

Contents

1	Objectifs	3
I	Partie théorique	4
2	Principe et modélisation du MCC	4
2.1	Principe	4
2.2	Mise en équation du mcc	4
2.2.1	Modélisation du MCC	4
3	Commande en tension de la MCC	5
3.1	Les paramètres de la fonction de transfert du régulateur PI	5
4	Commande en tension avec contrôle du courant de la MCC	6
4.1	Les paramètres de la fonction de transfert du régulateur PI	6
II	Simulation	10
5	Comportement en boucle ouverte	10
5.1	Constitution	10
5.2	Interprétation des résultats	13
6	Commande en tension du MCC	14
6.1	Schéma électrique:	14
6.2	Analyse des résultats	15
7	Contrôle du courant de la MCC	16
7.1	Schéma électrique & simulation	16
7.2	Analyse des résultats	18
8	Commande en tension avec contrôle du courant (cascade)	18
8.1	Schéma de simulation	18
8.2	Analyse des résultats	20
9	Conclusion Générale	21

1 Objectifs

Ce Tp a pour objectif de:

- ★ maîtriser les principales fonctionnalités du plus représentatif des logiciels de calcul scientifique: le logiciel de calcul Matlab et sa Toolbox graphique Simulink/plecs
- ★ Apprendre à concevoir une commande MLI pour un hacheur à 4 quadrant de l'alimentation du moteur DC.
- ★ Apprendre à concevoir une commande en tension, puis une commande en tension avec contrôle de courant (commande en cascade).

Part I

Partie théorique

2 Principe et modélisation du MCC

2.1 Principe

Un mcc est un dispositif électromécanique qui convertit une énergie électrique d'entrée en énergie mécanique.

2.2 Mise en équation du mcc

Le schéma équivalent d'un mcc est donné à la figure suivante:

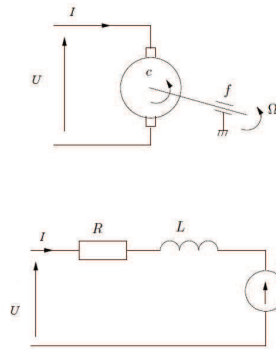


Figure 1: Schéma équivalent d'un MCC

2.2.1 Modélisation du MCC

L'équation électrique, liant la tension U aux bornes de l'induit (rotor) et le courant d'induit I s'écrit:

$$R * I + L \frac{dI}{dt} + E = U$$

où R est la résistance de l'induit du mcc, L son inductance et E la force électromotrice, qui est proportionnelle à la vitesse de rotation du rotor :

$$E = K * \Omega$$

L'équation mécanique rendant compte des couples agissant sur le rotor s'écrit :

$$T_e - T_{ch} - f_r * \Omega = J * \frac{d\Omega}{dt}$$

où T_e est le couple moteur, T_{ch} est le couple résistant (charge et perturbations), f_r le coefficient de frottement visqueux et J le moment d'inertie du rotor.

Par construction, le couple T est proportionnel au courant d'induit I :

$$T = K_m * I$$

En règle générale les coefficients K_e et K_m sont si proches qu'il est raisonnable de les considérer égaux, négligeant alors les pertes durant la conversion électromécanique de puissance.

On pose:

$$K_{em} = K_e = K_m$$

Le mcc peut être vu comme un système à contre-réaction. Pour s'en apercevoir, il faut reprendre les équations précédentes et les représenter sous forme de schéma-bloc.

