

République Algérienne Démocratique et Populaire

**Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche
Scientifique**



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued



FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

LICENCE ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Electromécanique industriel

Thème

**Fonctionnement de la MCC à excitation
série alimentée en courant continu**

Dirigée par :

• **CHENNOUFI Hakim**

Présenté par :

- **BELAI Mohammed**

- **BOUMADIENE YACOUB Mohamed**

- **GHERNOUG Mohammed Selama**

2014-2015

DÉDICACE

À nos parents,

À nos familles,

À nos amis.

REMERCIEMENTS

Le travail exposé dans ce mémoire a été effectué au Groupe de Recherche en Electromécanique industriels.

Je remercie 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 ses encouragements constants et la patience dont elle a su s'armer tout au long de ces années.

Liste des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre 01 : Généralités de la machine à courant continu	
1. Introduction.....	2
2. Structure de la machine à courant continu.....	2
2.1 L'inducteur.....	2
2.1.1. La construction d'inducteur.....	3
2.1.1.1 Les pôles principaux.....	3
2.1.1.2 La carcasse.....	3
2.1.1.3 Le flasque avant.....	3
2.2 L'induit.....	4
2.2.1. La construction d'induit.....	4
2.2.1.1 Armature de l'induit (encoche).....	4
2.2.1.2 Enroulement	4
2.2.1.3 Un collecteur commutatif rotatif.....	4
2.2.1.4 Balais	5
3. Phénomène d'induction.....	6
3.1. Loi de Laplace.....	6
3.2. Principe de génératrice.....	6
4. Conversion d'énergie électromécanique.....	6
5. Classification des machines à courant continu.....	7
5.1. Classification selon le mode d'excitation.....	7

5.1.1. Moteur en dérivation.....	7
5.1.1.1 A auto excitation.....	7
5.1.1.2 A excitation séparée.....	7
5.1.2. Moteur série.....	8
5.1.3. Moteur à excitation composée	9
6. Caractéristiques usuelles des moteurs à courant continu.....	9
7. Les avantages et les inconvénients.....	10
8. Conclusion.....	10

Chapitre 02 : Modélisation de la machine à courant continu

1. Introduction.....	11
2. Modélisation de la machine à courant continu.....	11
3. Équations de la machine à courant continu.....	11
3.1- Équations électriques.....	13
3.2- Équations électromécaniques.....	13
3.3- Équation mécanique.....	13
4. Transformées de Laplace.....	13
4.1- Schémas blocs.....	14
5. Modèle Simulink de la machine à courant continu.....	15
5.1 La partie électrique.....	15
5.2 La partie mécanique.....	15
5.3 Série.....	17
5.4 Parallèle.....	18
6. Conclusion.....	18

Chapitre 03 : Simulation des machines à courant continu à excitation série

1. Introduction	19
2. Mise en œuvre du laboratoire virtuel.....	19
3. Laboratoire : Étude de la MCC à excitation série.....	20
4. Relevé des caractéristiques mécaniques et de fonctionnement de la MCC à excitation série.....	23
5. Caractéristique mécanique	24
6. Caractéristiques de fonctionnement du moteur	24
7. Analyse des résultats obtenus	26
8. Conclusion	26
Conclusion générale	27
Annexe.....	28
Bibliographie.....	30

Liste des figures

Figure 1.1	La construction de la machine à courant continu	2
Figure 1.2	Inducteur de la machine à courant continu	3
Figure 1.3	Induit de la machine à courant continu	4
Figure 1.4	Collecteur de la machine à courant continu	5
Figure 1.5	Les balais de la machine à courant continu	5
Figure 1.6	Moteur à courant continu à excitation séparée.	8
Figure 1.7	Moteur à courant continu à excitation série	8
Figure 1.8	(a) Moteur composé à courte dérivation et (b) moteur composée à longue dérivation	9
Figure 2.1	Schéma d'un entraînement avec une MCC.	12
Figure 2.2	Schéma bloc tension-vitesse du moteur à courant continu.	14
Figure 2.3	Réalisation de la partie électrique de la MCC sous Simulink	15
Figure 2.4	Réalisation de la partie mécanique de la MCC sous Simulink.	15
Figure 2.5	Réalisation de la MCC sous Simulink.	16
Figure 2.6	Bloc de la MCC sous Simulink.	17
Figure 2.7	Modèle Simulink de la MCC à excitation série	17
Figure 2.8	Modèle Simulink de la MCC à excitation série.	18
Figure 3.1	Modèle pour le laboratoire virtuel	19
Figure 3.2	Modèle pour l'étude de la MCC à excitation série	20
Figure 3.3	fenêtre de réglage des paramètres de la machine à courant continu.	21
Figure 3.4	Fenêtre de réglage des paramètres de la source de tension	21
Figure 3.5	Fenêtre de réglage des paramètres de simulation.	22
Figure 3.6	Courbe de la caractéristique mécanique $W = f(M)$	24
Figure 3.7	Courbe de la caractéristique de fonctionnement $W = f(P_2)$.	24

Figure 3.8	Courbe de la caractéristique de fonctionnement $M=f(P_2)$.	25
Figure 3.9	Courbe de la caractéristique de fonctionnement $I_a=f(P_2)$.	25
Figure 3.10	Courbe de la caractéristique de fonctionnement $\eta = f(P_2)$.	26

Notations et symboles

$u_a(t)$: La tension aux bornes de l'induit

R_a La résistance de l'induit

L_a : L'inductance de l'induit

$\omega(t)$: la vitesse angulaire

$i_a(t)$: Le courant traversant le circuit d'induit

$T_{em}(t)$: Le couple électromagnétique instantané

Φ_1 : L'inducteur, fixé au stator, créant UN flux magnétique d'excitation

J_t : **inertie** totale entraînée (moteur J_m ET charge J_{ch})

B_m : coefficient de frottement visqueux

T_r : couple résistant

T_f : couple de frottement de coulomb

M_{af} : Inductance mutuelle

L_f : Inductance d'inducteur

R_f : Résistance d'inducteur

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.

C'est un rappel des généralités sur ces machines à courant contenu, on donnant la structure.

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 machine, 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.

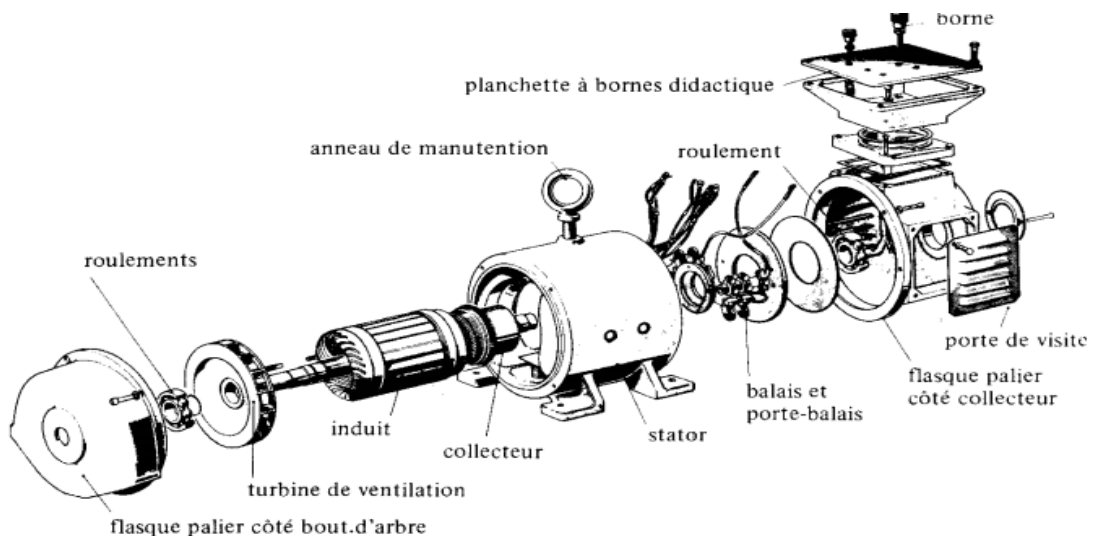


Fig.1 : La construction de la machine à courant continu

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].

