

3.4.3 Moteur asynchrone à cage d'écureuil

C'est de loin le moteur le plus utilisé. Son design est surtout prévu pour les applications à vitesse constante. De plus, afin de réduire son courant de démarrage, son inductance de fuite est (par design) élevée. Les limites de ce moteur est : à une fréquence plus élevée que 100 Hz, les pertes fers augmentent énormément de façon à réduire le couple du moteur. Si le couple nominal est requis pour une grande plage de fonctionnement, la ventilation forcée doit être adoptée.

Les commandes à tension variable peuvent être utilisées avec des moteurs à induction. La vitesse du moteur est modifiée directement par la variation de tension. Ces commandes nécessitent des moteurs à glissement élevé ; ils sont par conséquent inefficaces à hautes vitesses. Ces commandes ne conviennent qu'aux applications présentant des gammes réduites de vitesse.

D'autre part, l'entraînement à fréquence variable modifie la vitesse d'un moteur CA en faisant varier la fréquence d'alimentation du moteur. La tension de sortie de l'entraînement est ajustée de façon proportionnelle à sa fréquence de sortie pour assurer un rapport tension/fréquence relativement constant, comme l'exige les caractéristiques du moteur CA pour obtenir un couple adéquat.

3.4.4 Moteur asynchrone à rotor bobiné

La variation de vitesse de ce moteur peut être réalisée en utilisant un convertisseur dans le rotor ou bien en l'alimentant à l'aide d'un gradateur triphasé. La combinaison d'un convertisseur DC et d'un moteur à cage est connue sous le nom de cascade hyposynchrone. Ces entraînements peuvent atteindre des puissances jusqu'à 15 MW. Le moteur à rotor bobiné peut aussi être commandé par variation de résistances rotoriques.

On peut faire varier la vitesse du moteur à rotor bobiné en changeant la valeur de la résistance externe raccordée au circuit du rotor.

L'énergie de glissement du moteur est soit dissipée dans les résistances externes sous forme de chaleur, ou récupérée et convertie en énergie électrique ou mécanique utile. Si l'énergie de glissement est convertie en énergie électrique utile, le système est appelé commande de récupération de l'énergie de glissement du rotor bobiné.

Chapitre 4

MODELISATION DE LA MACHINE A COURANT CONTINU

4.1 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 côté 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 côté mécanique, nous représentons la machine à courant continu par l'inertie de l'induit augmentée de celui de la charge entraînée.

4.1.1 Equations 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 pourrions donc obtenir les autres modèles moyennant des modifications à partir du premier.

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

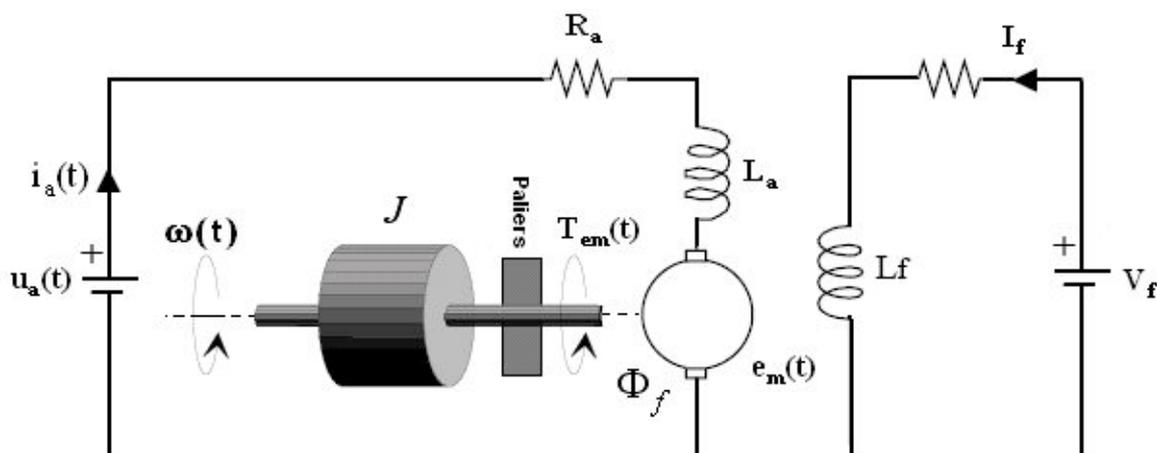


Fig. 4.1 : Schéma d'un entraînement avec une MCC à excitation indépendante.

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.e.m. (force électro-motrice), 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.

- Equations 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 :

$$u_a(t) = R_a \cdot i_a(t) + \frac{d\Psi}{dt} = R_a \cdot i_a(t) + \frac{d(N \cdot \Phi_f)}{dt}$$

$$u_a(t) = R_a \cdot i_a(t) + L_a \frac{di_a}{dt} + e_m(t)$$

- Equations 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 $\omega(t)$ et au flux inducteur $\Phi_f(t)$:

$$e_m(t) = k \cdot \Phi_f(t) \cdot \omega(t)$$

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 :

$$T_{em}(t) = k \cdot \Phi_f(t) \cdot i_a(t)$$

- Equation mécanique

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

$$J_t \frac{d\omega}{dt} = T_{em}(t) - B_m \omega(t) - T_r(t) - T_f(t)$$

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.

4.1.2 Transformées de Laplace

Les transformées de Laplace des équations sont les suivantes :

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

$$e_m(t) = k \cdot \Phi_f(t) \cdot \omega(t) \rightarrow E_m = k \cdot \Phi_f \cdot \Omega$$

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

$$J_t \frac{d\omega}{dt} = T_{em}(t) - T_r(t) - B_m \omega(t) - T_f \rightarrow T_{em} - T_r - B_m \omega(t) - T_f = s \cdot J_t \cdot \Omega$$

4.1.3 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.

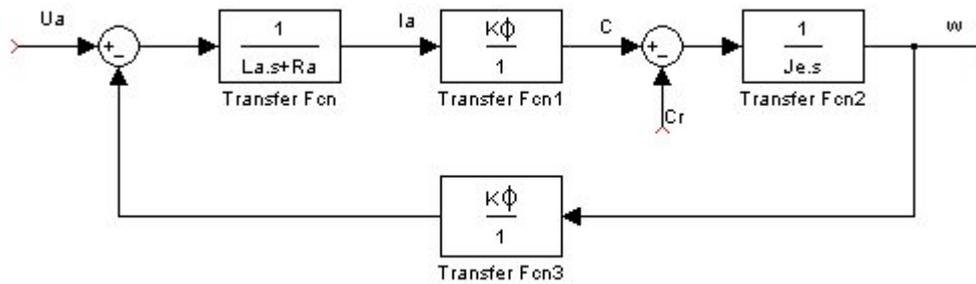


Fig. 4.2 : Schéma bloc tension-vitesse du moteur à courant continu.

- Si le courant à la sortie et gardée toujours la tension à l'entrée, on a :

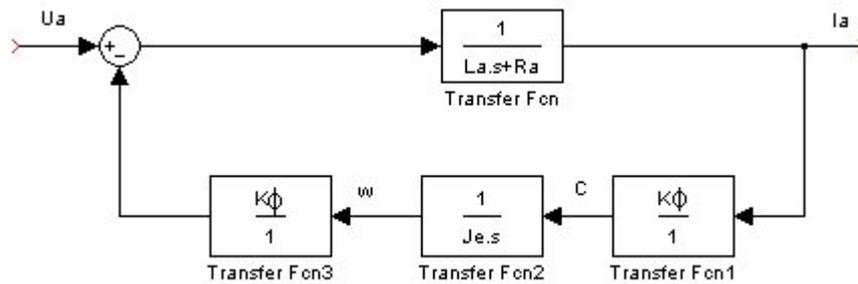


Fig. 4.3 : Schéma bloc tension-courant du moteur à courant continu.

4.2 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 :

La partie électrique

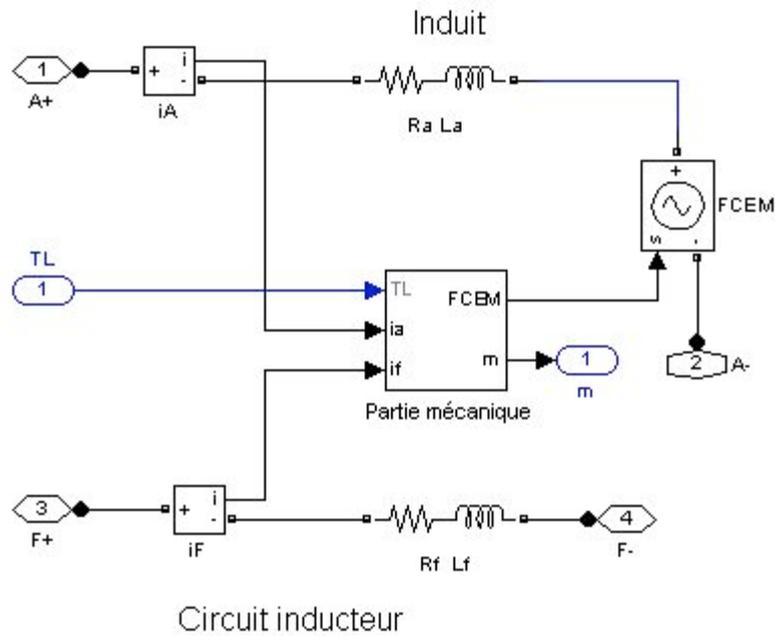


Fig. 4.4 : Réalisation de la partie électrique de la MCC sous Simulink.

La partie mécanique

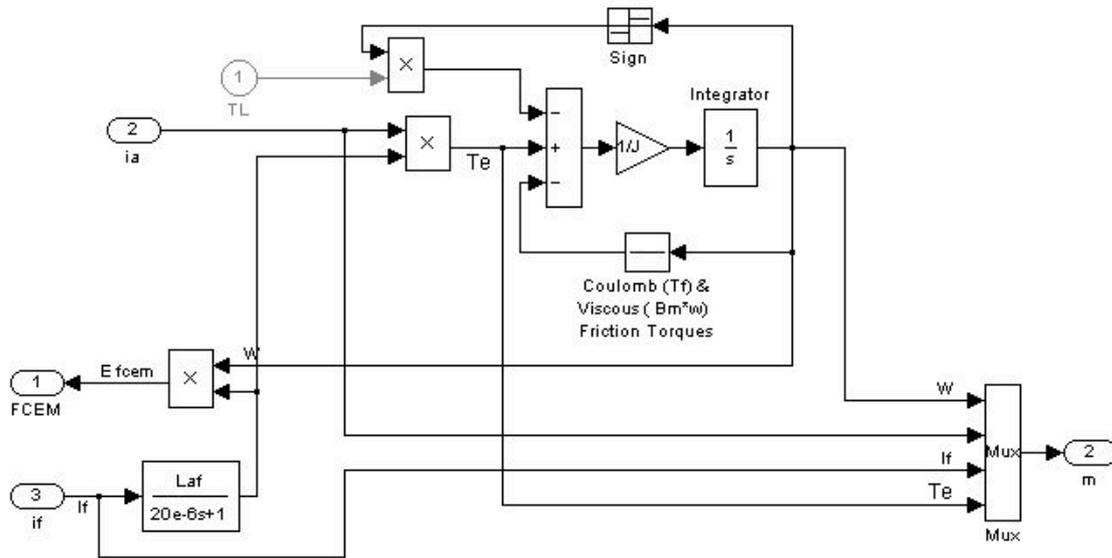


Fig. 4.5 : Réalisation de la partie mécanique de la MCC sous Simulink.

Le regroupement de ces deux donne :

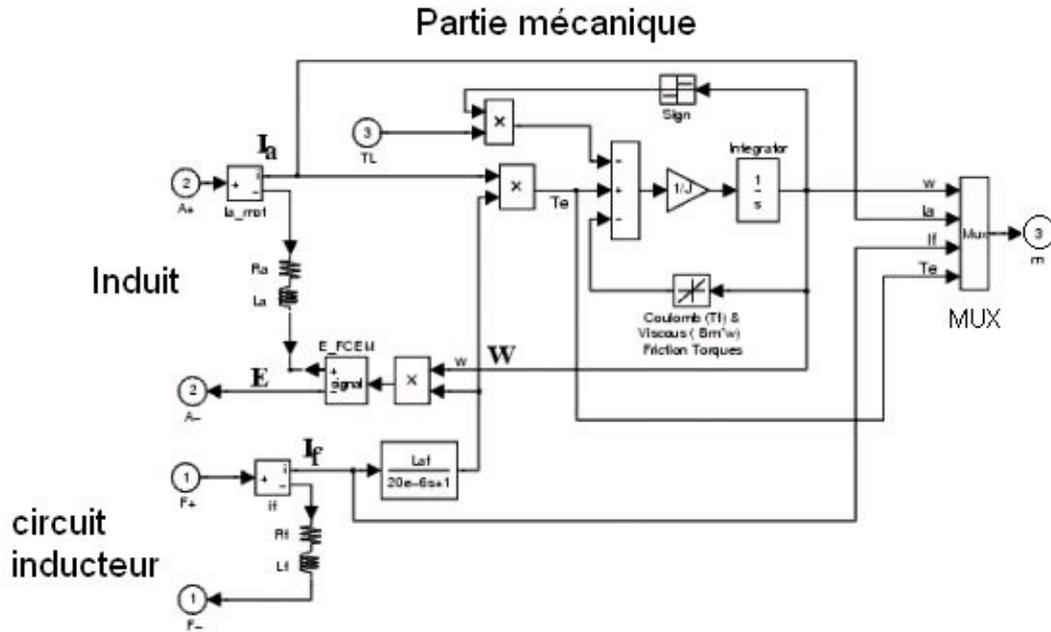


Fig. 4.6 : Réalisation de la MCC sous Simulink.