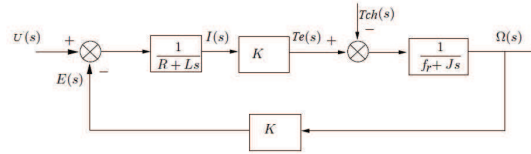


Figure 2: Schéma bloc d'un MCC

3 Commande en tension de la MCC

Si on néglige les frottements visqueux f_r et si on néglige l'influence de l'inductance d'induit, on aura un modèle de 1er ordre, avec la fonction de transfert suivante :

$$H(s) = \frac{1/R}{1 + \frac{R * J}{K^2} * s} = \frac{1/R}{1 + T_m * s}$$

si l'on définit la constante de temps électromécanique du système :

$$T_m = \frac{R * J}{K^2}$$

Le système ainsi modélisé est donc d'ordre un. Il possède un pôle stable $p = -\frac{1}{T_m}$

3.1 Les paramètres de la fonction de transfert du régulateur PI

✿ Méthode 1:

La fonction de transfert du correcteur PI étant celle d'un premier ordre:

$$C_{IW} = \frac{K_{IW}}{s} \left(\frac{K_{PW} * s}{K_{IW}} + 1 \right)$$

Avec :

$$G_I = \frac{1/K}{\frac{J * R}{K^2} * s + 1}$$

Le choix le plus simple consiste alors à compenser le pôle dominant (méthode de compensation de pôles dominants), $-\frac{K^2}{R * J}$ ce qui conduit à un système en boucle fermé d'ordre un .

Par identification:

$$\frac{K_{PW}}{K_{IW}} = \frac{K^2}{R * J}$$

Donc on a compensé le pôle.

d'où:

$$K_{IW} = \frac{K}{\tau} \text{ et } K_{PW} = \frac{R * J}{K * \tau}$$

✿ Méthode 2:

Cette méthode consiste à injecter sur l'entrée du système un échelon de commande et de relever la réponse de la sortie en fonction du temps. On compare ensuite la réponse obtenue avec une fonction de transfert normalisée.

Première comparaison possible, celle avec un premier ordre; le gain du système sera évalué par le rapport entre la variation de la sortie et l'échelon de commande .

La constante de temps est évaluée soit à partir de la tangente à l'origine, soit par le temps nécessaire pour atteindre 63% de la variation totale en sortie. Sur des échelons de δU de consigne.

Alors, on suppose que :

$$G_I = \frac{G}{t_s * s + 1}$$

d'où:

$$K_{IW} = \frac{1}{G\tau} \text{ et } K_{PW} = \frac{t_s}{G\tau}$$

4 Commande en tension avec contrôle du courant de la MCC

4.1 Les paramètres de la fonction de transfert du régulateur PI

✓ Pour la partie électrique:

on fait le raisonnement approché suivant:

La force électromotrice étant une grandeur proportionnelle à la vitesse de rotation, ses variations sont lentes devant celles du courant d'induit. On peut donc la considérer comme une perturbation dans le transfert tension-courant.

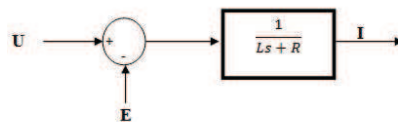


Figure 3: Schéma bloc du système électrique

On néglige la perturbation E :

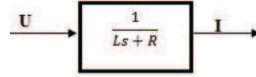


Figure 4: Schéma bloc du système électrique sans perturbation

Dans cette partie on va dimensionner les paramètres du régulateur PI en se basant sur le modèle du moteur:

L'idée est de rajouter un régulateur PI pour éliminer l'erreur de son entrée afin d'annuler l'erreur statique, augmenter le temps de réponse et éviter le dépassement.

La fonction de transfert étant celle d'un premier ordre une simple correction PI :

$$C_I = \frac{K_I}{s} \left(\frac{K_P * s}{K_I} + 1 \right)$$

avec :

$$G_I = \frac{1/R}{\frac{L}{R} * s + 1}$$

Le choix le plus simple consiste alors à compenser le pôle dominant $-\frac{R}{L}$ ce qui conduit à un système en boucle fermée d'ordre un de fonction de transfert :

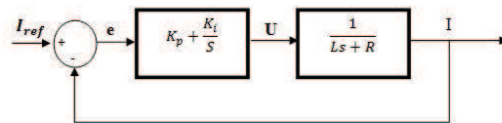


Figure 5: Schéma bloc du système électrique corrigé

Par identification:

$$\frac{K_P}{K_I} = \frac{L}{R}$$

Donc on a bien compensé le pôle dominant.