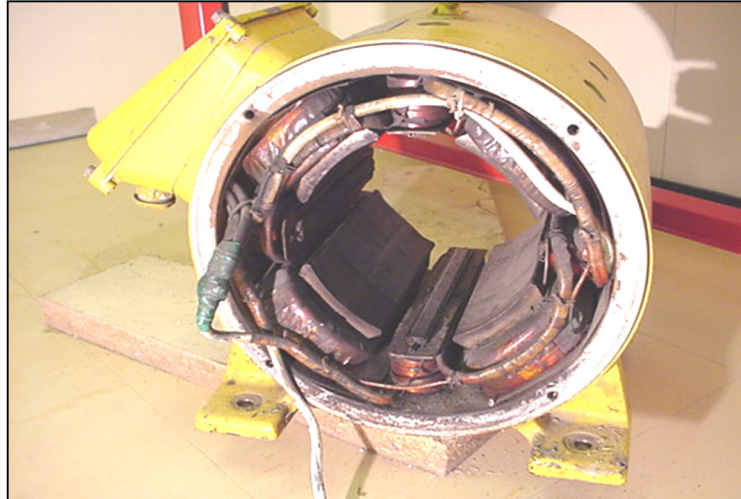


Fig.2 : Inducteur de la machine à courant continu

2.1.1. La construction d'inducteur :

L'inducteur comprend :

2.1.1.1 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.

2.1.1.2 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].

2.1.1.3 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 comptage 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 f.e.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. 3: Induit de la machine à courant continu

2.2.1. La construction d'induit

L'induit comprend :

2.2.1.1 Armature de l'induit (encoche) :

Réalisée à l'aide de tôles empilées, montrées directement sur l'arbre par insertion chaude, soit assemblées par queue d'aronde pour des grandes machines. Les encoches fermées par des becs d'encoches peuvent être de forme arrondie ou rectangulaire.

2.2.1.2 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].

2.2.1.3 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].

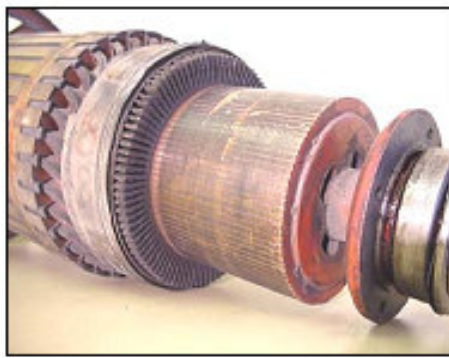


Fig.4 : Collecteur de la machine à courant continu

2.2.1.4 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.

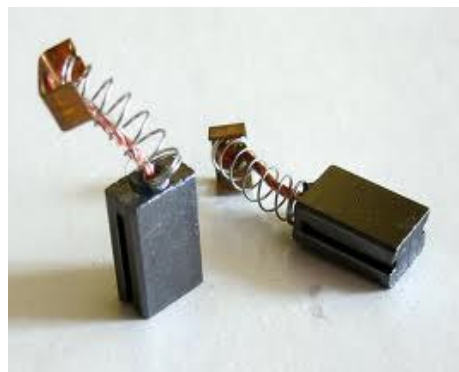


Fig.5 : Les balais de la machine à courant continu

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].

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

3.2. Principe de génératrice :

Un conducteur se déplaçant dans un champ magnétique va être le siège d'une f.e.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 entraîné 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 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.

5.1.1.1 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.

5.1.1.2 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 à excitation séparée, il est possible de faire varier la vitesse jusqu'à une certaine limite en modifiant la tension d'induit. Après le shuntage des inducteurs, il est possible d'augmenter la vitesse du moteur au-delà de la vitesse normale. Les autres caractéristiques sont identiques à celles d'une machine à auto excitation [4].

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

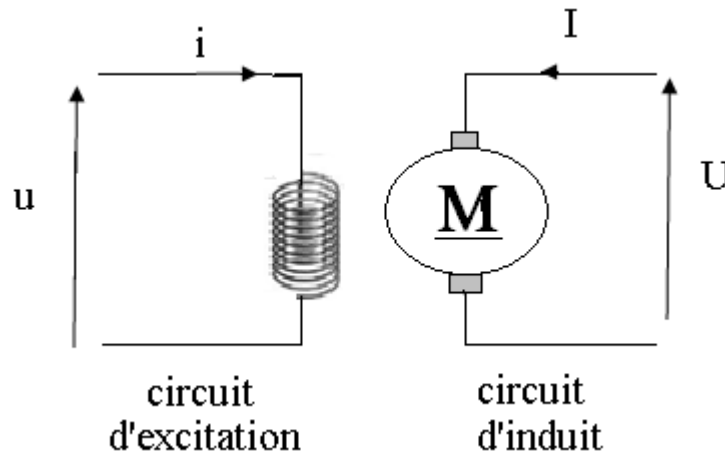


Fig.6 : Moteur à courant continu à excitation séparée.

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 principal 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].

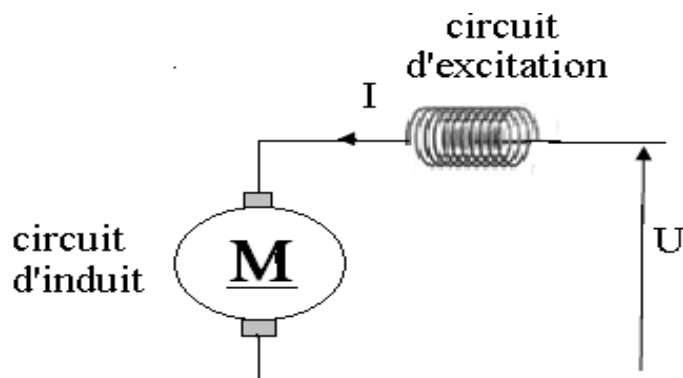


Fig. 7 : Moteur à courant continu à excitation série

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 composée, les moteurs composée à courte dérivation et à longue dérivation [4].

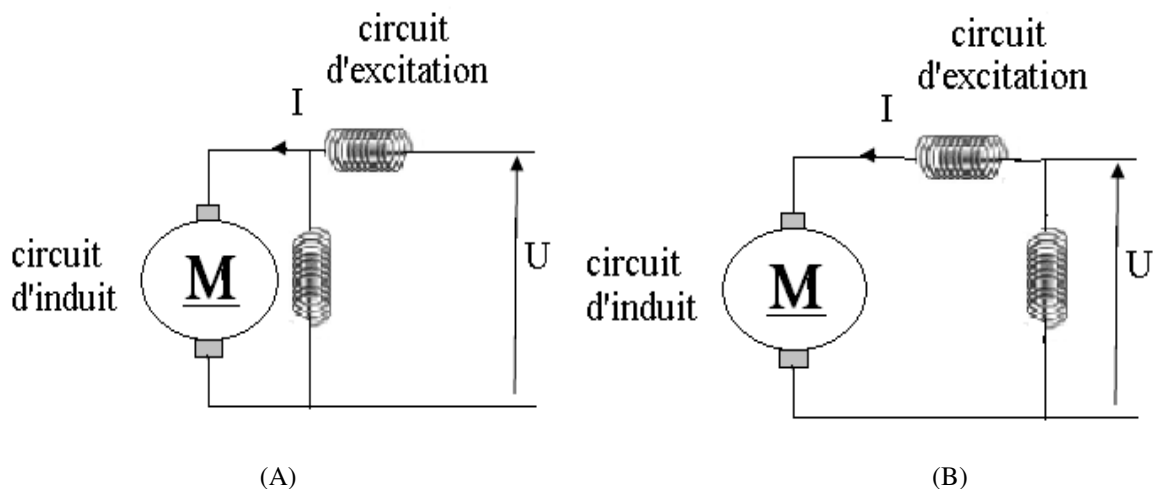


Fig.8 : (a) Moteur composé à courte dérivation et (b) moteur composée à longue dérivation

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.
- 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.
- La vitesse d'un moteur à courant continu peut varier si l'on modifie la tension de l'induit ou le courant de 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 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 électrique, électromécanique 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 :

La machine à courant continu peut être modélisée par le biais d'équations électrique, électromécanique 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.[7]

3. Équations de la machine à courant continu :

