



**République Algérienne Démocratique et
Populaire**



**Ministre de l'Enseignement Supérieur et de
La Recherche Scientifique**

Université Echahid Hamma Lakhdar - El-Oued

FACULTE DES SCIENCE ET TECHNOLOGIE

Mémoire de fin d'étude

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

LICENCE ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Spécialité : Génie mécanique

Option : Electromécanique industriel

Thème

**Réalisation d'un laboratoire virtuel de simulation des
machines à courant continu**

Devant le jury :Présenté par :

Président : Mr Y.GUERFI. - Chikha Mabrouk Younes.

Examineur : Mr A.ANNANE.-Chetioui Messaoud.

Rapporteur : Mr H.CHENNOUFI. -Saadoudi Abdelkrim.

2014/2015

DÉDICACE

À nos parents,

À nos familles,

À nos amis.

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous remercions ALLAH, notre créateur de nous avoir donné les forces pour accomplir ce travail.

Nous adressons le grand remerciement à notre encadreur qui a proposé le thème de ce mémoire, aussi pour ses conseils et ses orientations.

Nous avons également l'honneur de remercier l'Administration du Département de Mécanique d'avoir facilité le processus de sélection du mémoire et de l'encadreur, ainsi que de l'organisation et la bonne coordination.

Un grand merci est adressé aux examinateurs d'avoir accepté la lecture et l'évaluation de notre mémoire.

Finalement , nous remercions tous ceux qui ont participé à réaliser ce mémoire .

sommaire

Sommaire

- * Liste des figures .
- * Annexe .
- * Notation .
- * Bibliographie .

Introduction générale 01

Chapitre I : Généralités de la machine à courant continu.

| | |
|---|----|
| I.1. Introduction..... | 03 |
| I.2. Structure de la machine à courant continu | 03 |
| I.2.1. L'inducteur | 04 |
| I.2.1.1. La construction d'inducteur | 04 |
| I.2.2 'induit..... | 05 |
| I.2.2.1. La construction d'induit | 06 |
| I.3. Phénomène d'induction | 08 |
| I.3.1. Loi de Laplace..... | 08 |
| I.3.2. Principe de génératrice..... | 08 |
| I.4. Conversion d'énergie électromécanique..... | 08 |
| I.5. Classification des machines à courant continu..... | 09 |
| I.5.1. Classification selon le mode d'excitation..... | 09 |
| I.5.1.1. Moteur en dérivation..... | 09 |
| I.5.1.2. Moteur série..... | 11 |
| I.5.1.3. Moteur à excitation composée..... | 12 |
| I.6. Caractéristiques usuelles des moteurs à courant continu..... | 12 |
| I.7. Les avantages et les inconvénients..... | 13 |
| I.8. Conclusion..... | 14 |

Chapitre II : Modélisation est simulation de la machine à courant continu .

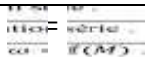
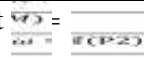
| | |
|---|----|
| II.1. Introduction..... | 16 |
| II.2. Modélisation de la machine à courant continu..... | 16 |

sommaire

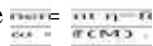
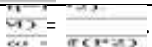
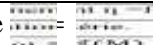
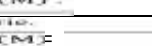
| | |
|---|-----------|
| II.2.1.Équation de la machine à courant continu..... | 17 |
| II.2.1.1. Equations électriques..... | 17 |
| II.2.1.2.Equations mécaniques..... | 17 |
| II.2.1.3. Equations Electromécanique | 17 |
| II.3. Simulation de la MCC..... | 18 |
| II.3.1. Schéma bloc de moteur à courant continu..... | 18 |
| II.3.2- Modèle Simulink de la machine à courant continu..... | 19 |
| II.3.3 -Laboratoire n°1 : Etude de la MCC à excitation indépendante | 24 |
| II.3.3.1 - Mise en œuvre du laboratoire virtuel..... | 24 |
| II.3.3.2- Relevé de la caractéristique mécanique, et calcul des caractéristiques de fonctionnement de la machine en régime de moteur..... | 25 |
| II. 3.3.3 Relevé de la caractéristique mécanique, et calcul des caractéristiques de fonctionnement de la machine en régime de générateur..... | 29 |
| II. 3.4 - Laboratoire n°2 : Etude de la MCC à excitation série..... | 32 |
| II.3.4.1 - Mise en œuvre du laboratoire virtuel..... | 32 |
| II.3.4.2 - Relevé des caractéristiques mécaniques et de fonctionnement de la MCC à excitation série..... | 33 |
| II.3.5. Les résultats de simulation | 36 |
| II.3.5.1. Fonctionnement en moteur | 36 |
| II.3.5.2. Interprétation..... | 41 |
| II.4. CONCLUSION..... | 41 |
| Conclusion générale | 43 |
| Résumé | 45 |

Liste des figures

Liste des figures

| <u>Titre</u> | <u>page</u> |
|--|-------------|
| Fig. I.1 : La construction de la machine à courant continu . | 03 |
| Fig. I.2 : l'inducteur . | 04 |
| Fig. I.3 : l'induit . | 05 |
| Fig. I.4 : Collecteur . | 07 |
| Fig. I.5 : Les balais . | 07 |
| Fig. I.6 : Moteur à courant continu à excitation séparée . | 10 |
| Fig. I.7 : Moteur à courant continu à excitation série . | 11 |
| Fig. I.8 : (a) Moteur composé à courte dérivation et (b) moteur composée à longue dérivation . | 12 |
| Fig. II.9 : Schéma de la MCC à excitation shunt sur les axes (d , q) . | 18 |
| Fig. II.10 : schéma bloc de la MCC . | 19 |
| Fig. II.11 : Réalisation de la partie électrique de la MCC sous Simulink . | 15 |
| Fig. II.12 : Réalisation de la partie mécanique de la MCC sous Simulink . | 20 |
| Fig. II.13 : Réalisation de la MCC sous Simulink . | 21 |
| Fig. II.14 : Modèle Simulink de la MCC à excitation indépendante . | 22 |
| Fig. II.15 : Modèle Simulink de la MCC à excitation série . | 23 |
| Fig. II.16 : Modèle pour l'étude de la MCC à excitation série . | 24 |
| Fig. II.17 : Courbe de la caractéristique mécanique  | 26 |
| Fig. II.18 : Courbe de la caractéristique de fonctionnement  | 27 |
| Fig. II.19 : Courbe de la caractéristique de fonctionnement $M=f(P2)$. | 27 |
| Fig. II.20 : Courbe de la caractéristique de fonctionnement $I_a=f(P2)$. | 28 |

Liste des figures

| | |
|--|-----------|
| Fig. II.21 : Courbe de la caractéristique de fonctionnement $\omega = f(P2)$. | 28 |
| Fig. II.22 : Courbe de la caractéristique mécanique  | 30 |
| Fig. II.23 : Courbe de la caractéristique de fonctionnement  | 30 |
| Fig. II.24 : Courbe de la caractéristique de fonctionnement $M = f(P2)$. | 31 |
| Fig. II.25 : Courbe de la caractéristique de fonctionnement $\omega = f(P2)$. | 31 |
| Fig. II.26 : Modèle pour l'étude de la MCC à excitation série. | 32 |
| Fig. II.27 : Courbe de la caractéristique mécanique  | 33 |
| Fig. II.28 : Courbe de la caractéristique de fonctionnement  | 34 |
| Fig. II.29 : Courbe de la caractéristique de fonctionnement $M = f(P2)$. | 34 |
| Fig. II.30 : Courbe de la caractéristique de fonctionnement $I_a = f(P2)$. | 35 |
| Fig. II.31 : Courbe de la caractéristique de fonctionnement $\omega = f(P2)$. | 35 |
| Fig. II.32 : la vitesse de rotation w (tr \ min) . | 36 |
| Fig. II.33 : la vitesse de rotation w (rad/s) . | 36 |
| Fig. II.34 : le couple (N.m) . | 37 |
| Fig. II.35 : le courant d'excitation I_a (A) . | 37 |
| Fig. II.36 : le courant d'excitation I_f (A) . | 38 |
| Fig. II.37 : le vitesse de rotation charge (tr \ min) . | 38 |
| Fig. II.38 : le vitesse de rotation charge (rad/s) . | 39 |
| Fig. II.39 : le couple (C_e , C_r) en charge (N.m) . | 39 |
| Fig. II.40 : Le courant d'induit I_a (A) en charge . | 40 |
| Fig. II.41 : Le courant d'excitation I_f (A) . | 40 |

Annex

Paramètre :

| | |
|---|--------------------------|
| Valeurs nominales de tension | 220 V |
| R_a (Résistance d'induit) | 2.52 |
| R_f (Résistance d'inducteur) | 92 |
| L_a (Inductance d'induit) | 0.048 H |
| L_f (Inductance d'inducteur) | 5.257 H |
| M_{af} (Inductance mutuelle) | 0.284 H |
| f (fortement) | 0.00542 I.S |
| J (Inertie de rotor) | 0.017 kg. m ² |
| Cr (couple résistons) | 12 N.m |

Notion

Notion

- **F** : la force électromagnétique (f.é.m.) (V) .
 - **B** : champ magnétique (web) .
 - **I** : courant électrique(A) .
 - **L** : longeur de conducteur (m) .
 - **ω** : vitesse de rotation (rad/s) .
 - **U_a** : Tension de l'induit(V) .
 - **R_a** : Résistance d'induit (Ω) .
 - **L_a** : Inductance de l'induit(h) .
 - **I_a** : Courant dans l'induit (A) .
 - **U_f** : Tension d'excitation(V) .
 - **R_f** : Résistance de l'inducteur(Ω) .
 - **L_f** : Inductance de l'inducteur(h) .
 - **I_f** : Courant d'excitation(A) .
 - **J** : Moment d'inertie (kgm²) .
 - **f** : Coefficient de frottement visqueux .
 - **C_e** : Couple électromagnétique (N.m) .
 - **C_r** : Couple résistant(N.m) .
 - **C_{em}** : Couple mécanique(N.m) .
 - **K** : constante de machine .
 - **M_{af}** : Inductance mutuelle (H) .
 - **MCC** : machines à courant continu .
 - **R_h** : résistance variable .
-

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BENNOUDJIT.A. « Introduction aux machines électriques à courant continu 1 », Presses de l'université de BATNA, Octobre 1995.
- [2] BEN AMOR A et BOUGHAZALA MOHAMMED M. « commande linéaire d'un moteur à courant continu à flux constant (synthèse et régulateurs) », Centre Universitaire d'EL-OUED, promotion 2008.
- [3] ZELACI Saida et MANANE Hamida « Etude des caractéristiques du moteur à courant continu (à excitation séparée et shunt) », Centre Universitaire d'EL-OUED, promotion 2009.
- [4] BROWN Mark et RAWATNI Jawaheer, PATIL Dinesh « Maintenance électrotechnique », DUNOD, Toulouse, France, Juillet 2006.
- [5] WILDI th et SYBILLE , « Ecole de technologie supérieur », paris, juin 2005.
- [6] «CONVERSION ÉLECTROMÉCANIQUE» Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion (chapitre 02). <http://www.electrotechnique-fr.com>
- [7] Dr.Ing. Adama Fanhirii SANGARE, Ph.D in Electrical Engineering and Automation <http://www.techno-science.net>
- [8] C. Naudet et M. Pinard « Machines électriques et électronique de puissance », DUNOD, .
- Adama F. SANGARE, Initiation à MATLAB SIMULINK, Bamako ENI-ABT, 2005.
- Modibo CISSOKO, Modélisation et Simulation des machines électriques, Bamako ENIABT, 2006.
-



Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale :

- **Les machines électriques tournantes** sont des convertisseurs d'énergie. Lorsqu'elles transforment de l'énergie électrique en énergie mécanique, on dit qu'elles fonctionnent en moteur. En revanche, si elles transforment l'énergie mécanique apportée par une autre machine en énergie électrique, on dit qu'elles fonctionnent en génératrice. On distingue plusieurs types d'alimentation des moteur à courant continu (séparé, shunt, série, compound...etc.).

- **La machine à courant continu** est une machine électrique tournante qui fonctionne, comme son nom l'indique, à partir de tensions et de courants continus. Dans le cas de petits moteurs, elle est donc adaptée à des sources d'énergie électrochimiques. Pour les fortes puissances, on la trouve dans les lignes de métro où elle fonctionne en moteur (traction) ou en génératrice (freinage).

- **Les machines tournantes** sont constituées de deux parties principales. Le stator est la partie fixe du système. Il entoure la partie tournante, appelée rotor. Nous allons nous intéresser à la façon de réaliser une MCC.

- **Le premier chapitre** c'est un rappel des généralités sur ces machines à courant contenu, on donnant la structure.

- **Le deuxième chapitre** c'est une partie de la modélisation et de la simulation de machine à courant continu, dans ce chapitre on donne le modèle de ces machines à partir la des équations électriques et mécanique, on forme les schémas bloc qui nous permet d'extraire les caractéristiques de ces machine (la vitesse, le couple utile et le courant) on utilisant le programme *MATLAB/SIMILINK*.

Chapitre 1

Généralités de la machine à courant continu.

1. Introduction :

Les machines à courant continu sont très utilisées dans nos jours, notamment dans les applications de faible puissance utilisant des batteries (moteur de jouet) ou encore pour la traction électrique, et très utilisées comme moteur à vitesse variable dans une gamme de puissance allant de quelques milliwatts à plusieurs mégawatts.

Ce chapitre représente des généralités sur la machine à courant continu. Il traite exactement la structure de ses machines, le phénomène d'induction qui donne de ces principes de ces machines avec ces deux fonctionnements, la conversion d'énergie électromécanique qui considère comme le rôle de ces machines, quelques problèmes pour les machines à courant continu (la réaction d'induit, la commutation), le bilan de puissance et on cite quelques avantages et quelques inconvénients de ces machines [1].

2. Structure de la machine à courant continu :

Les machines tournantes sont constituées de deux parties principales, l'inducteur et l'induit.