Remarque : Les blocs utilisés pour la réalisation du modèle sont défini à l'Annexe 1.

- ❖ 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 :

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - \text{sgn}(\omega)T_L - B_m - T_f$$

Soulignons que l'opérande $\text{sgn}(w)$ 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 :

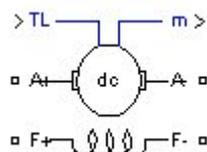


Fig. 4.7 : Bloc de la MCC sous Simulink.

Remarque : Il existe bien d'autres modèles concernant la MCC (Annexe 2).

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

◆ Indépendante

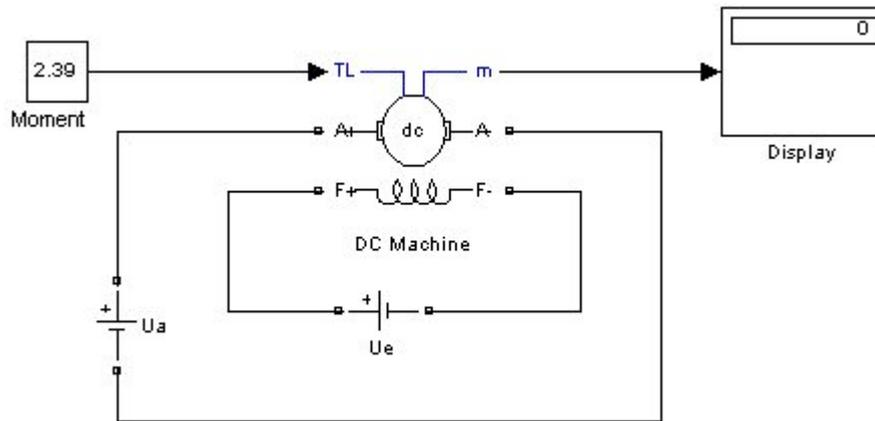


Fig. 4.8 : Modèle Simulink de la MCC à excitation indépendante.

◆ Série

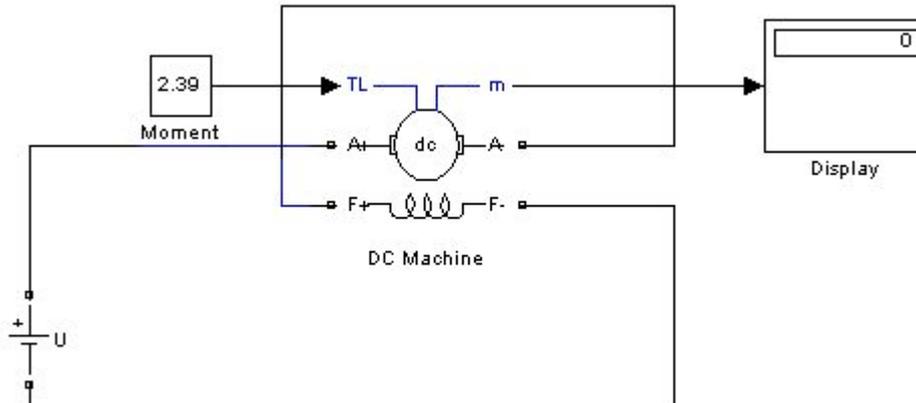


Fig. 4.9 : Modèle Simulink de la MCC à excitation série.

◆ Parallèle

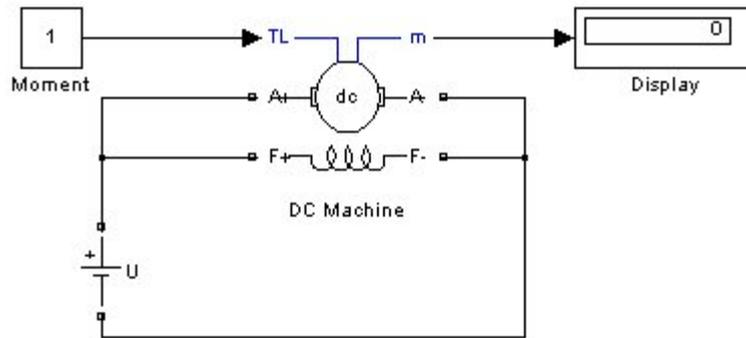


Fig. 4.10 : Modèle Simulink de la MCC à excitation série.

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* .

Chapitre 5

SIMULATION DES MACHINES A COURANT CONTINU

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

5.1.1 Mise en œuvre du laboratoire virtuel

Le laboratoire virtuel est représenté sur la fig. 5.1. Il 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*).

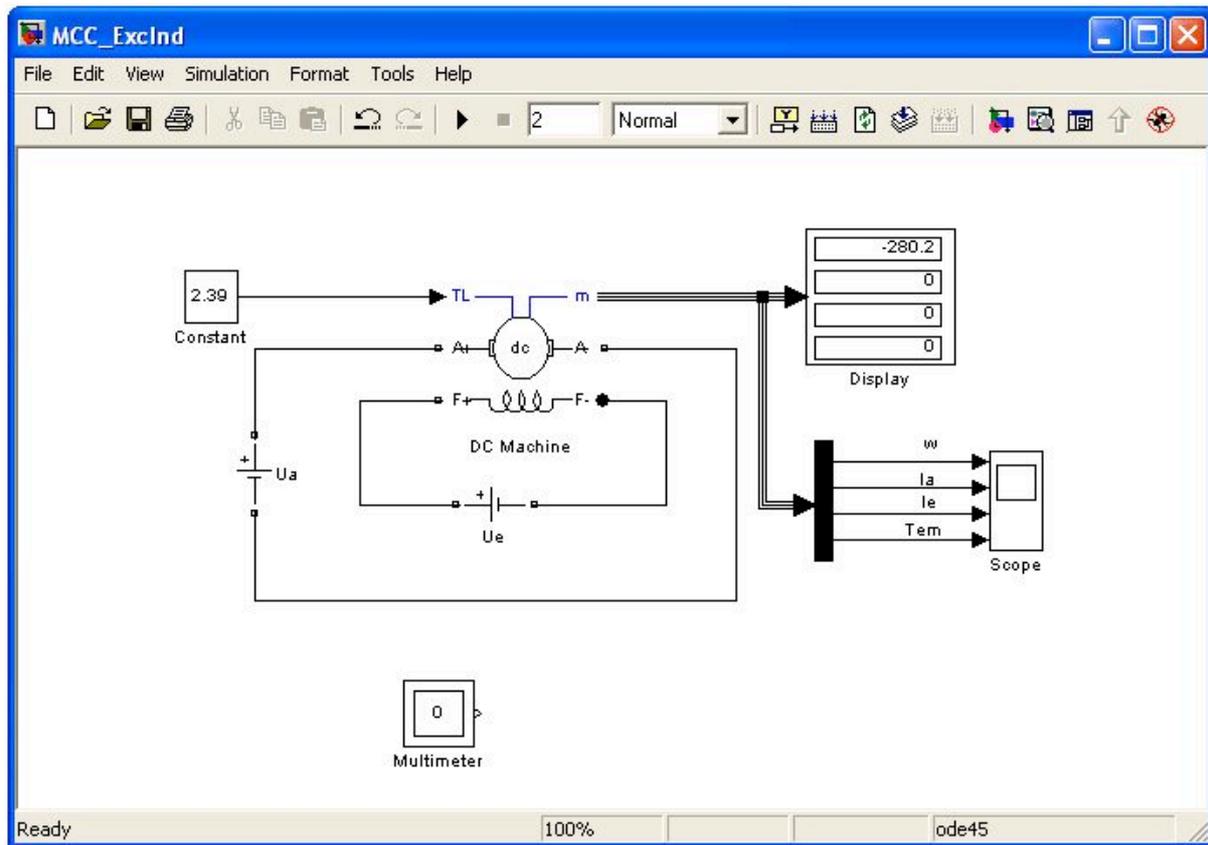


Fig. 5.1 : Modèle pour l'étude de la MCC à excitation indépendante.

Les circuits de l'induit et d'excitation sont visibles à partir du bloc *DC Machine*, à l'entrée TL duquel, on applique le couple de la charge, la sortie m est destinée pour la mesure et l'observation des variables d'état de la machine dans l'ordre suivant : la vitesse angulaire (rad/s), le courant de l'induit (A), le courant d'excitation (A), le couple électromagnétique (Nm).

Dans les champs de réglage de la machine (fig. 5.2) on donne :

- les paramètres de l'enroulement de l'induit – R_a (Ohm), L_a (H) ;
- les paramètres de l'enroulement d'excitation – R_f (Ohm), L_f (H) ;
- le coefficient L_{af} ;
- la somme des moments d'inertie de la machine et de la charge – J (Kgm^2). Il faut souligner, que les paramètres (L_f , J) sont importants dans l'étude des processus transitoires. Ils n'influent pas sur les régimes stationnaires ;
- le coefficient de frottement visqueux – B_m (Nms) ;
- le coefficient de frottement à sec – T_f (Nm) ;
- la vitesse initiale.

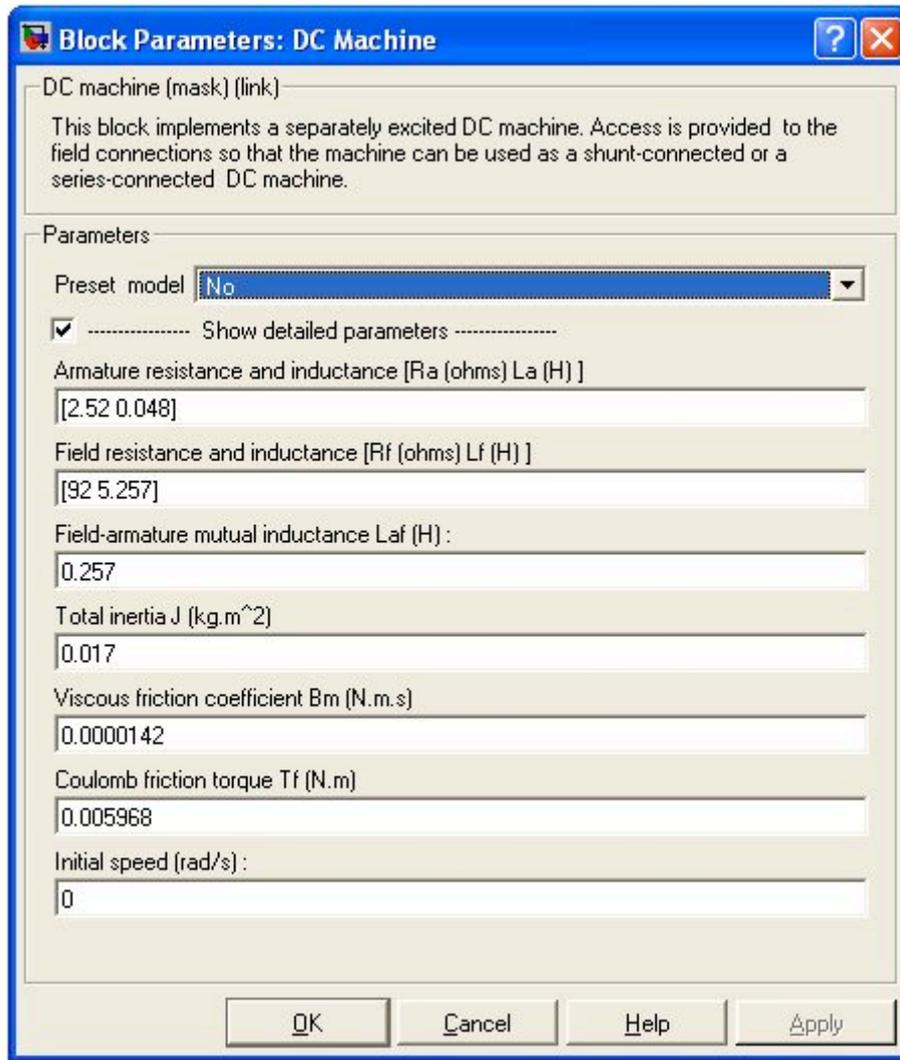


Fig. 5.2 : Fenêtre de réglage des paramètres de la machine à courant continu.

