declared compliant, but otherwise, a manufacturing defect is likely and the series is sent back for further investigation.

In this context, methods which allow the identification of all the parameters of an electrical machine from a single test are highly sought after. In our work, it is precisely one of these methods, it is called "Pasek method", and it applies to the identification of all the parameters of a direct current machine with independent excitation , from a single test.