

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

**Université Mouloud MAMMERY, Tizi-Ouzou**

**Faculté de Génie Electrique et d'Informatique**

**Département d'Electrotechnique**



## **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

**En vue de l'obtention du diplôme  
d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique  
Option : Machines Electriques**

**Thème :**

# **Identification des paramètres d'une machine à courant continu**

**Réalisé par :**

**M<sup>elle</sup> FEKID Hayat.**

**Dirigé par :**

**M<sup>r</sup> BECHOUCHE A.**

**Promotion : 2011**

# REMERCIEMENTS

*AU TERME DE CE TRAVAIL, JE TIENS A REMERCIER  
TOUT PARTICULIEREMENT :*

*Le Bon Dieu pour sa bienveillance et de m'avoir donné la force et la volonté  
de continuer mes études.*

*Ma profonde gratitude va à mon promoteur M<sup>r</sup> BECHOUCHE. A.  
pour l'honneur qu'il ma a fait en m'encadrant, pour ses précieux  
conseils, orientations et la confiance qu'il m'a placé.  
Je tiens à remercier, aussi, les Membres du jury, pour avoir accepté  
d'examiner mon travail.*

*Mes remerciements les plus sincères et les plus chaleureux vont  
également à Mr SEDIKI.H chef du département d'Electrotechnique  
d'avoir mis à ma disponibilité le matériel nécessaire pour effectuer mes  
différentes expérimentations.*

*Mes remerciements les plus sincères et les plus chaleureux vont  
également, à mon oncle 'khali LARBI' mon deuxième père pour tous  
ce qui a fait pour moi durant toutes ces longues années, et pour ces  
encouragements.*

## *Dédicaces*

*Je tiens à dédier ce modeste travail tout particulièrement*

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

*A mes frères pour leur soutien.*

*A ma future belle sœur Makari et sa famille.*

*A mes cousins et cousines.*

*A vous, dont le coeur est si plein de sympathies : myma, lyla,ouiza,et les autres.*

*En fin je dédie ce modeste travail à toute personne me connaissant de loin ou de près.*

**HAYAT**

## Nomenclature

Notation utilisées dans le mémoire

symbole	Unité	Désignation
$V_a$	V	Tension aux bornes d'induit
$V_f$	V	Tension aux bornes de l'inducteur
$I_a$	A	Courant à travers l'induit
$I_f$	A	Courant à travers l'inducteur
$R_a$	$\Omega$	Resistance de l'induit
$R_f$	$\Omega$	Resistance de l'inducteur
$L_a$	H	L'inductance de l'induit
$L_f$	H	L'inductance du circuit inducteur
$Z$	$\Omega$	L'impédance
$T_e$	s	Constante de temps électrique de l'induit
$T_m$	s	Constante de temps mécanique de l'induit
$T_f$	s	Constante de temps électrique de l'inducteur
$\Omega$	rd /s	Vitesse de rotation
$M_{fd}$	H	Inductance mutuelle
$J$	$Kg.m^2$	Moment d'inertie
$f$	J.s	Coefficient de frottement
$E$	V	La force électromotrice (f.e.m)
$\Phi$	$W_b$	Le flux d'inducteur
$K_e$	N.m/A	La constante de la force électromotrice
$K_m$	N.m/A	La constante du couple
$C_s$	N.m	Couple de frottement sec
$C_p$	N.m	Couple de pertes
$P_0$	W	Somme des pertes à vide
$T_1$ et $T_2$	s	Constantes de temps du moteur

## Sommaire

NOMENCLATURE	
INTRODUCTION GENERALE.....	01

**CHAPITRE I GENERALITE SUR LA  
MACHINE A COURANT CONTINU**

I.1.Introduction.....	02
I.2. Symboles de la machine à courant continu.....	02
I.3.Constitution .....	02
I.3.1.Partie fixe.....	03
I.3.2. Partie mobile.....	03
I.4.Force électromotrice.....	04
I.5. Couple électromotrice.....	05
I.6. puissance électromotrice.....	06
I.7.Principe de fonctionnement.....	06
I.8.Réaction magnétique de l'induit .....	07
I.9.Pôles de commutation.....	08
I.10.Réversibilité.....	08
I.11.Bilan des puissances.....	09
I.12.Rendement.....	10
I.13.Conclusion.....	10

**CHAPITRE II MODELISATION ET SIMULATION  
DE LA MACHINE A COURANT CONTINU**

II.1.Introduction.....	11
II.2.Hypothèses simplificatrice et convention de signe.....	11
II.2.1.Hypothèses simplificatrices.....	11
II.2.2.Convention de signe.....	12
II.3 .Type de machine à courant continu .....	12
a-Machine à courant continu à excitation séparée.....	12

b-Machine à excitation série.....	13
c-Machine à excitation shunt.....	14
d-Machine à courant continu à aimants permanent.....	15
e-Machine à excitation composée.....	15
II.4.transformées de LAPLACE.....	16
II.5.Schémas blocs.....	17
II.6.Simulation de la machine à courant continu à excitation indépendante.....	17
II.7.Interprétation des résultats.....	22
II.8.Conclusion.....	22

**CHAPITRE III IDENTIFICATION DES**  
**PARAMETERES DE LA MACHINE A**  
**COURANT CONTINU**

III.1. Introduction.....	23
III.2. Méthode classique.....	23
III.2.1. Détermination de la résistance de l'induit.....	23
III.2.2. Détermination de l'inductance de l'induit.....	24
III.2.3. Détermination de constante $K_e$ .....	25
III.2.4. Détermination du coefficient de frottement visqueux.....	26
III.2.5. Détermination de la constante $K_m$ .....	28
III.2.6. Détermination des pertes à vide.....	29
III.2.7.Détermination du moment d'inertie.....	30
III.2.8.Détermination de la résistance de l'inducteur.....	32
III.2.9.Détermination de l'inductance de l'inducteur.....	33
III.3.Identification des paramètres de la machine à courant continu par la méthode de Pask.....	35
III.3.1.Principe de la méthode.....	35
III.3.1.1. Modèle mathématique.....	35
III.3.2. Etude du régime transitoire.....	36
III.3.3. Etude du courant dans l'induit.....	37

III.3.4. Expression des grandeurs intervenant dans la détermination des paramètres de la machine.....	39
III.3.5. Description du montage .....	41
III.3.6. Conclusion.....	47
CONCLUSION GENERALE.....	48
ANNEXES	
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	

## **Introduction générale**

La modélisation et l'identification sont des disciplines fondamentales et indispensables qui précèdent toutes opérations de simulation. Elles permettent d'étudier le comportement d'un système afin d'effectuer ensuite une commande.

La commande et la modélisation ne sont applicables qu'avec des paramètres corrects, c'est donc le rôle du processus de l'identification appliquée aux machines électriques de fournir ces données. Bien que de nombreuses méthodes de mesures permettent d'accéder à certains grandeurs, la plupart des modèles employés en commande font apparaître des constantes qui regroupent plusieurs grandeurs électriques et ne sont donc pas mesurables directement. C'est pourquoi nous avons consacré le chapitre trois aux méthodes d'identification les mieux adoptées.

En électrotechnique, même pour une application en commande, nous préférons utiliser un modèle proche de la réalité, dont les paramètres (résistance, inductance) ont une signification réel [15].

Le travail présenté dans ce mémoire porte en particulier sur l'identification des paramètres de la machine à courant continu, en utilisant deux méthodes. La première est dite classique ; consiste à effectuer des essais classiques sur la machine. La deuxième est dite méthode de Pasek ; celle-ci est basée sur un seul essai en régime transitoire.

Le présent mémoire est organisé comme suit :

- Le premier chapitre portera des généralités sur la machine à courant continu. Ces différentes constitutions et son principe de fonctionnement seront abordés.
- Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation et la simulation de la machine à courant continu. Un démarrage direct est simulé, ensuite, les courbes de la vitesse, couple électromagnétiques et courant d'induit obtenues sont analysées. Un autre essai est effectuée où nous avons appliqué un couple de charge après le démarrage de la machine.
- Le troisième chapitre portera sur l'identification des paramètres de la machine à courant continu en utilisant deux méthodes.

Et enfin, nous terminons notre travail par une conclusion générale et perspective.

## Chapitre I

### Généralités sur la machine à courant continu

#### I.1. Introduction

Les moteurs à courant continu sont des machines qui transforment l'énergie électrique qu'ils reçoivent en énergie mécanique. La construction des moteurs est identique à celle des génératrices, de sorte qu'une machine à courant continu peut se servir indifféremment comme moteur ou comme génératrice. Le moteur à courant continu est l'une des machines les plus utilisées dans beaucoup de secteurs industriels. En principe, cette machine est à vitesse variable. Nous pouvons distinguer, le domaine le plus large est celui de la traction électrique (locomotive, tramways, véhicules électriques en général) [4], [7].

#### I.2. Symboles de la machine à courant continu

Les symboles de la machine à courant continu sont représentés par la figure I.1

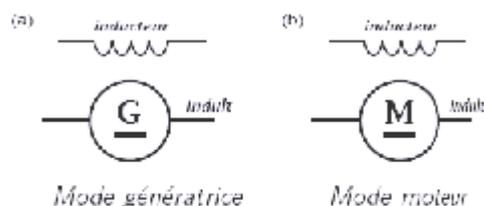


Figure I.1 Symboles de la machine à courant continu

#### I.3. Constitution

La machine à courant continu est réversible, c'est-à-dire que la constitution d'une génératrice est identique à celle d'un moteur.

Elle se compose de deux parties :

- Une partie fixe (stator), appelée inducteur, qui produit le flux magnétique nécessaire à la magnétisation de la machine.
- Une partie mobile (rotor), appelée induit, qui porte les conducteurs soumis au flux.

### I.3.1. Partie fixe (Inducteur)

La partie fixe comporte :

Ø **La carcasse(ou culasse) :** elle sert à :

- Supporter les différentes parties de la machine.
- Refermer le champ magnétique.

Ø **Les pièces polaires :**

Les pièces polaires sont constituées de tôles feuilletées (pour réduire les pertes par courant de Foucault) et permettent de supporter les bobines d'excitation de la machine. Elles permettent donc de produire un champ d'induction [4].

Ø **L'enroulement d'excitation :**

Il est monté sur les pièces polaires et l'ensemble forme un électro-aimant. Lorsque l'enroulement est parcouru par un courant, il produit un champ magnétique.

### 1.3.2. Partie mobile (Induit)

L'induit entre les pièces polaires. Il se compose de l'axe, du noyau, des enroulements et du collecteur. Sa structure est un noyau de fer feuilleté pour réduire les pertes par courant Foucault.

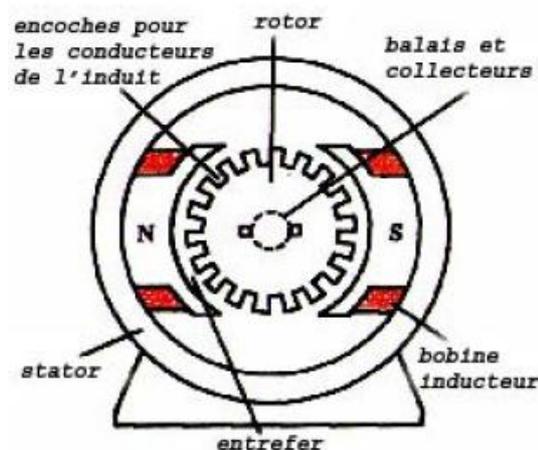


Figure I.2 Constitution d'une machine à courant continu [1].

**Ø Le collecteur :**

Il se compose de lames de cuivre isolées les une des autres et de l'axe par du mica. Les extrémités des lames comportent de petites encoches auxquelles sont soudées les spires de l'induit.

Pour expliquer le rôle du collecteur, nous allons considérer que la machine à courant continu travaille en mode générateur. Le but de celle-ci est de produire une tension. Donc un courant unidirectionnel dans la charge qui est connectée à ses bornes. Cependant la rotation du rotor dans le champ d'induction nous permet d'obtenir une force électromotrice alternative. Il faut donc réaliser un redresseur de la tension. C'est le rôle du collecteur [4][5][6].

**Ø Les balais**

Les balais frottent contre le collecteur et permettent de récolter la force électromotrice induite. Ils sont en carbone.

**I.4. Force électromotrice**

Une spire soumise à l'action d'un champ magnétique variable, développe à ces bornes une force électromotrice (f.e.m) selon la loi de Faraday [7]

$$e = \frac{df}{dt} \quad (\text{I-1})$$

Ce phénomène est d'une importance capitale car il se trouve à la base du fonctionnement des moteurs comme l'indique la formule (I-2) suivante :

$$E = \frac{p}{2pa} Nf\Omega \quad (\text{I-2})$$

Avec :

P : le nombre de paire de pôles

a : nombre de paire de voie parallèle

N : le nombre de conducteurs

$\Phi$  : flux à travers les spires en Weber [wb]

$\Omega$  : vitesse de rotation en [rad/s]

**Conclusion et synthèse :**

La f.e.m. totale de la machine à courant continu (MCC) dépend :

- Des paramètres de construction, purement technologiques (p, a et N).
- Du paramètre de fonctionnement interne, le flux sous un pôle  $\Phi$ .
- Du paramètre de fonctionnement externe, la vitesse de rotation  $\Omega$ .

On exprime alors la f.e.m. de la MCC de manière plus condensée par la relation :

$$E = K_e \Omega \quad (\text{I-3})$$

où  $K_e$  est la constante de f.e.m. de la MCC.

**I.5. Couple électromagnétique**

Chaque conducteur est le siège d'un effort créant un couple sur l'arbre. Leur somme génère le couple électromagnétique  $C_{em}$  [7].

L'expression du couple électromagnétique est donnée par :

$$C_{em} = \frac{p}{2pa} N f I \quad (\text{I-4})$$

Suivant la relation issue de la loi de Laplace, le couple dépend du flux sous un pôle ( $\Phi$  en Wb), du courant total d'induit (I en A) et du nombre de conducteurs (N).

**Conclusion et synthèse :**

Le couple délivré par la machine dépend :

- Des paramètres de construction, purement technologiques (p, a et N).
- Du paramètre de fonctionnement interne, le flux sous un pôle  $\Phi$ .
- Du paramètre de fonctionnement externe, le courant d'induit I.

Nous exprimons alors le couple sur l'arbre de la MCC de manière plus condensée par la relation :

$$C_{em} = K_m I \quad (\text{I-5})$$

où  $K_m$  est la constante de couple de la MCC [5], [12].