Tous ces paramètres sont calculés à l'aide des expressions suivantes :

$$I_E = \frac{U_E}{R_E}, \quad M_{nom} = \frac{P_{nom}}{\omega_{nom}} = \frac{30P_{nom}}{\pi n_{nom}}, \quad I_{anom} = \frac{P_{nom}}{U_{anom} \eta_{nom}} - I_E, \quad L_{af} = \frac{M_{nom}}{I_{anom} I_f}.$$

$$L_E \geq (2 \div 5) \frac{L_a R_E}{R_a}; \quad J \geq \frac{(5 \div 10) L_a P_{nom}^2}{R_a^2 \omega_{nom}^2 I_{anom}^2}$$

$$p_{mec} = (0.5 \div 2\%) P_{nom} \quad \text{et} \quad T_j \approx \frac{P_{mec}}{2\omega_{nom}}; \quad B_m \approx \frac{P_{mec}}{2\omega_{nom}^2}$$

Les données du catalogue des machines à courant continu concernant notre machine sont mentionnées dans le tableau suivant.

Tableau 5.1 : Données sur le moteur 2PN 90M

h (mm)	P_{nom} (kW)	U_{nom} (V)	N_{nom} (trs/min)	η_{nom} (%)	R_a (Ohm)	R_E (Ohm)	L_a (mH)
90	1	220	4000	72.5	2.52	92	48

La fenêtre de réglage des paramètres de la modélisation est représentée sur la fig. 5.3.

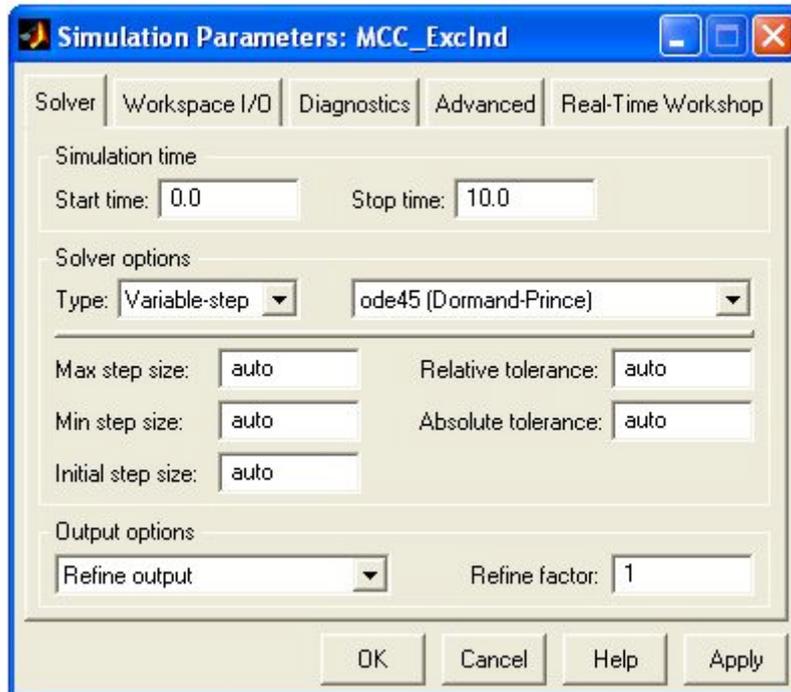


Fig. 5.3 : Fenêtre de réglage des paramètres de la modélisation.

5.1.2 Relevé de la caractéristique mécanique, et calcul des caractéristiques de fonctionnement de la machine en régime de moteur.

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 1.6 du moment du couple nominal.

Tableau 5.2 : Relevé des caractéristiques du moteur

Données	Mesures			Calculs		
M (N.m)	ω (rad/s)	Ia (A)	Ie (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 5.2 suite.

Données	Mesures			Calculs		
M (N.m)	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	264.5	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 :

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

- Caractéristique mécanique

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

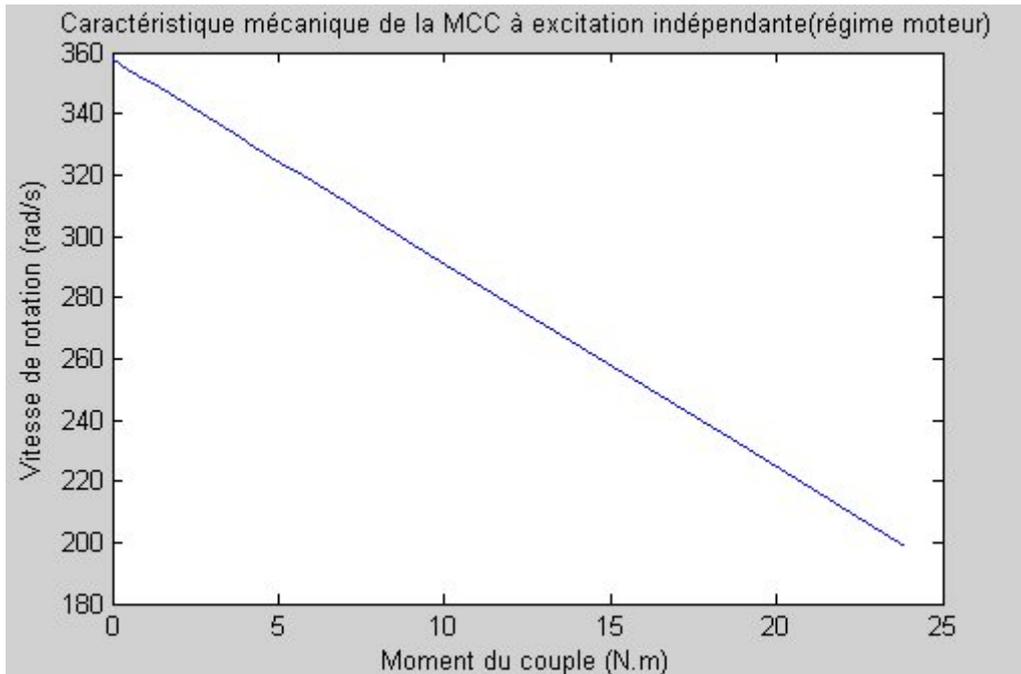


Fig.5.4 : Courbe de la caractéristique mécanique $\omega=f(M)$.

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

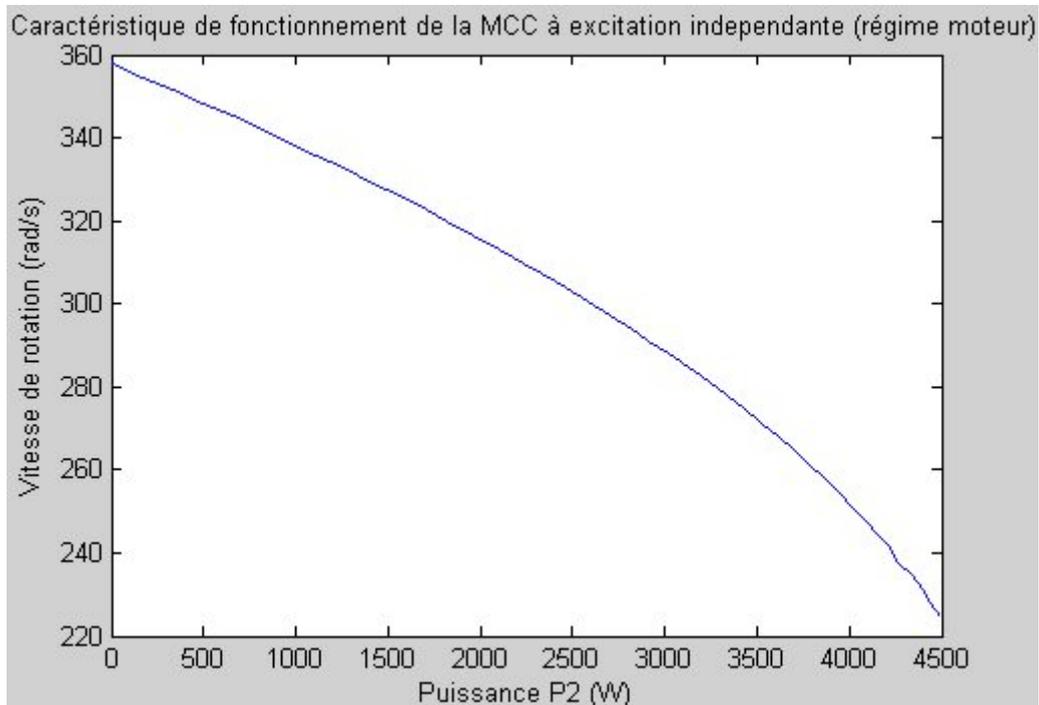


Fig. 5.5 : Courbe de la caractéristique de fonctionnement $\omega=f(P_2)$.

➤ Moment en fonction de la puissance de sortie

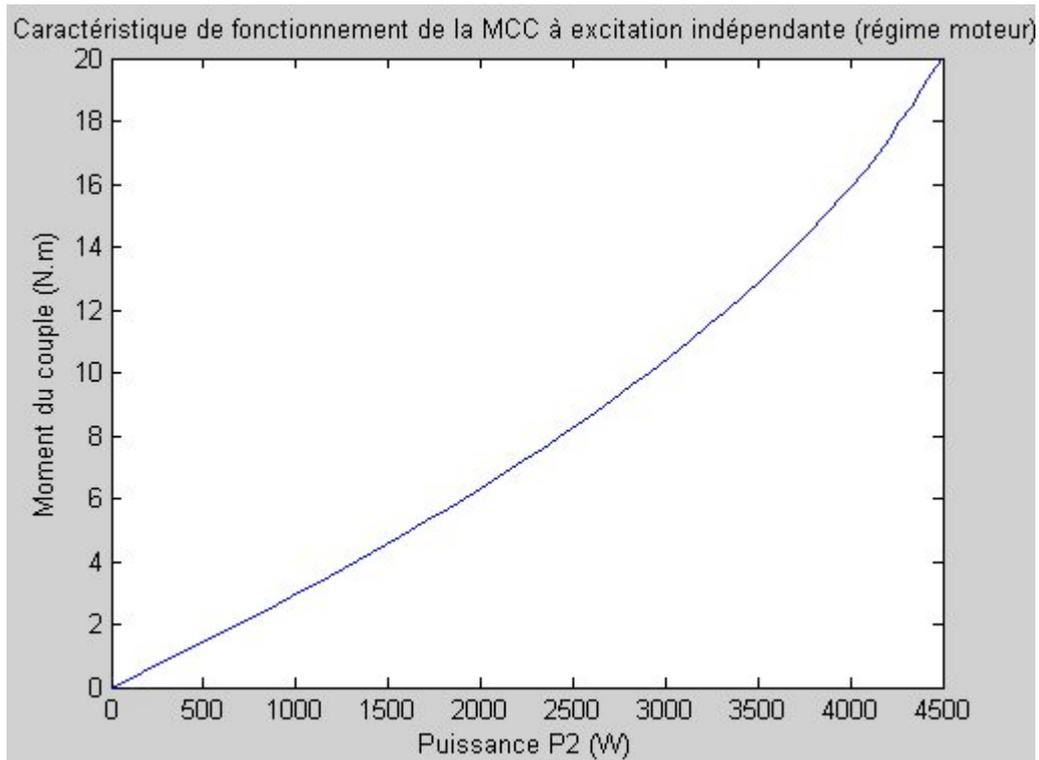


Fig. 5.6 : Courbe de la caractéristique de fonctionnement $M=f(P_2)$.