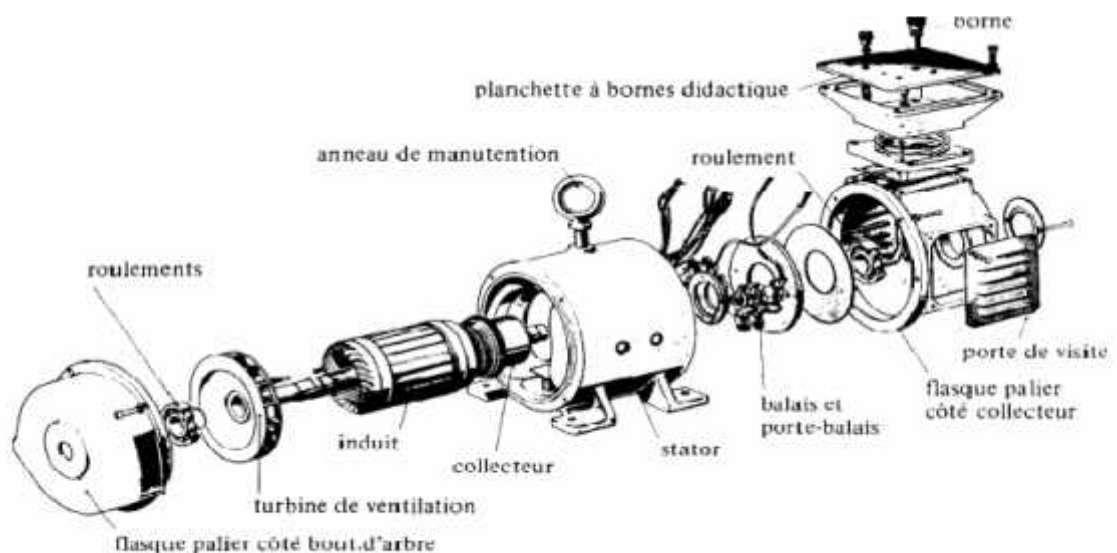


Fig. I.1 : La construction de la machine à courant continu .

2.1. L'inducteur :

C'est l'organe producteur du champ magnétique nécessaire à la transformation électromagnétique est située sur une partie fixe de la machine. Ce champ magnétique est fixé [1].



Fig. I.2 : l'inducteur .

2.1.1. La construction d'inducteur

L'inducteur comprend

- **Les pôles principaux :** destinés à créer le flux magnétique principal, qui peuvent être constitués d'aimants permanents ou de pièces polaires associées à des enroulements d'inducteurs parcourus par un courant continu.

- **La carcasse :** c'est à dire la partie de la machine à laquelle sont fixés les pôles principaux 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 appelée culasse [2].
- **Le flasque avant :** les matériaux utilisés soit l'aluminium ou le plastique. Le moyen d'obtention pour l'aluminium est dans la majorité des cas la fonderie, et pour le plastique l'injection est utilisée.

La principale mission est de porter le palier avant, sur ses machines les efforts mécaniques sont modérés, par contre le positionnement géométrique est très important, car le jeu entre les aimants et les tôles magnétiques est faible (quelques dixièmes de millimètres). La seconde mission est le contage de la carcasse, qui doit posséder une bonne concentricité avec le palier. Bien souvent le palier avant assure aussi la fixation du guide balais [3] .

2.2 L'induit:

C'est l'organe subissant le champ magnétique et en même temps le siège d'une force électromotrice(f.é.m.) induites alternatives. Et c'est un lieu de la transformation d'énergie mécanique en énergie électrique (génératrice électrique) ou inversement, de l'énergie électrique en énergie mécanique (moteur électrique). L'inducteur et l'induit sont séparés l'une à l'autre par un entrefer [2] .



Fig. I.3 : l'induit .

2.2.1. La construction d'induit :

L'induit comprend :

- **Armature de l'induit (encoche)** : réalisée à l'aide de tôles empilées, montrées directement sur l'arbre par insertion chaude, soit assemblées par que d'aronde pour des grandes machines. Les encoches fermées par des becs d'encoches peuvent être de forme arrondie ou rectangulaire.

- **Enroulement** : placé sur cette armature (bobinage), les conducteurs sont réalisés à partir de fils ou de barres de cuivre, les fils sont bobinés directement sur l'induit, les conducteurs sont isolés entre eux par un guipage (grande machine), ou un émail. Les faisceaux de fils ou des barres préformées sont isolés par rapport à la masse et entre eux ou avec un fil enroulé [2] .

- **Un collecteur commutatif rotatif** : un collecteur commutatif rotatif est un organe permettant de créer une connexion électrique entre la partie fixe (l'inducteur) et la partie mobile (l'induit), avec une fonction de commutation pendant la rotation.

Ce collecteur consiste en un anneau conducteur de l'électricité (généralement en cuivre), sectionné en un nombre pair de parties isolées entre elles, fixé avec une entretoise isolante sur l'axe de la machine. la connexion électrique est créée entre les parties conductrices et la partie fixée sur l'inducteur (borner), par une ou plusieurs paires de balais réalisés à base de carbone (ou des lames de métal souple pour les très petites machines) positionnées respectivement à 180 degrés. On alimente en électricité le bobinage d'induit par ces contacts (fonctionnement en moteur) ou au contraire on récupère l'électricité produite par le bobinage d'induit (fonctionnement en générateur) [3] .



Fig. I.4 : Collecteur .

▪ **Balais :** faite en carbone en raison de sa bonne conductivité électrique et de son faible coefficient de frottement.

En s'appuyant sur le collecteur, assurent un contact électrique entre l'induit et le circuit extérieur. Dans une machine à enroulements imbriqués, il y a autant de balais que de pôles magnétiques inducteur.

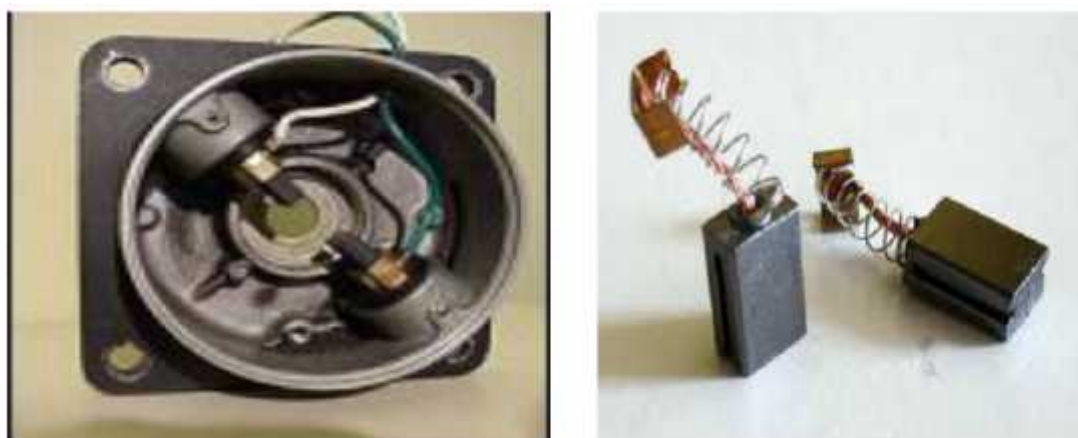


Fig. I.5 : Les balais .

3. Phénomène d'induction :

3.1. Loi de Laplace :

Un conducteur parcouru par un courant est soumis à une force de *LAPLACE* dont le sens est déterminé par la règle des trois doigts de la main droite, quand il est placé dans un champ magnétique. C'est phénomène de base à prendre en compte dans une conversion d'énergie électrique en énergie mécanique [2] .

$$\mathbf{F} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{I} \cdot \mathbf{L} \quad (1)$$

3.2. Principe de génératrice :

Un conducteur se déplaçant dans un champ magnétique va être le siège d'une force électromotrice (f.é.m.) induite. Il s'agit donc une conversion de sens inverse, d'énergie mécanique en énergie électrique.

4. Conversion d'énergie électromécanique :

Un appareil de conversion d'énergie électromécanique crée un lien entre un système électrique et un système mécanique. Lorsqu'un système mécanique fournit de l'énergie à un système électrique à travers cet appareil, ce dernier est une génératrice.

Lorsqu'un système électrique fournit de l'énergie à un système mécanique à travers cet appareil, ce dernier est un moteur.

Ce processus est réversible Toutefois, la part d'énergie convertie en chaleur est perdue, ce qui irréversible. Une machine électrique peut être conçue pour fonctionner en génératrice ou en moteur.

La conversion électromécanique dépend la relation entre les éléments suivants:

- ✓ les champs électriques et magnétiques;
- ✓ les forces mécaniques et mouvement.

Dans le cas d'une génératrice, l'enroulement est entraîné mécaniquement dans le champ magnétique. Les entraînements sont alors modifiés, ce qui entraîne des tensions induites.

Dans le cas d'un moteur, le conducteur porteur de courant est admis à l'intérieur d'un champ magnétique. Par conséquent, le couple qui en résulte est produit pour agir sur l'induit.

Qu'il s'agisse d'une génératrice ou d'un moteur, le conducteur porteur de courant se trouve à l'intérieur d'un champ magnétique. Les conducteurs et le flux se déplacent conjointement à une vitesse variable [6] .

Dans les machines tournantes, tension et couple sont générés. Seule la direction du flux de puissance détermine si la machine fonctionne en génératrice ou en moteur.

Dans une génératrice, la puissance est fournie par le générateur de force motrice. L'énergie électrique est produite par l'action de la génératrice, et de la puissance résulte générée en raison de friction est perdue. En revanche, dans le cas d'un moteur, la puissance est fournie par les entrées d'alimentation électrique et une légère perte se produit au niveau de la puissance mécanique résulte générée en raison de friction [4] .

5. Classification des machines à courant continu :

En générale les machines à courant continu peuvent être classés de différentes manières selon :

5.1. Classification selon le mode d'excitation :

5.1.1. Moteur en dérivation : dans ce type de machine, l'enroulement de champ est montré dans la culasse et l'enroulement d'induit sur le rotor. Ce type de moteur est utilisé lorsque la régulation de vitesse est importante.

▪ **A auto excitation** : L'enroulement de champ est connecté en parallèle (dérivation) avec l'enroulement d'induit sur la même alimentation .Modifier le courant de champ peut faire varier la vitesse ; le couple est proportionnel au courant d'induit. Ce type de moteur peut également fonctionner en génératrice. Pour limiter l'intensité du courant de démarrage du moteur, l'enroulement libère la tension dans la rampe

. Dans ce type de moteur, une résistance variable est connectée en série avec le circuit d'inducteur, pour diminuer légèrement la valeur du flux et de la vitesse [1] .

✓ Alimentation commune pour l'induit et l'inducteur mais le réglage de la vitesse devient.

✓ Problématique car en baissant la tension en baisse aussi le flux et le couple deviennent faibles.

▪ **A excitation séparée** : l'enroulement de champ est connecté en parallèle avec l'enroulement d'induit à l'aide d'une excitation séparée. Le couple est proportionnel au courant d'induit. Dans un moteur en dérivation excitation séparée, il est possible de faire varier la vitesse jusqu'à une certaine limite en modifiant la tension d'induit [4] .

Ils ont l'avantage d'avoir une vitesse relativement stable et réglable par la tension d'induit mais nécessaire une alimentation continue ou redressée pour l'inducteur [3] .

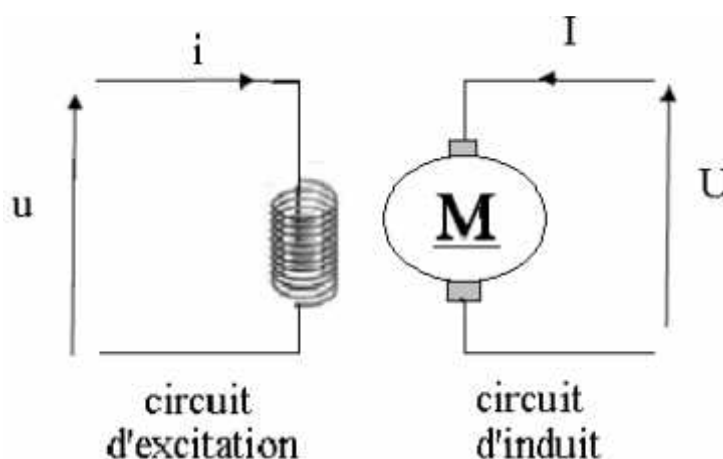


Fig. I.6 : Moteur à courant continu à excitation séparée .

5.1.2. Moteur série :

comme le nom de ce moteur l'indique, l'enroulement de champ est connecté en série avec l'enroulement d'induit dans ce type de moteur. Un courant de forte intensité circule. On a donc recours à un enroulement de champ de calibre supérieur.

Ce type de moteur est utilisé lorsque la régulation de vitesse n'est pas importante. Le principe avantage de ce moteur est que l'on peut obtenir un couple élevé, ce qui est utile pour les applications comme les locomotives Diesel ou les grues. Il est important de démarrer ce moteur sous charge, si non le moteur et les pièces environnantes peuvent être endommagés[4]. Très bon couple de démarrage, puisque le courant est le flux sont important au démarrage, par contre le réglage de la vitesse pose problème, elle varie avec la charge. Ce type de moteur est très utilisé en traction [3] .

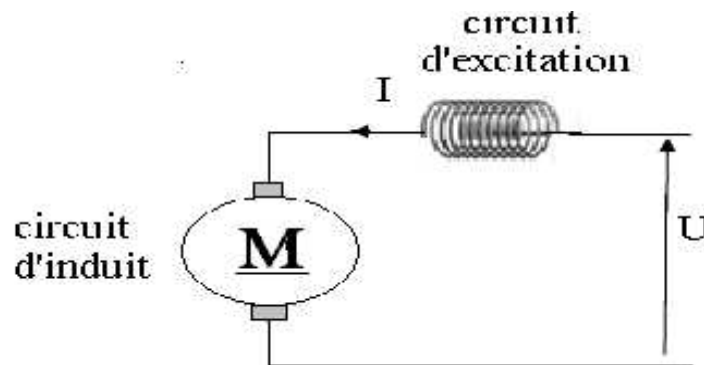


Fig. I.7 : Moteur à courant continu à excitation série .

5.1.3. Moteur à excitation composée : si l'on associe un moteur série et un moteur en dérivation, on obtient un moteur à excitation composée ou moteur compound. Ce dernier présente les caractéristiques avantageuses des deux moteurs:

Le couple élevé d'un moteur série et la régulation de vitesse d'un moteur en dérivation, Ces types des moteurs sont plus coûteux par rapport les types des moteurs précédents, Il existe deux types des moteurs composés, les moteurs composés à courte dérivation et à longue dérivation [4] .