**Remarque**

L'examen des deux constantes  $K_e$  et  $K_m$  montre qu'elles sont égales.

## I.6. Puissance électromagnétique

La puissance électromagnétique que l'inducteur transmet au rotor par l'action du couple électromagnétique  $C_{em}$  est donnée par :

$$P_{em}=EI \quad (I-6)$$

## I.7. Principe de fonctionnement

La machine à courant continu, comme toutes les autres machines électriques, peut fonctionner en moteur ou en générateur.

- **Fonctionnement générateur**

Dans le cadre d'une génératrice à excitation indépendante.

Le rôle d'un générateur est de fournir de l'électricité sous tension continue variable. Pour cela, il faut lui fournir de l'énergie mécanique sous forme d'un couple qui entraîne la rotation de la machine et également de l'électricité pour alimenter l'excitation, qui crée le champ magnétique. Comme l'enroulement d'excitation est fixe (situé au stator) et est parcouru par un courant continu, le champ qu'il crée est de direction constante, l'axe des pôles d'excitation.

De plus, le couple extérieur fait tourner le rotor.

L'interaction d'un champ fixe et d'un conducteur mobile provoque l'apparition d'une tension induite ( $E$ ) aux bornes de l'enroulement d'induit. Cette force électromotrice (f.e.m) est recueillie et redressée par les balais qui frottent sur le collecteur.

Selon l'amplitude du champ créé par l'excitation (et donc selon la valeur du courant d'excitation), la tension induite sera d'amplitude variable [4], [7].

- **Fonctionnement moteur**

Pour comprendre son principe de fonctionnement, nous allons supposer que l'inducteur et l'induit sont électriquement séparés. Nous sommes alors dans le cas d'un moteur à excitation indépendante.

On alimente l'excitation du moteur. Celui-ci crée un champ d'induction de direction constante. De plus, on fait circuler un courant dans le rotor en alimentant l'enroulement.

En vertu du principe de Laplace, l'interaction d'un courant avec un champ qui lui est perpendiculaire crée un couple sur les enroulements du rotor. Ce couple entraîne la rotation du moteur comme l'indique la formule suivante [4], [7] :

$$\vec{F} = I \cdot d\vec{l} \wedge \vec{B} \quad (\text{I-7})$$

Avec :

F : force de Laplace.

I : le courant qui parcourt les conducteurs.

dl : élément de longueur du conducteur.

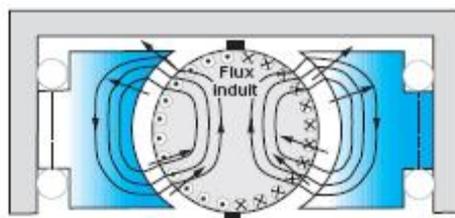
B : le champ magnétique.

### I.8. Réaction magnétique de l'induit

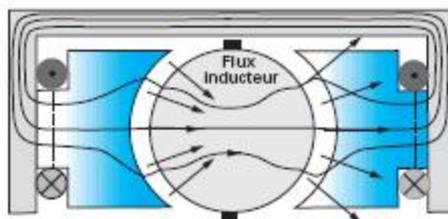
Que ce soit en fonctionnement moteur ou en fonctionnement génératrice, deux champs sont produits à l'intérieur de la machine à courant continu. Le champ total produit dans ce type de machine est dû à la superposition de deux champs.

La superposition des deux champs implique une déformation de la répartition des lignes de force dans la machine. Cette modification implique aussi une modification de l'emplacement de l'axe neutre de la machine comme indiqué sur la figure ci-dessous (Figures I.3, I.4 et I.5).

Cette modification de l'emplacement de l'axe neutre de la machine peut conduire à un mauvais fonctionnement de la machine. Des étincelles peuvent apparaître au niveau du collecteur et produire une destruction de celui-ci. C'est le problème de la commutation [4], [6].



**Figure I.3** Induit alimenté seul [6].



**Figure I.4** Inducteur alimenté seul [6].

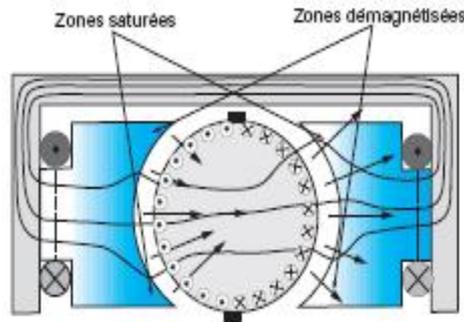


Figure I.5 Réactions magnétiques de l'induit [6].

### I.9. Pôles de commutation

Lors de l'étude de la réaction d'induit, nous avons vu qu'il y avait une déformation de la répartition du champ d'induction dans la machine. Cette modification de la répartition du champ d'induction dans la machine implique obligatoirement un déplacement de l'axe neutre de la machine. Cependant les balais ne changent pas de place et de ce fait il y a encore un courant qui circule à l'intérieur des enroulements quand les balais mettent en court-circuit une partie des lames du collecteur. Il y a donc des étincelles qui se produisent et qui risquent de détruire les lames du collecteur. Pour éviter ces étincelles et la destruction des lames du collecteur, on utilise des petits pôles auxiliaires, appelés "pôles de commutation", entre les pièces polaires. Ils sont insérés en série avec l'induit et créent un champ qui s'oppose à la réaction d'induit [4], [6].

### I.10. Réversibilité

Moteur et génératrice sont une seule et même machine : par construction, elle est réversible. La loi d'Ohm s'écrit selon deux conventions :

La convention récepteur (moteur) et convention générateur (génératrice) sont représentées sur la figure I.6.

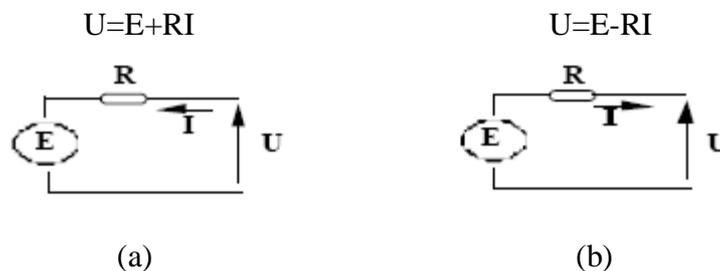


Figure I.6 Convention moteur (a) et génératrice (b) [2].

$E$  : la force électromotrice,  $R_a$  est la résistance interne de l'induit.

### I.11. Bilan des puissances

Nous avons reporté sur la figure I.7 le bilan des puissances et des pertes d'un moteur à courant continu.

La puissance électrique totale amenée au moteur et venant du réseau est égale à la tension aux bornes du moteur,  $I_a$  le courant dans l'induit dans l'induit et  $i_{ex}$  le courant d'excitation.

Une partie de cette puissance est dépensée pour compenser les pertes dans le circuit d'excitation  $P_{ex}$ , et les pertes dans le circuit de l'induit. Le reste de la puissance est transformée en puissance électromagnétique, qui à son tour est transformée en puissance mécanique totale  $P_{mec.}$ . la puissance mécanique utile fournie par le moteur est inférieure à la puissance mécanique totale vu les pertes mécaniques  $P_m$ ,  $P_f$  et les pertes fer dans le rotor.

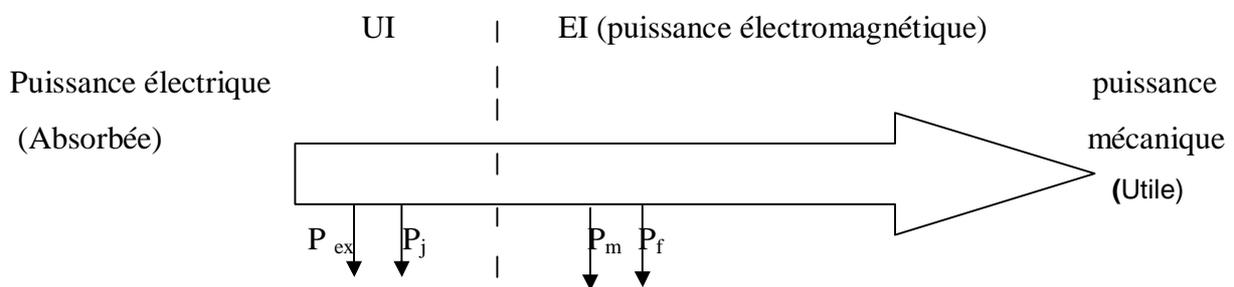


Figure I.7 Écoulement de puissance.

Avec :

$P_{ex}$  : pertes par excitation

$P_j$  : pertes joule

$P_m$  : pertes mécaniques

$P_f$  : pertes fer

#### Remarque :

En génératrice, le sens d'écoulement de la puissance est l'inverse de celui du régime moteur.

**I.12. Rendement**

Le rendement du moteur est égal à la caution de la puissance utile à la puissance absorbée. Le rendement d'un moteur à courant continu varie de 75% à 95%. Il est d'autant meilleur que le moteur est de forte puissance [4].

**I.13. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous nous sommes familiarisés avec les constitutions de la machine à courant continu. Dans le chapitre suivant, nous nous intéresserons au comportement de la machine à courant continu, pour cela il est important de connaître les relations qui existent entre les grandeurs d'entrées et les grandeurs de sortie. C'est le rôle de la modélisation.

## **Chapitre II**

### **Modélisation et simulation de la machine à courant continu**

#### **II.1. Introduction**

Modéliser consiste à créer des modèles mathématiques proches de la réalité. Ces Modèles sont des équations mathématiques. Une équation, en mathématiques, est un problème, consistant à trouver des entités (les solutions de l'équation). Les principales équations décrivant le fonctionnement du moteur à courant continu sont les équations électriques, mécaniques et magnétiques [14].

#### **II.2. Hypothèses simplificatrice et convention de signes**

##### **II.2.1. Hypothèses simplificatrices**

- On suppose que le circuit magnétique est non saturé (ce qui permet de considérer le flux comme fonction linéaire des courants).
- On suppose que le circuit magnétique est complètement feuilleté au stator et au rotor (seul les enroulements induit et inducteur sont parcourus par des courants).
- La densité de courant peut être considérée comme uniforme dans la section des conducteurs élémentaires(en néglige l'effet de peau).
- On suppose que les inductances propres sont des constantes et que les mutuelles inductances sont fonction sinusoïdale de l'angle que font leurs axes magnétiques.

$$M_{ij}=M_{ij} \cos(\theta_j-\theta_i) \quad (II-1)$$

$M_{ij}$  : mutuelle inductance créée par l'enroulement j dans l'enroulement i.

$M_{ij}$  : maximum de la mutuelle inductance entre l'enroulement i et l'enroulement j

$\theta_j$  : angle repérant l'axe magnétique de l'enroulement i.

$\theta_i$  : angle repérant l'axe magnétique de l'enroulement j.

- On néglige la réaction magnétique de l'induit [8].

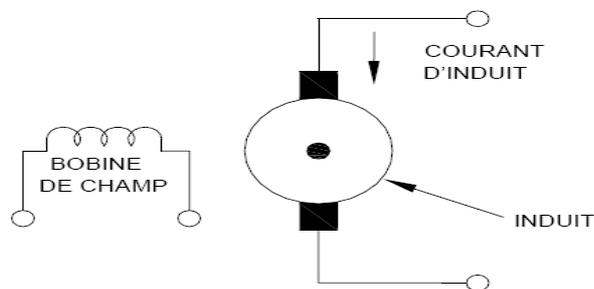
**II.2.2. Convention de signe**

- Un courant positif créé à travers son propre enroulement un flux positif.
- Une f.e.m positive fait circuler un courant positif.
- L'inducteur et l'induit sont considérés comme récepteurs (fonctionnement moteur) [11].

**II. 3. Types de moteurs à courant continu**

**a. Moteur à courant continu à excitation séparée**

Les deux enroulements inducteur et induit sont alimentés par deux sources de tension continu différentes [10].



**Figure II.2** Moteur à excitation séparée.[3]

**Ø Equation régissant la machine à courant continu à excitation indépendante**

• **Équations électriques**

$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + M_{fd} \omega_r i_f \tag{II-2}$$

$$V_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \tag{II-3}$$

• **Équations mécaniques**

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\omega_r}{dt} + f \omega_r \tag{II-4}$$

$$C_{em} = M_{fd} i_f i_a \tag{II-5}$$

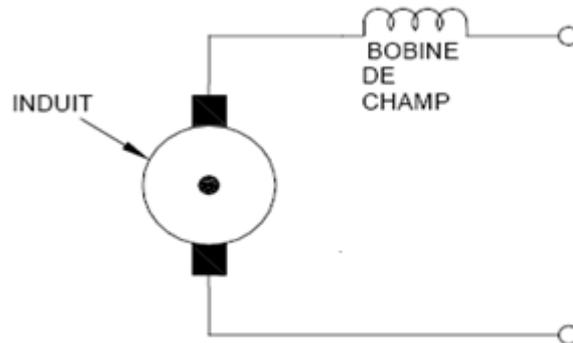
• **Équations magnétiques**

$$\begin{aligned} j_f &= L_f i_f \\ j_a &= L_a i_a \end{aligned} \tag{II-6}$$

$$j_d = M_{fd} i_f$$

**b. Moteur à excitation série**

Les deux enroulements induit et inducteur sont mis en série [9]



**Figure II. 3** Machine à excitation série [3].

**Ø Equation régissant le moteur à courant continu à excitation série**

• **Équation électrique**

$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + M_{fd} \omega_r i_f \tag{II-7}$$

$$V_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \tag{II-8}$$

$$i_f = i_a \tag{II-9}$$

• **Équation mécanique**

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\omega_r}{dt} + f \omega_r \tag{II-10}$$

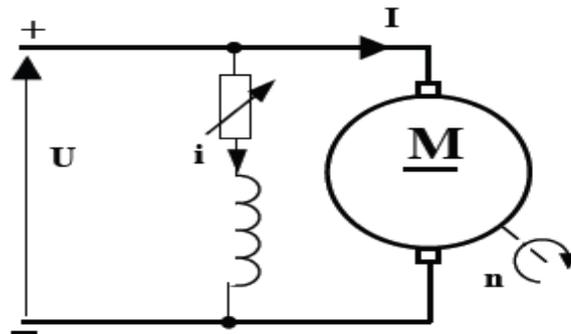
$$C_{em} = M_{fd} i_f i_a \tag{II-11}$$

• **Équation magnétique**

$$\begin{aligned} J_f &= L_f i_f \\ J_a &= L_a i_a \\ J_d &= M_{fd} i_f \end{aligned} \tag{II-12}$$

**c. Moteur à excitation parallèle (shunt)**

Les enroulements induit et inducteur sont mis en parallèle [9].