D'où:

$$H_{BF} = \frac{\frac{K_I}{R*s}}{1 + \frac{K_I}{R*s}} = \frac{1}{\frac{R}{K_I} * s + 1} = \frac{1}{\tau_i * s + 1}$$

avec: $\tau_i = \frac{R}{K_I}$

D'où:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{K_P}{K_I} = \frac{L}{R} \\ K_P = \frac{L}{\tau_i} \Leftrightarrow K_I = \frac{R}{\tau_i} \end{array} \right.$$

Maintenant il faut ajouter une limitation de courant parce que le moteur a certaine limite qu'il ne faut pas la dépasser, si non il va être grillé.

✓ Pour la partie mécanique:

On procède la même méthode que celle de la partie électrique en négligeant Tch :

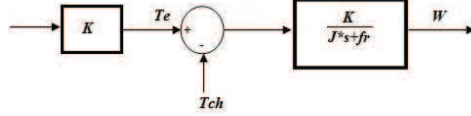


Figure 6: Schéma bloc du système mécanique

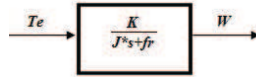


Figure 7: Schéma bloc du système mécanique sans perturbation

On néglige τ_i devant $\frac{J}{f_r}$, on obtient le schéma suivant:

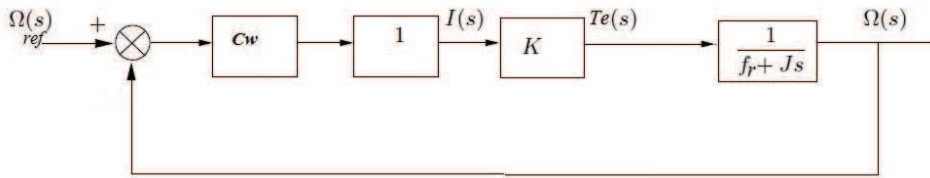


Figure 8: Schéma bloc du système mécanique corrigé

La fonction de transfert étant celle d'un premier ordre une simple correction PI :

$$C_{IW} = \frac{K_{IW}}{s} \left(\frac{K_{PW}}{K_{IW} * s} + 1 \right)$$

avec :

$$G_{IW} = \frac{1/f_r}{\frac{J}{f_r} * s + 1}$$

On compense le pôle dominant $-\frac{f_r}{J}$ ce qui conduit à un système en boucle fermée d'ordre un de fonction de transfert .

Par identification:

$$\frac{K_{PW}}{K_{IW}} = \frac{J}{f_r}$$

Donc on compense le pôle.

d'où:

$$H_{BF} = \frac{\frac{K_{IW} * K}{f_r * s}}{1 + \frac{K_{IW} * K}{f_r * s}} = \frac{1}{\frac{f_r}{K_{IW}} * s + 1} = \frac{1}{\tau_i * s + 1}$$

avec:

$$\tau_w = \frac{f_r}{K_{IW} * K}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{K_{PW}}{K_{IW}} = \frac{J}{f_r} \\ K_{PW} = \frac{J}{\tau_w * K} \end{array} \right. \Leftrightarrow K_{IW} = \frac{f_r}{\tau_w * K}$$

Part II

Simulation

5 Comportement en boucle ouverte

D'après le modèle dynamique du moteur obtenu , on peut étudier la réponse du système en boucle ouverte. Si l'on impose un échelon de tension de consigne au moteur les réponses indicielles en vitesse et en courant (couple) ont les allures décrites par la figures ci-dessous pour lequel :