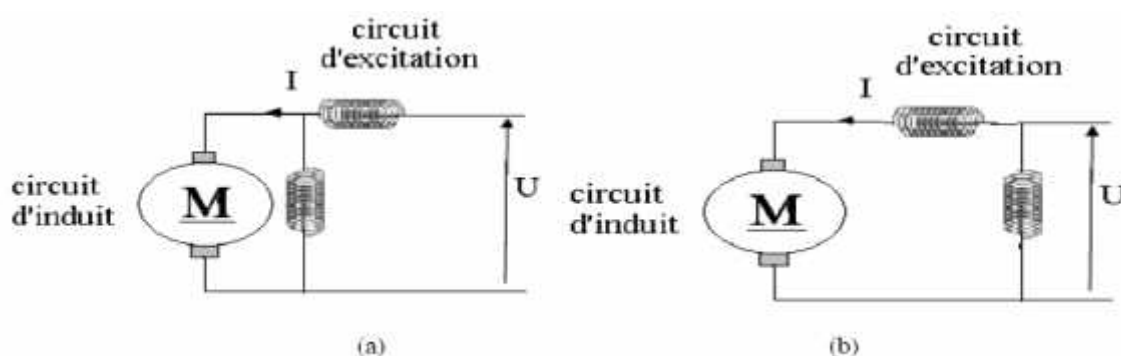


Fig. I.8 : (a) Moteur composé à courte dérivation et (b) moteur composée à longue dérivation .

6. Caractéristiques usuelles des moteurs à courant continu :

- Les moteurs à courant continu offrent un bon couple de démarrage, ainsi que des capacités de régulation de vitesse.
- Les moteurs à courant continu à aimant permanent sont utilisés pour le positionnement exact d'objets avec des couples de fonctionnement élevés.
- Les moteurs en série ont un couple de démarrage élevé et peuvent par conséquent démarrer avec des charges importantes.
- Les moteurs en série fonctionnement à vide peuvent atteindre des vitesses élevées, ce qui endommage le moteur.
- La vitesse d'un moteur à courant continu peut varier si l'on modifie la tension de l'induit ou le courant de champ.

- Les moteurs en dérivation offrent une bonne régulation de vitesse.
- Il est possible d'inverser le sens de marche d'un moteur à courant continu en modifiant les fils de l'induit ou du champ.
- Le moteur à courant continu est plus coûteux que le moteur à courant alternatif usuel. Son entretien est plus exigeant, mais on peut faire varier sa vitesse de rotation.

7. Les avantages et les inconvénients :

L'avantage principal des machines à courant continu réside dans leur adaptation simple aux moyens permettant de régler ou de faire varier leur vitesse, leur couple et leur sens de rotation.

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

La vitesse de rotation est élevée, plus la pression des balais doit augmenter pour rester en contact avec le collecteur donc plus le frottement est important aux vitesses élevées les balais doivent donc être remplacés très régulièrement. Un autre problème limite les vitesses d'utilisation élevées de ces moteurs lorsque l'induit est bobiné. Un certain nombre de ces inconvénients ont partiellement été résolus par des réalisations de moteurs sans fer à l'induit.

Les inconvénients ci-dessus ont été radicalement éliminés grâce à la technologie du moteur à courant continu sans balais [4] .

8. Conclusion :

Aujourd'hui malgré la prépondérance de ces applications des machines à courant alternatif notamment dans les systèmes de traction, les machines à courant continu occupe toujours une place de choix en raison de ses caractéristiques unique.

Dans ce chapitre, on a étudié la machine à courant continu sous forme générale (l'étude de la structure de sa machine), le principe de fonctionnement, la conversion d'énergie électromécanique, les avantages et inconvénient.

Dans le chapitre suivant on va faire la modélisation et la simulation de la machine à courant continu.

Chapitre 2

Modélisation est simulation de la machine à courant continu.

1. Introduction :

La simulation qui se fait avec le programme *MATLAB/SIMILINK* est nécessaire pour comprendre le comportement de la machine électrique avant leur utilisation ainsi que la validation de ces résultats. Dans ce chapitre, on a fait la transformation de *LAPLACE* de l'équation électrique et mécanique pour déduire le modèle de la machine à courant continu.

A partir ce modèle, on trace le schéma bloc qu'il permet d'obtenir les caractéristiques de ces machines.

La machine à courant continu peut être modélisée par le biais d'équations électriques , électromagnétique et mécanique. Ces trois groupes d'équations nous permettrons de mieux appréhender la machine à courant continu dans son fonctionnement réel . Du coté électrique nous pouvons dire que la machine à courant continu se définit par un circuit d'induit et un circuit inducteur: l'induit de la MCC peut-être vu comme une résistance R_a et une inductance L_a en série avec une source de tension commandée $e_m(t)$ proportionnelle à la vitesse $\omega(t)$. Du coté mécanique, nous représentons la machine à courant continu par l'inertie de l'induit augmentée de celui de la charge entraînée.

2. Modélisation de la machine à courant continu :

Modélisation de la machine à courant continu avec ces différents types d'excitations. On s'est basé sur les phénomènes physiques « transfert de puissance » pour réaliser la modélisation, et les modèles obtenus sont présentés par des liens graphiques.

Contrairement à la première partie on se concentre cette fois-ci sur les équations mathématiques qui régissent la machine à courant continu, on peut appeler cette modélisation par la modélisation numérique.

La modélisation numérique de la machine à courant continu peut se faire de plusieurs manières, et plusieurs repères sont possibles. Pour cela, notre choix est porté sur la modélisation du machine à courant continu dans le système d'axes « d. q ». L'outil *MATLAB/SIMILINK* présente une bonne plate-forme pour la validation et la simulation de nos modèles [7] .

2.1.Équation de la machine à courant continu :

Le circuit de l'induit d'une machine à courant continu à excitation shunt est représenté par sa force électromotrice (f.é.m.), sa résistance et l'inductance par la formule suivante [8] :

2.1.1. Equations électriques :

$$U_a(t) = R_a \cdot I_a + L_a \cdot \frac{dI_a(t)}{dt} + M_{af} \cdot I_f \cdot \omega(t) \quad (2-1)$$

$$U_f(t) = R_f \cdot I_f + L_f \frac{dI_f(t)}{dt} \quad (2-2)$$

2.1.2. Equations mécaniques :

Le moteur en rotation est décrit par l'équation (de la dynamique) d'équilibre suivante :

$$J \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} + f\omega(t) = C - C_r \quad (2.3)$$

2.1.3. Equation Electromagnétique :

$$C_e(t) = K \cdot \Phi_f(t) \cdot I_a(t) \cdot I_f(t) \quad (2.4)$$

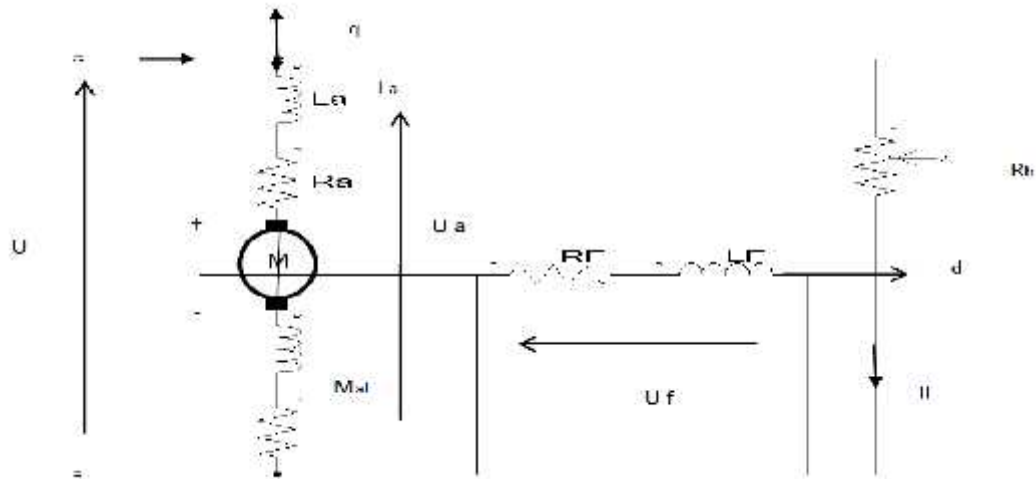


Fig. II.9 : Schéma de la MCC à excitation shunt sur les axes (d , q) .

3. Simulation de la MCC :

On effectue enfin les derniers réglages sur le schéma bloc en réduisant le temps de simulation de 0 à 5 seconde, en alimentant l'inducteur sous 220 V, l'induit sous 220V, et en réglant le couple résistant constant sur 12Nm.

Les paramètres de la machine à courant continu dans l'annexe A.

3.1. Schéma bloc de moteur à courant continu :

Pour faire la simulation, nous réalisons le modèle ci-dessous sous *MATLAB/SIMILINK*:

La partie électrique :

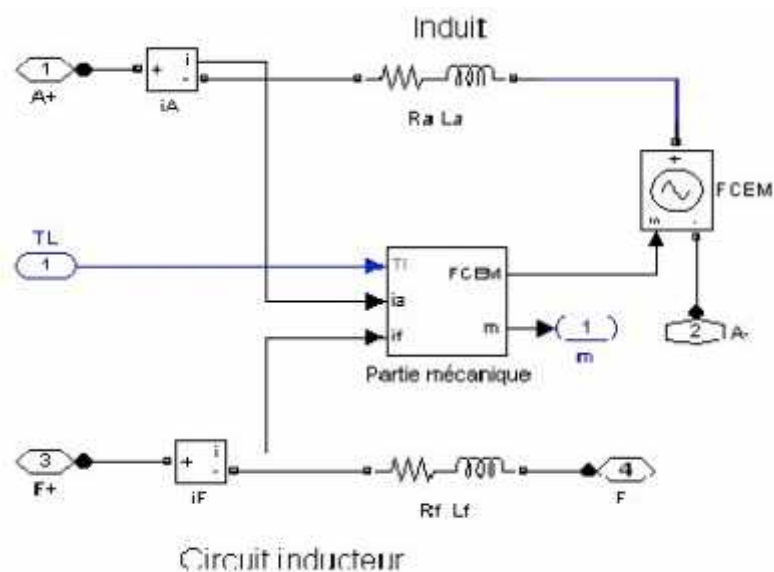


Fig. II.11 : Réalisation de la partie électrique de la MCC sous Simulink .

La partie mécanique :

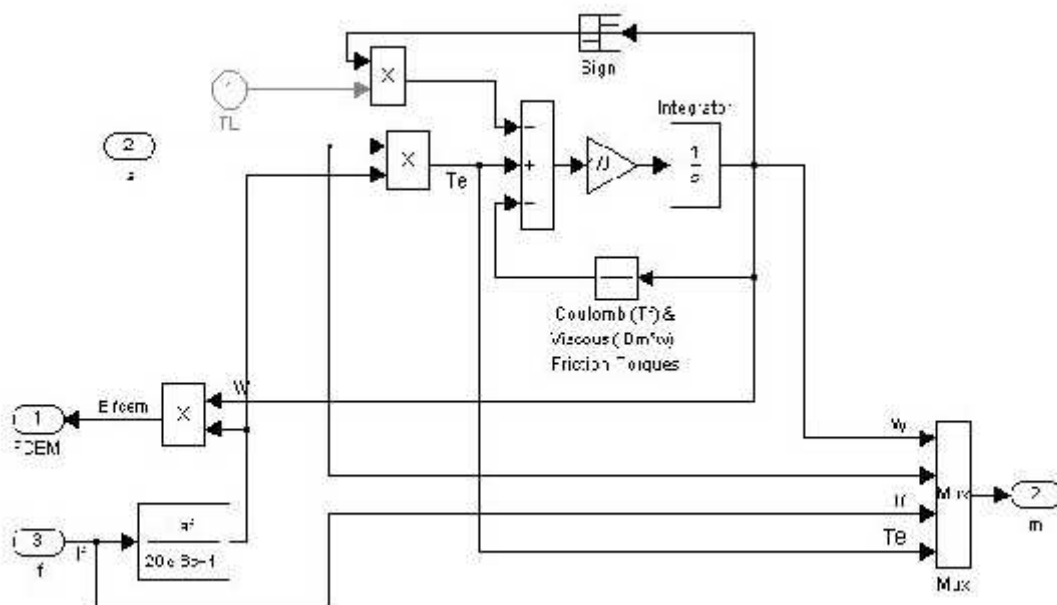


Fig. II.12 : Réalisation de la partie mécanique de la MCC sous Simulink .

Le regroupement de ces deux donne :

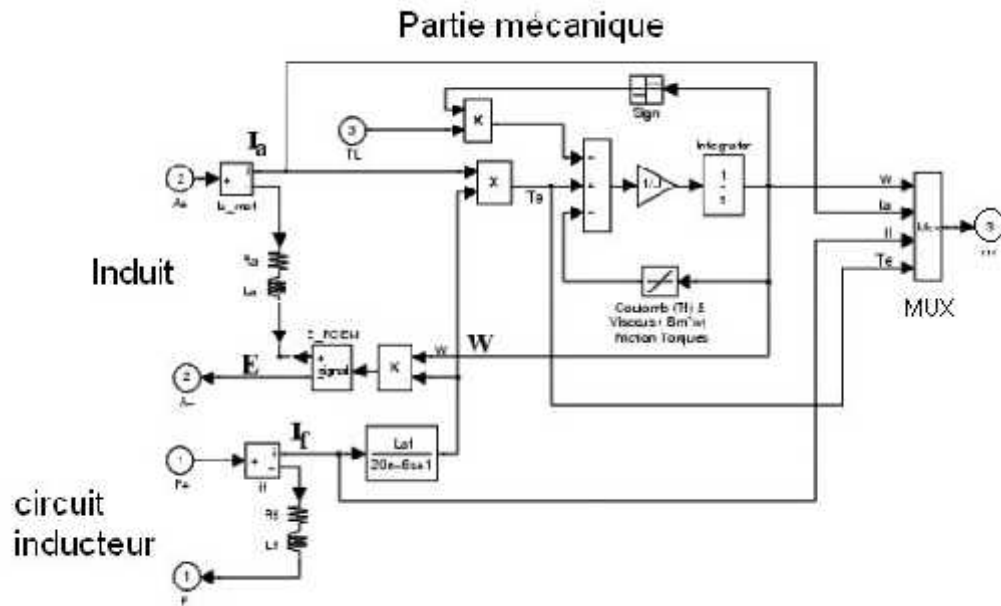


Fig. II.13 : Réalisation de la MCC sous Simulink .

- ✓ Le circuit magnétique (inducteur) est représenté par un circuit R-L (R_f , L_f) en série. Il est connecté entre les bornes F+ et F- du bloc de la machine à courant continu.
- ✓ Le circuit d'induit est aussi un circuit R-L série (R_a , L_a) en série avec une source de tension contrôlée et un bloc de mesure de courant . Il est connecté entre les bornes A+ et A- de la machine .