**Figure II.4** Machine à excitation parallèle [3].

• **Équations électriques**

$$v_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + M_{fd} w_r i_f \quad (\text{II-13})$$

$$v_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \quad (\text{II-14})$$

$$v_f = v_a$$

• **Équations mécaniques**

$$C_{em} - C_r = J \frac{dw_r}{dt} + f w_r \quad (\text{II-15})$$

$$C_{em} = M_{fd} i_f i_a \quad (\text{II-16})$$

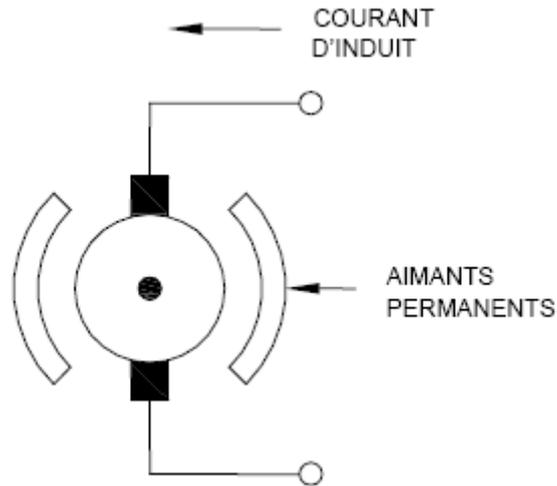
• **Équations magnétiques**

$$\begin{aligned} j_f &= L_f i_f \\ j_a &= L_a i_a \end{aligned} \quad (\text{II-17})$$

$$j_d = M_{fd} i_f$$

**d. Moteur à courant continu à aimants permanents**

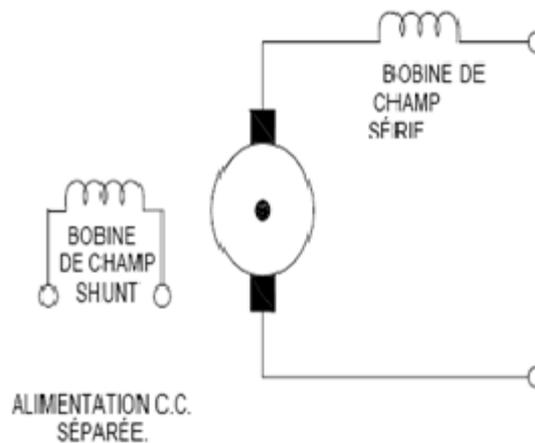
Dans ce type de moteur, on emploie non plus des enroulements inducteurs mais des aimants permanents pour engendrer le champ magnétique du stator (Figure II.5) [9].



**Figure II.5** Moteur à courant continu à aimant permanent [3].

**e. Moteur à excitation composée (compound)**

Le moteur à courant continu à excitation compound comprend à la fois un enroulement inducteur série et un enroulement inducteur shunt qui sont en général raccordés de façon à ce que leurs champs s'additionnent (Figure II.6) [4], [9].



**Figure II.6** Moteur à excitation compound [3].

Dans les applications usuelles, c'est essentiellement la machine à excitation séparée qui est utilisée .A priori, nous raisonnerons donc en ces termes dans tout ce qui suit [3], [9].

**II.4. Transformées de Laplace**

Les transformées de Laplace des équations sont les suivantes

- **Équations électriques**

$$V_a(p) = R_a I_a(p) + pL_a I_a(p) + M_{fd} \Omega(p) I_f$$

$$V_f(p) = R_f I_f(p) + pL_f I_f(p)$$

- **Équations mécaniques**

$$C_{em}(p) - C_r(p) = pJ\Omega(p) + f\Omega(p)$$

$$C_{em}(p) = M_{fd} I_f(p) I_a(p)$$

- **Equations magnétiques**

$$j_f(p) = L_f i_f(p)$$

$$j_a(p) = L_a i_a(p)$$

$$j_d(p) = M_{fd} i_f(p)$$

La plaque signalétique de la machine à simuler est citée dans le tableau I, cette machine à fait déjà l’objet d’étude d’identification [13].

**Tableau I :** plaque signalétique

Tension nominale $U_n$	190V
courant nominal $I_n$	14.2A
puissance nominale $p_n$	2.7KW
Vitesse nominale $\omega_n$	1500tr/min

- **Paramètres de la machine à simuler :**

Les paramètres identifiés sont données dans le tableau II suivant :

**Tableau II :** paramètres de la machine à simuler

Resistance de l’induit $R_a$	2.7Ω
Inductance de l’induit $L_a$	0.037H
Gain $K$	1.5
Coefficient de frottement $f$	0.0047 J.s
Moment d’inertie $J$	0.053 Kg.m <sup>2</sup>

### **II.5. Schémas blocs**

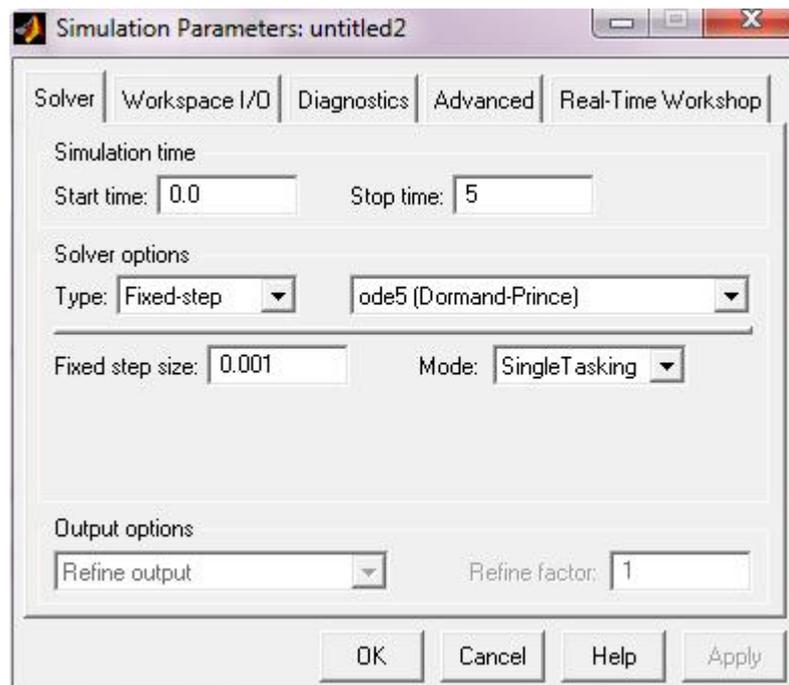
Les transformées de Laplace obtenues nous permettent de modéliser le moteur sous forme de schéma bloc ou schéma fonctionnel. Ces schémas présentent les fonctions de transfert suivant les paramètres d'entrée et de sortie considérés.

Si on considère comme grandeur d'entrée la tension appliquée aux bornes de l'induit et comme grandeur de sortie la vitesse du moteur, nous obtenons le schéma bloc tension – vitesse. Ce dernier nous permet de voir l'évolution de la vitesse avec la tension.

### **II.6. Simulation de la machine à courant continu à excitation indépendante**

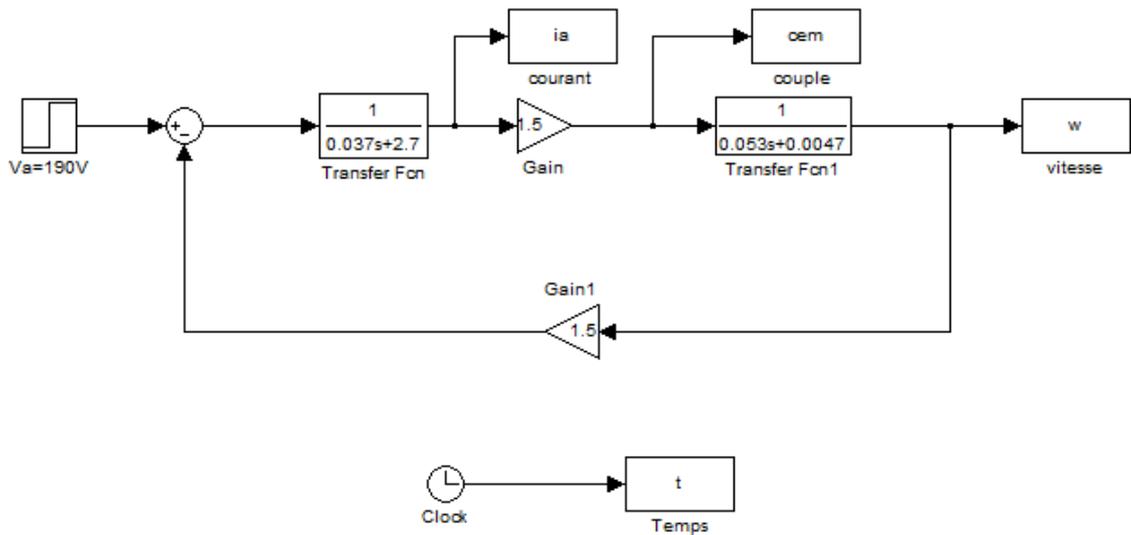
L'ensemble de ce qui précède nous permet de réaliser le modèle simulink (c'est à dire le modèle utilisé en simulation dans MATLAB/Simulink) de la machine à courant continu comme Suit :

- **Les paramètres de simulation**



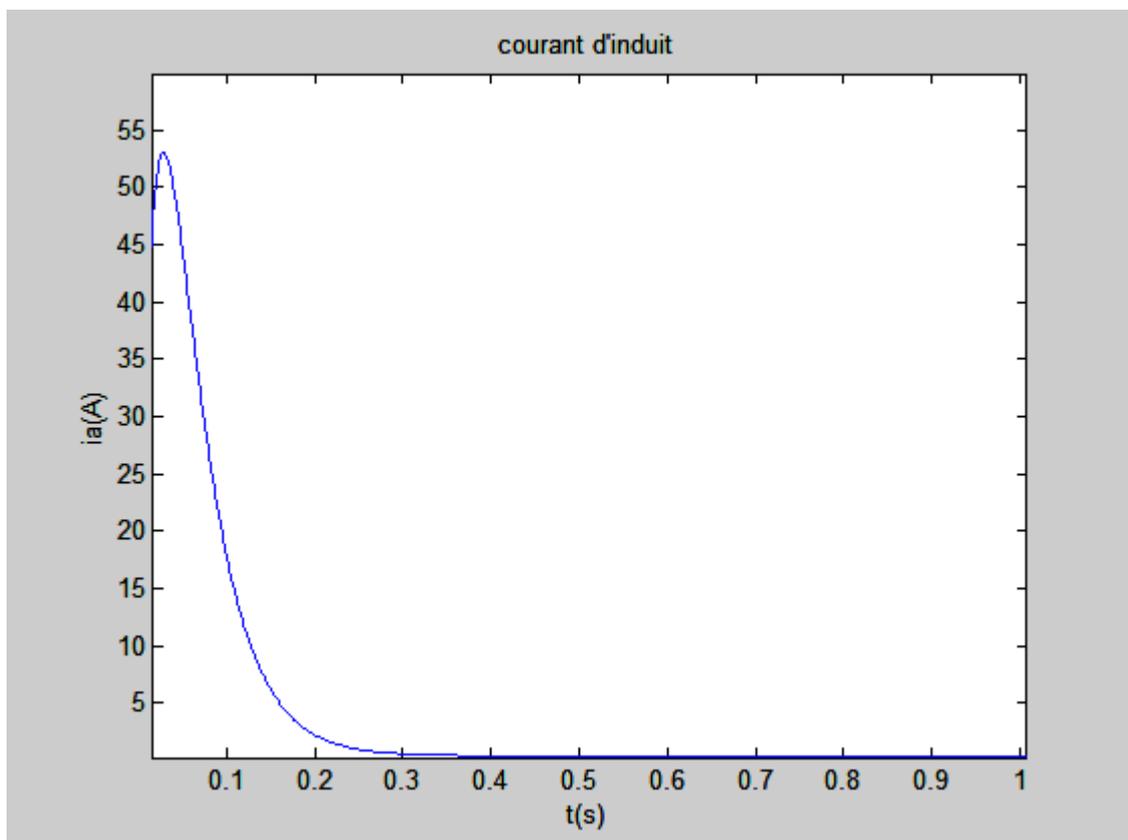
**Figure II.7** Paramètres de simulation.