Notons d'abord que dans notre modélisation nous allons utiliser le moteur à courant continu afin d'établir les équations et ce qui s'en suit. Du fait que, par des changements de connexions entre l'induit et l'inducteur on aboutit aux autres types de MCC (par rapport à l'excitation) et que les MCC sont réversibles, nous pourrons donc obtenir les autres modèles moyennant des modifications à partir du premier.[8]

Le schéma technologique d'une MCC est représenté sur la figure suivante :

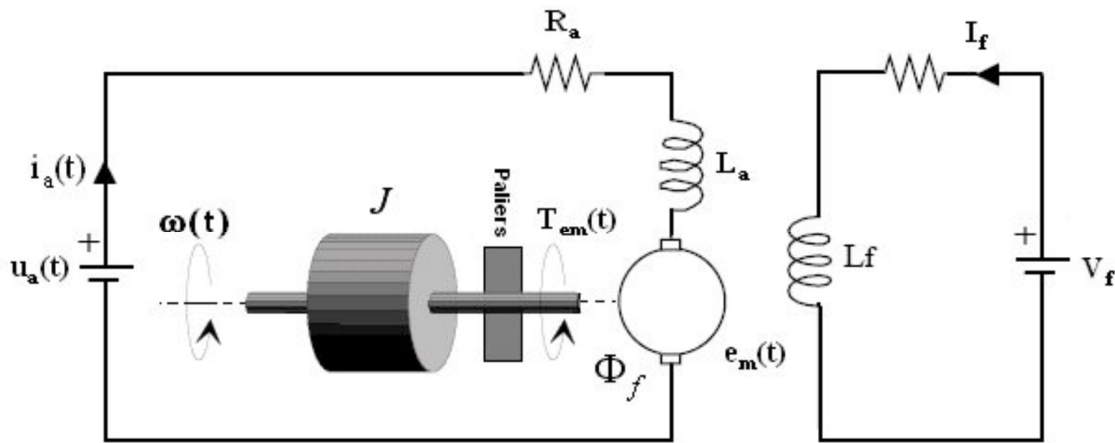


Fig. 01 : Schéma d'un entraînement avec une MCC.

Les signaux y intervenant sont les suivants :

- La tension aux bornes de l'induit $u_a(t)$ (l'indice 'a' correspond à Anker, c'est-à-dire induit en langue allemande) ;
- le circuit électrique de l'induit, faisant apparaître :
 - La résistance de l'induit R_a ;
 - L'inductance de l'induit L_a ;
- Une tension $e_m(t)$ appelée f.é.m. (force électromotrice), proportionnelle à la vitesse angulaire $\omega(t)$;
- Le courant traversant le circuit d'induit $i_a(t)$;
- Le couple électromagnétique instantané $T_{em}(t)$ produit ;
- L'inducteur, fixé au stator, créant un flux magnétique d'excitation Φ_f
- La charge mécanique, dépendante de l'application (inertie J , frottement visqueux, élasticité de la transmission, etc.) ; La vitesse $\omega(t)$ du rotor du moteur[9]

3.1- Équations électriques

Prenant en compte la résistance R_a et l'inductance L_a du circuit d'induit, du collecteur, des balais et des connexions, et en les supposant toutes deux constantes (pas de variation due à l'échauffement ni à la saturation magnétique), l'équation de tension induite s'écrit

$$U_a = R_i I_i + e_m$$

$$U_{ex} = R_i I_{ex}$$

$$U_a = R_i I_i + P L_a I_a + E_m$$

3.2- Équations électromécaniques

La tension induite $e_m(t)$ appelée FEM ("force électromotrice" dans l'optique de l'exploitation en générateur) est proportionnelle à la vitesse angulaire $w(t)$ et au flux inducteur $\phi_1(t)$:

$$e_m(t) = k \phi_1(t) \cdot w(t)$$

K est une constante dépendant de la construction de la machine. La première équation Montre que $e_m(t)$ s'oppose à $u_a(t)$ c'est à dire que le moteur réagit en créant une FEM $e_m(t)$ tendant à équilibrer à $u_a(t)$.

Cet effet correspondra à une contre-réaction bien visible dans le schéma fonctionnel du moteur.

Le couple électromagnétique $T_{em}(t)$ développé a pour expression :

$$T_{em}(t) = K \phi(t) i_a(t)$$

3.3- Équation mécanique

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

$$J_t \frac{dw}{dt} = T_{em}(t) - B_0 W(t) - T_r(t) - T_0(t)$$

Où

J_t : inertie totale entraînée (moteur J_m et charge J_{ch})

B_m : coefficient de frottement visqueux

T_r : couple résistant

T_f : couple de frottement de coulomb

Voilà en somme les équations régissant le fonctionnement du moteur. Mais pour mieux les exploiter, nous allons utiliser leurs transformées de Laplace.

4. Transformées de Laplace

Les transformées de Laplace des équations sont les suivantes :

$$U_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a}{dt} + e_m(t) \rightarrow U_a - I_a = R_a I_a + PL_a I_a$$

$$e_m(t) = k\phi_f(t) \cdot w(t) \rightarrow E_m k\phi_f \Omega$$

$$T_{em}(t) = k\phi_f(t) i_a(t) \rightarrow T_{em} = k\phi_f I_a$$

$$J_t \frac{dw}{dt} = T_{em}(t) - T_r(t) - B_0 w(t) - T_1 \rightarrow T_{em} - T_0 B_0 w(t) - T_1 = PJ_t \Omega$$

4.1- 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.[7]

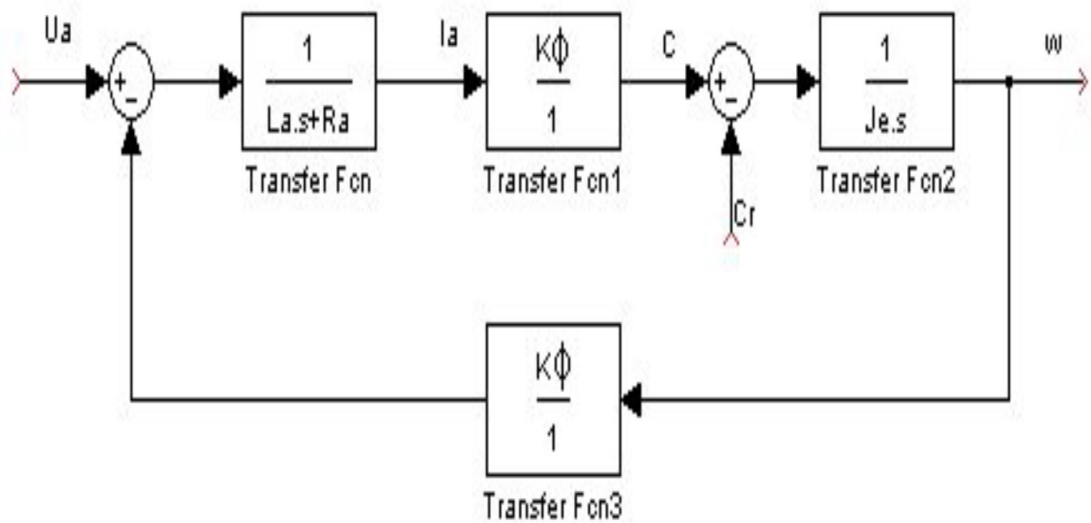


Fig.02 : Schéma bloc tension-vitesse du moteur à courant continu.

5. Modèle Simulink de la machine à courant continu

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 :

5.1 La partie électrique

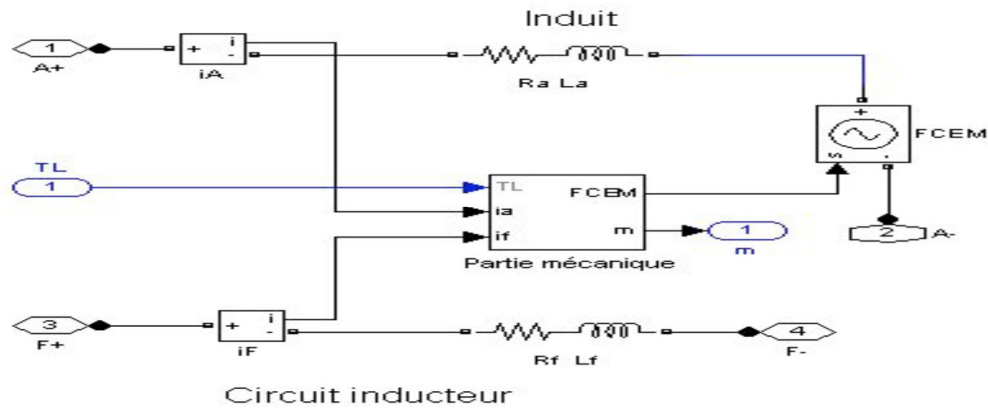


Fig. 03 : Réalisation de la partie électrique de la MCC sous Simulink.