- ✓ La partie mécanique calcule la vitesse de la machine à partir du couple appliqué au rotor. Cette vitesse et le courant d'excitation sont utilisés pour le calcul de la force contre électromotrice du circuit d'induit. Elle est représentée par des blocs Simulink mettant en œuvre l'équation :

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = T_0 - \text{sgn}(\omega) T_L - B_n - T_f$$

✚ Independent :

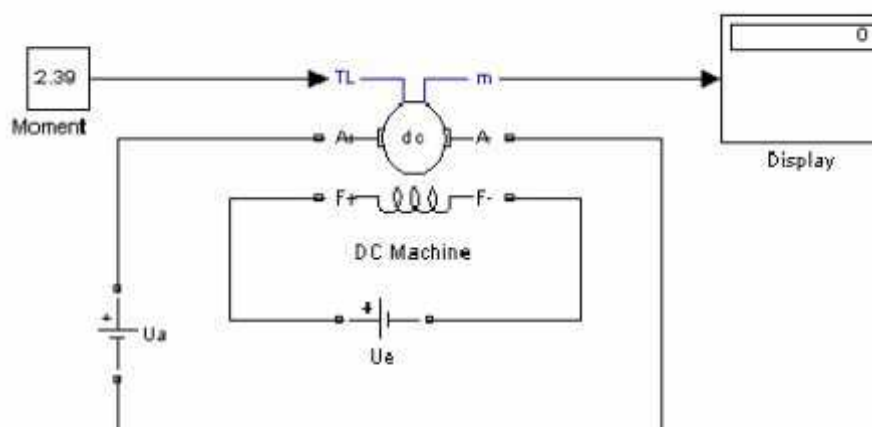


Fig. II.14 : Modèle Simulink de la MCC à excitation indépendante .

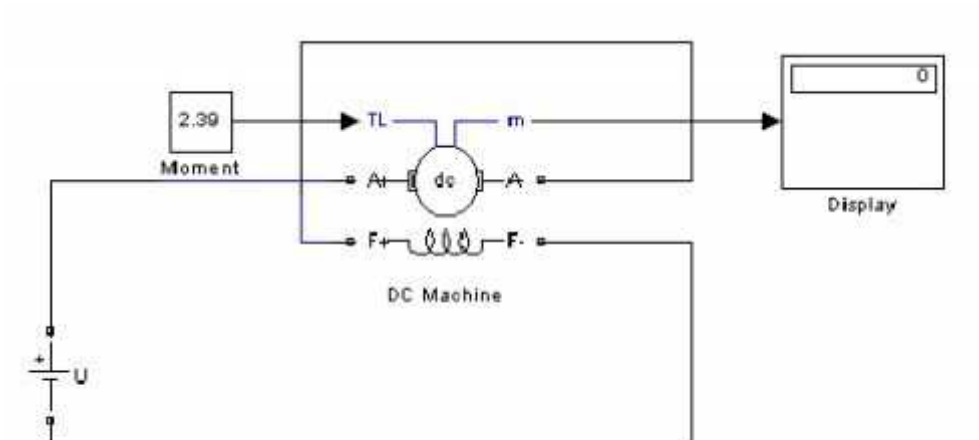
 Série :

Fig. II.15 : Modèle Simulink de la MCC à excitation série .

* Pour nos modèles, nous avons utilisé les blocs suivants :

- *Source de tension continue* de la bibliothèque *Power System Block set / Electrical Sources*,
- *Moment*, pour donner les différentes valeurs du moment du couple de charge. C'est le bloc *constant* de la bibliothèque *Simulink / Sources*,
- *Display*, de mesure des variables d'état de la machine, de la bibliothèque *Simulink / Sinks*,
- *DC machine*, représentant la MCC, de la bibliothèque *Power System Block set / Machines* .

3.3 -Laboratoire n°1 : Etude de la MCC à excitation indépendante :

3.3.1 - Mise en œuvre du laboratoire virtuel :

Le laboratoire virtuel est représenté sur la fig. 5.14 ; il comprend les mêmes éléments que le précédent.

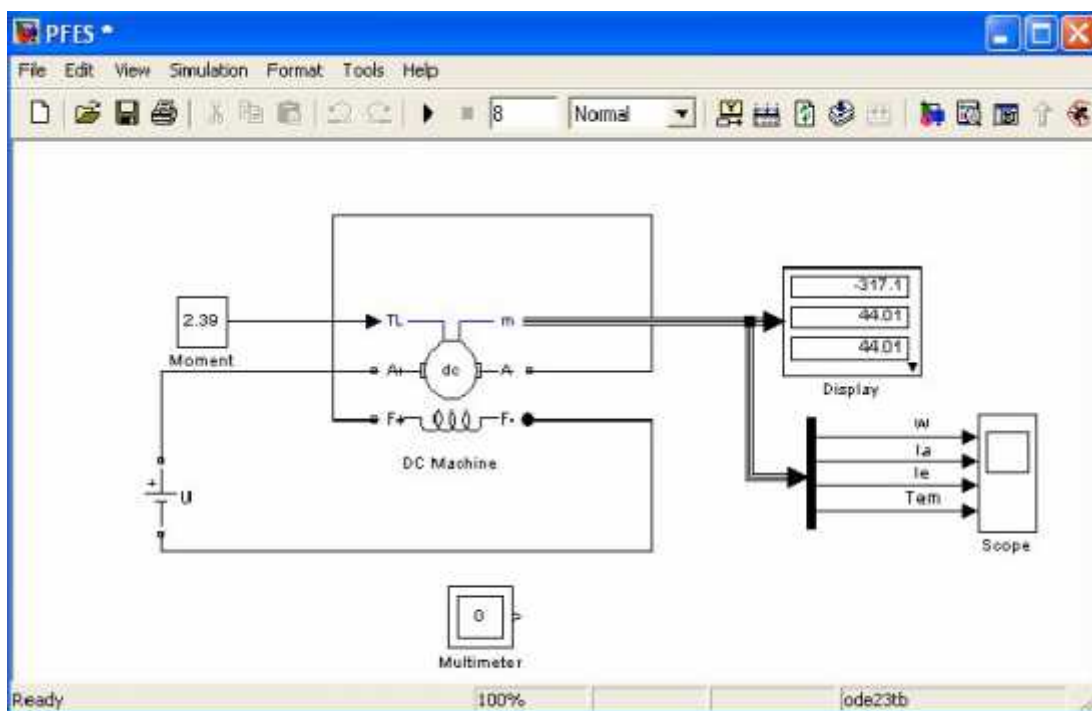


Fig. II.16 : Modèle pour l'étude de la MCC à excitation série .

3.3.2- Relevé de la caractéristique mécanique, et calcul des caractéristiques de fonctionnement de la machine en régime de moteur :

| Données | Mesures | | | Calculs | | |
|---------|------------------|-----------|-----------|---------|---------|--------|
| | ω (rad/s) | I_a (A) | I_e (A) | P1 (W) | P2 (W) | η |
| 0 | 357.9 | 0.0175 | 2.391 | 529.87 | 0 | 0 |
| 0.478 | 354.7 | 0.7957 | - | 701.07 | 169.547 | 0.2419 |
| 0.956 | 351.5 | 1.573 | - | 872.08 | 336.387 | 0.3857 |
| 1.434 | 348.3 | 2.351 | - | 1043.24 | 499.462 | 0.4788 |
| 1.912 | 345.1 | 3.129 | - | 1214.4 | 659.83 | 0.5433 |
| 2.39 | 342 | 3.905 | - | 1385.12 | 817.38 | 0.5901 |
| 2.868 | 338.8 | 4.684 | - | 1556.5 | 971.678 | 0.6243 |
| 3.3 | 335.9 | 5.386 | - | 1710 | 1108.47 | 0.6482 |
| 3.8 | 332.6 | 6.2 | - | 1890 | 1263.88 | 0.6687 |
| 4.3 | 329.2 | 7.014 | - | 2069.1 | 1415.56 | 0.6841 |
| 4.8 | 325.9 | 7.827 | - | 2248 | 1564.8 | 0.6961 |
| 5.3 | 322.5 | 8.641 | - | 2427 | 1709.3 | 0.7043 |
| 5.7 | 319.9 | 9.292 | - | 2570.3 | 1823.4 | 0.7094 |
| 6.2 | 316.5 | 10.11 | - | 2750.2 | 1962.3 | 0.7135 |
| 6.7 | 313.2 | 10.92 | - | 2928.4 | 2098.4 | 0.7166 |
| 7.2 | 309.9 | 11.73 | - | 3106.6 | 2231.3 | 0.7182 |
| 7.6 | 307.2 | 12.38 | - | 3249.62 | 2334.7 | 0.7184 |
| 8.1 | 303.9 | 13.2 | - | 3430 | 2461.6 | 0.7177 |
| 8.6 | 300.5 | 14.01 | - | 3608.2 | 2584.3 | 0.7162 |
| 9.1 | 297.2 | 14.82 | - | 3786.4 | 2704.5 | 0.7143 |
| 9.6 | 293.9 | 15.64 | - | 3966.8 | 2821.4 | 0.7113 |
| 10 | 291.2 | 16.29 | - | 4109.8 | 2912 | 0.7086 |
| 10.5 | 287.9 | 17.1 | - | 4288 | 3022.9 | 0.7050 |
| 11 | 284.5 | 17.91 | - | 4466.2 | 3129.5 | 0.7007 |
| 11.5 | 281.2 | 18.73 | - | 4646.6 | 3233.8 | 0.6959 |
| 12 | 277.8 | 19.54 | - | 4824.8 | 3333.6 | 0.6909 |
| 12.5 | 274.5 | 20.36 | - | 5005.2 | 3431.3 | 0.6855 |
| 13 | 271.2 | 21.17 | - | 5183.4 | 3525.6 | 0.6802 |

Tableau Relevé des caractéristiques du moteur.

Tableau suite.

| Données | Mesures | | | Calculs | | |
|---------|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|
| | ω (rad/s) | I_a (A) | I_e (A) | P_1 (W) | P_2 (W) | η |
| 13.5 | 267.8 | 21.98 | - | 5361.6 | 3615.3 | 0.6743 |
| 14 | 261.5 | 22.8 | - | 5542 | 3703 | 0.6682 |
| 14.5 | 261.2 | 23.61 | - | 5720.2 | 3787.4 | 0.6621 |
| 15 | 257.8 | 24.42 | - | 5898.4 | 3867 | 0.6556 |
| 16.5 | 247.8 | 26.86 | - | 6435.2 | 4088.7 | 0.6354 |
| 17 | 244.5 | 27.68 | - | 6615.6 | 4156.5 | 0.6283 |
| 17.5 | 241.2 | 28.49 | - | 6793.8 | 4221 | 0.6213 |
| 18 | 237.8 | 29.3 | 2.391 | 6972 | 4269.6 | 0.6124 |
| 18.5 | 234.5 | 30.12 | - | 7152.4 | 4338.3 | 0.6066 |
| 19 | 231.1 | 30.93 | - | 7330.6 | 4390.9 | 0.5990 |
| 19.5 | 227.8 | 31.74 | - | 7508.8 | 4442.1 | 0.5916 |
| 20 | 224.5 | 32.56 | - | 7689.2 | 4490 | 0.5839 |

Les calculs des différentes grandeurs à partir des formules suivantes :

$$P_1 = U(I_a + I_E) \quad , \quad P_2 = M_{nom}\omega \quad , \quad \eta = \frac{P_2}{P_1}$$

❖ **Caractéristique mécanique :**

A partir de ce tableau on trace la caractéristique mécanique $\omega=f(M)$. La courbe est la suivante :

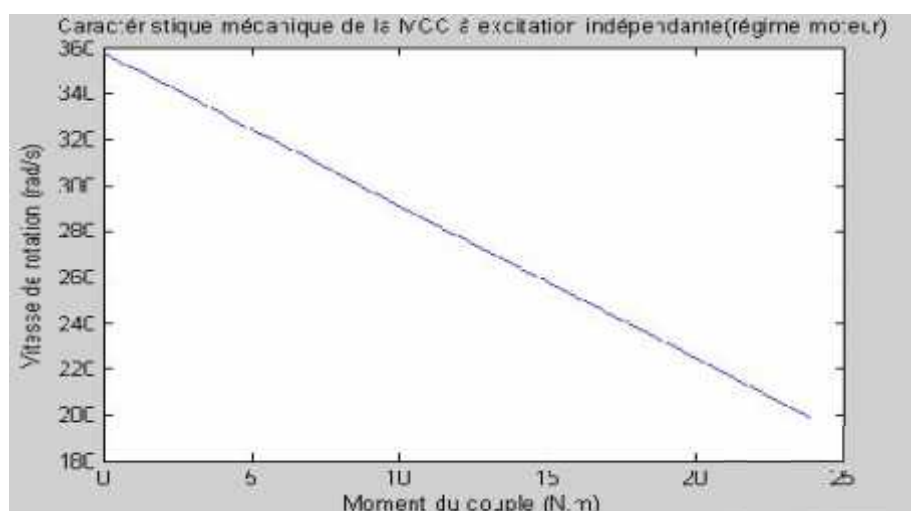


Fig. II.17 : Courbe de la caractéristique mécanique $\omega = f(M)$.

❖ Caractéristiques de fonctionnement du moteur :

- Vitesse en fonction de la puissance de sortie :

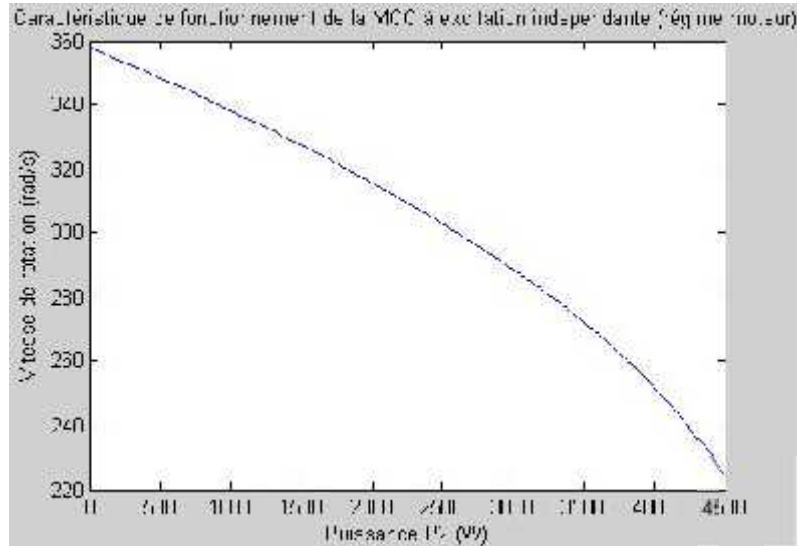


Fig. II.18 : Courbe de la caractéristique de fonctionnement $\omega = f(P2)$.