**Schéma bloc tension-vitesse du moteur fonctionnant à vide**

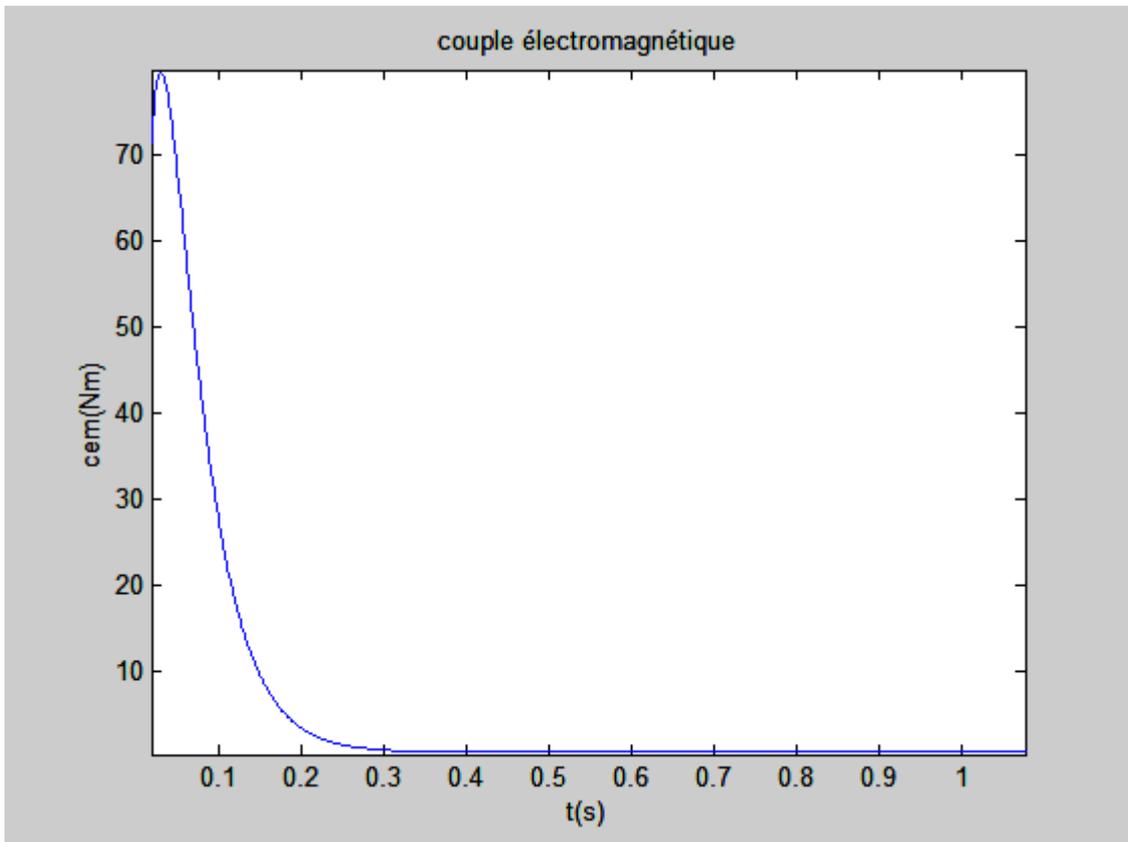


**Figure II.8** Schéma bloc sous MATLAB/Simulink du moteur fonctionnant à vide.

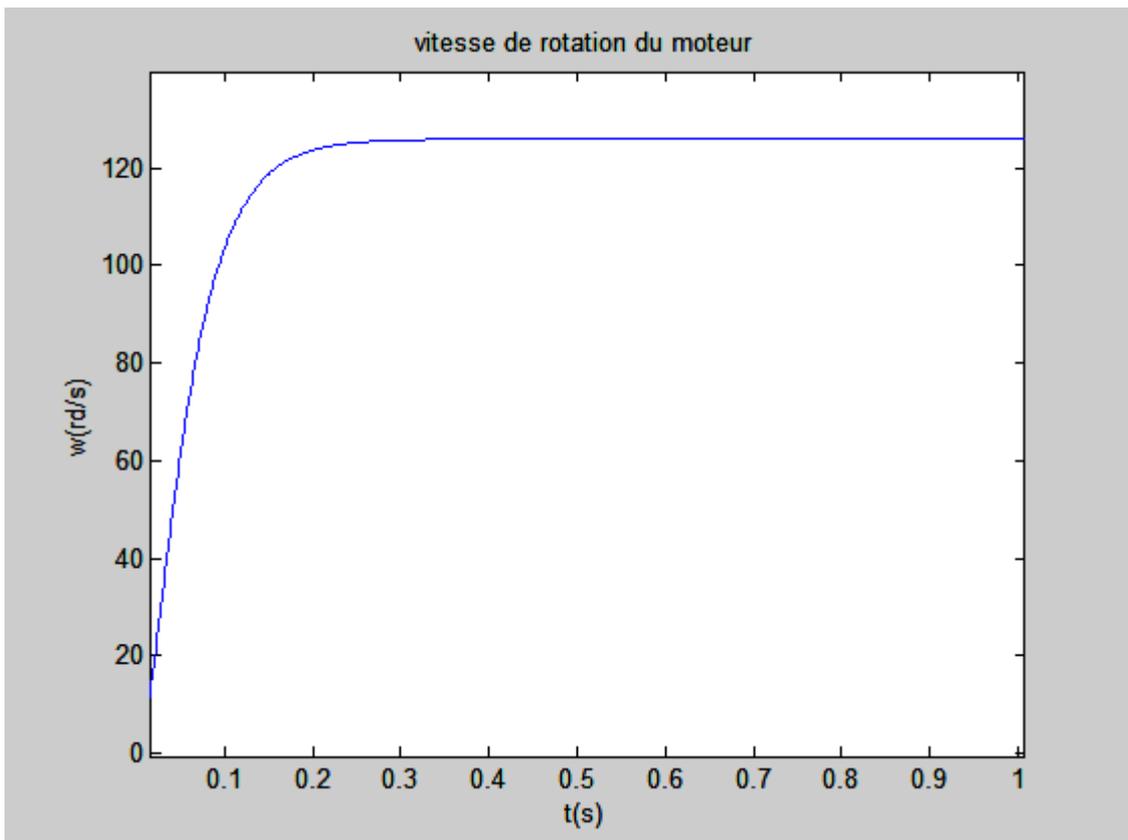
Après simulation, nous obtenons les résultats suivants :



**Figure II.9** Courant d'induit.

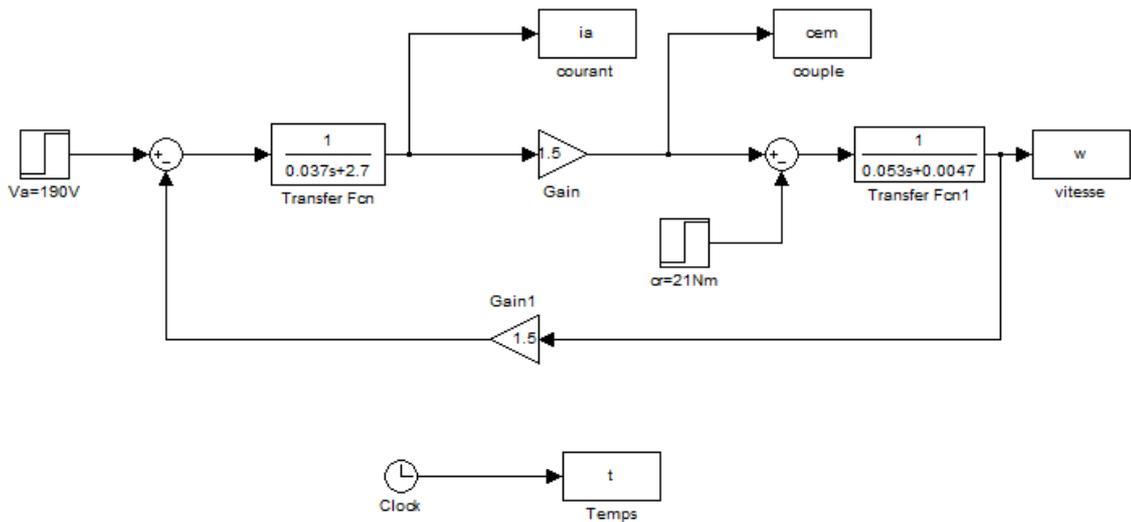


**Figure II.10** Couple électromagnétique.



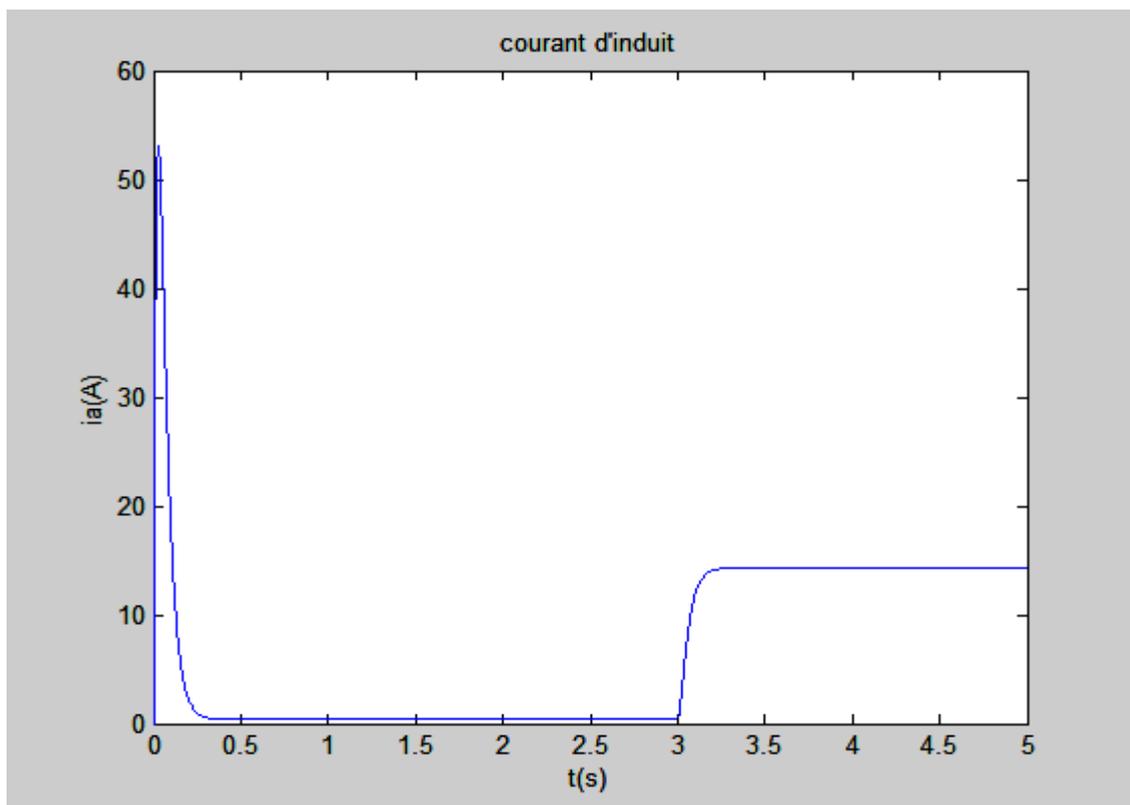
**Figure II.11** Vitesse de rotation du moteur.

Schéma bloc tension-vitesse du moteur avec application d'un couple de charge à  $t=3s$ .

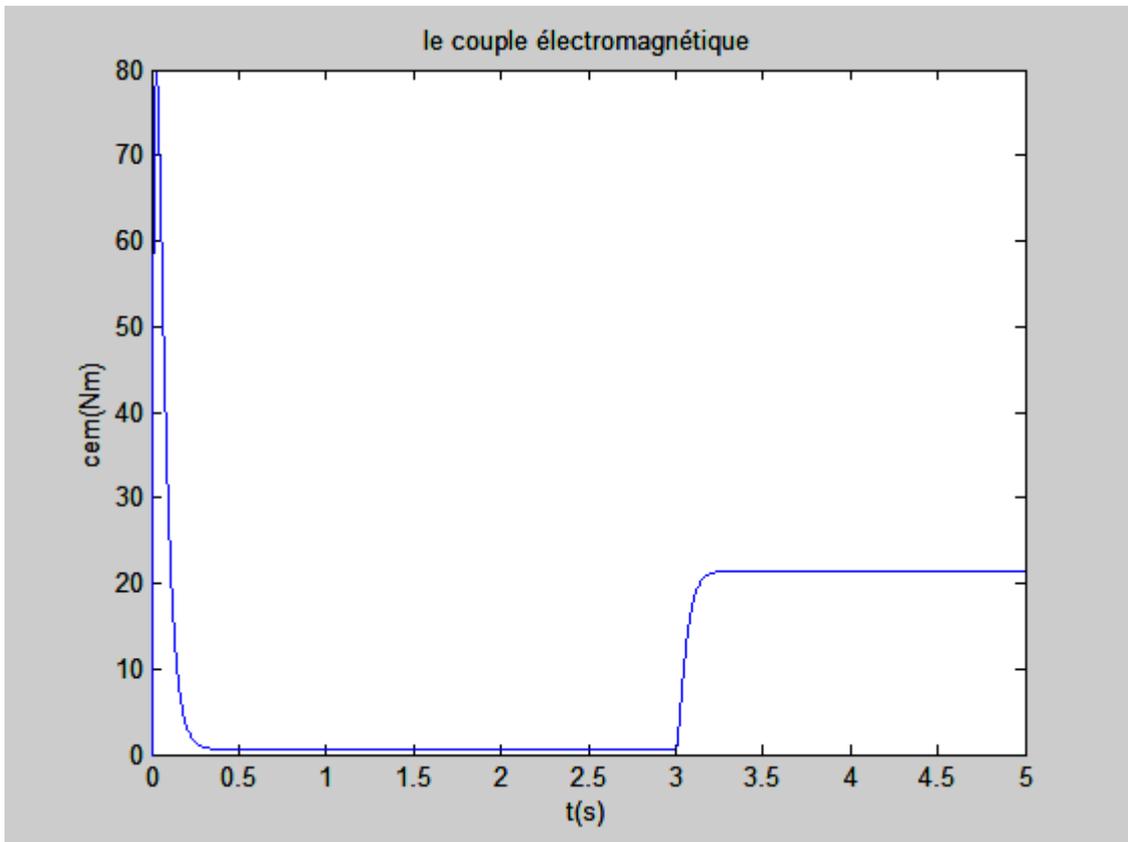


**Figure II.12** Schéma bloc sous MATLAB/Simulink du moteur fonctionnant en charge.

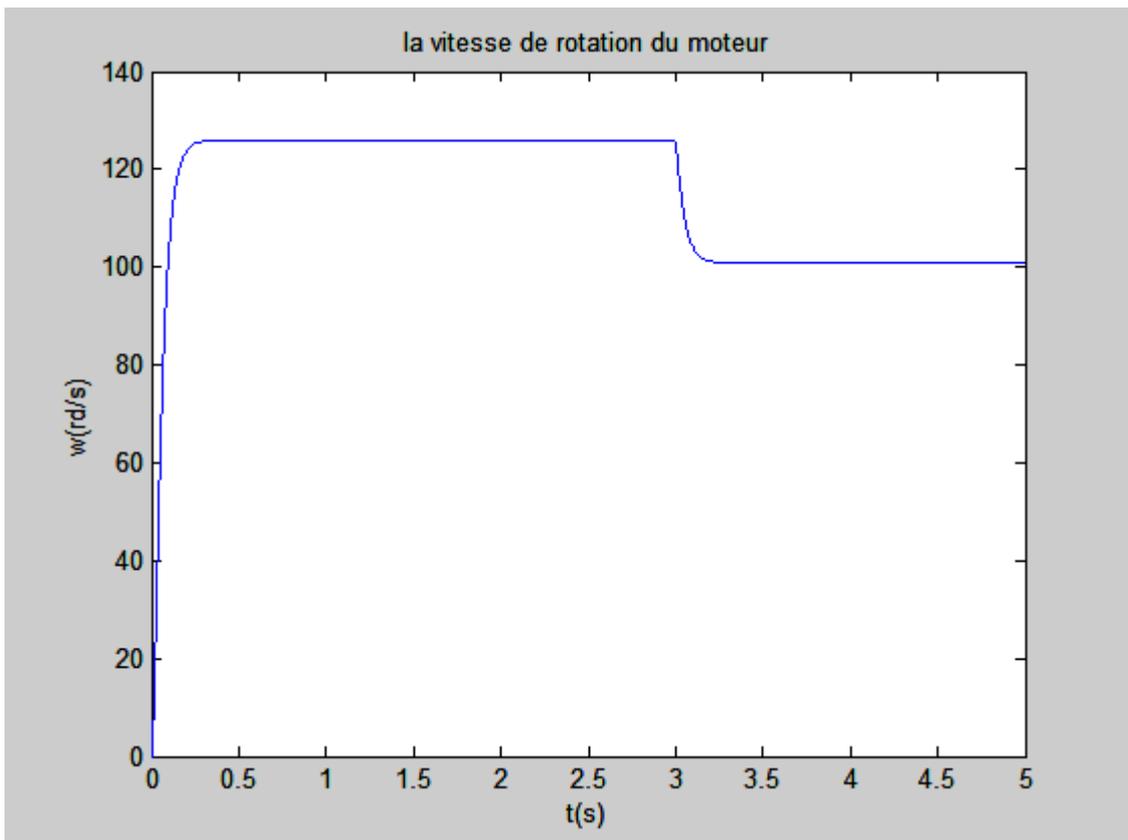
Après simulation, nous obtenons les résultats suivants :



**Figure II.13** Courant d'induit.



**Figure II.14** Couple électromagnétique.



**Figure II.15** Vitesse de rotation du moteur.

### **II.7. Interprétation des résultats**

Ces graphes représentent la variation du courant, le couple électromagnétique et la vitesse du moteur en fonction du temps. Lorsque le moteur est au repos, la vitesse est

nulle, donc la force la f.c.e.m  $E$  est nulle, ainsi l'équation du courant devient  $I_a = \frac{V_a}{R_a}$

C'est-à-dire au démarrage le courant est important car la résistance de l'induit est très faible. la grande force agissant alors sur les conducteurs produit un couple de démarrage puissant, provoquant une accélération rapide de l'induit.