5.2 La partie mécanique

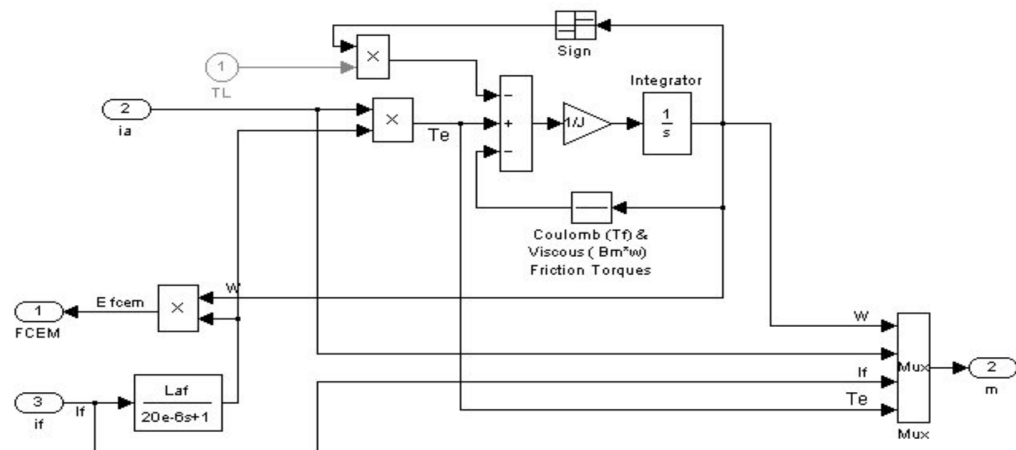


Fig.04 : Réalisation de la partie mécanique de la MCC sous Simulink.

Le regroupement de ces deux donnes :

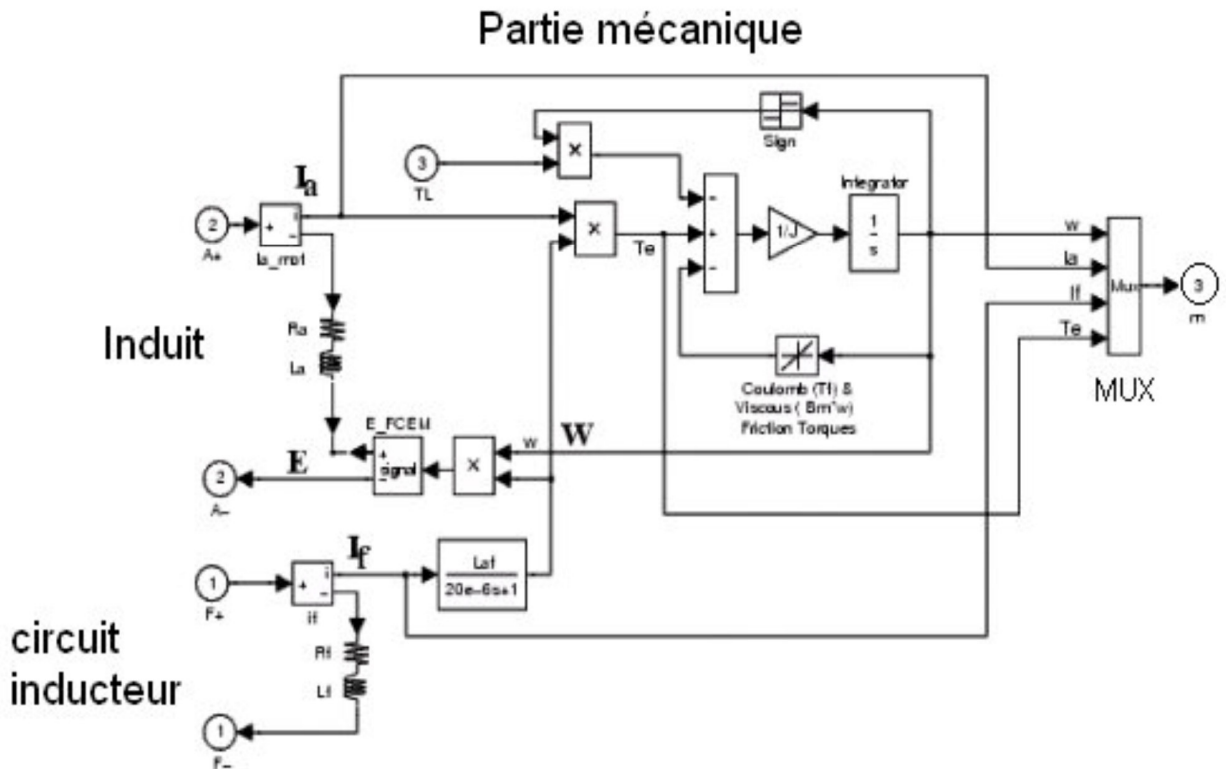


Fig. 05 : Réalisation de la MCC sous Simulink.

- 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 :

$$J \frac{dw}{dt} = T_e - \text{SGN}(w)T_L - B_m - T_F$$

Soulignons que l'opérande **sgn(w)** prend en compte la réversibilité de la MCC.

Dans nos simulations nous n'utiliserons pas le modèle comme présenté au schéma précédent, mais en tant qu'un masque représenté par le bloc simplifié qui suit :

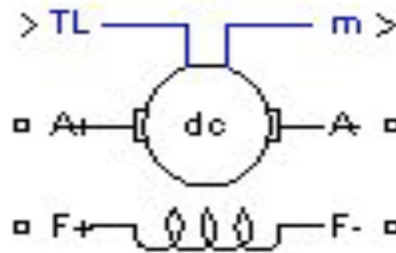


Fig. 06 : Bloc de la MCC sous Simulink.

Avec les différents modes de connexions nous aurons donc le modèle de la MCC à excitation :

5.3 Série

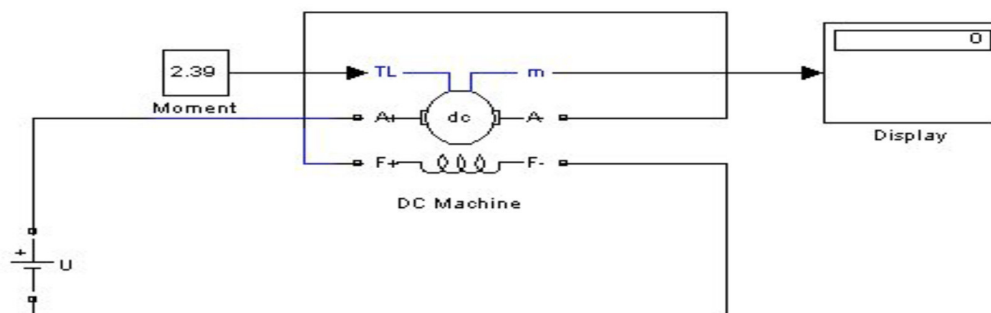


Fig. 07 : Modèle Simulink de la MCC à excitation série.

5.4 Parallèle :

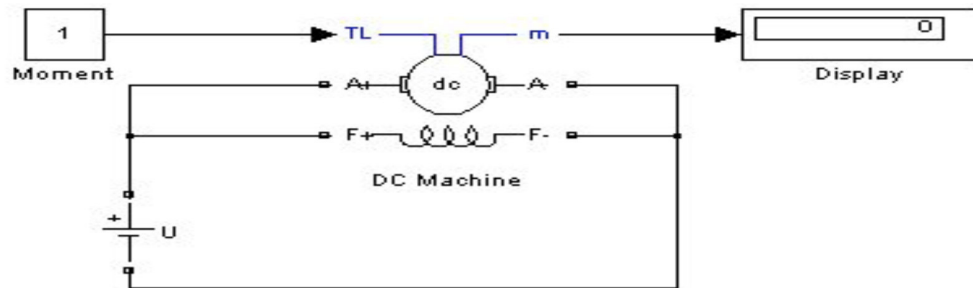


Fig. 08 : Modèle Simulink de la MCC à excitation série.