- Moment en fonction de la puissance de sortie :

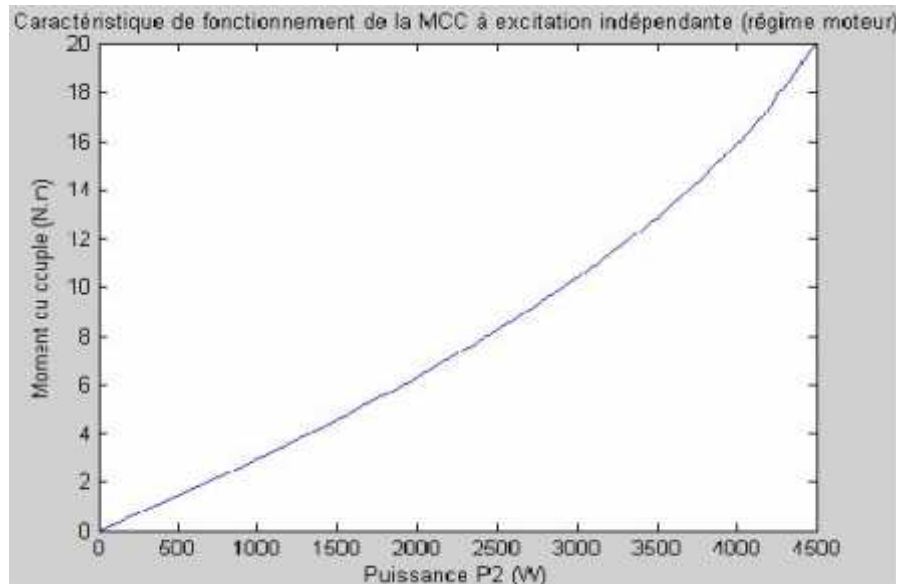


Fig. II.19 : Courbe de la caractéristique de fonctionnement $M=f(P2)$.

- **Courant d'induit en fonction de la puissance de sortie :**

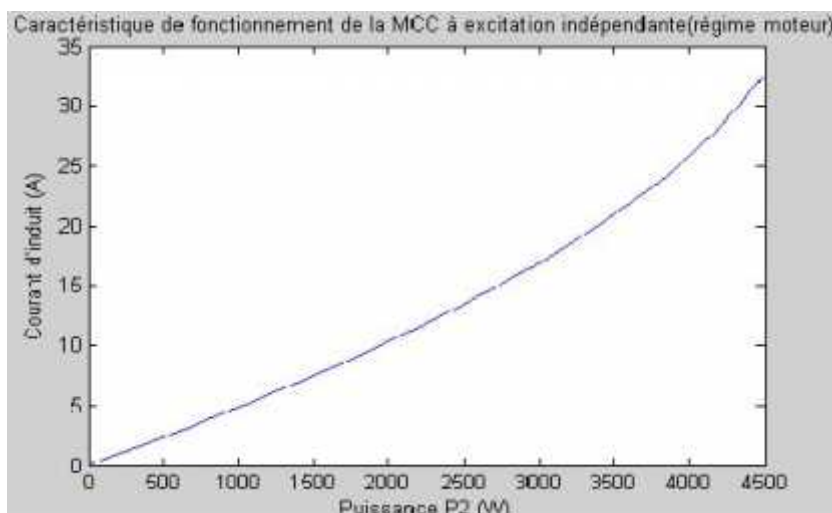


Fig. II.20 : Courbe de la caractéristique de fonctionnement $I_a=f(P_2)$.

- **Rendement en fonction de la puissance de sortie :**

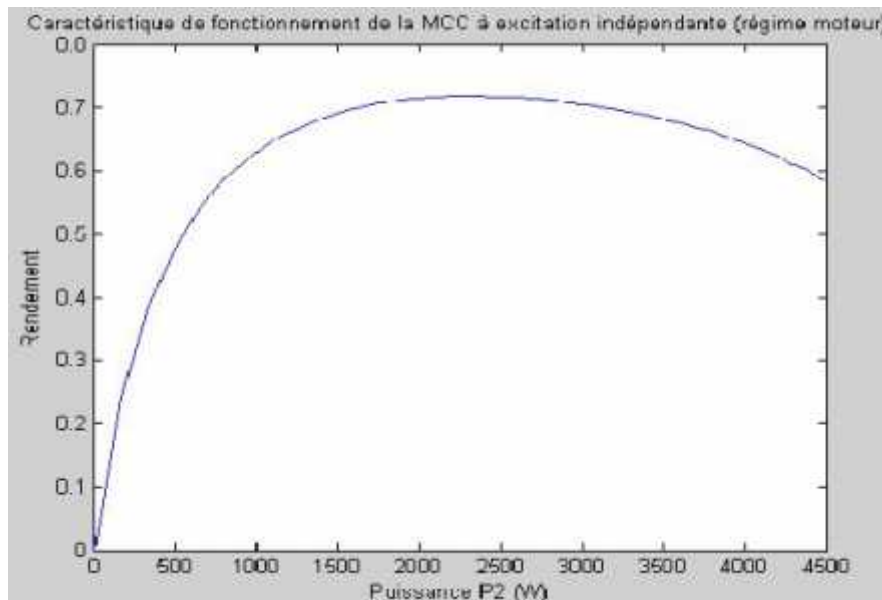


Fig. II.21 : Courbe de la caractéristique de fonctionnement $\eta=f(P_2)$.

3.3.3 Relevé de la caractéristique mécanique, et calcul des caractéristiques de fonctionnement de la machine en régime de générateur:

Le relevé des caractéristiques s'effectue sur le modèle de la fig. 5.1. On effectue la modélisation (dans la fenêtre de réglage du bloc moment) pour chaque valeur du couple de charge qui varie de 0 à -1.2 du moment du couple nominal. On a le tableau suivant :

Tableau 5.3 : Relevé des caractéristiques du générateur

| Données | Mesures | | | Calculs | | |
|---------|------------------|-----------|-----------|---------|--------|--------|
| | ω (rad/s) | I_a (A) | I_e (A) | P1 (W) | P2 (W) | H |
| 0 | 357.9 | 0.0175 | 2.391 | 520.87 | 0 | 0 |
| -0.478 | 361.1 | -0.7584 | 2.391 | 692.87 | 172.61 | 0.2491 |
| -0.956 | 364.3 | -1.536 | 2.391 | 863.94 | 348.27 | 0.4031 |
| -1.434 | 367.5 | -2.341 | 2.391 | 1041 | 527 | 0.5062 |
| -1.912 | 370.7 | -3.092 | 2.391 | 1206.3 | 708.78 | 0.5876 |
| -2.39 | 373.8 | -3.869 | 2.391 | 1377.2 | 893.38 | 0.6487 |
| -2.868 | 377 | -4.647 | 2.391 | 1548.4 | 1081.2 | 0.6983 |

Les calculs se font comme précédemment. Signalons que le rendement se calcul par :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

- **Caractéristique mécanique :**

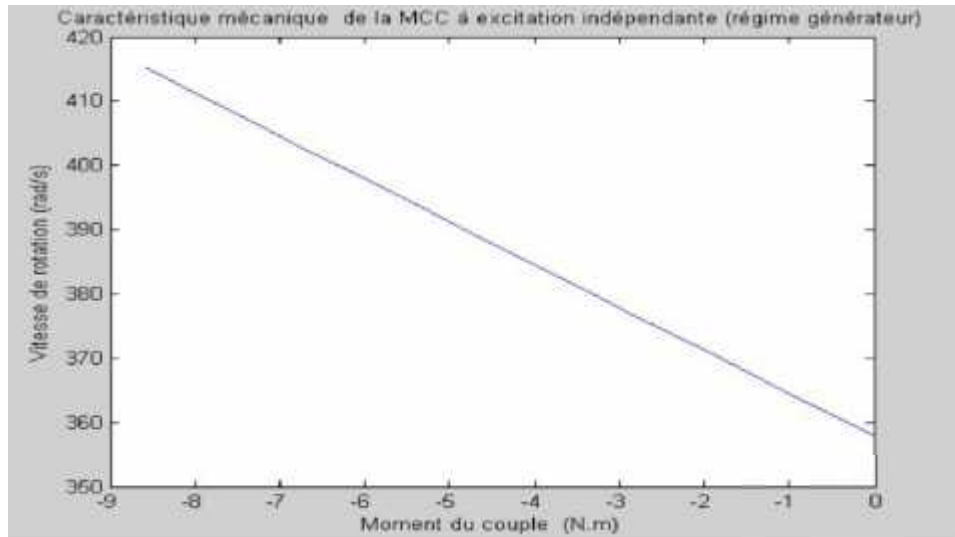


Fig. II.22 : Courbe de la caractéristique mécanique $\omega = f(M)$.

- ❖ **Caractéristiques de fonctionnement du générateur :**

- **Vitesse en fonction de la puissance de sortie :**

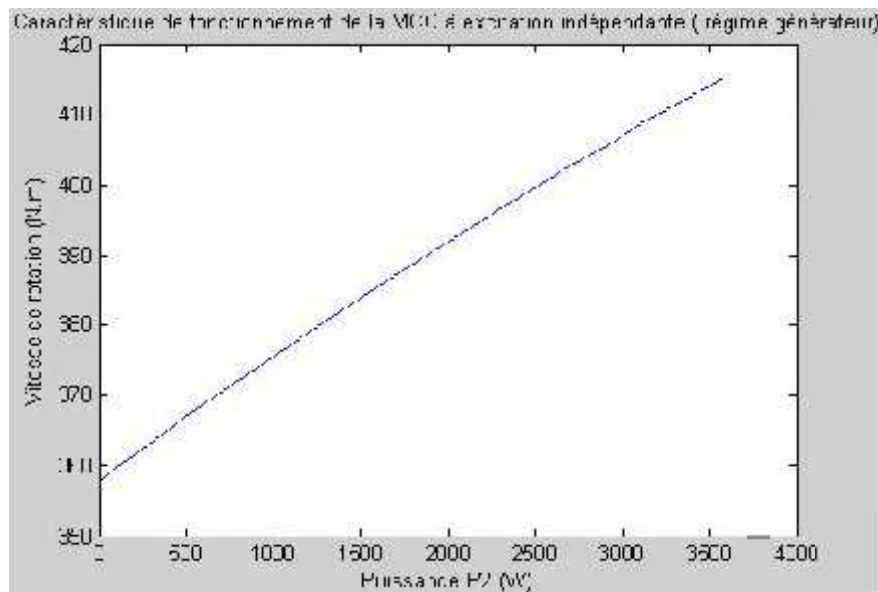


Fig. II.23 : Courbe de la caractéristique de fonctionnement $\omega = f(M)$.

- Moment en fonction de la puissance de sortie :

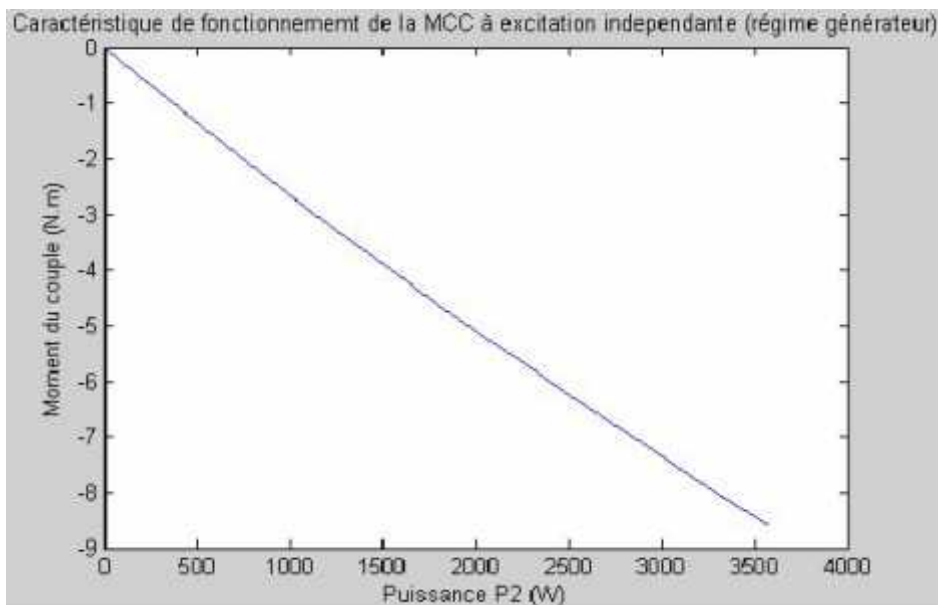


Fig. II.24 : Courbe de la caractéristique de fonctionnement $M=f(P_2)$.

- Courant d'induit en fonction de la puissance de sortie :

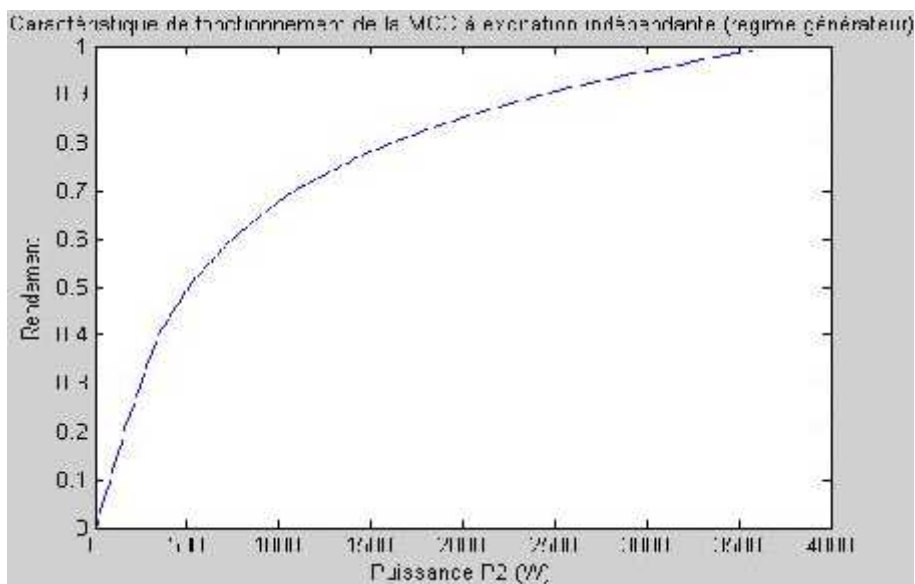


Fig. 25 : Courbe de la caractéristique de fonctionnement $\eta=f(P_2)$.