A mesure que la vitesse croît, la f.c.e.m augmente et la valeur de la  $(V_a - E)$  diminue. On en conclut que le courant  $I_a$  diminue avec l'augmentation de la vitesse.

Cependant, pour continuer à tourner, le moteur doit toujours produire un couple suffisant pour vaincre le frottement. Par conséquent, la f.c.e.m doit être quelque peu inférieure à la tension de la source pour permettre le passage du faible courant nécessaire à la production de ce couple.

Lorsqu'une charge est appliquée à l'arbre du moteur tournant à vide, le faible courant à vide ne peut produire un couple suffisant pour entraîner cette charge, et le moteur ralentit.

La force contre électromotrice diminue alors, ce qui provoque le passage d'un courant plus intense dans l'induit. Le courant augmente jusqu'à ce qu'il produit un couple suffisant pour supporter la charge à entraîner [4].

### **II.8. Conclusion**

Après avoir abordé dans ce chapitre la modélisation de la machine à courant continu, ainsi que la simulation du courant, le couple électromagnétique et la vitesse de rotation du moteur à courant continu, l'identification des paramètres de la machine fera l'objet d'étude du chapitre qui suit. On présente quelques méthodes d'identification, nous obtenons le plus souvent les paramètres du modèle du système par des essais de laboratoire.

## **Chapitre III**

### **Identification des paramètres de la machine à courant continu**

#### **III.1. Introduction**

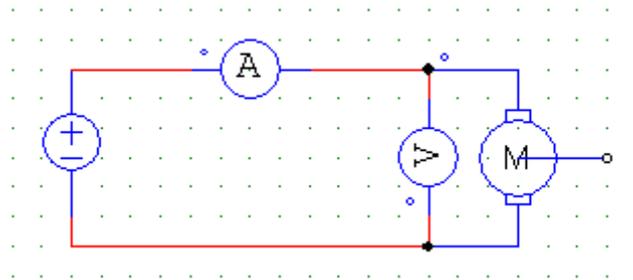
L'identification des paramètres de la machine à courant continu consiste faire des essais sur celle-ci. Les paramètres à identifier sont la résistance de l'induit  $R_a$ , l'inductance de l'induit  $L_a$ , la constante du couple électromagnétique la force électromotrice  $K_m$ ,  $K_e$ , le coefficient de frottement  $f$ , et du moment d'inertie  $J$ . Pour y parvenir, nous avons opté pour deux méthodes ; l'une dite méthode classique, et l'autre dite méthode de Pasek.

#### **III.2. Méthode classique**

Des essais mécaniques et électriques ont été réalisés sur la machine, afin de déterminer les différents paramètres. Les caractéristiques de la machine identifiée sont données dans l'annexe.

##### **III.2.1. Détermination de la résistance d'induit $R_a$**

Afin de déterminer la résistance d'induit, nous utilisons la méthode voltampérométrique, pour cela nous mesurons le courant et la tension d'induit, sans l'excitation de la machine, comme ceci est montrée par le schéma suivant :



**Figure III.1** Détermination de la résistance de l'induit  $R_a$ .

Les résultats obtenus sont montrés dans le tableau I

Nous pouvons donc déterminer la résistance d'induit grâce à la loi d'ohm :

$$V_a = R_a I_a \quad (III-1)$$

**Tableau I**

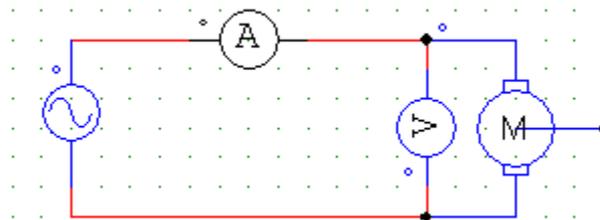
$V_a$ mesurée (V)	2.20	3.15	5.35	6.50	8.10	9.45	11	12.50	5.25
$I_a$ mesuré (A)	1.35	1.85	3.30	4.10	5.10	6.00	6.85	7.70	3.25
$R_a$ calculée ( $\Omega$ )	1.62	1.70	1.62	1.60	1.58	1.57	1.60	1.62	1.61

La valeur moyenne de la résistance  $R_a$  d'induit est :

$$R_a = 1.61 \Omega$$

### III.2.2. Détermination de l'inductance de l'induit $L_a$

Nous alimentons l'induit du moteur à courant continu par une tension alternative  $V_a$ . pour différentes valeurs de  $V_a$  et de  $I_a$ , nous déduisons la valeur de l'inductance à travers le calcul de l'impédance moyenne  $Z_a$  de l'induit. Le montage proposé est le suivant :



**Figure III.2** Détermination de l'inductance de l'induit  $L_a$

**Tableau II**

$V_a$ mesuré (V)	3.20	4.55	6.70	8.10	9.2	12.00	19.00	20.95
$I_a$ mesuré (A)	1.40	1.90	2.85	3.45	3.95	5.05	7.90	8.40
$Z_a$ calculé ( $\Omega$ )	2.28	2.39	2.35	2.34	2.32	2.37	2.40	2.49

La valeur de l'impédance moyenne est :  $Z_a = 2.36 \Omega$

Pour le calcul de l'inductance nous suivons les étapes suivantes :

L'expression de l'impédance est donnée par :

$$Z_a = \frac{V_a}{I_a} \tag{III-2}$$

Et

$$Z_a = \left( R_a^2 + (L_a \omega_s)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \tag{III-3}$$

Avec :  $\omega_s = 2\pi f$  ;  $f = 50\text{Hz}$

Et enfin, nous déduisons l'inductance

$$L_a = \frac{1}{2\pi f} \left[ \left( Z_a^2 - R_a^2 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \tag{III-4}$$

**$L_a = 0.0055 \text{ H}$**

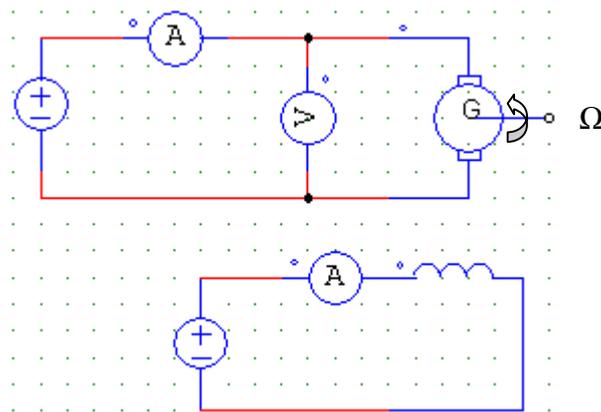
Maintenant, que nous avons la valeur de la résistance et de l'inductance, nous pouvons déduire la constante de temps électrique comme suit :

$$T_e = \frac{L_a}{R_a} = 0.0033\text{s}$$

### III.2.3. Détermination de la constante $K_e$

Sachant que la génératrice ne débite aucun courant induit, nous fixons le courant d'excitation à sa valeur nominale. Nous varions la tension de l'induit du moteur d'entraînement et nous notons les différentes valeurs de la f.c.e.m et de la vitesse.

Le montage est le suivant :



**Figure III.3** Détermination de la constante de la force électromotrice  $K_e$

### Chapitre III Identification des paramètres de la machine à courant continu

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau suivant :

**Tableau III**

$E_{\text{mesurée}}(\text{V})$	<b>30</b>	<b>41</b>	<b>53</b>	<b>60</b>	<b>69</b>	<b>76</b>	<b>82</b>	<b>95</b>	<b>100</b>
$\Omega_{\text{mesurée}}(\text{rd/s})$	<b>20.82</b>	<b>28.46</b>	<b>37.15</b>	<b>42.49</b>	<b>49.19</b>	<b>54.32</b>	<b>58.82</b>	<b>68.55</b>	<b>71.69</b>
$K_e = E_{\text{mesurée}} / \Omega_{\text{mesurée}}$	<b>1.44</b>	<b>1.44</b>	<b>1.42</b>	<b>1.41</b>	<b>1.40</b>	<b>1.40</b>	<b>1.39</b>	<b>1.38</b>	<b>1.39</b>

$E_{\text{mesurée}}(\text{V})$	<b>125</b>	<b>150</b>	<b>165</b>	<b>175</b>	<b>195</b>	<b>200</b>	<b>210</b>	<b>215</b>	<b>225</b>
$\Omega_{\text{mesurée}}(\text{rd/s})$	<b>88.96</b>	<b>107.28</b>	<b>118.48</b>	<b>123.71</b>	<b>139.62</b>	<b>142.97</b>	<b>149.35</b>	<b>151.34</b>	<b>158.88</b>
$K_e = E_{\text{mesurée}} / \Omega_{\text{mesurée}}$	<b>1.40</b>	<b>1.39</b>	<b>1.39</b>	<b>1.41</b>	<b>1.39</b>	<b>1.39</b>	<b>1.40</b>	<b>1.42</b>	<b>1.41</b>

La valeur moyenne de la constante  $K_e$  est :

$$K_e = 1.4 \text{ V/rd.s}$$

#### **III.2.4. Détermination du coefficient de frottement visqueux $f$**

L'équation mécanique de la machine s'écrit

$$C_m = J \frac{dw}{dt} + C_p \quad (\text{III-5})$$

Au régime permanent, nous avons :

$$J \frac{dw}{dt} = 0 \quad (\text{III-6})$$

Donc le couple moteur s'écrit :

$$C_m = C_p \quad (\text{III-7})$$

Tels que :

$$C_p = (C_s + f\Omega) \quad (\text{III-8})$$

Avec :

$C_s$  : le couple de frottement sec

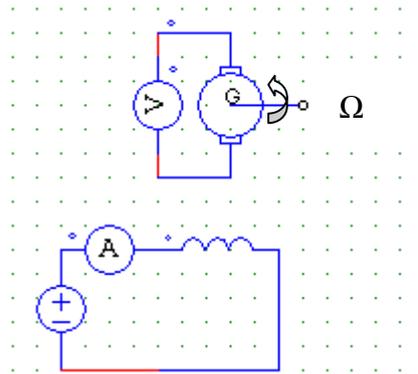
$f\Omega$  : le couple de frottement visqueux

### Chapitre III Identification des paramètres de la machine à courant continu

Dans cette partie, nous allons réaliser une expérience qui va nous permettre de mesurer le couple de perte à l'aide d'un appareil piézo-électrique. À vitesse nulle nous obtenons le couple de frottement sec  $C_s=2.25\text{Nm}$ .

Nous excitions le moteur d'entraînement et la génératrice à leur courant d'excitations nominaux qui sont respectivement 1A, 1.33A. Sachant que la génératrice fonctionne à vide, en faisant varier la vitesse de rotation du moteur, nous obtenons les valeurs du couple de perte  $C_p$ .