Pour nos modèles, nous avons utilisé les blocs suivants :

- Source de tension continue de la bibliothèque Power System Blockset / 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 Blockset / Machines.

6. Conclusion

On en conclut que 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 .

Chapitre 3

*Simulation des machines à
courant continu à excitation
série*

1. Introduction

Nous allons effectuer notre simulation afin de réaliser les modélisations précédentes, d'étudier les résultats et de reproduire de façon virtuelle cette situation et cette étude.

2. Mise en œuvre du laboratoire virtuel

Le laboratoire virtuel est représenté sur la fig.1 :

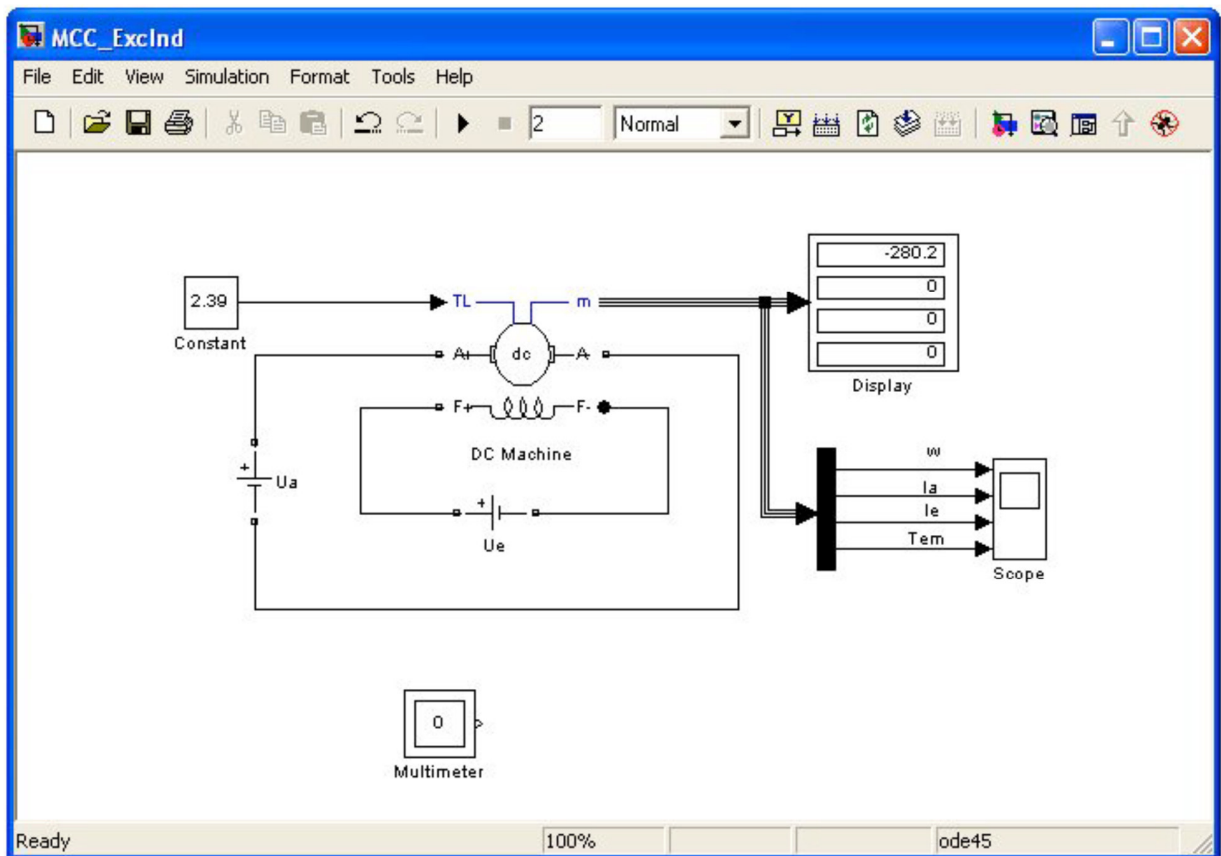


Fig.1 : Modèle pour le laboratoire virtuel.

Comprend :

- Une machine à courant continu *DC machine*, à étudier (bibliothèque *Power System Blockset/Machines*).
- Deux sources de tension continue (U_a pour l'alimentation de l'induit de la machine, U_e pour l'alimentation de l'enroulement d'excitation de la bibliothèque *Power System Blockset / Electrical Sources*).

- Un bloc *Moment* pour fournir le couple de charge (le bloc *constant* de la bibliothèque Simulink / Sources).
- Un bloc *Display* pour la mesure des variables d'état de la machine et l'oscilloscope *Scope* pour visualiser les processus (de la bibliothèque *Simulink / Sinks*).
- Un bloc *Multimeter* pour la mesure de tension et de courant du circuit (de la bibliothèque *SimPowerSystems/Measurements*).
- Un bloc Demux à 4 sorties pour avoir accès aux 4 paramètres de la MCC (de la bibliothèque *Simulink/Commonly Used Blocks*).

3. Laboratoire : Étude de la MCC à excitation série :

Le laboratoire Étude de la MCC à excitation série est représenté sur la fig.2 :

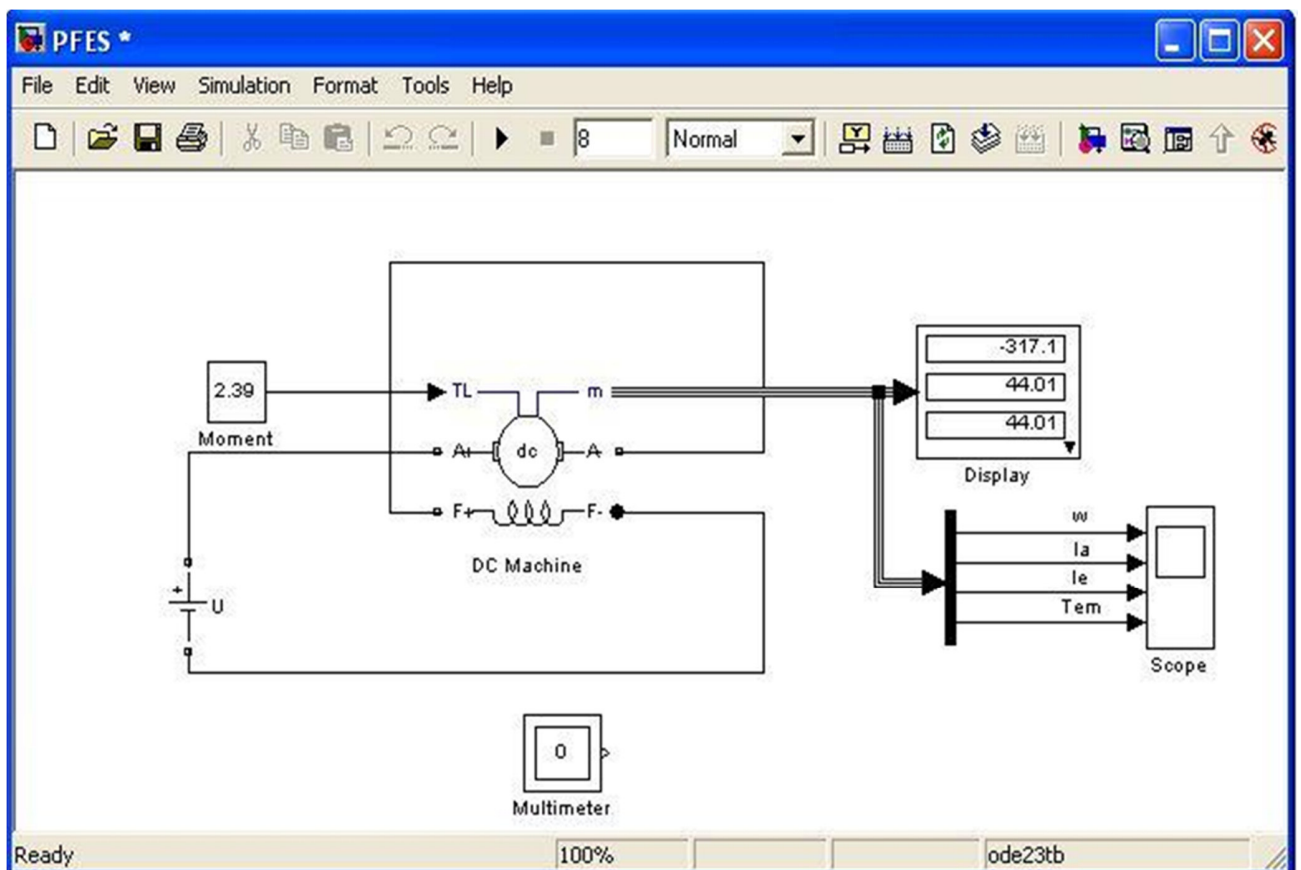


Fig. 2 : Modèle pour l'étude de la MCC à excitation série.