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

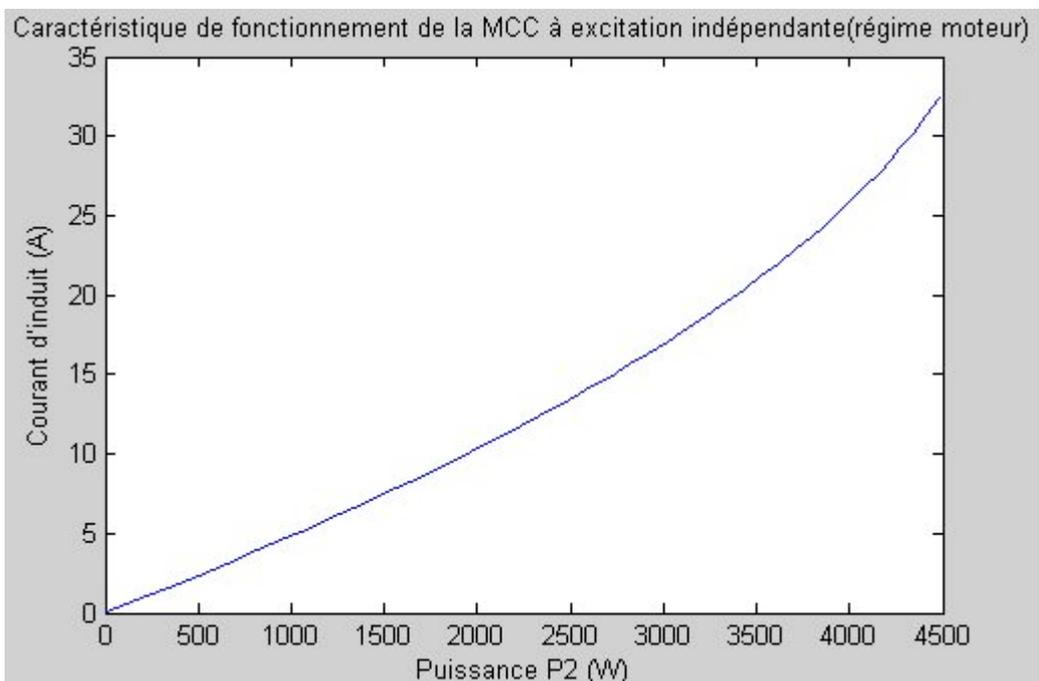


Fig. 5.7 : Courbe de la caractéristique de fonctionnement $I_a=f(P_2)$.

➤ Rendement en fonction de la puissance de sortie

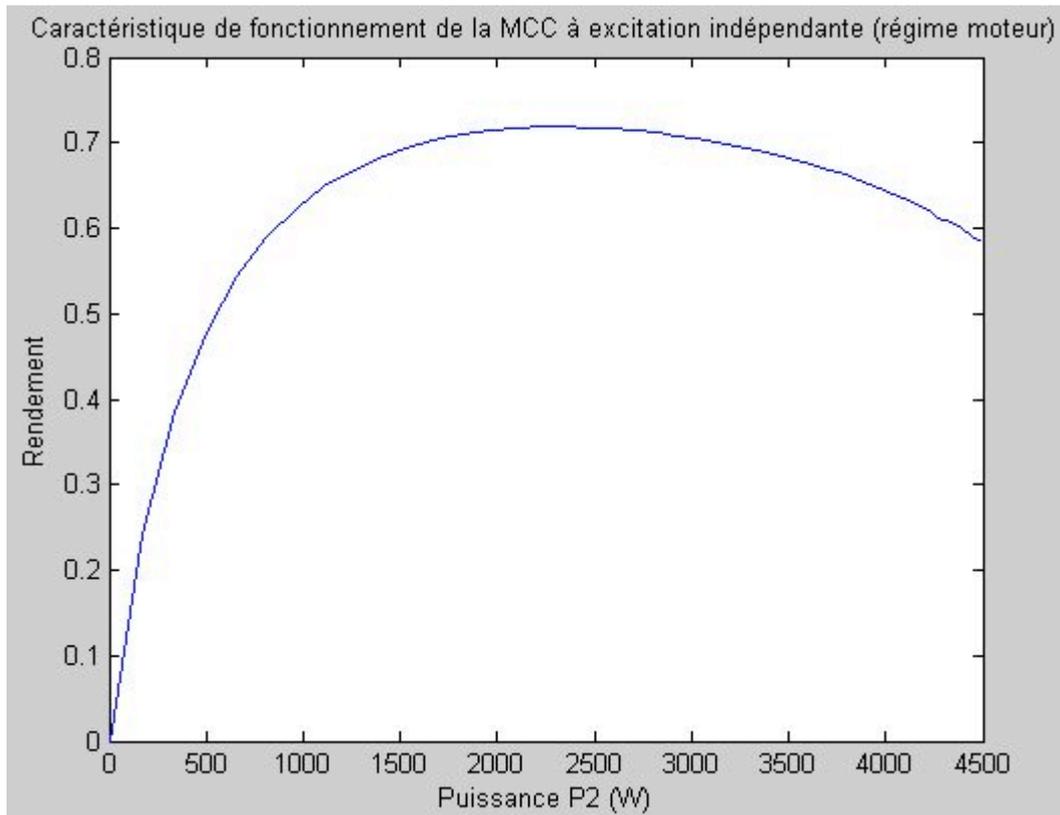


Fig. 5.8 : Courbe de la caractéristique de fonctionnement $\eta=f(P_2)$.

5.1.3 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)	Ia (A)	Ie (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

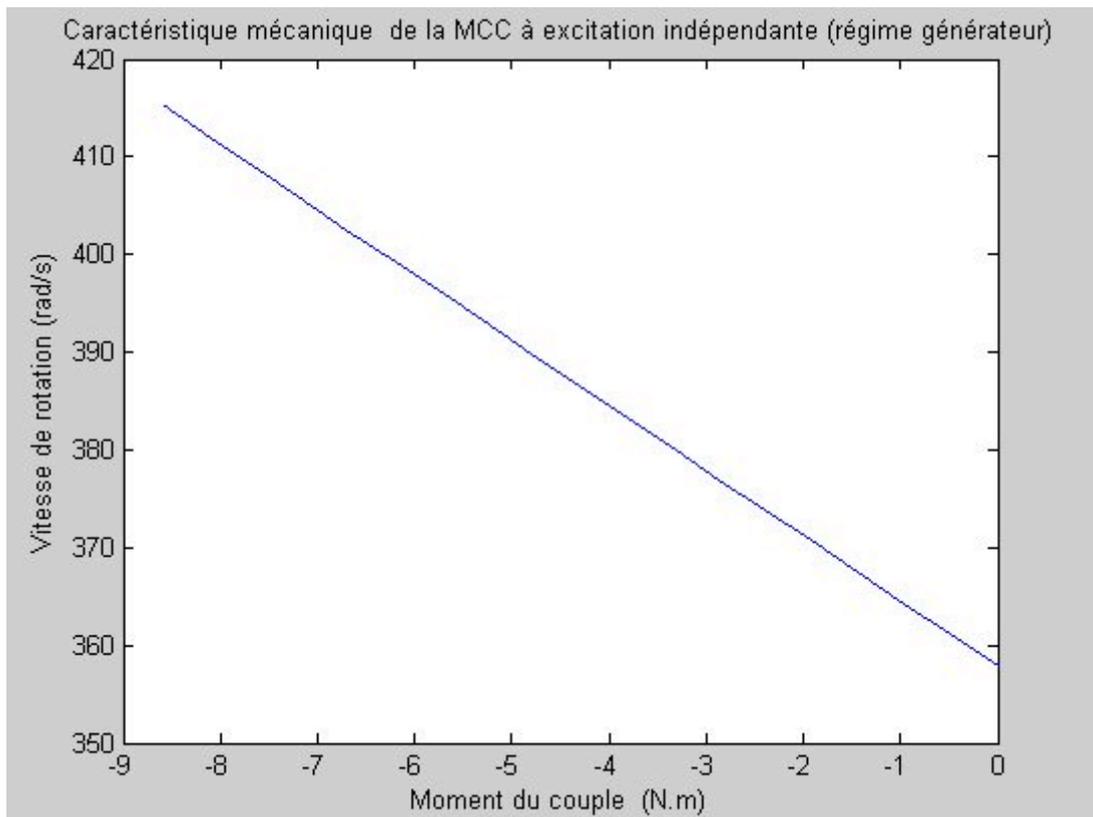


Fig. 5.9 : Courbe de la caractéristique mécanique $\omega=f(M)$.

- Caractéristiques de fonctionnement du générateur.

➤ Vitesse en fonction de la puissance de sortie

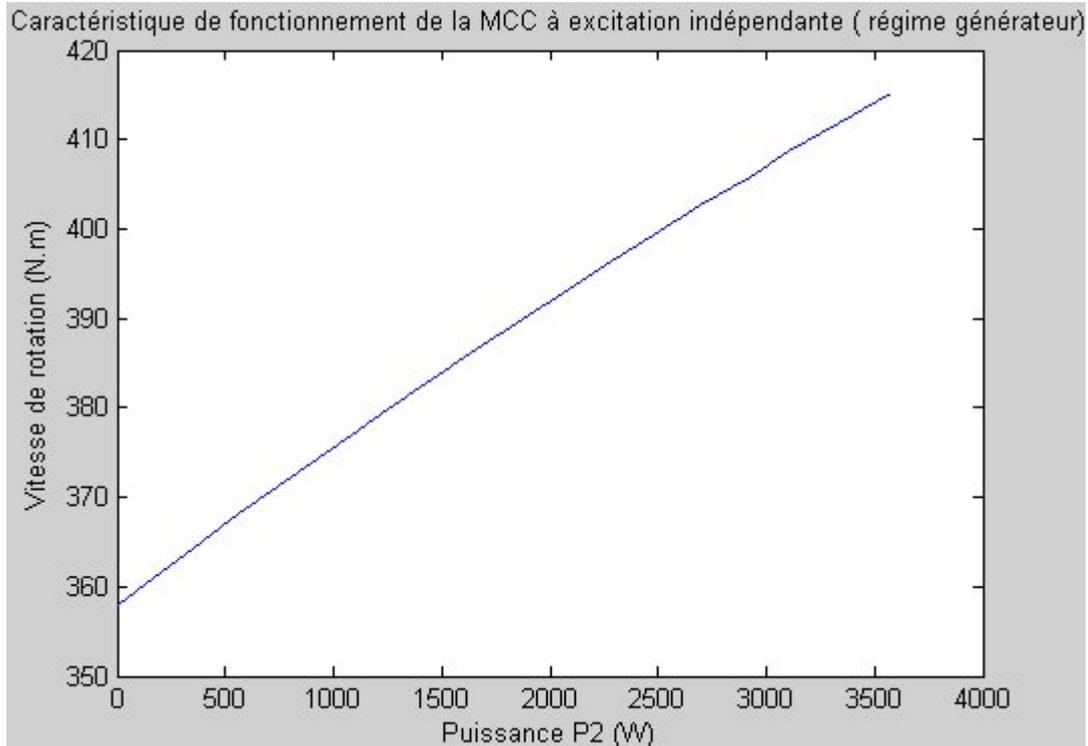


Fig. 5.10 : Courbe de la caractéristique de fonctionnement $\omega=f(P_2)$.

➤ Moment en fonction de la puissance de sortie

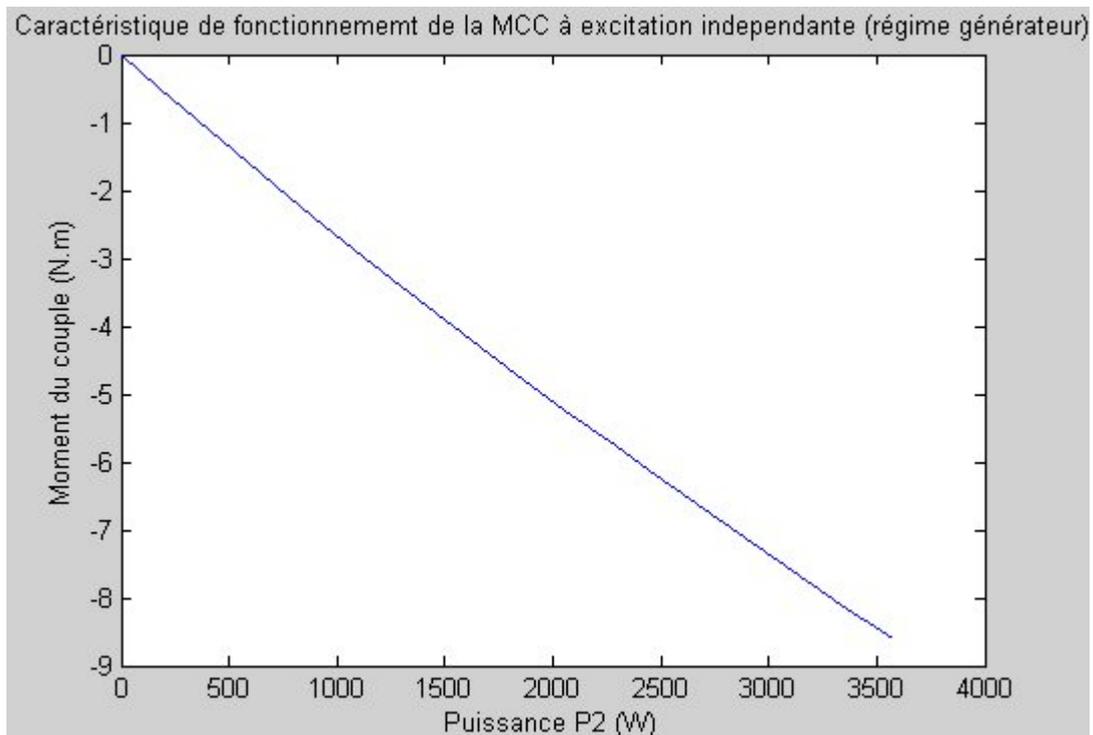


Fig. 5.11 : Courbe de la caractéristique de fonctionnement $M=f(P_2)$.