Le schéma du montage est donné par la figure suivante :



**Figure III.3** Détermination du coefficient de frottement visqueux  $f$

Les résultats obtenus sont les suivants :

**Tableau VI**

$\Omega_{\text{mesuré}}$ (rd/s)	<b>34.59</b>	<b>48.46</b>	<b>60.96</b>	<b>82.79</b>	<b>99.64</b>	<b>113.77</b>	<b>130.31</b>	<b>137.11</b>	<b>150.09</b>	<b>157.94</b>
$C_p$ (Nm)	<b>3.3</b>	<b>3.4</b>	<b>3.45</b>	<b>3.5</b>	<b>3.58</b>	<b>3.6</b>	<b>3.65</b>	<b>3.7</b>	<b>3.75</b>	<b>3.8</b>

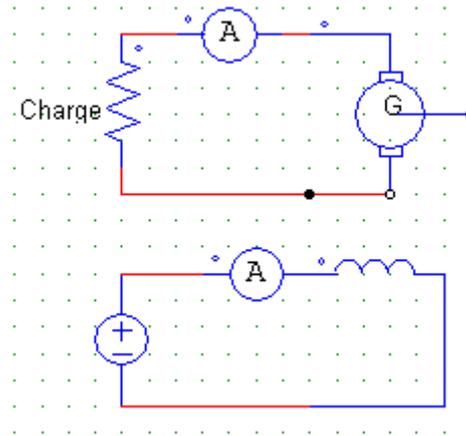
La valeur moyenne du coefficient de frottement est donnée par :

$$f = \frac{\Delta C_p}{\Delta \Omega} \quad (\text{III-9})$$

$$f = \mathbf{0.0044 \text{ J.s}}$$

**III.2.5. Détermination de la constante du couple électromagnétique  $K_m$**

La détermination de la constante du couple  $K_m$  se fait à partir d'un essai en charge sur la génératrice, en entrainant cette dernière à sa vitesse nominale  $\Omega_n$  avec le moteur d'entrainement. La variation du couple est obtenue en agissant sur la charge et nous notons les variations du courant d'induit correspondantes. Le montage est le suivant :



**Figure III.4** Détermination de la constante du couple

Les résultats obtenus sont illustré dans le tableau suivant :

**Tableau V**

$C_m(Nm)$	5.2	6.6	7.9	9.6	11	12.4	13.5	14.9	16	17
$I_a(A)$	1	1.8	2.7	3.7	4.65	5.5	6.3	7.15	8.05	8.65
$\Omega(rd/s)$	157	155	153.12	155.6	156.79	157.52	156.58	156.68	155.11	137.11

L'expression du couple moteur est donnée par :

$$C_m = C_{em} + C_p = K_m I_a + (f\Omega + C_s) \tag{III-10}$$

Nous tirons ensuite l'expression de la constante du couple

$$K_m = \frac{cm - f\Omega - c_s}{I_a} \tag{III-11}$$

Avec:

$$f = 0.0044 \text{ J.S}$$

$$C_s = 2,25 \text{ N.m}$$

La valeur moyenne de  $K_m$  est :

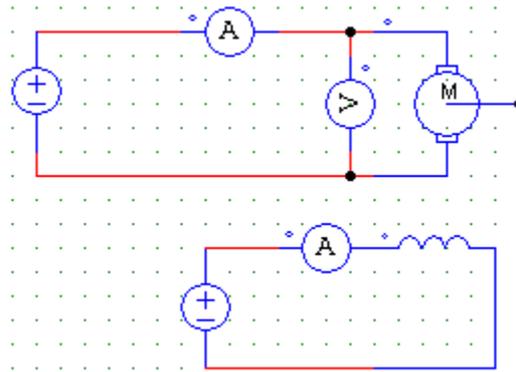
$$K_m = 1,82 \text{ N.m/A}$$

**Remarque**

La constante de la f.c.e.m est égale à la constante du couple électromagnétique  $K_m = K_e$  avec quelques erreurs près.

**III.2.6. Détermination des pertes à vide**

Avec la mesure des pertes à vide  $P_0$  de la machine pour une vitesse  $\Omega_0$  donnée, nous déduisons le couple  $C_{p0}$  calculé par  $P_0 / \Omega_0$ . Le montage proposé est le suivant:



**Figure III.5** Détermination des pertes à vide  $p_0$

Les valeurs mesurées sont données dans le tableau suivant :

**Tableau VII**

Vitesse de rotation $\omega_0$	1504 tr /min
Tension d'induit	217.5V
Courant induit	1.3A
Courant d'excitation	1.33A

L'expression de la puissance absorbée par le moteur est :

$$p_a = R_a I_a^2 + p_0 \tag{III-12}$$

Nous déduisons l'expression de la puissance.

$$p_0 = p_a - R_a I_a^2 \tag{III-13}$$

Nous savons que la puissance absorbée par le moteur est :

$$p_a = V_a I_a \quad (\text{III-14})$$

Avec :

$p_a$  : La puissance absorbée par le moteur

$p_0$  : La somme des pertes

$$p_0 = 217.5 * 1.3 - 1.61 * 1.3^2 = 280.03 \text{ W}$$

La valeur de la puissance

$$\mathbf{P_0 = 280.03 W}$$

Maintenant, nous pouvons déduire le couple de pertes

$$p_0 = C_p * \Omega_0 \quad (\text{III-15})$$

Nous tirons l'expression du couple de pertes

$$C_p = \frac{P_0}{\Omega_0} \quad (\text{III-16})$$

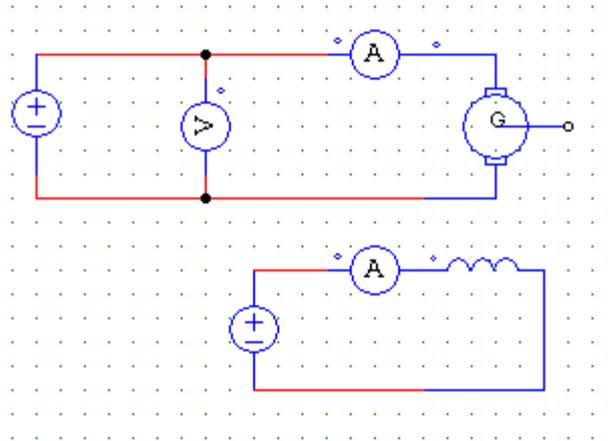
$$C_p = \frac{280.03}{1504 * \frac{2\pi}{60}} = 1.77 \text{ Nm}$$

La valeur du couple de perte est :

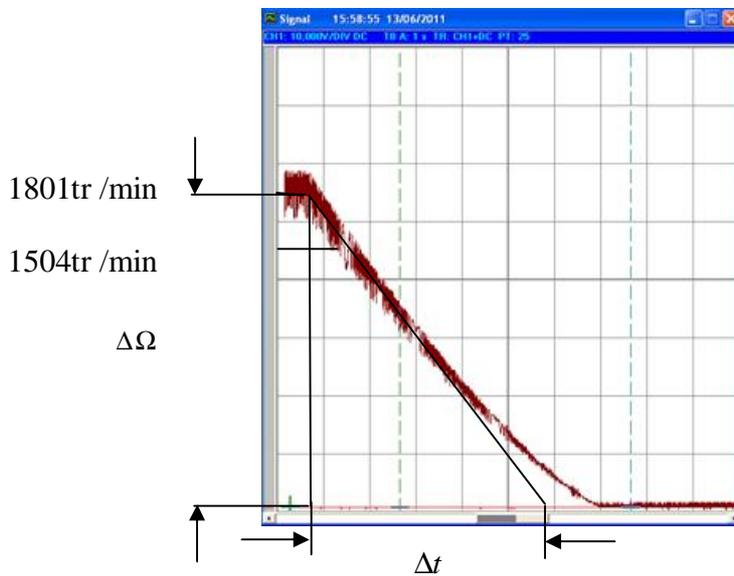
$$\mathbf{C_p = 1.77 Nm}$$

### **II.2.7. détermination du moment d'inertie J**

La détermination du moment d'inertie se fait à partir d'un essai en ralentissement. La machine fonctionnera en génératrice à vide est sera entraînée par un moteur d'entraînement à une vitesse supérieure a la vitesse nominale, puis nous coupons l'alimentation de l'induit du moteur d'entraînement. A l'aide d'un oscilloscope, nous enregistrons l'allure de la vitesse en fonction du temps. Le montage proposé est suivant:



**Figure III.5** Essai en ralentissement



**Figure III.6** Allure de la vitesse en fonction du temps lors du freinage

Légende :

1carreau  $\longrightarrow$  334.22 tr/min

1carreau  $\longrightarrow$  1s

L'équation mécanique de la machine s'écrit :

$$C_m - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + C_p \tag{III-17}$$

Avec :

$C_r = 0$  , car la génératrice est à vide

$C_m=0$  pas de courant d'induit, alors :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = -C_p \quad (\text{III-18})$$

L'expression du moment d'inertie est donnée par :

$$J = -\frac{C_p}{\frac{\Delta\Omega}{\Delta t}} \quad (\text{III-19})$$

Enfin en déduit la valeur du moment d'inertie :

$$J = \frac{1.77}{\frac{205}{5.7}} = 0.049 \text{ Kg.m}^2$$

$$\mathbf{J=0.049 \text{ Kg.m}^2}$$

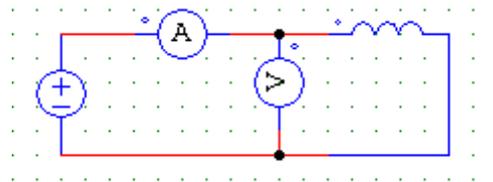
Maintenant, nous avons les valeurs du moment d'inertie et du coefficient de frottement nous pouvons déduire la constante de temps mécanique

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

$$\mathbf{T_m= 11.13 \text{ s}}$$

### III.2.8. détermination de la résistance de l'inducteur $R_f$

La détermination de la résistance de l'inducteur est mesurée par la méthode voltampérométrique, pour différentes valeurs du courant de l'inducteur, nous pouvons mesurer la tension de l'inducteur, sans alimenter l'induit, le schéma de montage est le suivant :



**Figure III.7** Détermination de la résistance de l'inducteur  $R_f$ .

Nous pouvons déterminer la résistance d'inducteur grâce à la loi d'ohm.

$$V_f = R_f * I_f$$

Les résultats obtenus sont donné dans le tableau suivant :

**Tableau VIII**

$V_f$ mesurée (V)	<b>13.5</b>	<b>19.6</b>	<b>26.8</b>	<b>32.5</b>	<b>39</b>	<b>45.5</b>	<b>52.5</b>
$I_f$ mesuré (A)	<b>0.2</b>	<b>0.3</b>	<b>0.4</b>	<b>0.5</b>	<b>0.6</b>	<b>0.7</b>	<b>0.8</b>
$R_f$ calculée ( $\Omega$ )	<b>65.5</b>	<b>65.3</b>	<b>67</b>	<b>65</b>	<b>65</b>	<b>65</b>	<b>65.62</b>

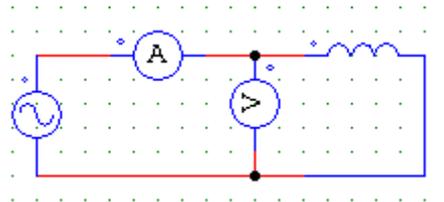
$V_f$ mesurée (V)	<b>59.5</b>	<b>66.5</b>	<b>73.5</b>
$I_f$ mesuré (A)	<b>0.9</b>	<b>1</b>	<b>1.2</b>
$R_f$ calculée ( $\Omega$ )	<b>66.11</b>	<b>66.5</b>	<b>61.25</b>

La valeur moyenne de la résistance de l'inducteur  $R_f$  est :

**$R_f = 65.22 \Omega$**

**III.2.9. détermination de l'inductance  $L_f$  de l'inducteur**

Nous alimentons l'inducteur du moteur à courant par une tension alternative  $V_f$  et par différentes valeurs de  $V_f$  et de  $I_f$ , nous déduisons la valeur de l'inductance à travers le calcul de l'impédance moyenne  $Z_f$  de l'inducteur.



**Figure III.8** Détermination de l'inductance de l'inducteur

**Tableau IX**

$V_f$ mesuré (V)	<b>150</b>	<b>130</b>	<b>120</b>	<b>100</b>	<b>80</b>	<b>60</b>	<b>40</b>	<b>20</b>
$I_f$ mesuré (mA)	<b>57</b>	<b>49.5</b>	<b>46</b>	<b>39</b>	<b>32.5</b>	<b>24.5</b>	<b>16.9</b>	<b>8.75</b>
$Z_f$ calculé (K $\Omega$ )	<b>2.63</b>	<b>2.62</b>	<b>2.6</b>	<b>2.56</b>	<b>2.46</b>	<b>2.44</b>	<b>2.36</b>	<b>2.28</b>

La valeur de l'impédance moyenne est :  **$Z_f = 2.49K \Omega$**

Pour le calcul de l'inductance nous suivons les étapes suivantes :

L'expression de l'impédance est donnée par :

$$Z_f = \frac{V_f}{I_f} \tag{III-20}$$

Nous avons :

$$Z_f = \left( R_f^2 + (L_f \omega_s)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \tag{III-21}$$

Avec :  $\omega_s = 2\pi f$  ;  $f = 50\text{Hz}$

Et enfin nous déduisons l'inductance

$$L_f = \frac{1}{2\pi f} \left[ (Z_f^2 - R_f^2) \right]^{\frac{1}{2}} \tag{III-22}$$

**$L_f = 7.92 \text{ H}$**

Nous pouvons déduire que la constante de temps est :

$$T_f = \frac{L_f}{R_f} = 0.12\text{s}$$

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

**Tableau X**

Symbole	Désignations	Valeurs	Unité
$k_e$	Constante de la f.c.e.m	1.4	V/rd/s
$K_m$	Constante du couple électromagnétique	1.82	N.m/A
$R_a$	Resistance de l'induit du moteur	1.61	$\Omega$
$L_a$	L'inductance de l'induit	0.0054	H
$T_e$	Constante de temps électrique de l'induit	0.0033	s
$J$	Moment d'inertie	0.049	$\text{Kg.m}^2$
$F$	Coefficient de frottement	0.0044	j.s
$T_m$	Constante de temps mécanique	11.13	s
$R_f$	Resistance de l'inducteur	65.22	$\Omega$
$L_f$	L'inductance de l'inducteur	7.92	H
$T_f$	La constante de temps électrique de l'inducteur	0.12	s
$C_s$	Couple de frottement sec	2.25	N.m

Afin de situer la validité de la méthode proposée, nous avons jugé utile de procéder à l'identification des paramètres du moteur à courant continu par un autre procédé appelé la méthode de Pasek [12].

### **III.3. Identification des paramètres de la machine à courant continu par la méthode de Pasek**

Les performances de détermination des paramètres avec la méthode classique demeurent insuffisantes pour les systèmes complexes. Pour cela nous avons opté pour une autre méthode, celle de Pasek.

Pour la détermination des paramètres de la machine à courant continu, Pasek a proposé une méthode simple qui n'exige qu'un seul essai en régime transitoire où les frottements sont nuls. Mais dans notre étude, nous tiendrons compte du coefficient de frottement que nous pouvons déduire de l'équation mécanique [11], [13].

#### **III.3.1. Principe de la méthode**

##### **III.3.1.1. Modèle mathématique**

###### **- Équations électriques**

$$v_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e(t) \quad (\text{III-23})$$

$$e(t) = K_e j \Omega(t) = K \Omega(t) \quad (\text{III-24})$$

L'équation électrique globale peut alors se mettre sous la forme suivante :

$$v_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + K \Omega(t) \quad (\text{III-25})$$

Soit dans le domaine de Laplace :

$$V_a(p) = (R_a + pL_a) I_a(p) + K \Omega(p) \quad (\text{III-26})$$

###### **- Équations mécaniques**

$$C_{em}(t) - C_r(t) = J \frac{d\Omega(t)}{dt} + f \Omega(t) \quad (\text{III-27})$$

**Remarque**

Nous supposons que les conditions initial indiquée 0

Avec :  $C_r = C_0$

$C_r$  : le couple résistant.