3.4 - Laboratoire n°2 : Etude de la MCC à excitation série :

3.4.1 - Mise en œuvre du laboratoire virtuel : Le laboratoire virtuel est représenté sur la fig. 5.14 ; il comprend les mêmes éléments que le précédent.

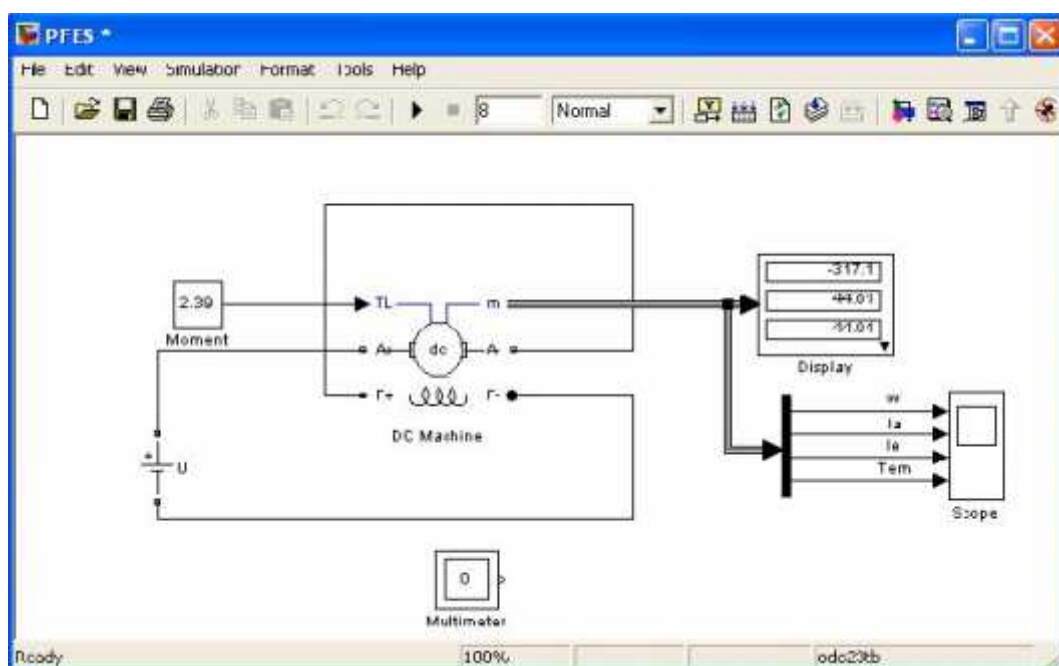


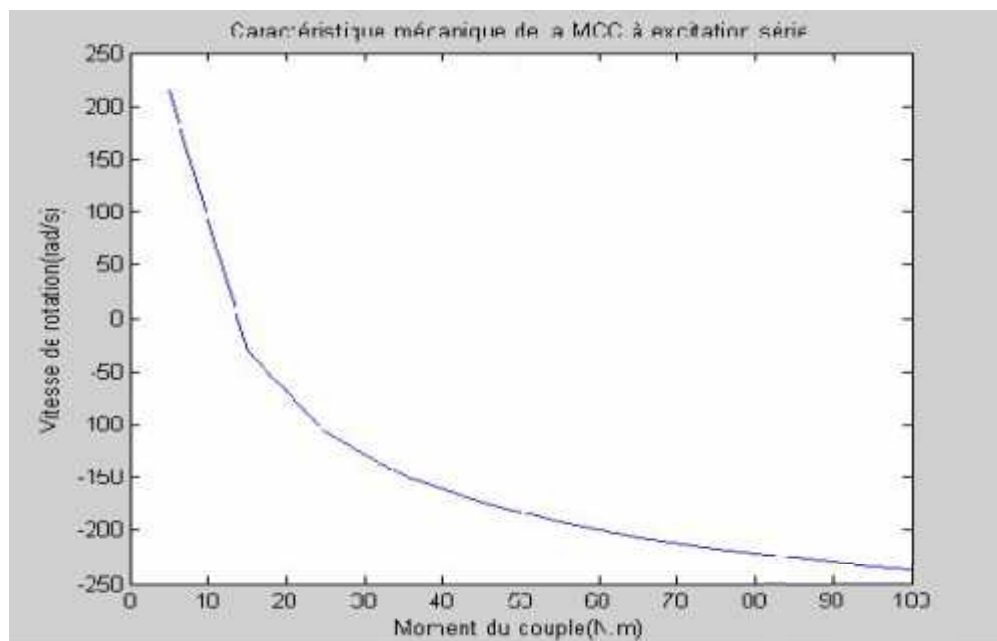
Fig. II.26 : Modèle pour l'étude de la MCC à excitation série .

3.4.2 - Relevé des caractéristiques mécaniques et de fonctionnement de la MCC à excitation série :

| Données | | Mesures | | Calculs | | |
|---------|------------------|---------|--------|---------|---------|--------|
| M (N.m) | ω (rad/s) | Ia (A) | Ie (A) | P1 (W) | P2 (W) | η |
| 5 | 213.9 | 4.415 | 4.415 | 5827.8 | 1067 | 0.1831 |
| 15 | -31.56 | 7.638 | 7.638 | 10082 | -473.4 | 0.4695 |
| 25 | -107.4 | 9.861 | 9.861 | 13017 | -2685 | 0.2063 |
| 35 | -147.7 | 11.67 | 11.67 | 15404 | -5169.5 | 0.3356 |
| 45 | -173.7 | 13.23 | 13.23 | 17464 | -7816.5 | 0.4176 |
| 55 | -192.2 | 14.63 | 14.63 | 19312 | -10571 | 0.5474 |
| 65 | -206.3 | 15.9 | 15.9 | 20988 | -13410 | 0.6389 |
| 75 | -217.4 | 17.08 | 17.08 | 22546 | -16305 | 0.7232 |
| 85 | -226.6 | 18.19 | 18.19 | 24011 | -19261 | 0.8022 |
| 95 | -234.2 | 19.23 | 19.23 | 25384 | -22249 | 0.8706 |
| 100 | -237.6 | 19.72 | 19.72 | 26030 | -23760 | 0.9128 |

Tableau Relevé des caractéristiques mécaniques .

- **Caractéristique mécanique :**

Fig. II.27 : Courbe de la caractéristique mécanique $\omega = f(M)$.

- **Caractéristiques de fonctionnement du moteur :**
- **Vitesse en fonction de la puissance de sortie :**

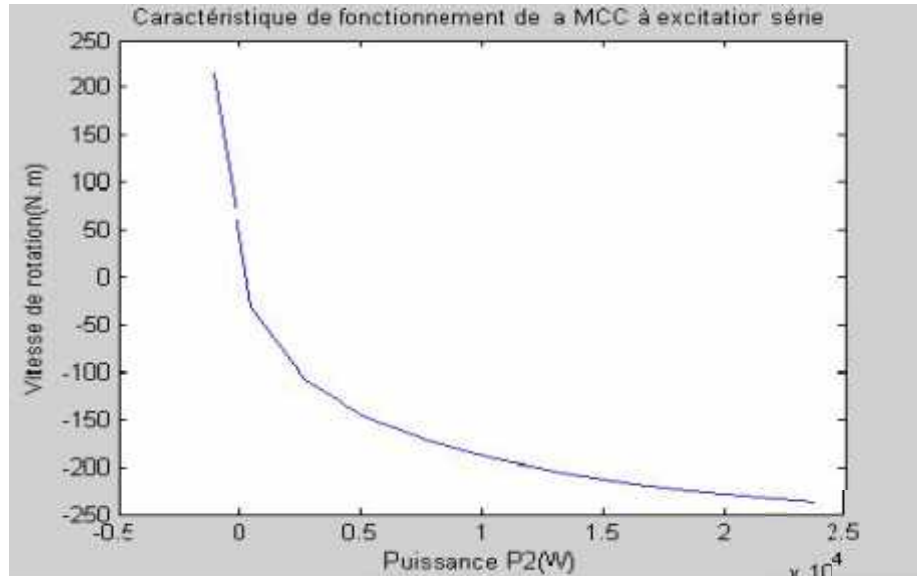


Fig. II.28 : Courbe de la caractéristique de fonctionnement $\omega = f(P2)$.

- **Moment en fonction de la puissance de sortie :**

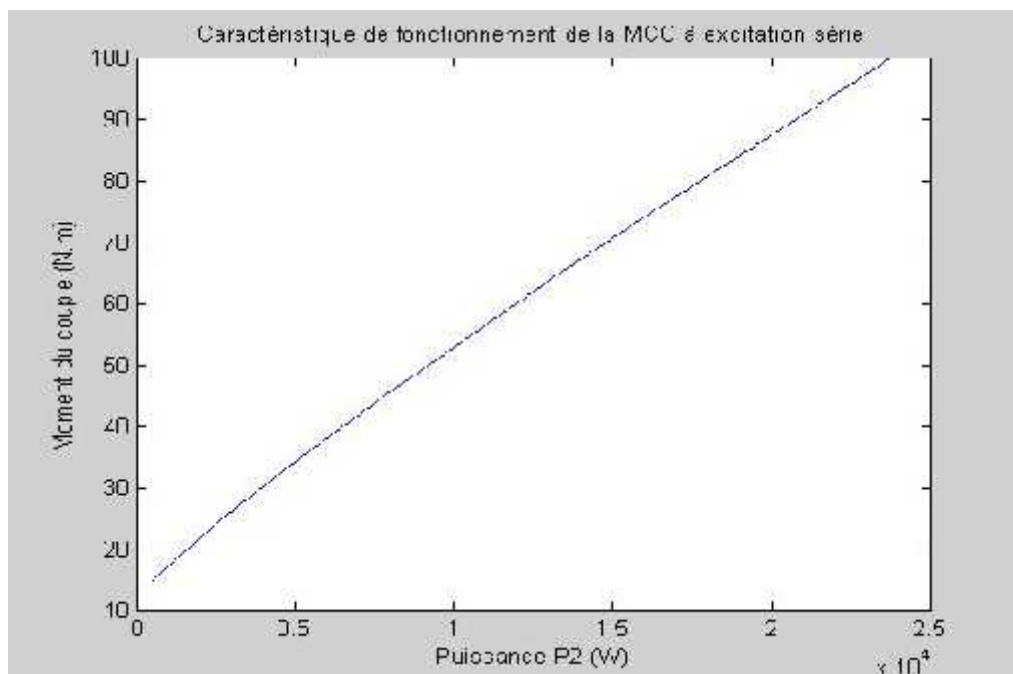


Fig. II.29 : Courbe de la caractéristique de fonctionnement $M=f(P2)$.

- Courant d'induit en fonction de la puissance de sortie :

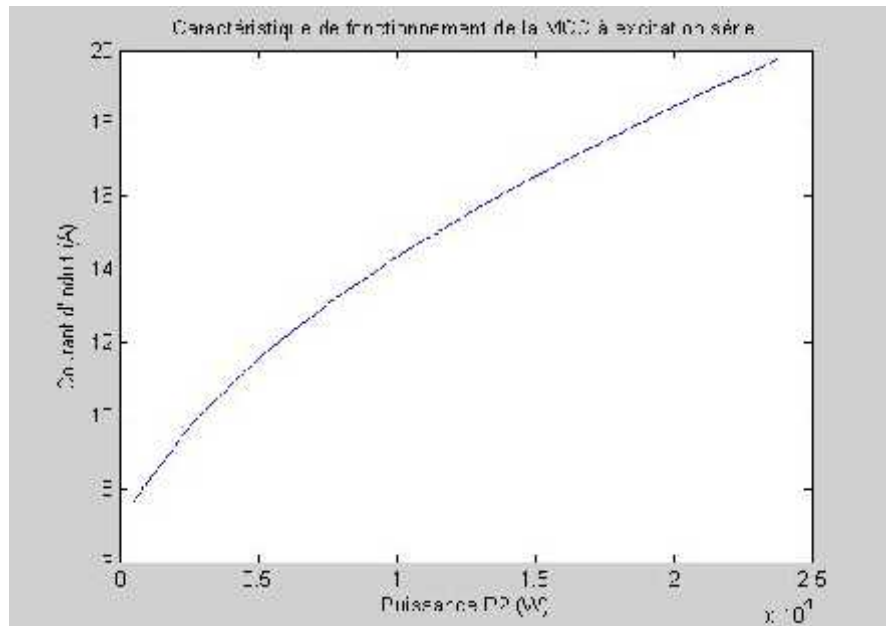


Fig. II.30 : Courbe de la caractéristique de fonctionnement $I_a=f(P_2)$.

- Rendement en fonction de la puissance de sortie :

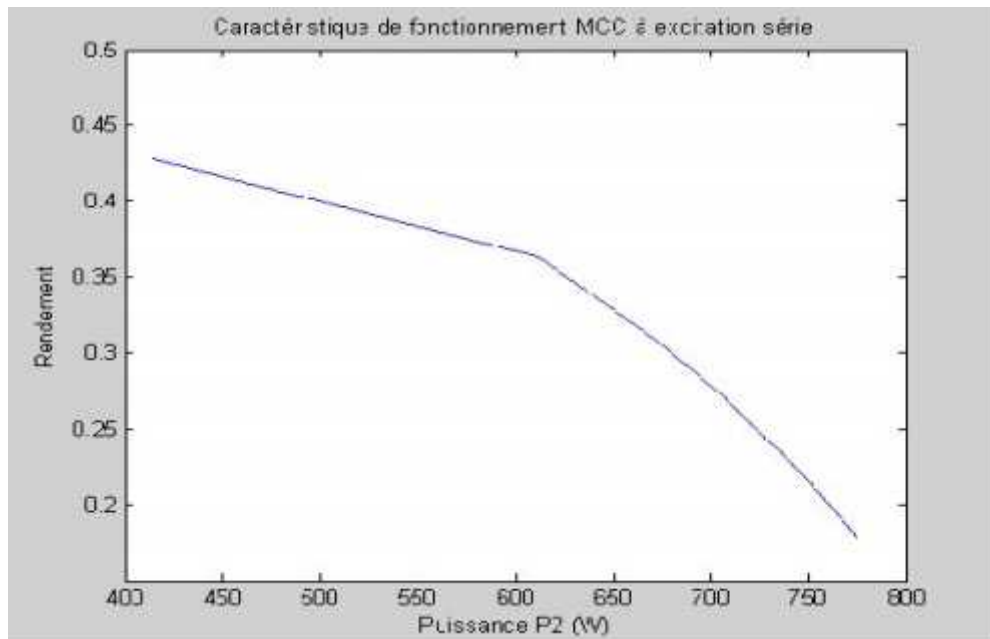


Fig. II.31 : Courbe de la caractéristique de fonctionnement $\eta=f(P_2)$.