La fenêtre de réglage des paramètres de la machine à courant continu est représentée sur la fig. 3.

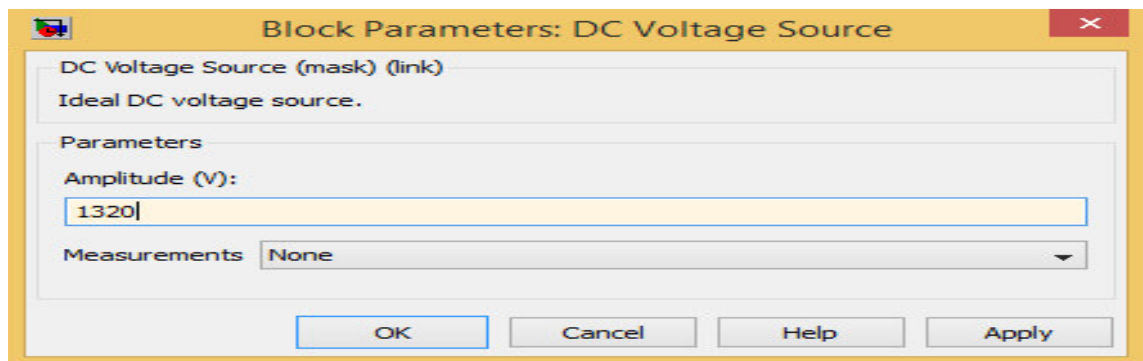


fig.3 : fenêtre de réglage des paramètres de la machine à courant continu.

La fenêtre de réglage des paramètres de la source de tension est représentée sur la fig. 4.

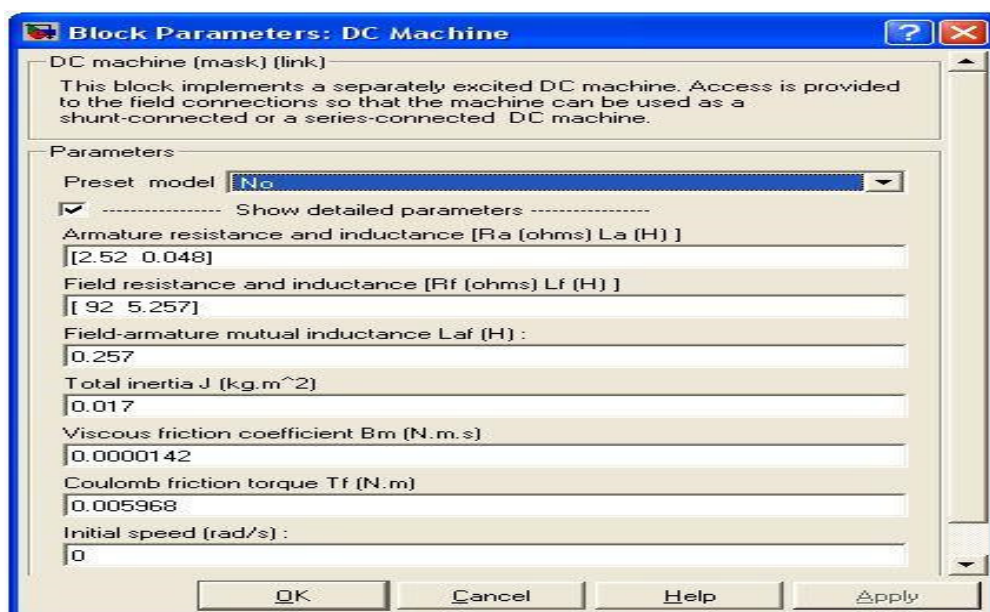


Fig. 4 : Fenêtre de réglage des paramètres de la source de tension.

La fenêtre de réglage des paramètres de simulation est représentée sur la fig. 5.

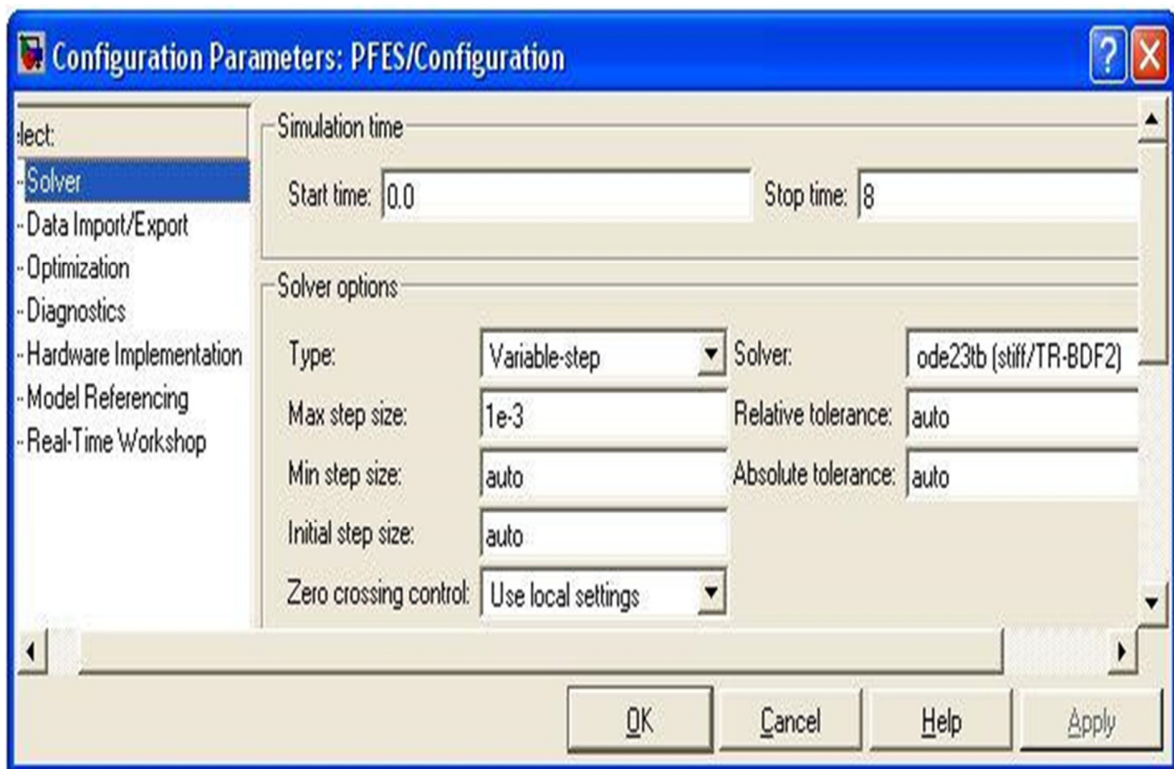


Fig. 5 : Fenêtre de réglage des paramètres de simulation.