Algorithm 1 Paramètres du MDC en SI

```
ftri=2000  
T=1/ftri  
Vdc=42  
Uref=10  
R=1  
L=5e-3  
K=0.076  
fr=1.1e-5  
J=2.5e-4
```

5.1 Constitution

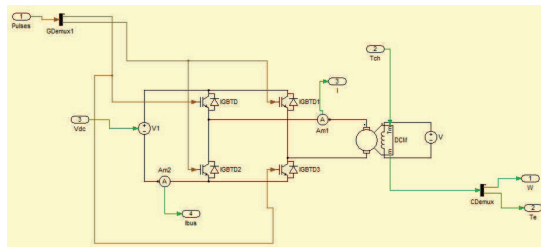


Figure 9: Circuit de puissance d'un MCC+Hacheur sous PLECS

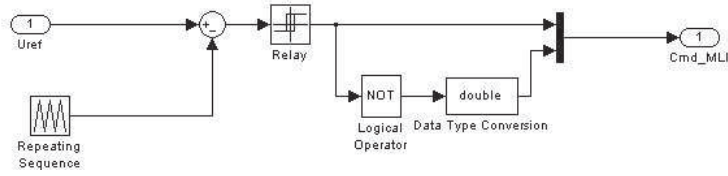


Figure 10: Bloc MLI

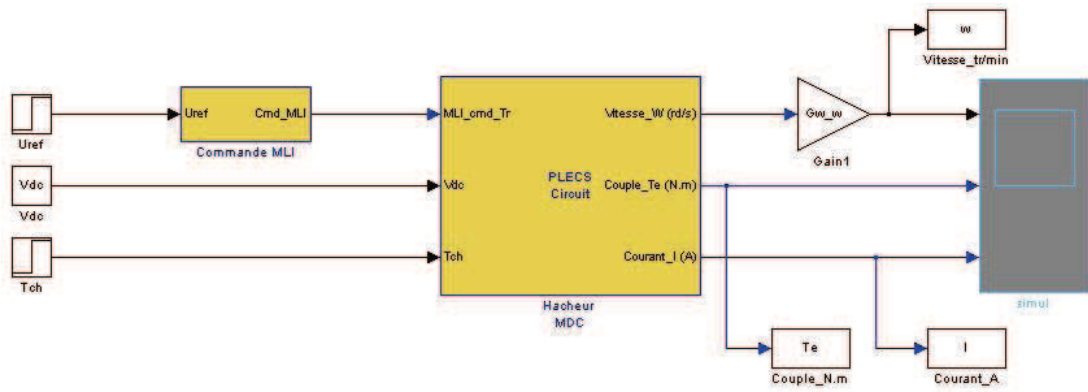


Figure 11: schéma complet en boucle ouverte sous Simulink

Au lieu de relever à chaque fois les courbes pour une valeur bien déterminé du couple résistant; on peut appliquer deux valeurs de T_L à des instants différents:

À $t = 0s \rightarrow T_L = 0$ et à $t = 0.3s \rightarrow T_L = 0.2$

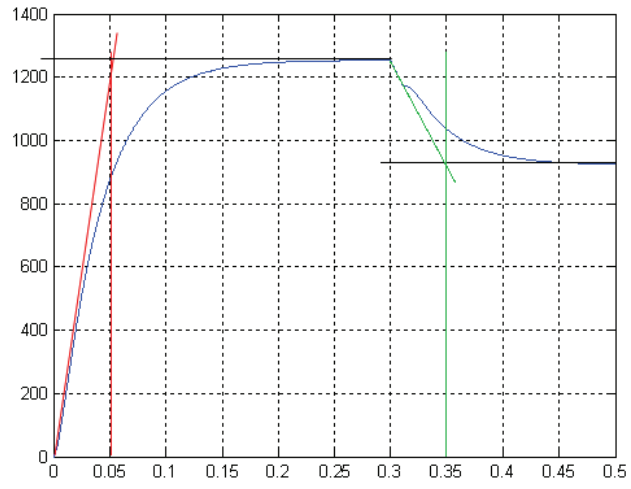


Figure 12: Courbe de la vitesse en fonction du temps

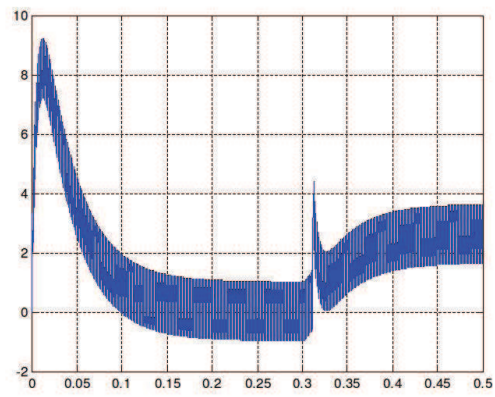


Figure 13: Courbe du courant en fonction du temps

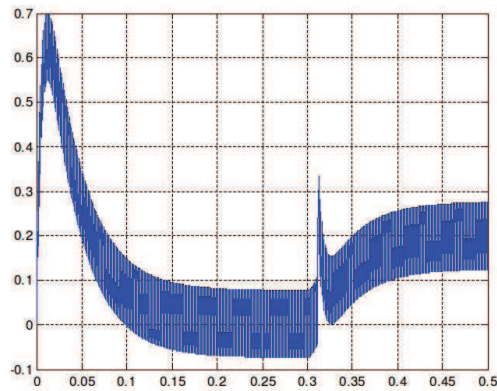


Figure 14: Courbe du couple en fonction du temps

5.2 Interprétation des résultats

D'après les résultats de la simulation on remarque que:

- la courbe de la vitesse ressemble à un système du premier ordre pour la même tension et sa valeur maximale (en régime permanent) dépend la charge;
- la vitesse est non contrôlable, cette dernière dépend du couple résistant ;
- On observe un dépassement du courant qui peut atteindre des valeurs très importantes lors des transitoires;
- L'identification du système en boucle ouverte fait apparaître un temps de réponse de l'ordre de $t_s = 0.05s$, et un gain statique de $G = 126tr * V/min$ (voir courbe de la vitesse).

Une fois réglée la boucle de courant, on réalise l'asservissement de vitesse du mcc.

6 Commande en tension du MCC

6.1 Schéma électrique:

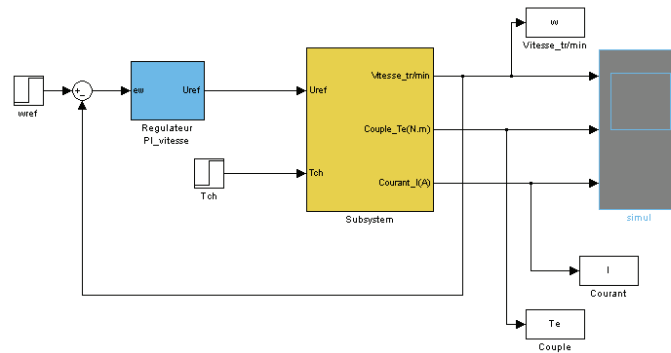


Figure 15: Schéma de simulation en BF sous Simulink

Algorithm 2 regulateur de vitesse PI

```
%identification du système  
G=126 % gain statique en B0  
ts=0.05 % constante du temps  
%paramètres du PI_vitesse  
 $\tau=0.1$  %imposée par le cahier des charges  
 $K_{IW}=1/(G*\tau)$   
 $K_{PW}=ts/(G*\tau)$ 
```

Même chose qu'auparavant ;on applique:

À $t = 0s \rightarrow T_L = 0$ et à $t = 0.7s \rightarrow T_L = 0.2$

D'où les schémas suivants:

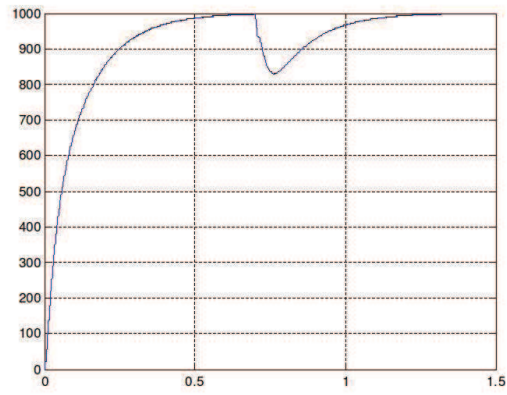


Figure 16: Courbe de la vitesse en fonction du temps

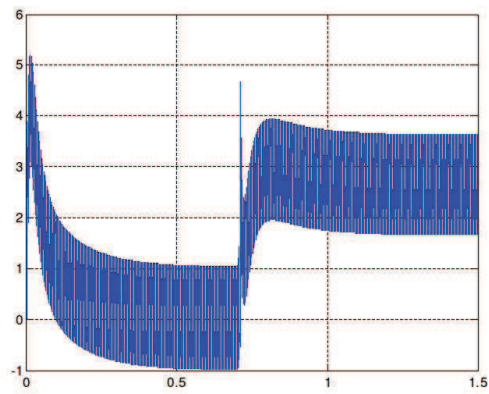


Figure 17: Courbe du courant en fonction du temps

6.2 Analyse des résultats

D'après les résultats de la simulation, on remarque que :

- ☛ la commande en tension nous permet :
- ❶ d'asservir la vitesse de rotation pour différentes valeurs de la consigne ;
- ❷ de maintenir la vitesse de rotation constante pour un couple de charge variable;
- ☛ On constate toujours la présence d'un courant de transitoire important lors du démarrage, et aussi lorsqu'on varie la consigne ou le couple résistant.

Les dépassements de courant observés précédemment constituent un gros problème, pour le convertisseur statique et le moteur. En effet les transitoires risquent de détruire les composants du Hacheurs et les conducteurs du moteur .

Pour ces raisons on ajoute une boucle de régulation de courant permettant :

- ✗ D'asservir le courant pour avoir la maîtrise des dépassements;
- ✗ De limiter le courant maximum pour protéger le moteur dans tous les cas.

7 Contrôle du courant de la MCC

7.1 Schéma électrique & simulation

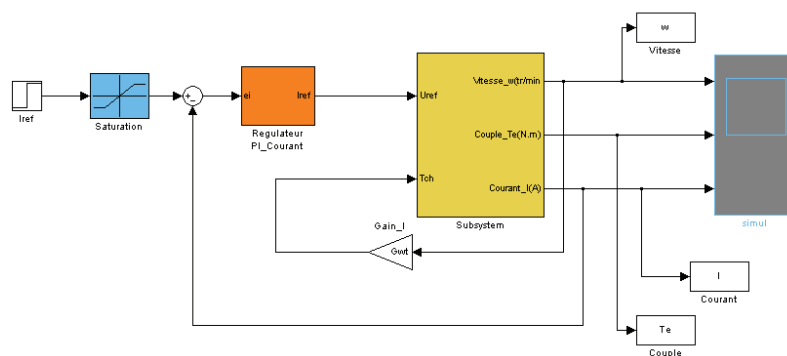


Figure 18: Schéma en BF

Pour que le moteur puisse développer un couple moteur équivalent au courant I_{ref} , on le charge par un couple résistant linéaire et proportionnel à la vitesse, cette dernière évolue jusqu'à où le couple moteur soit égal au couple de charge.

En ce point de fonctionnement, la machine absorbe un courant qu'on désire qu'il soit plus proche à la consigne et avec de meilleurs performances (temps de réponse, moins de dépassement...)