3.5. Les résultats de simulation :

3.5.1. Fonctionnement en moteur :

- À vide

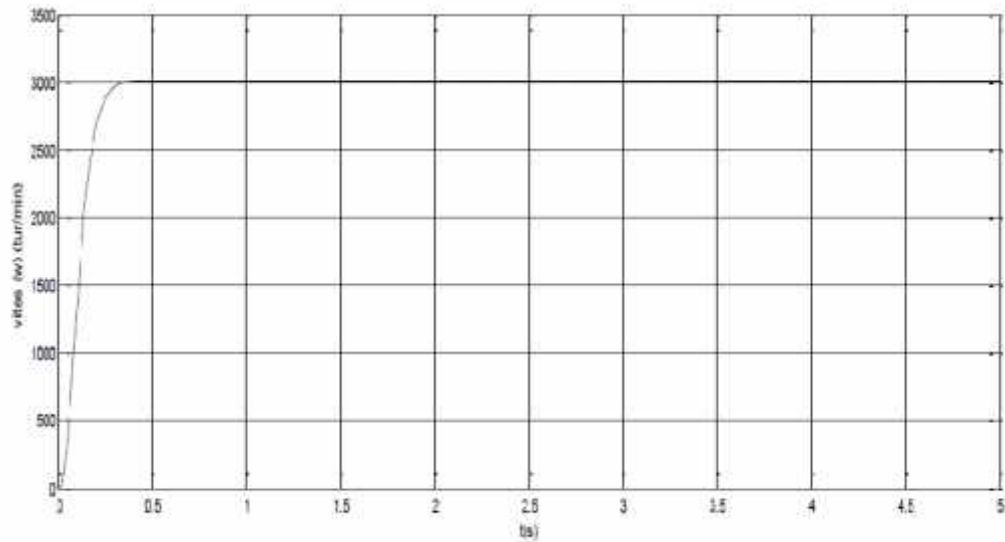


Fig. II.32 : la vitesse de rotation w (tr \ min) .

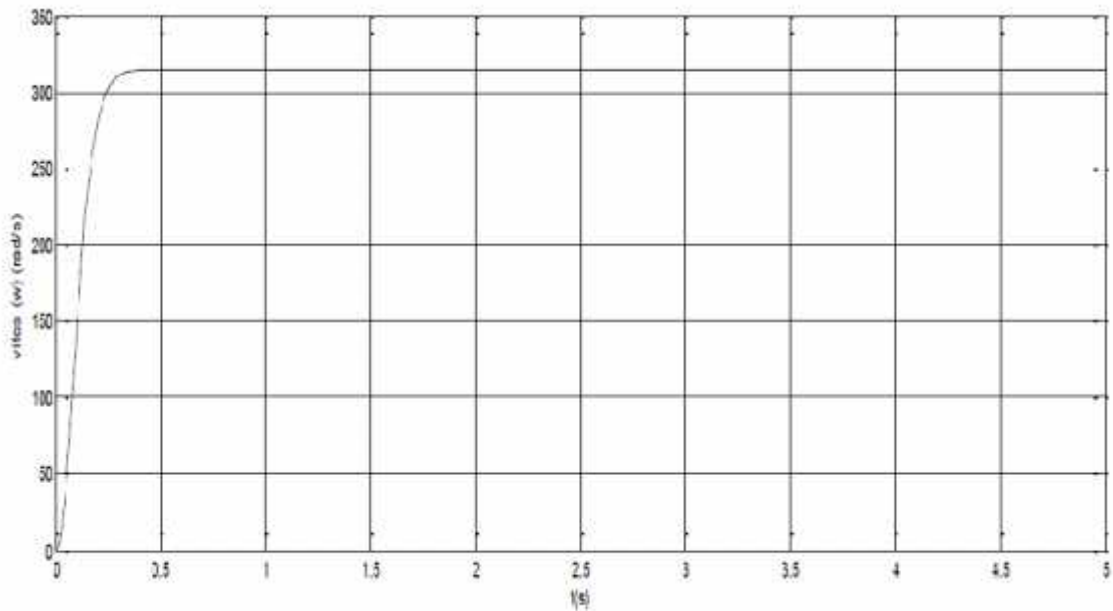


Fig. II.33 : la vitesse de rotation w (rad/s) .

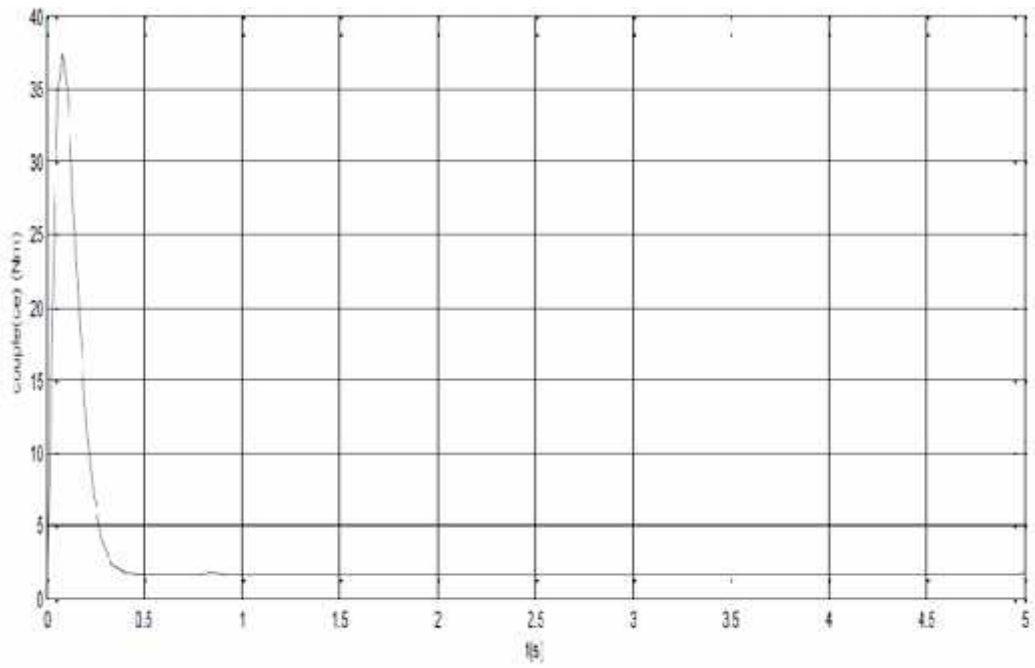


Fig. II.34 : le couple (N.m) .

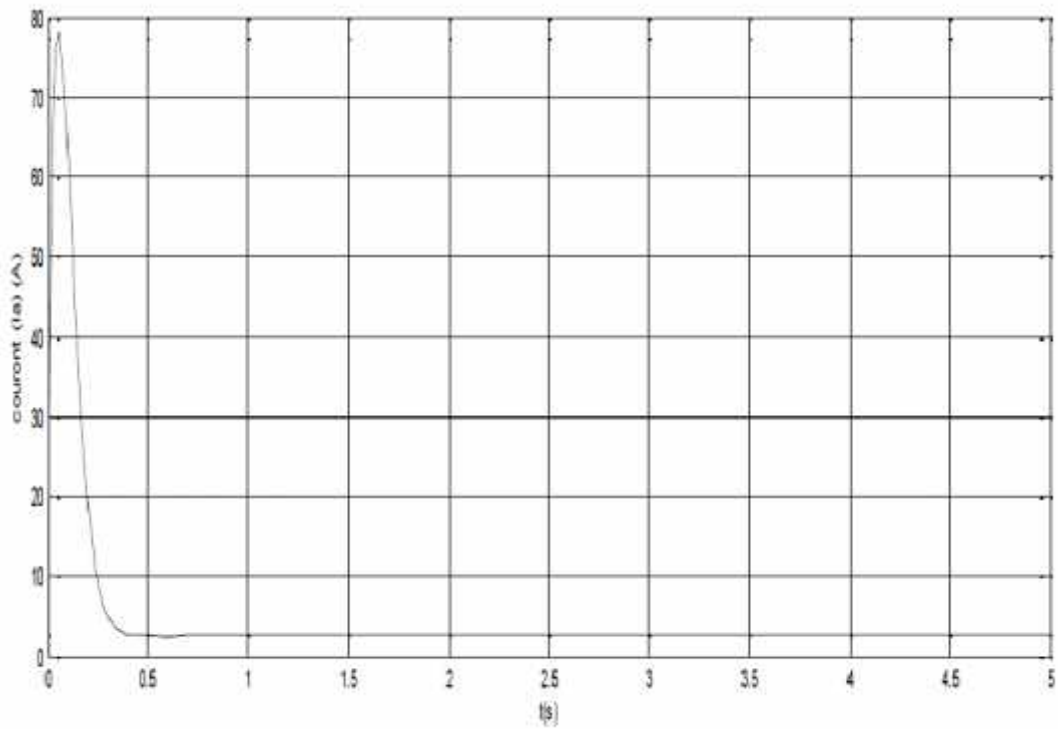


Fig. II.35 : le courant d'excitation I_a (A) .

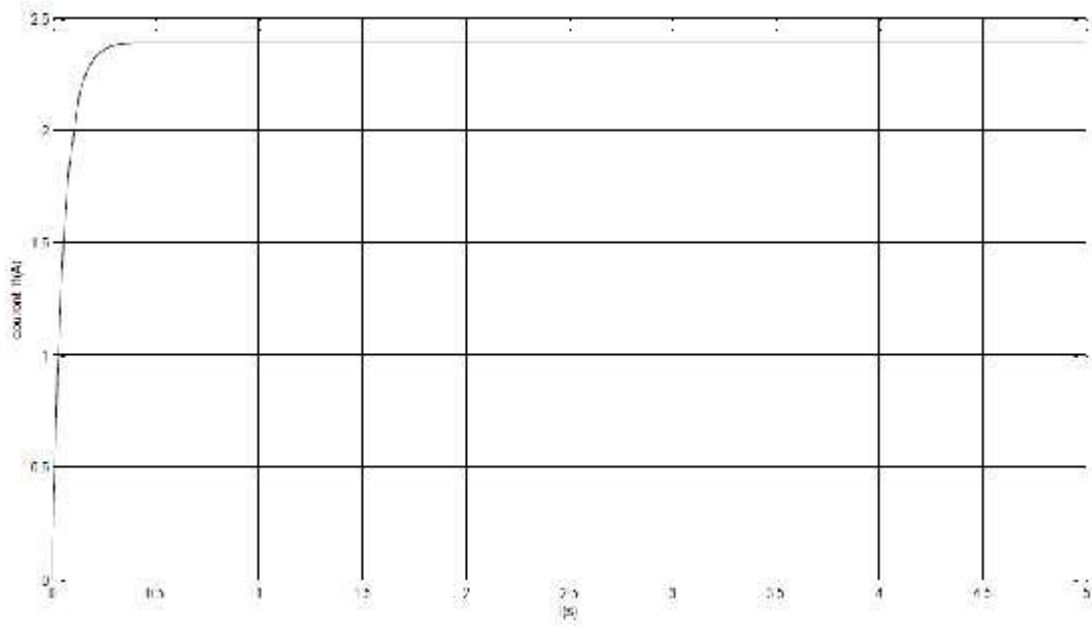


Fig. II.36 : le courant d'excitation I_f (A) .

- **En charge :**

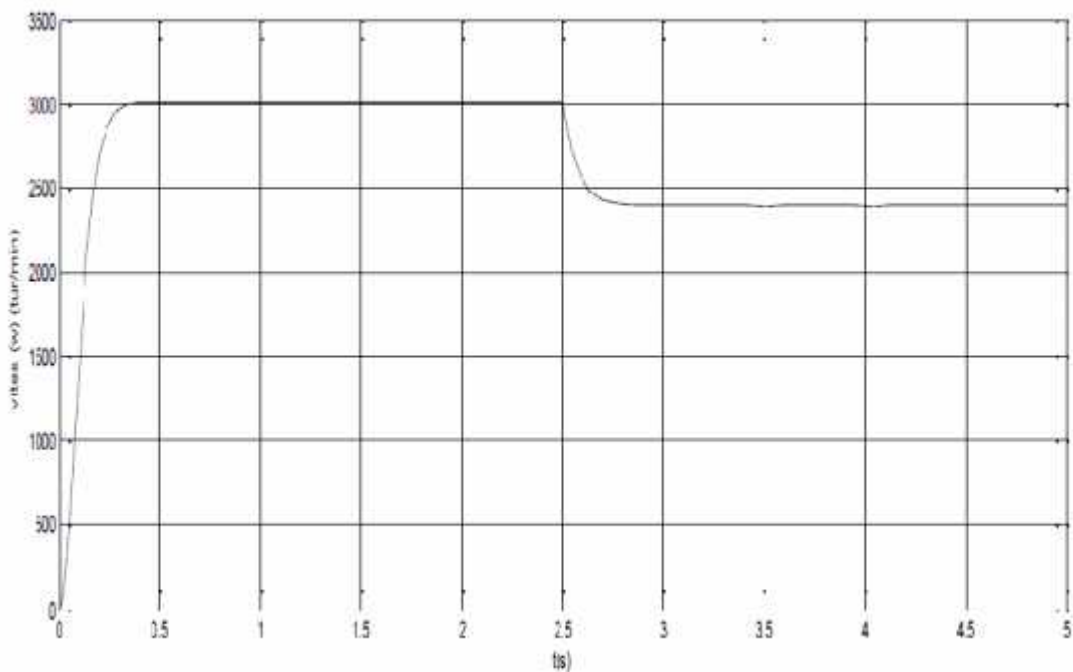


Fig. II.37 : le vitesse de rotation charge (tr \ min) .