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

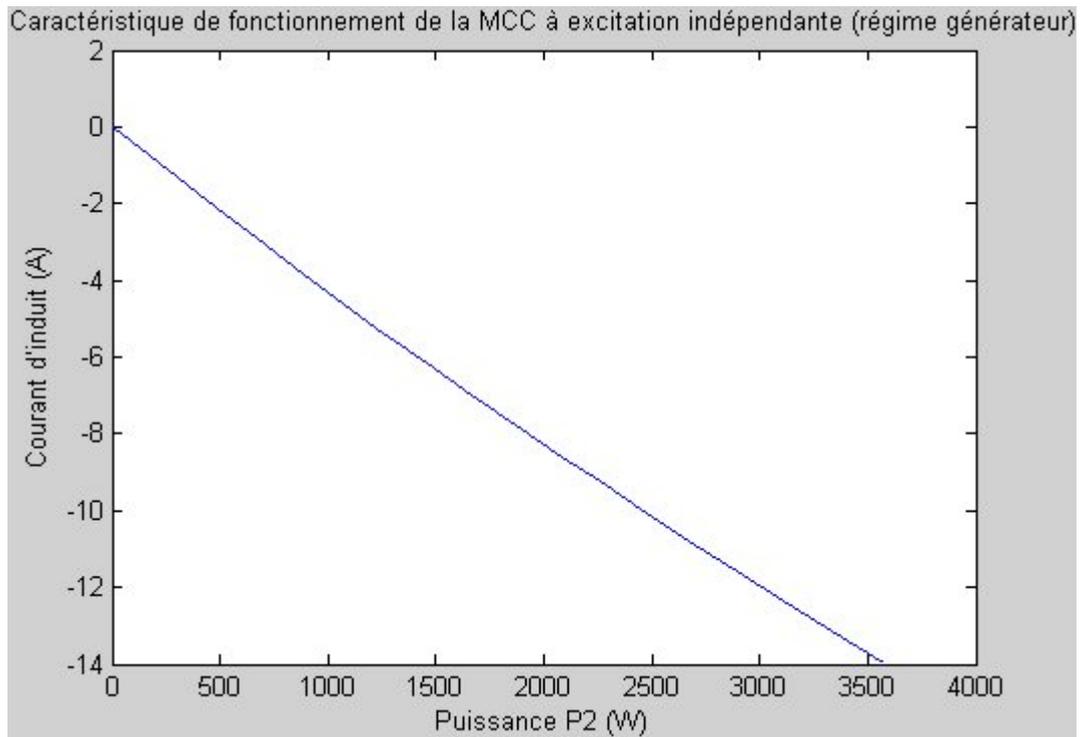


Fig. 5.12 : Courbe de la caractéristique de fonctionnement $I_a=f(P_2)$.

➤ Rendement en fonction de la puissance de sortie

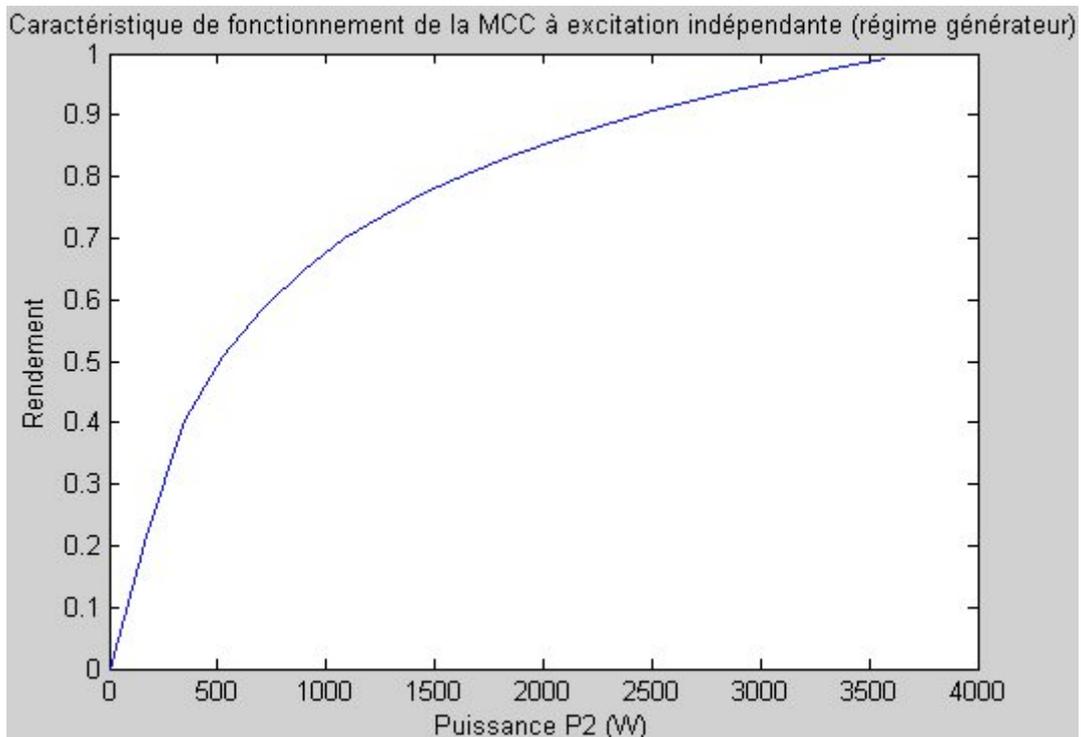


Fig. 5.13 : Courbe de la caractéristique de fonctionnement $\eta=f(P_2)$.

5.1.4 Relevé des caractéristiques mécaniques avec variation de la tension d'alimentation aux bornes du circuit de l'induit.

En utilisant le modèle de la figure 5.1, on fait varier le moment du couple de -1.2 à $1.2 M_{nom}$, pas 0.2 , pour chaque valeur de la tension d'induit ($U_a = 10, 20, 80, 132, 176$ et 220 V).

Tableau 5.4 : Relevé des caractéristiques mécaniques

	U_a = 10 V	U_a = 20 V	U_a = 80 V	U_a = 132 V	U_a = 176 V	U_a = 220 V
M (N.m)	ω (rad/s)					
-2.868	35.36	51.63	149.3	233.9	305.4	377
-2.39	32.18	48.45	146.1	230.7	302.3	373.8
-1.912	28.99	45.26	142.9	227.5	299.1	370.7
-1.434	25.8	42.07	139.7	224.3	295.9	367.5
-0.956	22.61	38.88	136.5	221.1	292.7	364.3
-0.478	19.42	35.69	133.3	217.9	289.5	361.1
0	16.23	32.5	130.1	214.7	286.3	357.9
0.478	13.04	29.31	126.9	211.5	283.1	354.7
0.956	9.852	26.12	123.7	208.3	279.9	351.5
1.434	6.663	22.93	120.6	205.1	276.7	348.3
1.912	3.474	19.74	117.4	202	273.6	345.1
2.39	0.285	16.56	114.2	198.8	270.4	342
2.868	-2.824	13.37	111	195.6	267.2	338.8

On obtient les courbes suivantes :

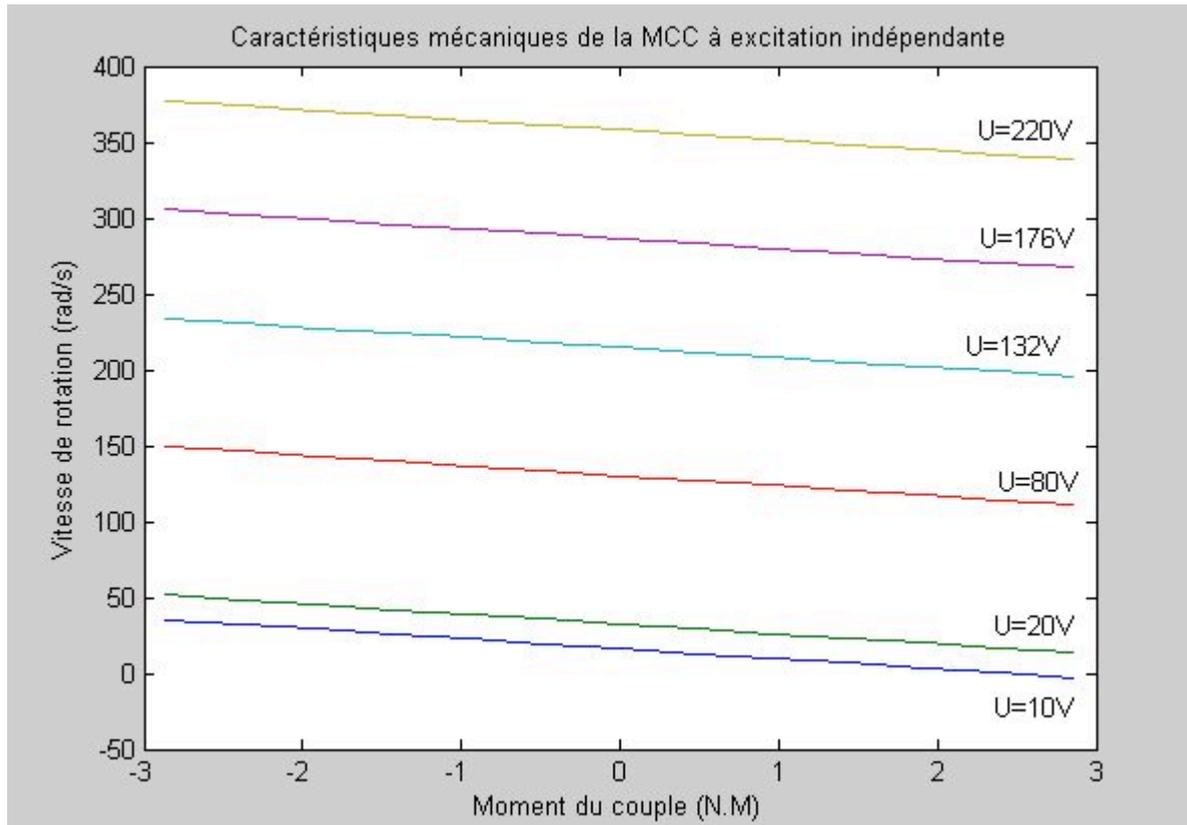


Fig. 5.14 : Courbes des caractéristiques mécaniques $\omega=f(M, U_a)$.

5.1.5 Relevé des caractéristiques mécaniques par variation de la tension d'excitation

Toujours avec le même modèle, on fait varier le moment du couple de -1.2 à $1.2 M_{nom}$, pas 0.2 , pour chaque valeur de la tension d'excitation ($U_e = 80, 160$ et 220 V). on a le tableau suivant :

Tableau 5.5 : Relevé des caractéristiques mécaniques par variation de la tension d'excitation

M (N.m)	Ue=220 V	Ue=160 V	Ue=140	Ue=130
	w (rad/s)			
-2.868	377	528.2	609.5	660.3
0	357.9	492.1	562.3	605.5
2.39	342	461.9	522.9	555.9
3.5	334.6	447.9	504.7	538.7
5	324.5	429	479.9	510
10	291.2	365.9	397.6	414.5
15	257.8	302.9	315.2	319
25	191.1	176.7	150.5	127.9
30	157.8	113.7	68.14	32.43
35	124.4	50.63	-14.03	-62.85
40	91.04	-12.28	-96.39	-158.4
45	57.69	-75.35	-178.7	-253.9
50	24.33	-138.4	-261.1	-349.4
55	-8.95	-201.5	-343.5	-444.9

Après les relevés on obtient les courbes suivantes :

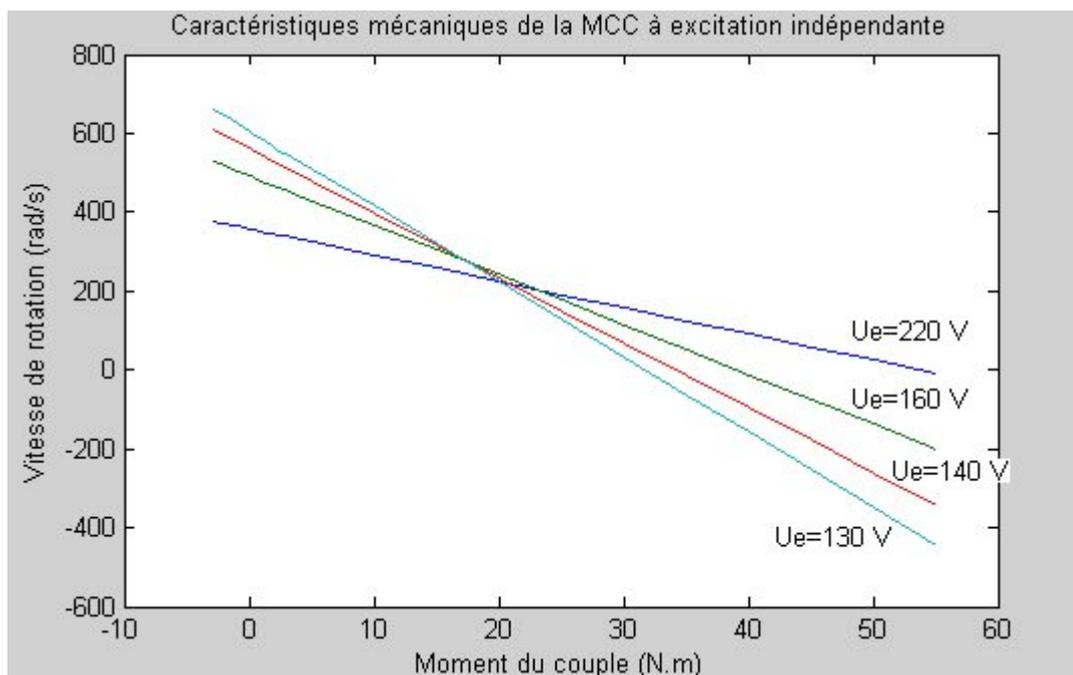


Fig. 5.15 : Courbes des caractéristiques mécaniques $\omega=f(M, U_e)$.