$C_{em}$  : couple électromagnétique.

$$C_{em} = M_{fd} i_f(t) i_a(t).$$

Comme le courant d'excitation est constant, nous obtenons

$$i_f = i_{f0}$$

Donc l'équation mécanique (III-27) devient :

$$K i_a(t) - C_0 = J \frac{d\Omega(t)}{dt} + f \Omega(t) \tag{III-28}$$

$$K I_a(p) - \frac{C_0}{p} = (pJ + f) \Omega(p) \tag{III-29}$$

$$V_{a0} = R_a i_{a0} + K \Omega_0 \tag{III-30}$$

**III.3.2. Étude du régime transitoire**

L'étude du régime transitoire consiste à provoquer une variation de la tension d'induit  $\Delta V_a$ , en considérant que le courant d'excitation est maintenu constant durant la perturbation, les équations électriques et mécaniques deviennent [14][15] :

$$\Delta V_a(p) = (R_a + pL_a) \Delta I_a(p) + K \Delta \Omega(p) \tag{III-31}$$

$$K \Delta I_a(p) = (pJ + f) \Delta \Omega(p) \tag{III-32}$$

Nous concluons de ces équations :

$$\Delta \Omega(p) = \frac{K \Delta V_a(p)}{K^2 + (R_a + L_a p)(Jp + f)} \tag{III-33}$$

$$\Delta I_a(p) = \frac{\Delta V_a(p)(Jp + f)}{K^2 + (R_a + L_a p)(Jp + f)} \quad (\text{III-34})$$

### III.3.3. Étude du courant dans l'induit

Nous introduisons les constantes de temps mécanique  $T_m$  et électrique  $T_e$ , l'équation du courant d'induit devient :

$$\Delta I_a(p) = \frac{\left( \Delta V_a(p) \left( p + \frac{1}{T_m} \right) \right)}{L_a \left[ p^2 + \left( \frac{1}{T_m} + \frac{1}{T_e} \right) p + \frac{1}{T_m T_e} + \frac{K^2}{JL_a} \right]} \quad (\text{III-35})$$

Où :  $T_m = \frac{J}{f}$

Avec :

$T_m$  : constante de temps mécanique.

$T_e$  : constante de temps électrique.

En supposant  $T_m = \lambda T_e$ , l'équation du courant devient :

$$\Delta I_a(p) = \frac{\left( \Delta V_a(p) \left( p + \frac{1}{T_e} \right) \right)}{L_a \left[ p^2 + \frac{1}{T_e} \left( 1 + \frac{1}{\lambda} \right) p + \frac{1}{T_e^2} + \frac{K^2}{JL_a} \right]} \quad (\text{III-36})$$

Détermination des racines du dénominateur du second degré.

$$L_a \left[ p^2 + \frac{1}{T_e} \left( 1 + \frac{1}{\lambda} \right) p + \frac{1}{T_e^2} + \frac{K^2}{JL_a} \right] = 0$$

Le déterminant donne :

$$b^2 = \Delta = \frac{1}{T_e^2} \left[ \left( 1 - \frac{1}{\lambda} \right) \right]^2 - 4 \frac{T_e^2 K^2}{JL_a} \quad (\text{III-37})$$

Et les racines du polynôme s'obtient par

$$p_1 = -\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{T_e} \left( 1 + \frac{1}{l} \right) + b \right] \quad (\text{III-38})$$

$$p_2 = -\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{T_e} \left( 1 + \frac{1}{l} \right) - b \right] \quad (\text{III-39})$$

Nous supposons que  $\beta_1 = T_e \cdot \beta$ , les constantes de temps du système, en fonction des racines  $p_1, p_2$ , s'exprime par :

$$T_1 = -\frac{1}{p_1} = \frac{2T_e}{1 + b_1} \quad (\text{III-40})$$

$$T_2 = -\frac{1}{p_2} = \frac{2T_e}{1 - b_1} \quad (\text{III-41})$$

L'expression du courant devient alors :

$$\Delta I_a(p) = \frac{\Delta V_a(p) \left( p + \frac{1}{lT_e} \right)}{L_a p (p - p_1)(p - p_2)} \quad (\text{III-42})$$

Avec :

$$\Delta V_a(p) = \frac{\Delta V_a}{p}$$

La réponse temporelle de l'équation est donnée par

$$\Delta I_a(t) = \frac{\Delta V_a}{L_a} \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \left[ \frac{T_2 - T_1}{T_m} + \left( 1 + \frac{T_1}{T_m} \right) e^{-\frac{t}{T_1}} - \left( 1 + \frac{T_2}{T_m} \right) e^{-\frac{t}{T_2}} \right] \quad (\text{III-43})$$

### III.3.4. Expression des grandeurs intervenant dans la détermination des paramètres de la machine

Nous concluons l'instant  $t_1$ , le temps que met le moteur pour atteindre le courant maximal

$\Delta i_a(t_1)$  est maximal, d'où  $\frac{d\Delta i_a(t_1)}{dt} = 0$

$$t_1 = \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \ln \frac{T_2}{T_1} \left( \frac{T_m + T_1}{T_m + T_2} \right) \quad (\text{III-44})$$

Si nous considérons que  $\frac{T_m + T_1}{T_m + T_2} = 1$

Pour conclure, nous tirons :

$$\frac{t_1}{T_e} = \frac{1}{b_1} \ln \left( \frac{1 + b_1}{1 - b_1} \right) \quad (\text{III-45})$$

$$\frac{t_1}{T_1} = \left( \frac{1 + b_1}{2b_1} \right) \ln \left( \frac{1 + b_1}{1 - b_1} \right) \quad (\text{III-46})$$

$$\frac{t_1}{T_2} = \left( \frac{1 - b_1}{2b_1} \right) \ln \left( \frac{1 + b_1}{1 - b_1} \right) \quad (\text{III-47})$$

Nous définissons le rapport du courant aux instants  $t_1$  et  $2t_1$ , lors de la perturbation, par la grandeur  $\delta$

Tel que :

$$d = \frac{\Delta i_a(2t_1)}{\Delta i_a(t_1)} \quad (\text{III-48})$$

$$d = \left( \frac{1 + b_1}{1 - b_1} \right)^{\frac{b_1 - 1}{2b_1}} \quad (\text{III-49})$$

A partir de l'équation (III-47), nous pouvons déduire la valeur  $\delta$ , nous utilisons l'allure (III-26) qui nous permet d'obtenir la valeur  $\beta_1$  qui correspond à  $\delta$ .

- La constante de la f.c.e.m est définie par :

$$K = \frac{\Delta V_a}{\Delta \Omega} \quad (\text{III-50})$$

- La résistance est donnée par l'expression suivante :

$$R_a = \frac{\Delta V_a}{\Delta I_{t1}} \quad (\text{III-51})$$

- La constante de temps électrique est définie par :

$$\frac{t_1}{T_e} = \frac{1}{b_1} \ln \left( \frac{1+b_1}{1-b_1} \right) \quad (\text{III-52})$$

Sachant que  $T_e = \frac{L_a}{R_a}$ , nous déduisons la valeur de l'inductance  $L_a$

$$L_a = T_e * R_a \quad (\text{III-53})$$

- Les constantes  $T_1$  et  $T_2$  sont définies à partir des équations (III-44)

$$\frac{t_1}{T_1} = \left( \frac{1+b_1}{2b_1} \right) \ln \left( \frac{1+b_1}{1-b_1} \right)$$

$$\frac{t_1}{T_2} = \left( \frac{1-b_1}{2b_1} \right) \ln \left( \frac{1+b_1}{1-b_1} \right)$$

- La constante de temps mécanique est déduite à partir de l'équation suivante :

$$\Delta I_0 = \frac{\Delta V_a}{L_a} \frac{T_1 T_2}{T_m} \Rightarrow T_m = \frac{\Delta V_a}{L_a} \frac{T_1 T_2}{\Delta I_0} \quad (\text{III-54})$$

- Les expressions des paramètres  $\lambda$ ,  $J$  et  $f$

$$I = \frac{T_m}{T_e} \quad (\text{III-55})$$

$$J = \frac{4T_e^2 K^2}{L_a \left[ \left(1 + \frac{1}{I}\right)^2 - b_1^2 \right]} \quad \text{(III-56)}$$

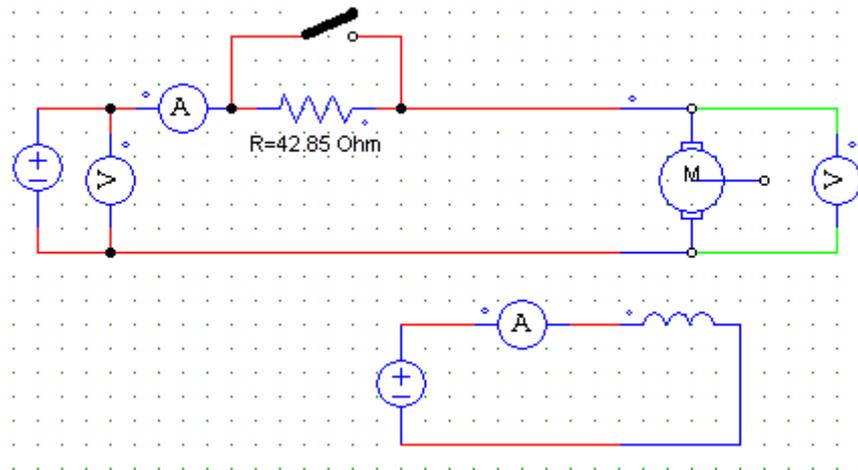
$$f = \frac{J}{IT_e} \quad \text{(III-57)}$$

.  $C_0$  est défini à partir de l'expression suivante :

$$KI_{a0} = f\Omega_0 + C_0 \quad \text{(III-58)}$$

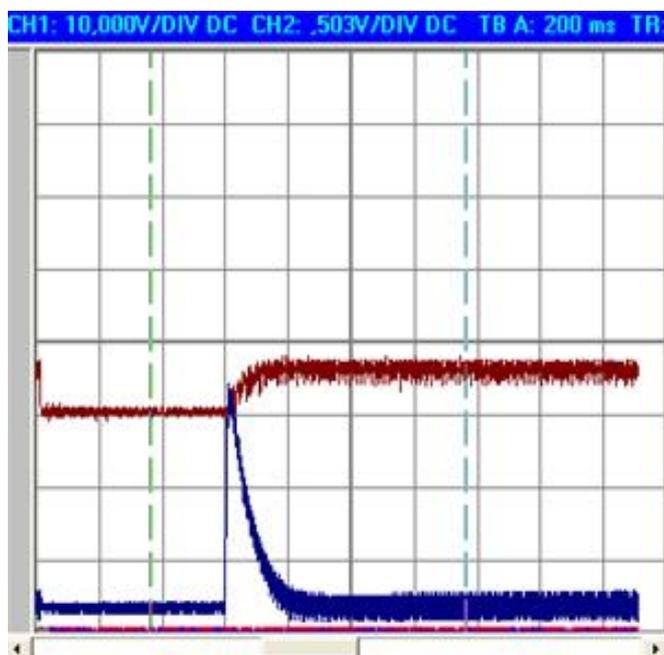
### III.3.5. Description du montage

Nous alimentons le moteur à courant continu à excitation indépendante par une tension  $V_{a0}$  voisine de la tension nominale à travers une résistance  $R$ . A l'instant  $t_0$ , nous court-circuitons la résistance  $R$  de façon à engendrer un échelon de tension  $\Delta V_a$  sur l'induit du moteur. Nous notons l'évolution du courant et de la vitesse de rotation du moteur [12][13].

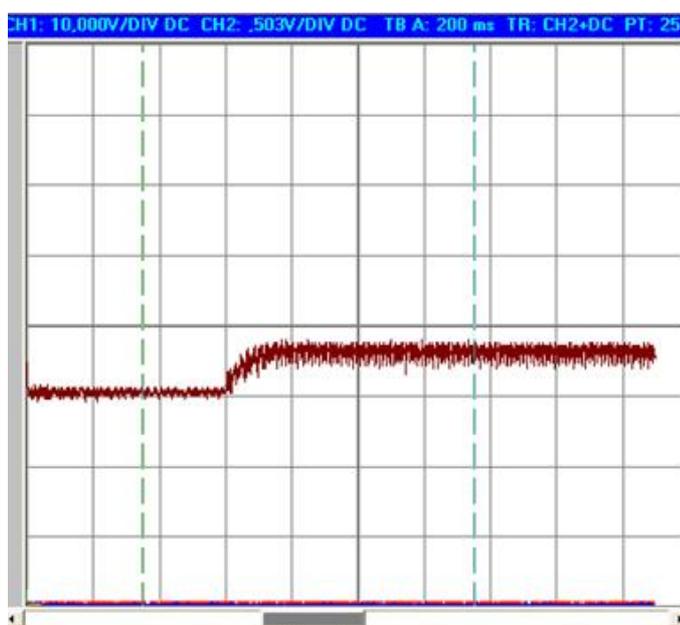


**Figure III.9.** Schéma du montage en régime transitoire

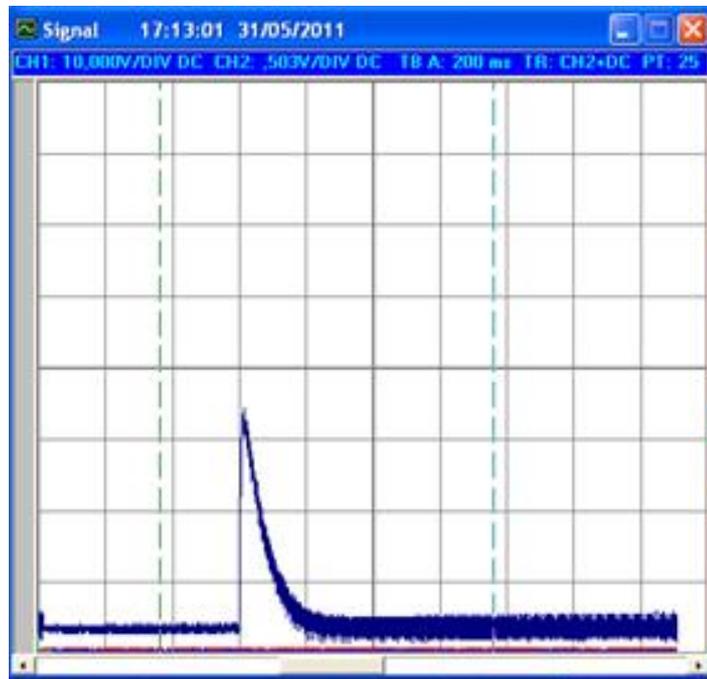
La figure III.10 montre le résultat expérimental obtenu