4. Relevé des caractéristiques mécaniques et de fonctionnement de la MCC à excitation série :

Données		Mesures			Calculs		
M (N.m)		W (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	0.4476
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		-218.6	18.6	18.6	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

5. Caractéristique mécanique :

La courbe de la caractéristique mécanique est représentée dans la **fig. 6** :

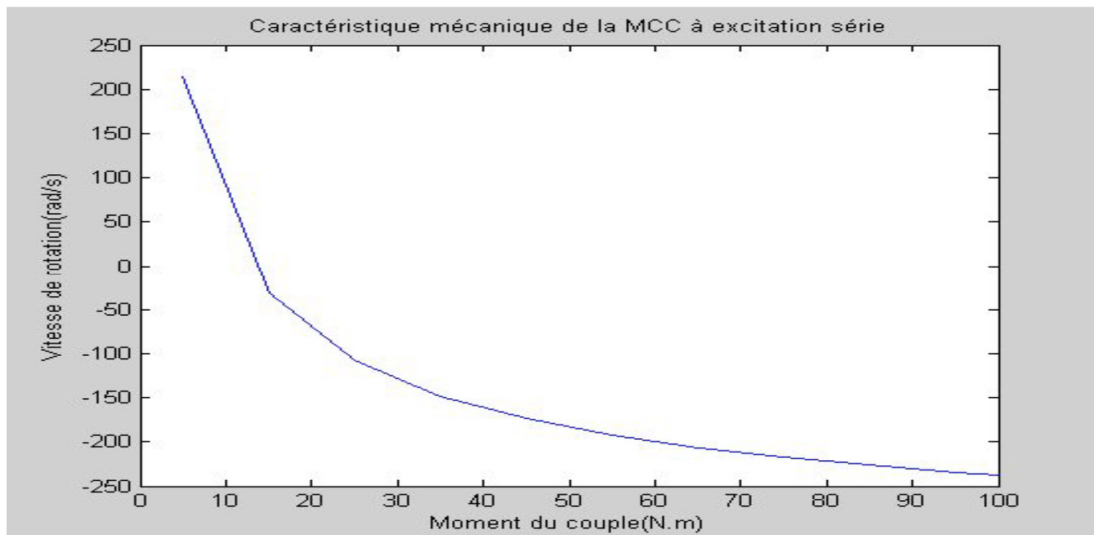


Fig.6 : Courbe de la caractéristique mécanique $W = f(M)$.

6. Caractéristiques de fonctionnement du moteur

- Vitesse en fonction de la puissance de sortie :

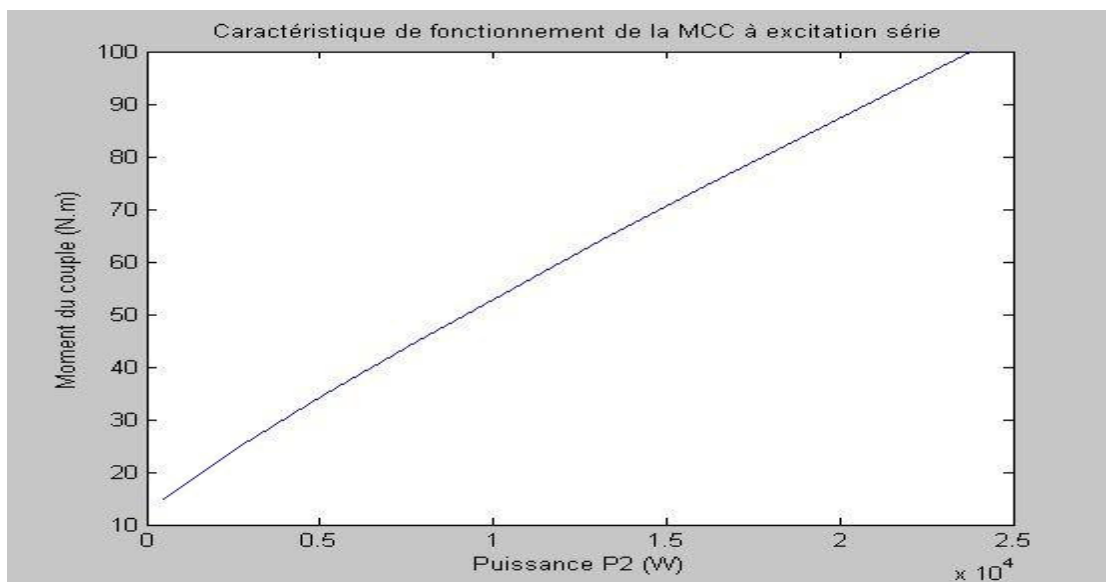


Fig.7 : Courbe de la caractéristique de fonctionnement $W = f(P_2)$.

- Moment en fonction de la puissance de sortie

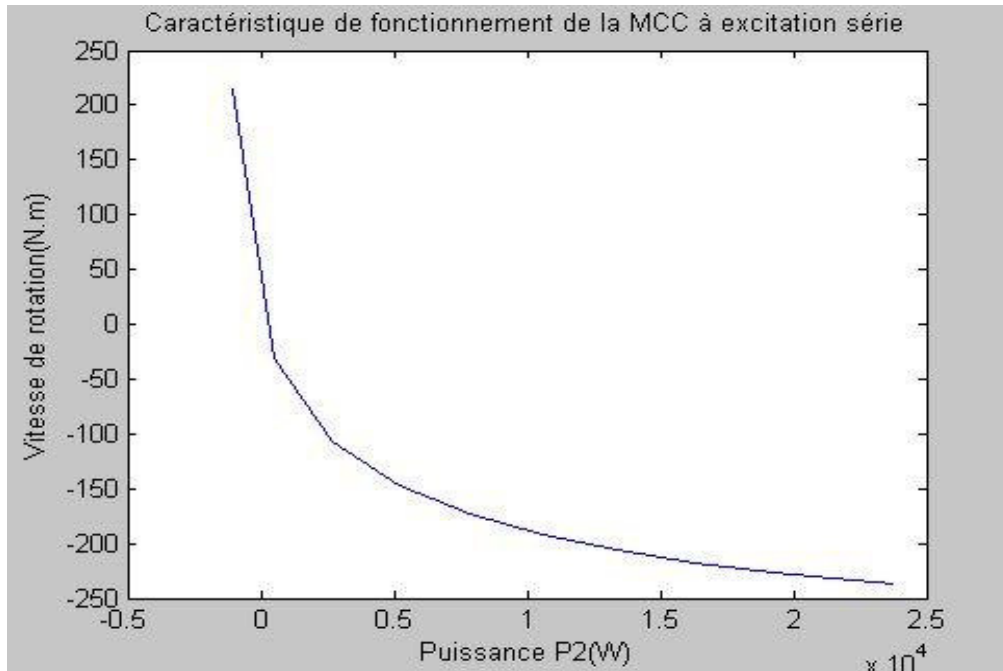


Fig.8 : Courbe de la caractéristique de fonctionnement $M=f(P_2)$.

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

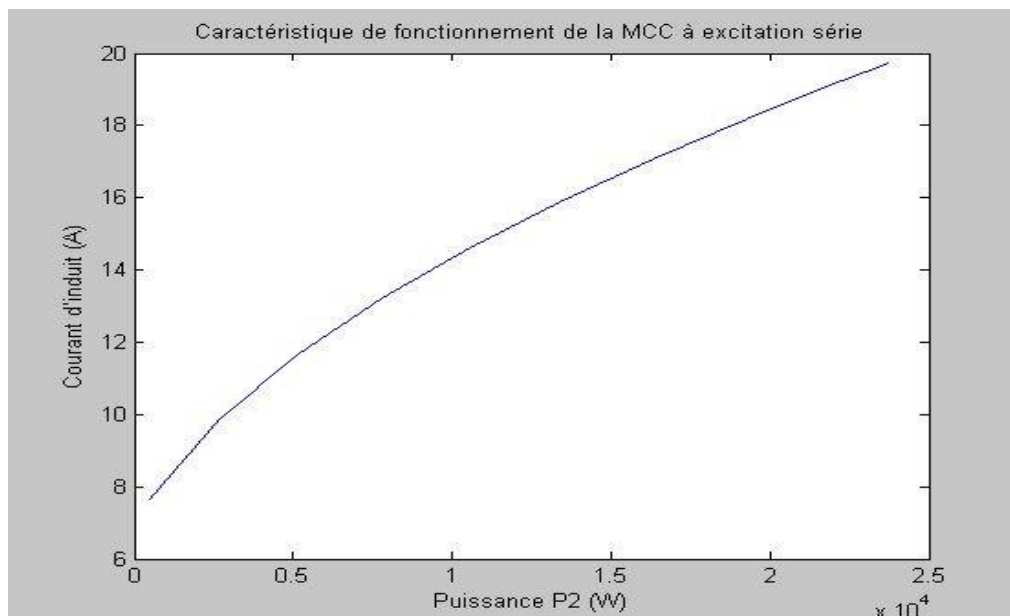


Fig.9 : Courbe de la caractéristique de fonctionnement $I_a=f(P_2)$.