5.1.6 Relevé des caractéristiques mécaniques par variation de la résistance dans le circuit de l'induit.

On fait comme précédemment mais pour des valeurs de la résistance d'induit de 2 et 4 fois la résistance nominale en plus de cette dernière.

Tableau 5.6 : Relevé des caractéristiques mécaniques par variation de la résistance d'induit

	Ra = 2.52 Ω	Ra= 7.56 Ω	Ra = 15.12 Ω
M (N.m)	ω (rad/s)		
-2.868	377	415.1	472.3
-2.39	373.8	405.6	453.1
-1.912	370.7	396	433.8
-1.434	367.5	386.4	414.9
-0.956	364.3	376.9	395.8
-0.478	361.1	367.3	376.6
0	357.9	357.8	357.5
0.478	354.7	348.2	338.4
0.956	351.5	338.6	319.3
1.434	348.3	329.1	300.1
1.912	345.1	319.5	281
2.39	342	309.9	261.9
2.868	338.8	300.4	242.8

On obtient les courbes suivantes :

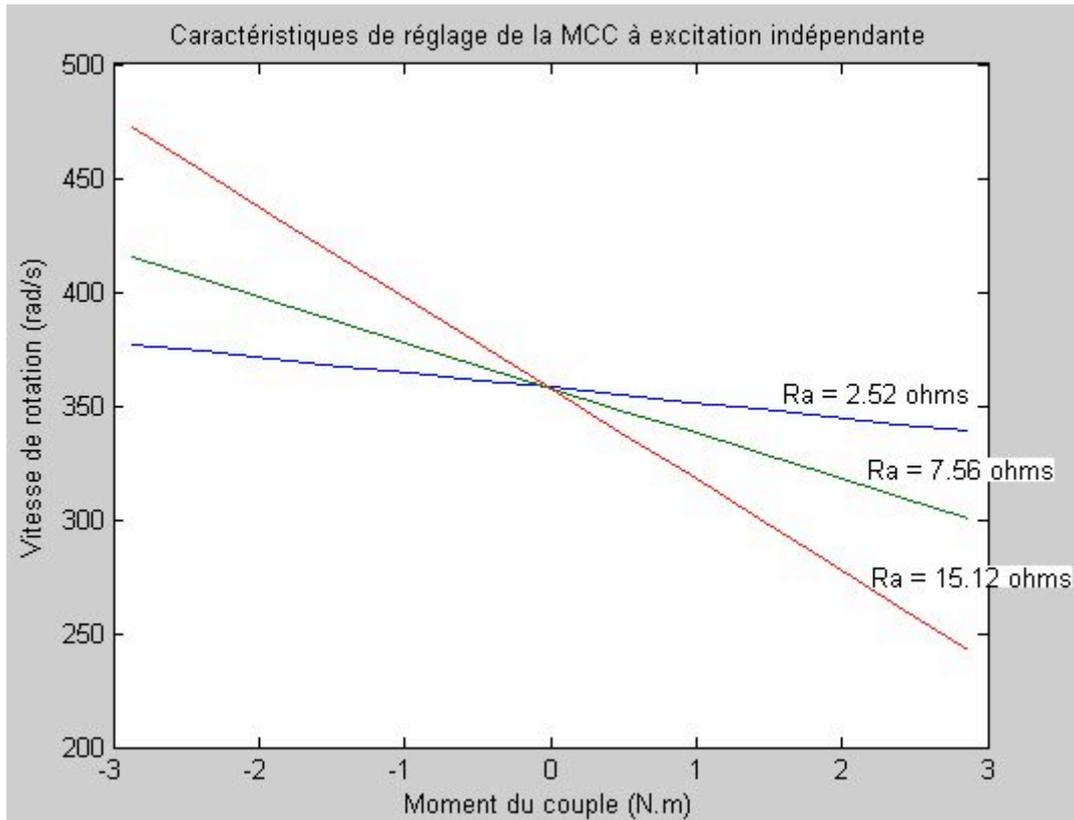


Fig. 5.16 : Courbes des caractéristiques mécaniques $\omega=f(M,R_a)$.

5.1.7 Relevé des caractéristiques mécaniques avec différentes valeurs du flux d'excitation.

Ici aussi on fait la modélisation comme au point 5.1.5, mais pour des valeurs du flux d'excitation de 0.6 et 0.8 fois le flux nominal en plus de ce dernier.

Tableau 5.7 : Relevé des caractéristiques mécaniques

	$\Phi = 0.6 \Phi_{nom}$	$\Phi = 0.7 \Phi_{nom}$	$\Phi = 0.8 \Phi_{nom}$	$\Phi = \Phi_{nom}$
M(N.m)	ω (rad/s)			
-2.868	649.5	550.3	477.2	377
0	596.4	511.2	447.3	357.9
2.868	543.2	472.2	417.4	338.8
5	503.7	443.1	395.2	324.5
10	411.1	375.1	343.1	291.2
15	318.4	307	291	257.8
25	133.1	170.9	186.8	191.1
30	40.5	102.8	134.6	157.8
35	-51.93	34.73	82.5	124.4
40	-144.6	-33.18	30.4	91.04
45	-237.2	-101.3	-21.6	57.69
50	-329.9	-169.3	-73.72	24.33
55	-422.5	-237.4	-125.8	-8.95

Remarque : Pour le relevé des caractéristiques, pour faire varier le flux d'excitation on a joué sur la valeur de l'inductance mutuelle L_{af} . En effet si $L_{af} = nL_{afnom}$, alors $\Phi = n\Phi_{nom}$ avec n un nombre décimal positif.

On obtient les courbes suivantes :

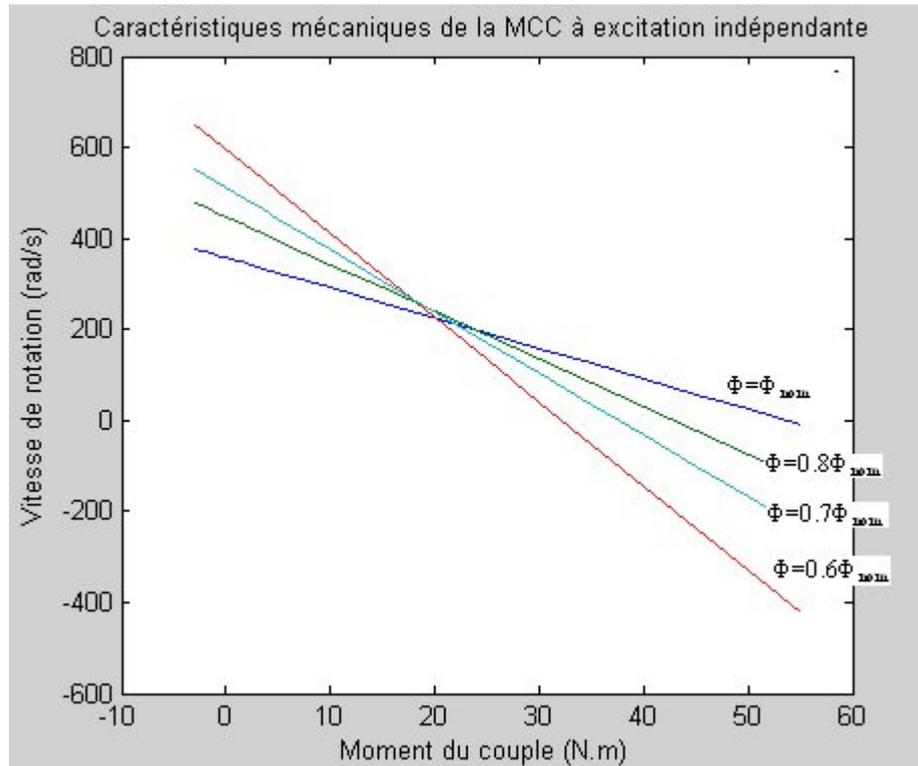


Fig. 5.17 : Courbes des caractéristiques mécaniques $\omega = f(M, \Phi)$.

5.1.8 Relevé des caractéristiques de réglage avec la variation de la tension aux bornes de l'induit.

Pour le relevé de la caractéristique de réglage, on utilise le modèle de la fig. 5.1. En faisant varier la tension d'induit de 0.4 à 1.2 de la valeur initiale (220V), et tout en gardant le couple de charge constant (égale à $M_{nom} = 2.39$ N.m), on effectue la manipulation et on a le tableau suivant :

Tableau 5.8 : Relevé de la caractéristique de réglage

Ua (V)	ω (rad/s)
88	127.1
132	198.8
176	270.4
220	342
260	413.5

D'où la courbe suivante :

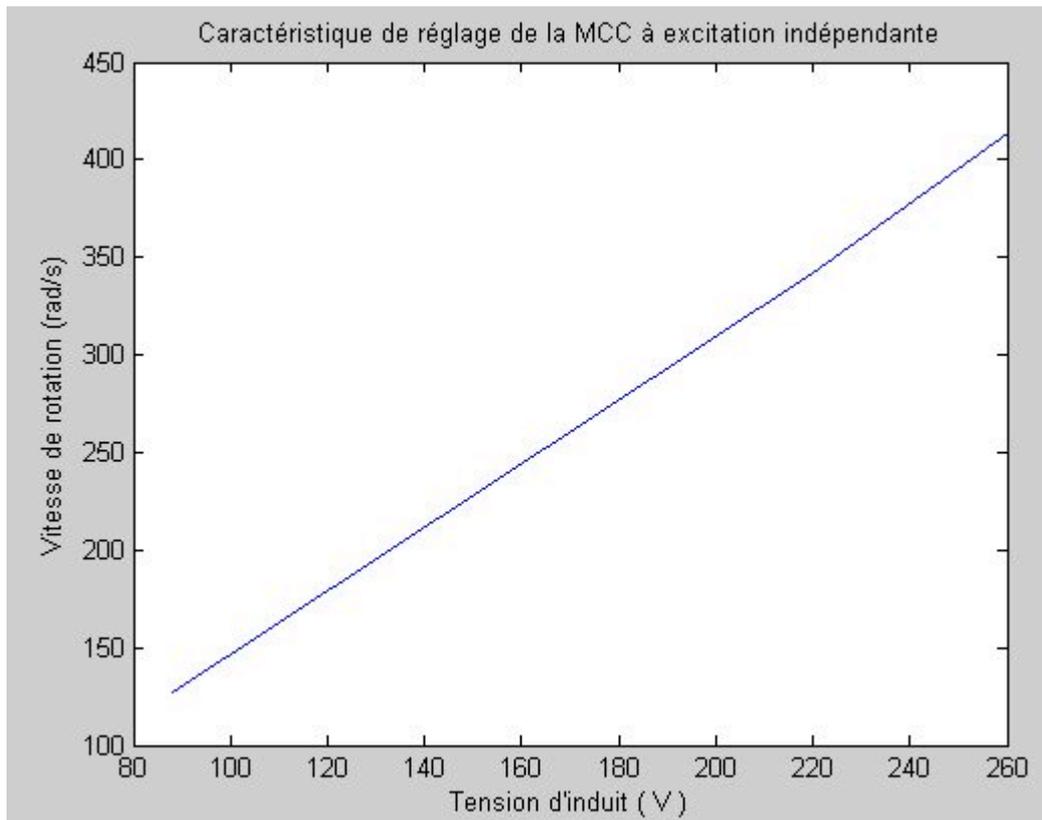


Fig. 5.18 : Courbe de la caractéristique de réglage $\omega=f(U_a)$.