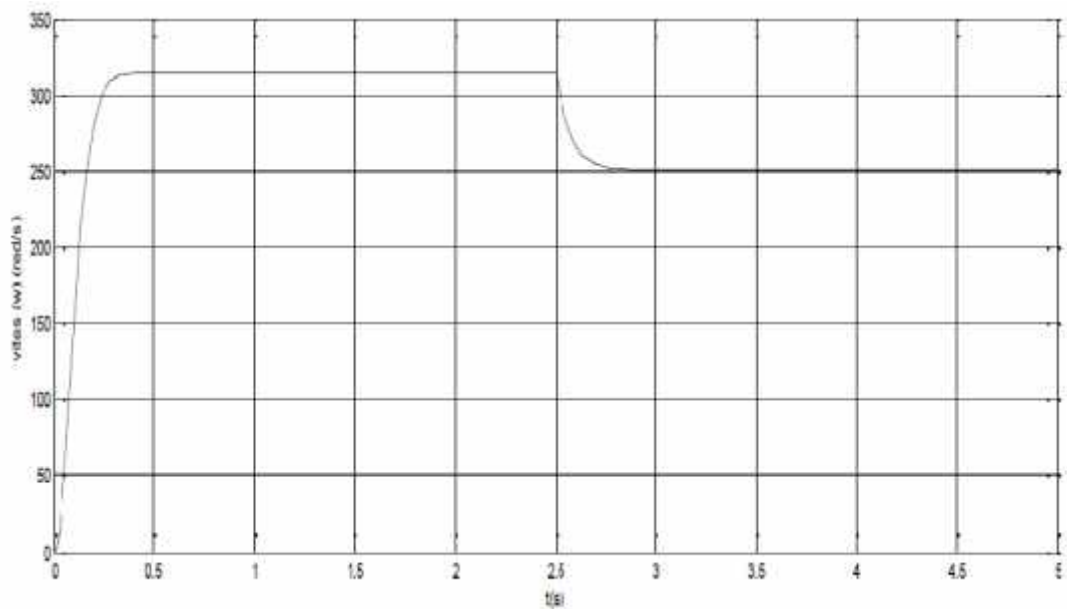


Fig. II.38 : le vitesse de rotation charge (rad/s) .

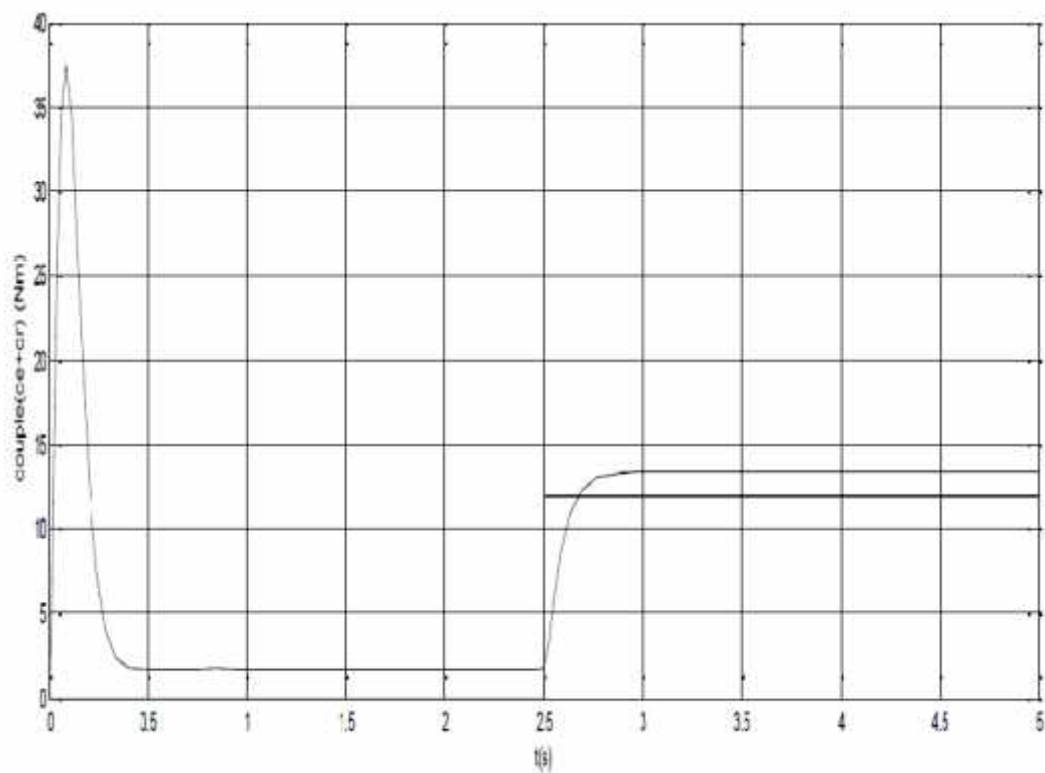


Fig. II.39 : le couple (Ce , Cr) en charge (N.m) .

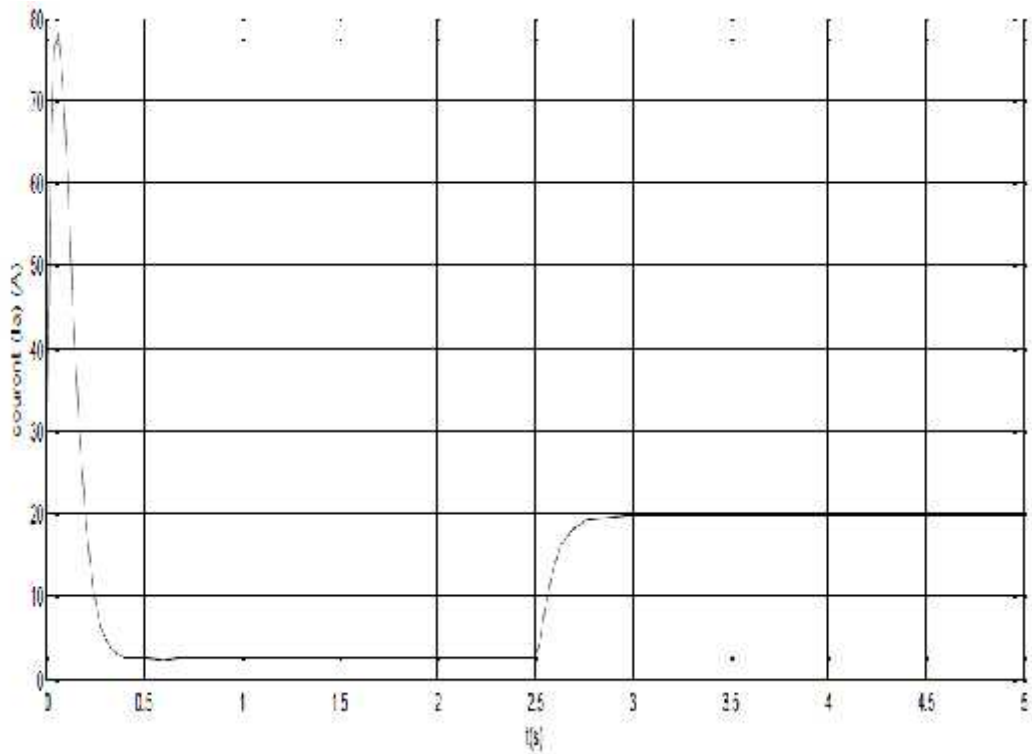


Fig. II.40 : Le courant d'induit I_a (A) en charge .

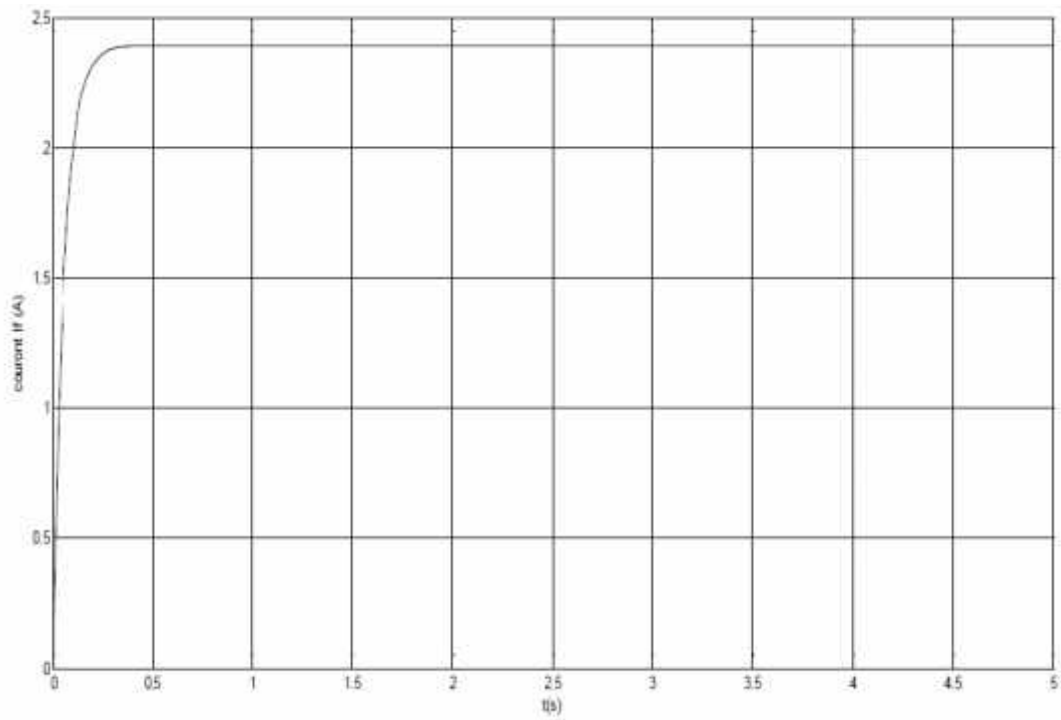


Fig. II.41 : Le courant d'excitation I_f (A) .

3.5.2. Interprétation :

- **À vide :**
 - **La figure (II.34)** : présente l'allure du couple en fonction de temps, on remarque qu'au démarrage que la couple atteint une grande valeur, puis se stabilisé à une valeur presque nulle.
 - Dans **la figure (II.35)** , on remarque l'allure de courant (I_a) à la même forme que l'allure du couple (c.-à-d. qu'il y a un couplage entre le courant I_a et le couple C_e)
 - Le courant d'excitation est présenté dans **le figure (II.35)** , après le démarrage le courant se stabilise a une valeur fixe (c.-à-d. qu'il y a un découplage entre le couple et le courant I_f) .
- **En charge :**
 - A l'instant $t = 2.5$ s on applique un couple de charge $C_r = 12$ Nm, on remarque a cette instant qu' il y a une chute de vitesse (**figure (II.37)**) .
 - A **la figure (II.39)** le couple C_e suit presque le couple de charge C_r , ainsi qu'il y a un appelle de courant I_a très fort (**figure II.40**) , qui se traduit par le couplage entre le courant I_a est le couple C_e . Le courant d'excitation reste constant et sans perturbation malgré l'application du couple (il y a un découplage entre le couple et le courant I_f)

4. CONCLUSION :

- Dans ce chapitre, on a présenté la modélisation et la simulation du fonctionnement de la machine à courant continu.
- Les résultats obtenus, montrent les caractéristiques de fonctionnement à vide et en charge. Ce qui nous permet de dire que le modèle est assez fiable et suffisamment précis.
- L'environnement virtuel qu'est *MATLAB/SIMULINK*, est un bon moyen d'étude du fonctionnement de MCC dans les conditions de fonctionnement voulues. En effet il nous permet de présenter une approche assez réaliste des phénomènes physiques et d'envisager le couplage entre le courant et le couple électromagnétique.

conclusion générale

Conclusion générale .

Malgré la dispersion d'utilisation l'étude et d'utilisation des machines à courant alternative, l'étude et l'utilisation des machines à courant continu restent indispensable grâce à leur caractéristique unique.

Ce projet de fin d'étude nous a permis de mettre en place un laboratoire virtuel de simulation des machines à courant continu en vue de leur étude.

Les résultats obtenus dans nos laboratoires virtuels nous montrent des caractéristiques qui sont en concordance avec celles obtenues avec les modèles théoriques. Ce qui nous permet de dire que le modèle est assez fiable et suffisamment précis.

L'environnement virtuel qu'est MATLAB/SIMULINK, est un bon moyen d'étude du fonctionnement des MCC (et aussi d'autres systèmes) dans les conditions de fonctionnement voulues. En effet il nous permet de présenter une approche assez réaliste des phénomènes physiques et d'envisager plusieurs cas de fonctionnement du modèle élaboré.

Ce laboratoire, en association avec d'autres déjà mis en place par nos aînés, peut constituer une puissante source de connaissances qui seront acquises par ses utilisateurs, après un travail actif et individuel.

Au terme de cette étude, nous pouvons dire que nous avons atteint objectifs fixés par le thème en procédant à la mise en place de cette plate forme simulation, malgré les difficultés rencontrées au cours de l'élaboration de ce projet.

Nous voudrions terminer en disant que ce projet de fin d'étude nous a permis de nous familiariser avec l'outil qu'est MATLAB/SIMULINK. Sa puissance de programmation nous incite à exhorter étudiants, professeurs et chercheurs à l'adopter afin de doter l'ENI-ABT de plusieurs TP instructifs d'une part, et de fournir des applications à la pointe de la technologie à l'Afrique et au monde d'autre part.

Conclusion générale .

L'environnement virtuel qu'est *MATLAB/SIMULINK*, est un bon moyen pour d'étude du fonctionnement des machines à courant continu dans les conditions de fonctionnement voulues.

Cette mémoire est composée à deux chapitres qui sont résumés comme suit:

Le premier chapitre contient des généralités sur la machine à courant continu c'est-à-dire que ce chapitre traite la structure interne de la machine à courant continu, le principe de fonctionnement de ces machines, la conversion d'énergie électromécanique, leur classification selon différents type.

Le deuxième chapitre contient la modalisation et la simulation de la machine à courant continu. Nous avons pré sonates les équations électriques et mécaniques, les schémas blocs et les caractéristiques de la vitesse, de la couple utile et de la courant de charge on a choisis un type de la machine à flux constant.

Résumé

Ce projet porte sur l'étude des machines à excitation série, cette étude est développée en s'appuyant sur des modèles analytiques et des calculs bien précis, elle montre la performance de ces machines en termes de niveau de couple, de commutation de courant et d inductance cyclique.

Des mesures de couple et de caractéristiques couple vitesse sur des machines existantes ont aussi permis de valider et de critiquer les méthodes et les outils de simulation utilisés pour développer notre étude.

Mots clés : Les machines, courant continu, excitation, un moteur, d'équations électrique.

=====

| | | |
|--|----------|---------|
| تحليلية | هذه | يركز هذ |
| التبديل وعزم الدوران والحث الدوري. أجرينا قياسات | حيث | هذه |
| انتقاد أساليب | تطوير هذ | دقيقة |

كلمات مفتاحية : التيار المستمر، إثارة ، المعادلات الكهربائية .