**Figure III.10** Réponse duale du courant et de vitesse à un échelon de tension  
Les figures (III.11 et III.12) montrent la réponse en vitesse et en courant séparément :



**Figure III.11** Réponse en vitesse

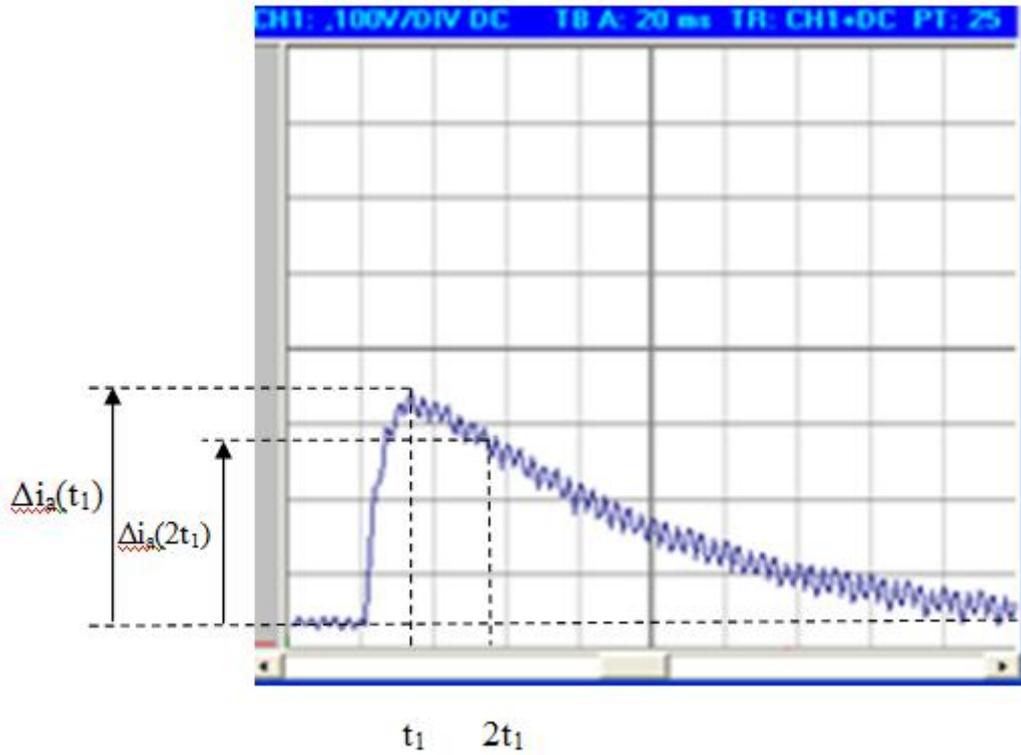


**Figure III.12** Réponse en courant d'induit.

Légende :

Echelle du temps : 1carreau → 200ms  
Echelle de vitesse : 1carreau → 33.53rd /s  
Echelle du courant : 1carreau → 3.73A

La figure III.13 montre un zoom de l'allure du courant d'induit obtenu :



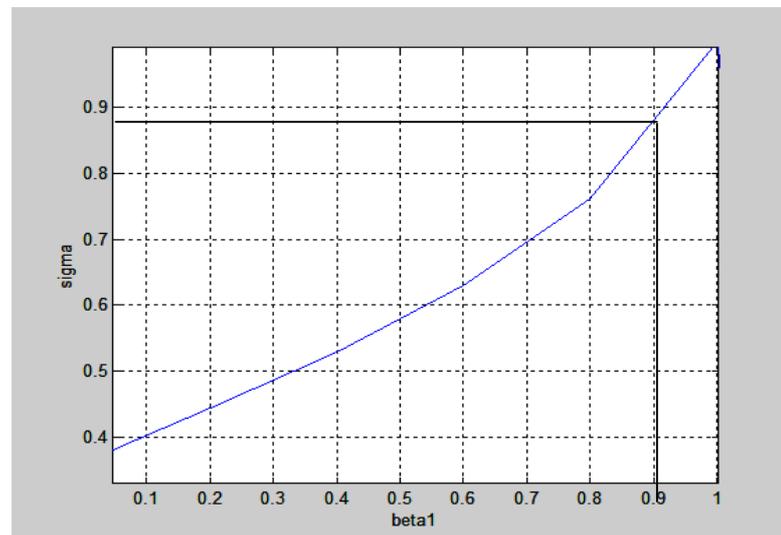
**Figure III.13** Zoom de l'allure du courant

Légende :

Echelle du temps : 1carreau  $\rightarrow$  20ms

Echelle du courant : 1carreau  $\rightarrow$  3.73A

La figure III.14 montre le tracé théorique de sigma  $\delta$  en fonction de  $\beta_1$ .



**Figure III.13** Tracé théorique de sigma  $\delta=f(\beta_1)$

Le calcul numérique développé est le suivant:

- Tension

$$\Delta V_a = 56 \text{ V}$$

- Courant

$$I_1 = 1.22 \text{ A}$$

$$I_0 = 1.12 \text{ A}$$

$$\Delta i_a(t_1) = 11.44 \text{ A}$$

$$\Delta I_0 = 0.1 \text{ A}$$

$$\Delta i_a(2t_1) = 9.96 \text{ A}$$

- Vitesse

$$\Omega_0 = 103.93 \text{ rd / s}$$

$$\Omega_1 = 142.73 \text{ rd / s}$$

$$\Delta \Omega = 38.75 \text{ rd/s}$$

- Temps

$$t_1 = 14 \text{ ms}$$

$$2t_1 = 28 \text{ ms}$$

Calcul des paramètres :

- Calcul de la constante de la force électromotrice partir de (III-50)

$$K = \frac{\Delta V}{\Delta \Omega} = \frac{56}{38.73} = 1.44 \text{ V / rd / s}$$

- Calcul de la résistance de l'induit

$$R_a = \frac{\Delta V_a}{\Delta I_{t1}} = \frac{56}{11.44} = 4.26 \Omega$$

- Calcul de  $\delta$

$$d = \frac{i_a(2t_1)}{i_a(t_1)} = \frac{9.96}{11.44} = 0.87$$

### Chapitre III Identification des paramètres de la machine à courant continu

A partir de l'allure  $\delta=f(\beta_1)$ , on tire la valeur de  $\beta_1=0.92$

- Calcul de  $T_1$  et  $T_2$

$$T_1 = 0.0042s$$

$$T_2 = 0.1013s$$

$$T_e = 0.0041s$$

- Calcul de l'inductance de l'induit

$$T_e = \frac{L_a}{R_a} \Rightarrow L_a = T_e * R_a = 0.0173H$$

$$T_m = \frac{\Delta V_a}{L_a} \frac{T_1 T_2}{\Delta I_0} = 13.86s$$

- A partir des équations (III-56), (III-57) et (III-58), nous obtenons

$$I = \frac{T_m}{T_e} = 3380$$

$$J = 0.0516Kg.m^2$$

$$f = 0.0037 j.s$$

- Le couple  $C_0$

$$C_0 = 1.23Nm$$

Nous présenterons les différents résultats obtenus pour les deux méthodes proposées dans le tableau XI suivant :

**Tableau XI**

Désignation	Méthode classique	Méthode Pasek
$k_e$ [V/rd/s]	1.4	1.44
$R_a$ [ $\Omega$ ]	1.61	4.42
$L_a$ [H]	0.0054	0.0173
$T_e$ [s]	0.0033	0.0041
$J$ [Kg.m <sup>2</sup> ]	0.049	0.051
$f$ [j.s]	0.0044	0.0037
$C_s$ [N.m]	2.25	1.23

Malgré la simplicité de la méthode de Pasek, celle-ci peut parfois donner des résultats d'une précision insuffisante. Les résultats présentés dans le tableau XI montre que l'écart enregistré lors de la détermination des paramètres  $k_e$ ,  $R_a$ ,  $L_a$  et  $f, J$  du moteur sont acceptables avec des erreurs prés. Ce qui permet de mettre en évidence la validité de la méthode proposée [11].

### **III.3.6. Conclusion**

L'objectif d'une procédure d'identification d'une machine à courant continu est la recherche d'un modèle le plus réel. Mais malheureusement, quelle que soit cette procédure d'identification, l'erreur ne sera jamais nulle, à cause des erreurs de mesures et les perturbations liées au réseau électrique. Le but de cette étude est de déterminer le modèle d'une machine à courant continu en vue d'élaborer une commande optimale et performante d'une machine à courant continu.

## Conclusion générale

Le travail que nous avons présenté dans ce mémoire porte sur l'identification des paramètres d'une machine à courant continu.

Pour y parvenir, nous avons commencé par quelques généralités sur la machine à courant continu pour avoir une idée sur les constitutions de celle-ci et son principe de fonctionnement dans les deux régimes à savoir le fonctionnement en moteur où en générateur.

Ensuite, nous nous sommes intéressés à la modélisation de la machine à courant continu. La modélisation est fondée en générale sur les lois de la physique. Le but de cette étape est de connaître le comportement du système afin d'en effectuer la commande.

Enfin, nous avons présenté une démarche alternative à la modélisation, le plus souvent complémentaire, consiste à réaliser, à partir d'un nombre limité de mesures pratiquées sur la machine, son identification. Mais les paramètres ne sont pas constants et les valeurs trouvées dépendent des conditions dans lesquelles on a effectué les mesures, notamment l'amplitude de variation des grandeurs mesurées. C'est pourquoi, on préfère des méthodes plus proches de l'automatique, méthode de Pasek pour la détermination des paramètres de la machine à courant continu. Cette méthode de l'identification des paramètres présente un avantage particulier du fait qu'elle n'exige qu'un seul essai, mais en contrepartie de sa simplicité, cette méthode peut parfois donner des résultats d'une précision insuffisante [14].

Cependant, les paramètres de la machine à courant continu identifiés par la méthode basée sur des essais classiques et par la méthode de Pasek sont proches et l'erreur reste acceptable. Ceci valide les résultats obtenus par ces deux méthodes.

Comme perspective à cette présente étude, nous pouvons citer :

- La mise en œuvre d'une autre méthode d'identification des paramètres plus performante, afin de s'approcher à un modèle plus réel de la machine à courant continu.
- Le dimensionnement d'un régulateur afin de commander la machine à courant continu.

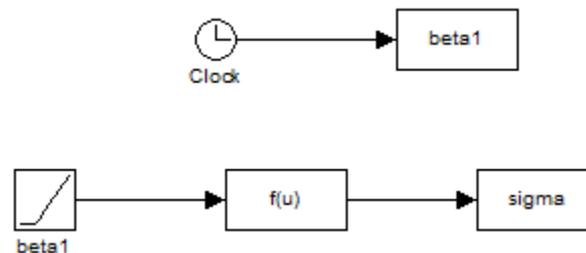
## Annexe

La plaque signalétique de la machine a identifiée est illustrée dans le tableau suivant :

**Tableau A.1** : plaque signalétique de la machine à identifier.

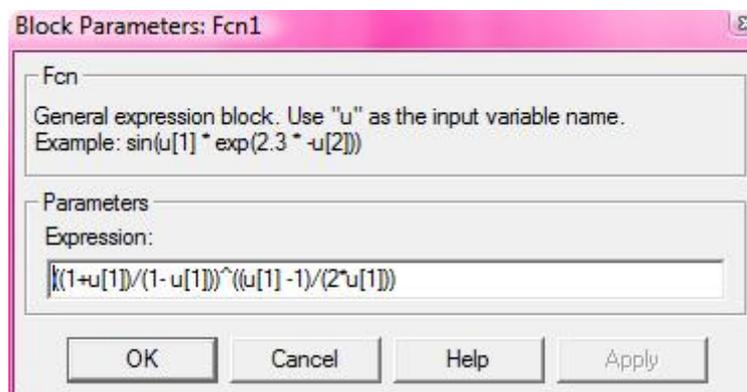
Tension nominale de l'induit $V_{na}$	220 V
courant nominal de l'induit $I_{na}$	16 A
Tension nominale de l'inducteur $V_{nf}$	120 V
courant nominal de l'inducteur $I_{nf}$	1.33 A
puissance nominale $p_n$	3 Kw
Vitesse nominale $\omega_n$	1500tr/min

La détermination de la constante  $\beta_1$  est déterminée à partir de schéma bloc suivant :



**Figure A.1** schéma bloc de  $\delta=f(\beta_1)$

La fonction utilisée est la suivante :



**Figure A.2** la fonction de utiliser pour calculer  $\beta_1$

## Références bibliographiques

- [1] <http://www.lsc.univ-evry.fr>
- [2] <http://www.physique-eea.ujf-grenoble.fr>
- [3] <http://www.leroy-somer.com>
- [4] T. Wildi, G. Sybille. *Electrotechnique*, Edition de Boeck, 2005.
- [5] F. Bernot. *Machines à courant continu constitution et fonctionnement*, Technique de l'Ingénieur, D 3555.
- [6] F. Bernot. *Machines à courant continu construction*, Technique de l'Ingénieur, D 3556.
- [7] M. Kostenko, L. Piotrovski. *Machine à courant continu et transformateur*, Edition Mir. Moscou.
- [8] P. Barret. *Régime transitoire des machine électrique*, Edition Eyrolles, 1982.
- [9] A. Hebert, C. Nardet, M. Pinard. *Machines électrique et électronique de puissance*, Edition Bordas, 1985.
- [10] B. Saint Jean. *Electronique et machine électrique*, Edition Eyrolles, 1977.
- [11] J. P. Louis, B. Multon, Y. Bonnassieux. *Commande des machines à courant continu (mcc) à vitesse variable*, Technique de l'Ingénieur, D3610.
- [12] D. Silem, B. Tighilt. *Modèle de la machine à courant continu en vue de régulation de la vitesse*, Mémoire d'Ingénieur, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 1996.
- [13] L. Hamoudi. *Récepteur mécanique de couple résistant asservi étude et réalisation*, Mémoire d'Ingénieur, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2005.
- [14] A. Bossavit. *Modèle et modélisation en électrotechnique*. Technique de l'Ingénieur, A1207.
- [15] R. Husson. *Méthodes de commande des machines électriques*, Edition Lavoisier, 2003.