5.1.9 Analyse des résultats obtenus

Dans notre premier laboratoire, nous avons mis en œuvre l'obtention des caractéristiques mécaniques, de fonctionnement et de réglage de la MCC à excitation indépendante.

- Les caractéristiques mécaniques montrent que la vitesse est une fonction décroissante du couple
- Les caractéristiques de fonctionnement montrent que :
 - la vitesse est une fonction décroissante de la puissance de sortie
 - le moment et le courant d'induit sont des fonctions croissantes de la puissance
 - la courbe du rendement en fonction de la puissance présente une courbe en cloche avec un maximum en (2335 N.m, 71.84%) pour le régime moteur ; pour le régime générateur, on a une fonction croissante dans la limite de la plage de données utilisée.
- Les caractéristiques (mécaniques) de réglages :

- par variation de la tension d'induit montrent qu'on a des caractéristiques parallèles (au dessous de la nominale pour des valeurs de tension inférieures à la tension nominale)
- par variation de la tension d'excitation montrent des caractéristiques qui s'entrecoupent dans le premier cadran de fonctionnement de la MCC ; ce qui permet un réglage de la vitesse au dessus ou en dessous de la nominale.
- par variation de la résistance du circuit de l'induit nous donnent des caractéristiques qui se coupent à la vitesse à vide ω_0 (de 357.5 rad/s) et permettent un réglage de la vitesse au dessus ou en dessous de la nominale suivant le régime de fonctionnement.
- par le flux d'excitation nous montrent que les caractéristiques s'entrecoupent et donnent la possibilité de régler la vitesse au dessus et en dessous de la nominale.

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

5.2.1 Mise en œuvre du laboratoire virtuel

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

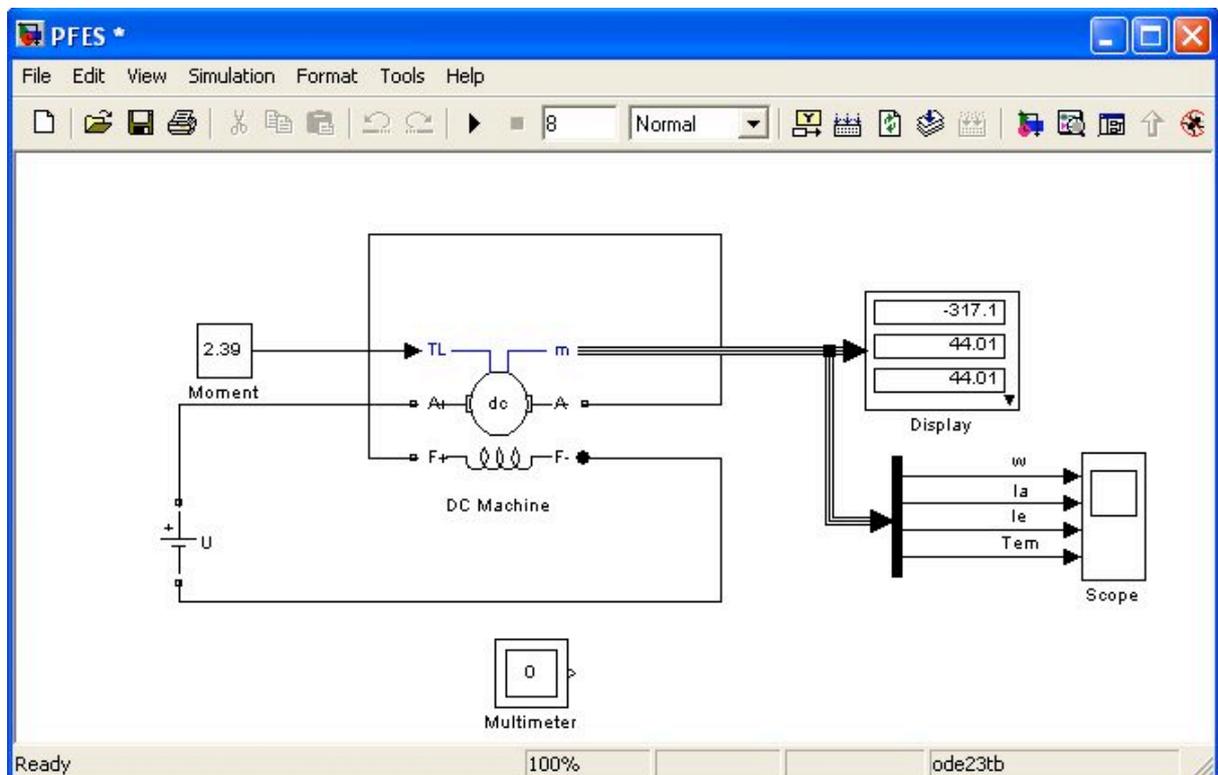


Fig. 5.19 : Modèle pour l'étude de la MCC à excitation série.

La fenêtre de réglage des paramètres de la machine à courant continu est représentée sur la fig. 5.19. La fenêtre de réglage des paramètres de la source d'alimentation est représentée sur la fig. 5.20. La fenêtre de réglage des paramètres de la modélisation est représentée sur la fig. 5.21.

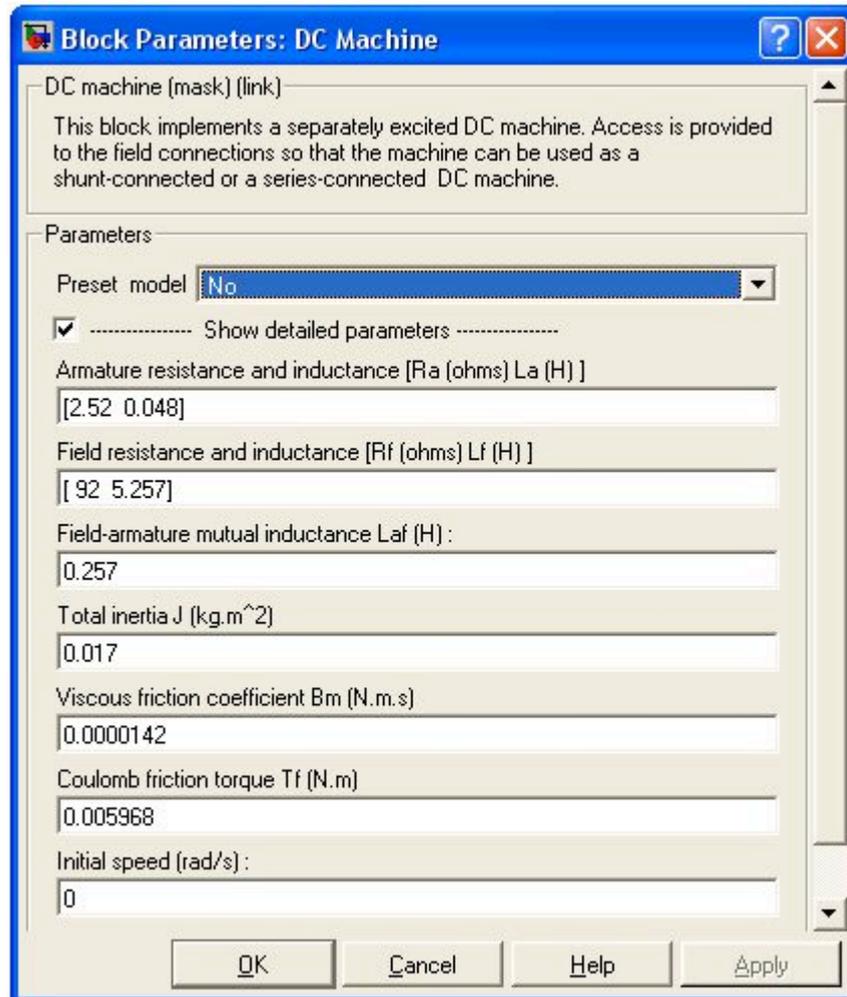


Fig. 5.20 : Fenêtre de réglage des paramètres de la machine.

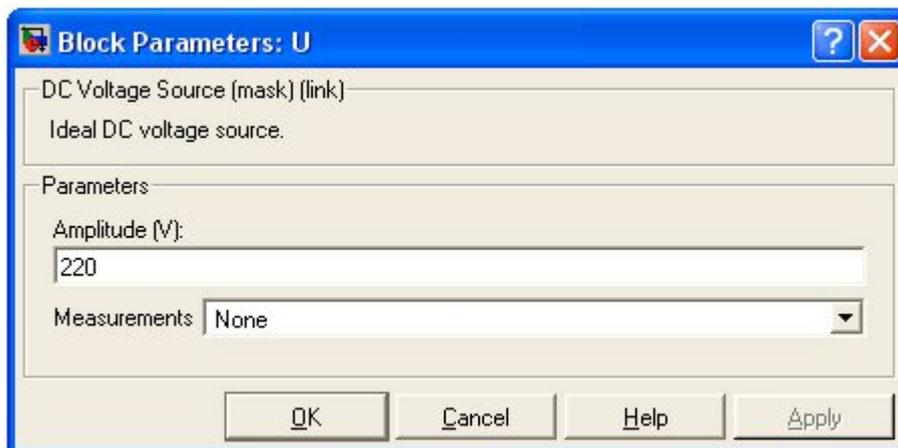


Fig. 5.21 : Fenêtre de réglage des paramètres de la source de tension.

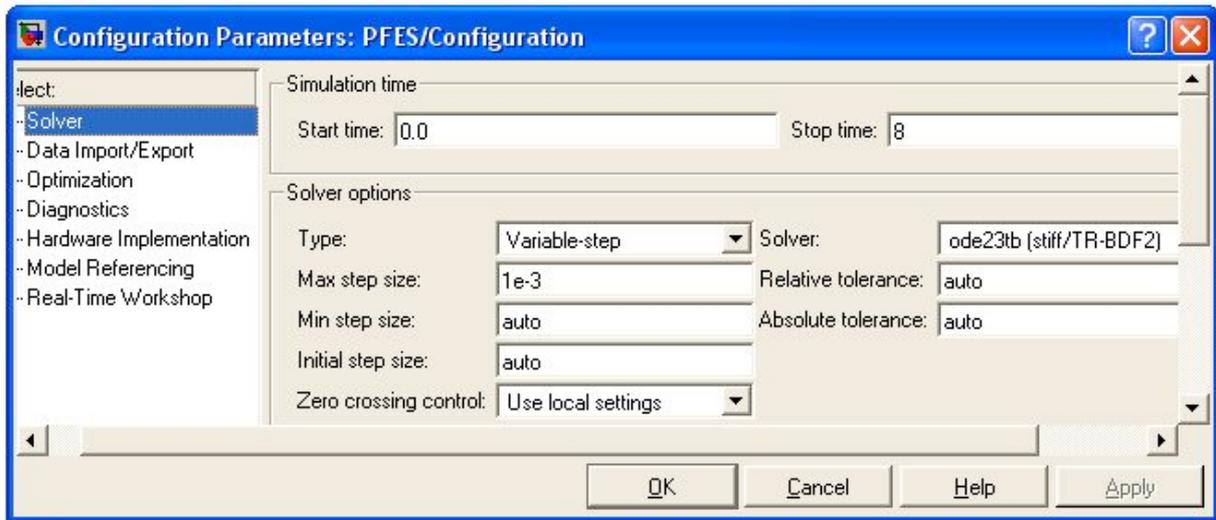


Fig. 5.22 : Fenêtre de réglage des paramètres de simulation.