- Rendement en fonction de la puissance de sortie

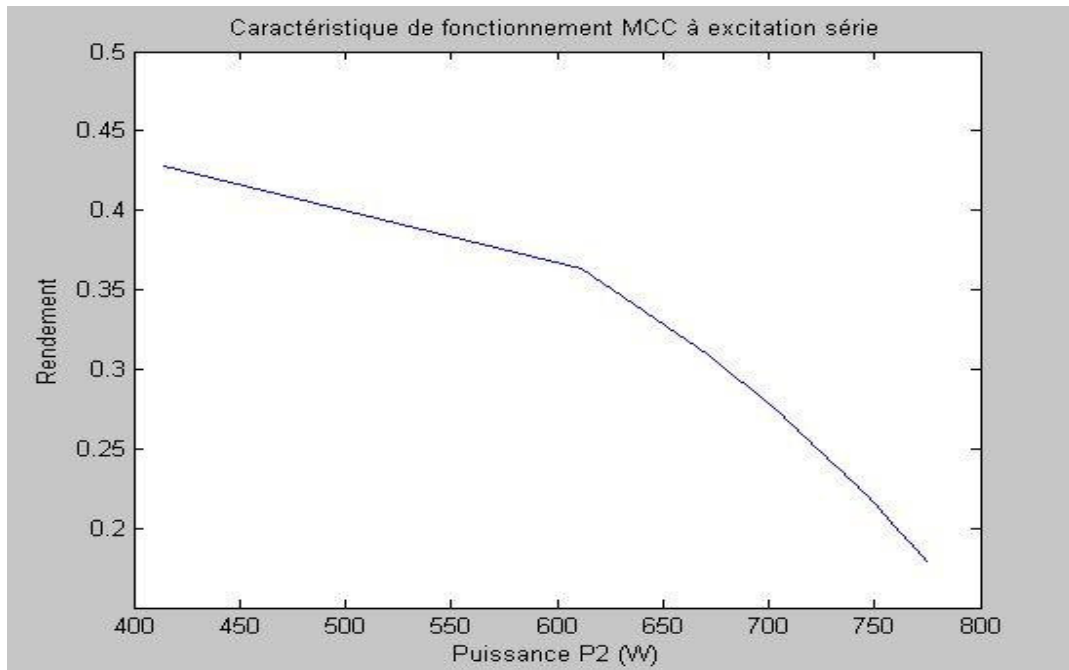


Fig.10 : Courbe de la caractéristique de fonctionnement $\eta = f(P2)$.

7. Analyse des résultats obtenus

Dans ce laboratoire, les différentes caractéristiques nous montrent que :

- Pour la caractéristique mécanique la vitesse est une fonction décroissante du couple
- Pour les caractéristiques de fonctionnement, la vitesse est une fonction décroissante de la puissance ; le courant et le moment du couple croient avec la puissance par contre le rendement décroît avec elle (dans la limite des valeurs du moment de charge).

Remarque :

Nous avons aussi visualisé les courbes instantanées à l'oscilloscope.

L'analyse des courbes obtenues nous donne des résultats qui sont en concordance avec les caractéristiques théoriques.

8. Conclusion

On en conclut que notre simulation nous a permis de présenter une certaine approche assez réaliste des phénomènes physiques et d'envisager plusieurs cas de fonctionnement du modèle réalisé.

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 :

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.

Contient la modalisation et la simulation de la machine à courant continu. Nous avons présentes 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.

(Simulink)

Simulink est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation de systèmes dynamiques. IL fournit UN environnement graphique ET un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal. Simulink est intégré à MATLAB, fournissant ainsi un accès immédiat aux nombreux outils de développement algorithmique, de visualisation et d'analyse de données de MATLAB.

Simulink est un environnement de diagramme fonctionnel destiné à la simulation multi domaine et à l'approche de conception par modélisation Model-Based Design. Il prend en charge la conception et la simulation au niveau système, la génération automatique de code, ainsi que le test et la vérification en continu des systèmes embarqués.

Simulink propose un éditeur graphique, un ensemble personnalisable de bibliothèques de blocs et des solveurs pour la modélisation et la simulation de systèmes dynamiques. Il est intégré à MATLAB, ce qui vous permet d'incorporer les algorithmes MATLAB dans les modèles et d'exporter le résultat des simulations vers MATLAB pour compléter l'analyse

Principales fonctionnalités

- Éditeur graphique pour la création et la gestion de diagrammes fonctionnels hiérarchiques
- Bibliothèques de blocs prédéfinis pour la modélisation de systèmes en temps continu ou en temps discret
- Moteur de simulation avec des solveurs ODE à pas fixes ou variables
- Scopes et affichage de données pour la consultation du résultat de la simulation
- Outils de gestion de données et de projets pour les données et fichiers des modèles
- Outils d'analyse de modèles pour l'affinage de l'architecture de modèle et l'augmentation de la vitesse de simulation
- Bloc MATLAB Function pour l'import d'algorithmes MATLAB dans les modèles
- Outil Legacy Code Tool pour l'import rapide de code C et C++ existant dans les modèles

- **Ressources produits**
- **Essayer Simulink**
- **Création du modèle**

Simulink propose un ensemble de blocs prédéfinis que vous pouvez combiner pour créer un schéma fonctionnel détaillé de votre système. Les outils destinés à la modélisation hiérarchique, à la gestion des données et à la personnalisation des sous-systèmes vous permettent de représenter avec concision et précision les systèmes les plus complexes.

Sélection des blocs

Le navigateur de bibliothèques Simulink Library Browser contient l'ensemble des blocs servant généralement à la modélisation d'un système, en particulier :

- Blocs dynamiques continus et discrets, notamment les blocs Integration et Unit Delay
- Blocs algorithmiques, notamment Sum, Product et Lookup Table
- Blocs structurels, notamment Mux, Switch et Bus Selector

Vous pouvez créer des fonctions personnalisées en utilisant ces blocs ou en incorporant à votre modèle du code MATLAB, C, Fortran ou Ada écrit manuellement.

Vous pouvez enregistrer vos blocs personnalisés dans des bibliothèques dédiées au sein du Simulink Library Browser.

Bibliographie

- [1] Abdoulaye TRAORE, Adama F. SANGARE. Machines à courant continu, Bamako ENI-ABT, 2007. 80p.
- [2] Abdoulaye TRAORE, Modibo CISSOKO. Machines électriques : Machines à courant Continu, Bamako ENI-ABT, 2006. 102p.
- [3] Jean NIARD, Jean-Claude GALLOIS. Electricité : Machines électriques et électronique, Paris Nathan 1995. 271p.
- [4] R. MERAT, R. MOREAU, L. ALLAY. Génie Electrotechnique, éditions Nathan 1997. 429p.
- [5] Adama F. SANGARE, Initiation à MATLAB SIMULINK, Bamako ENI-ABT, 2005. 6]
- Adama F. SANGARE, Commande des machines électriques, Bamako ENI-ABT, 2005.
- [7] Modibo CISSOKO, Modélisation et Simulation des machines électriques, Bamako ENI-ABT, 2006.
- [8] Ahmed CHERITI, Mamadou Lamine DOUMBIA, Note de Cours : CONTROLE DES MOTEURS, Université du Québec à Trois-Rivières, 2006.105p.
- [9] Projet de fin d'étude de DEMBELE Abdoulaye, Mise en place d'une plateforme de Simulation de commande de machines à courant continu, Bamako ENI-ABT, 2002.110p.

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 existants 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.

ملخص

يركز هذا المشروع على دراسة سلسلة من آلات الإثارة ولقد وضعت هذه الدراسة بالاستناد إلى نماذج تحليلية وحسابات دقيقة تدل على أداء هذه الآلات من حيث المستوى الحالي والتبديل وعزم الدوران والحث دوري. أجرينا قياسات في عزم الدوران وخصائص عزم دوران السرعة على الآلات الموجودة مما سمح لنا التحقق من صحة وانتقاد أساليب وأدوات المحاكاة المستخدمة في تطوير هذه الدراسة.

كلمات مفتاحية: الآلات، التيار المستمر، إثارة، محرك، المعادلات الكهربية.