5.2.2 Relevé des caractéristiques mécaniques et de fonctionnement de la MCC à excitation série

Tableau 5.9 : Relevé des caractéristiques mécaniques

Données	Mesures			Calculs		
	ω (rad/s)	I_a (A)	I_e (A)	P1 (W)	P2 (W)	η
M (N.m)						
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	-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

- Caractéristique mécanique

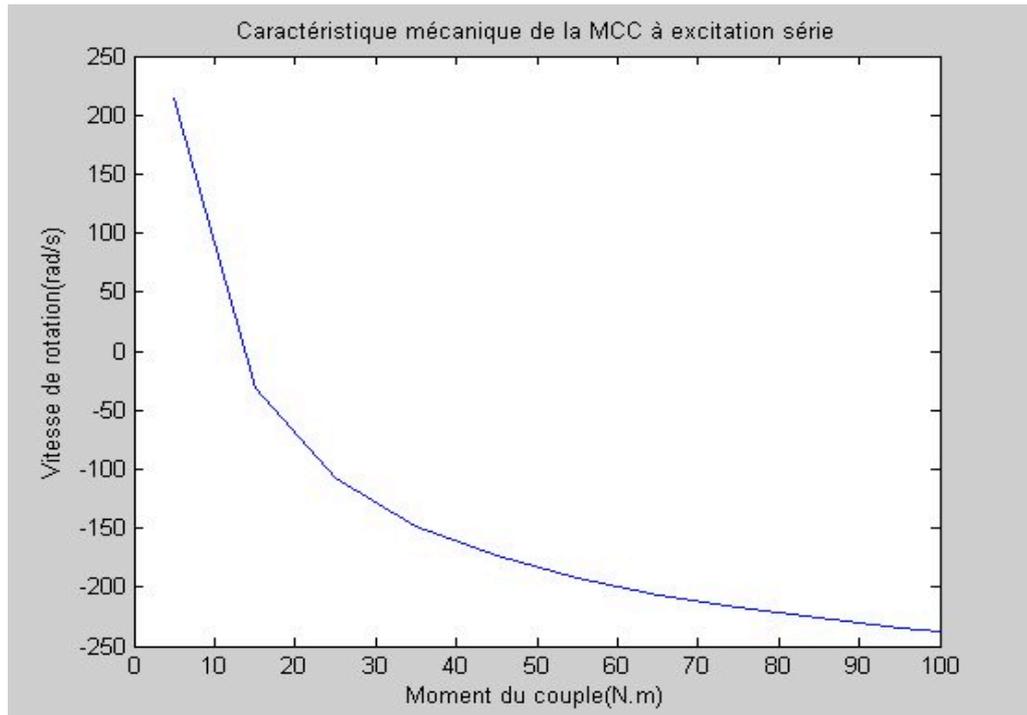


Fig. 5.23 : Courbe de la caractéristique mécanique $\omega=f(M)$.

- Caractéristiques de fonctionnement du moteur

➤ Vitesse en fonction de la puissance de sortie

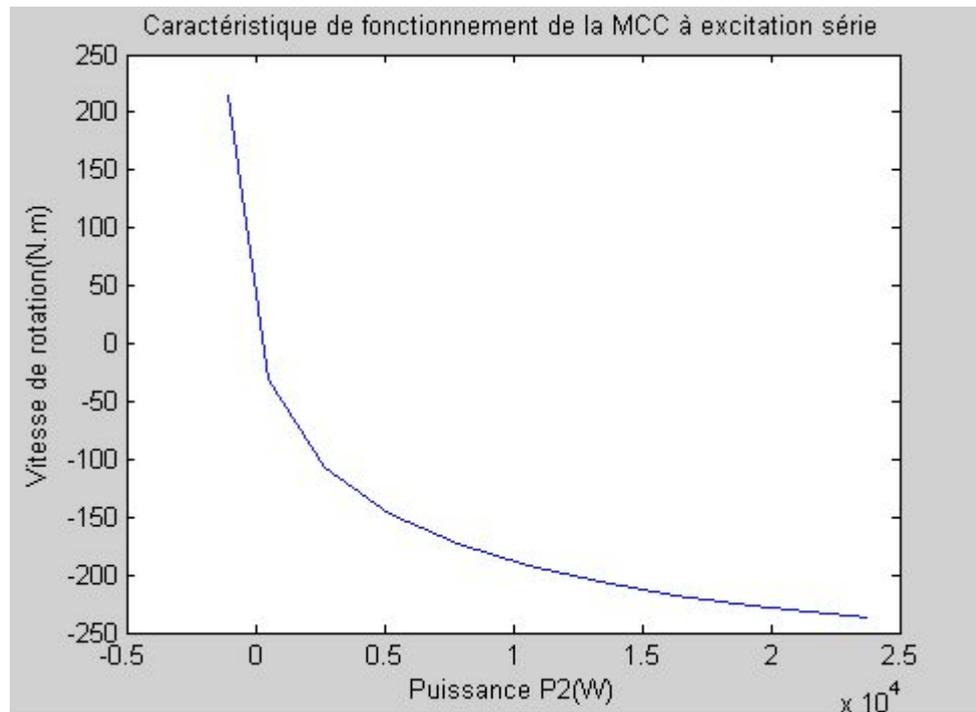


Fig. 5.24 : Courbe de la caractéristique de fonctionnement $\omega=f(P2)$.

➤ Moment en fonction de la puissance de sortie

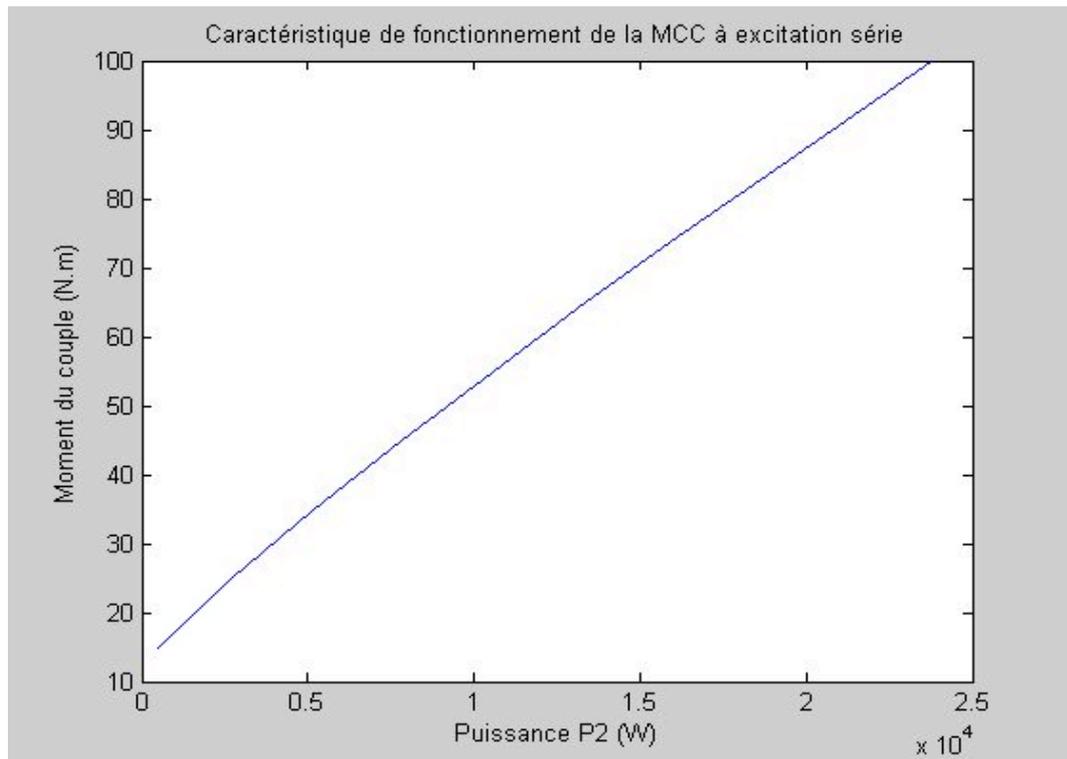


Fig.5.25 : Courbe de la caractéristique de fonctionnement $M=f(P_2)$.

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

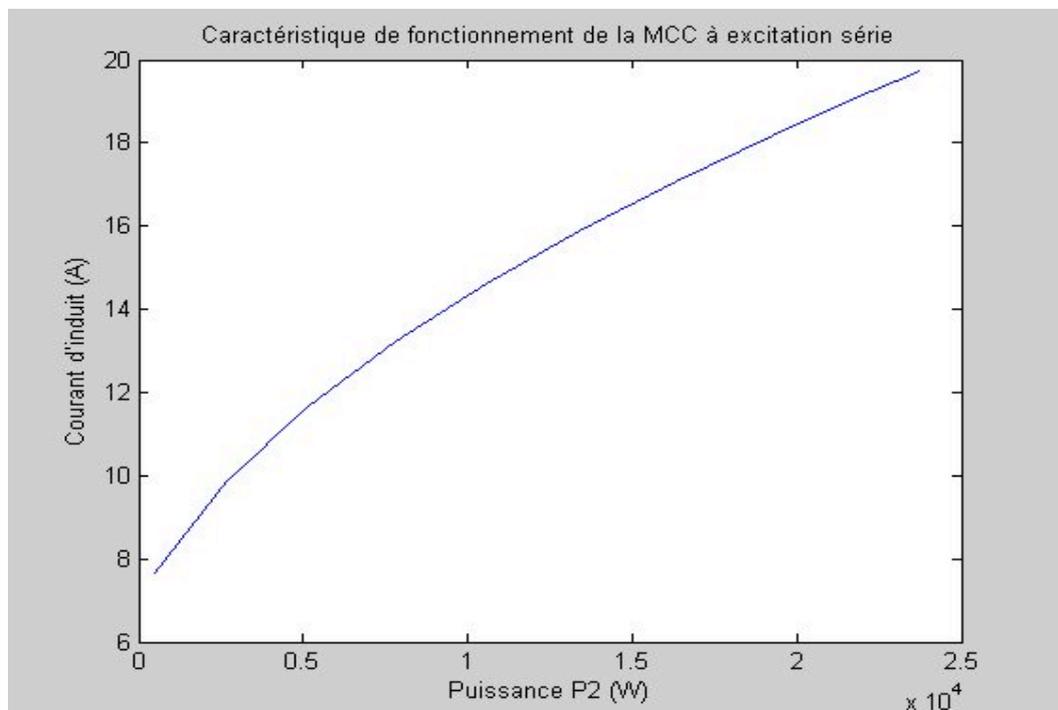


fig.5.26 : Courbe de la caractéristique de fonctionnement $I_a=f(P_2)$.

➤ Rendement en fonction de la puissance de sortie

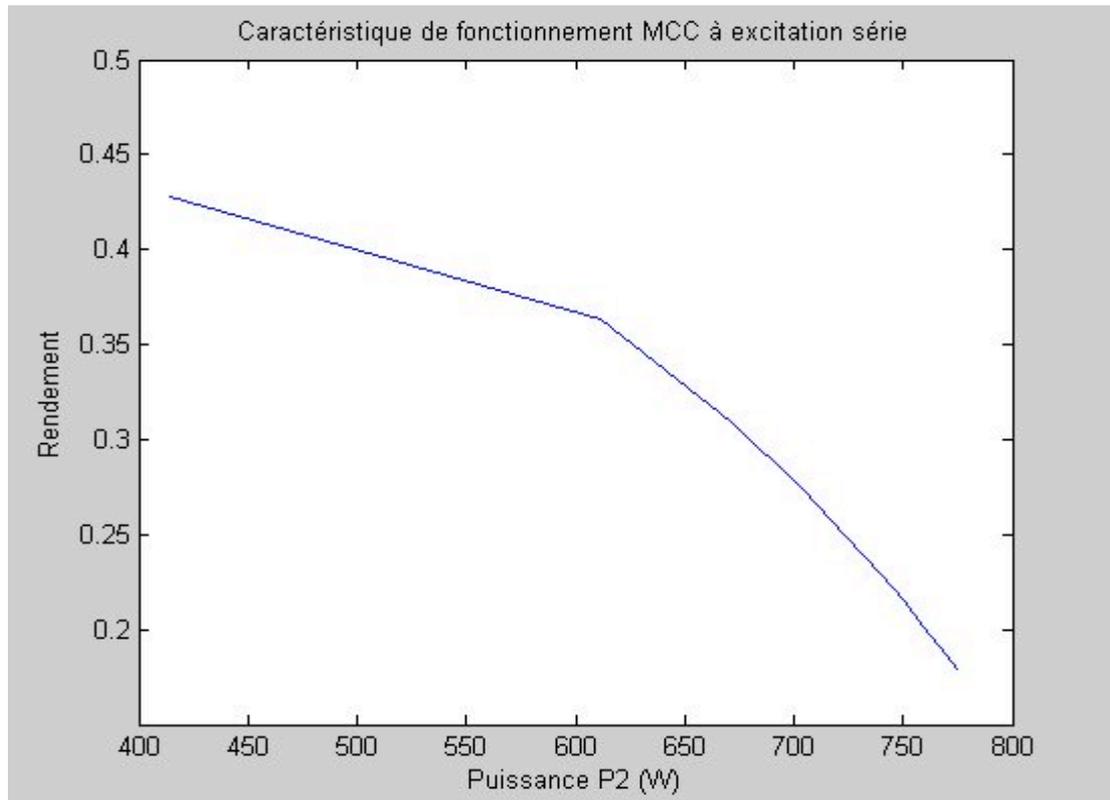


Fig. 5.27 : Courbe de la caractéristique de fonctionnement $\eta=f(P_2)$.

5.2.3 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 du modèle (Annexe 3).

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

Conclusion

Les machines à courant continu sont peu à peu remplacées par les machines asynchrones dans certains processus. Pourtant leur étude s'avère nécessaire car elles sont toujours utilisées dans plusieurs domaines où elles sont les mieux adaptées. 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.

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 plate forme de simulation de commande de machines à courant continu, Bamako ENI-ABT, 2002.110p.