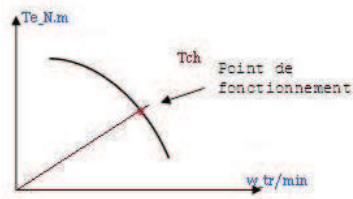


Figure 19: Point de fonctionnement

Algorithm 3 regulateur de courant PI

$I_{sat} = 5A$
 $I_{ref} = 3.5A$ %courant de référence
 %paramètres du PI_courant
 $\tau_{ei} = L/R$
 $\tau_{ei} = 0.01$
 $K_{IW} = R/\tau_{ei}$
 $K_{PW} = Ki * te$

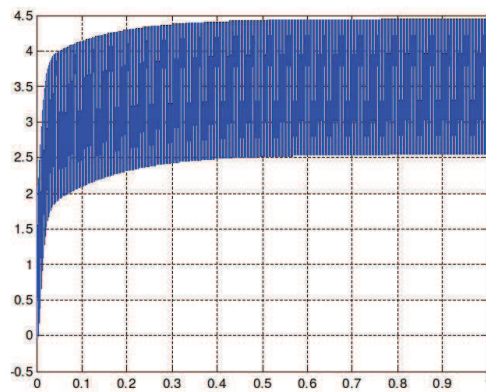


Figure 20: Courbe du courant pour le contrôle du courant

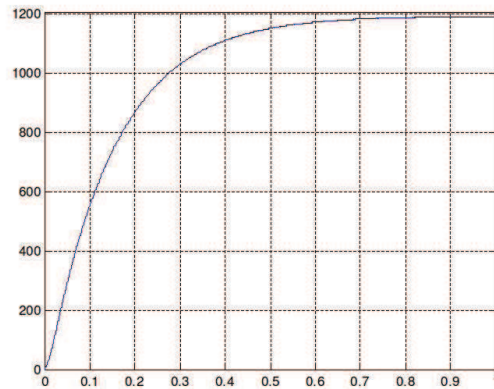


Figure 21: Courbe de vitesse pour le contrôle du courant

7.2 Analyse des résultats

D'après ces courbes on constate que :

- ❖ La boucle de régulation de courant maîtrise le dépassement du courant absorbé;
- ❖ le courant est toujours inférieure à la valeur limite de saturation. ce qui ne permet d'éviter les fortes intensités de courant destructif.

8 Commande en tension avec contrôle du courant (cas-cade)

8.1 Schéma de simulation

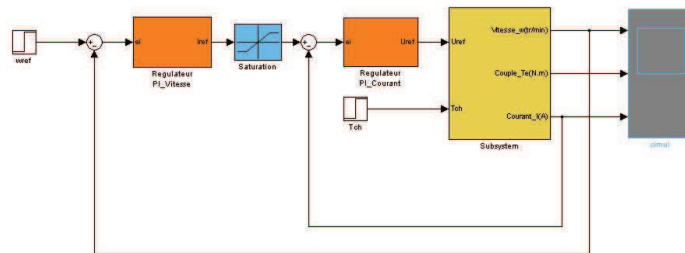


Figure 22: Schéma complet en cascade

Algorithm 4 regulateur de courant+vitesse (cascade) PI

```
 $I_{sat} = 3A$   
%à t=0 :Wref= 1000 tr/min  
%à t=0.5 :Wref= 1500 tr/min  
%à t=1 :Tch= 0.1N.m  
%identification du système  
G=126 % gain statique en B0  
ts=0.05 % constante du temps  
%paramètres du PI_vitesse  
 $\tau = 0.1$  %imposée par le cahier des charges  
 $K_{IW} = 1/(G*\tau)$   
 $K_{PW} = ts/(G*\tau)$   
%paramètres du PI_courant  
 $\tau_{ei} = L/R$   
 $\tau_{ei} = 0.01$   
 $K_{IW} = R/\tau_{ei}$   
 $K_{PW} = K_i * te$ 
```

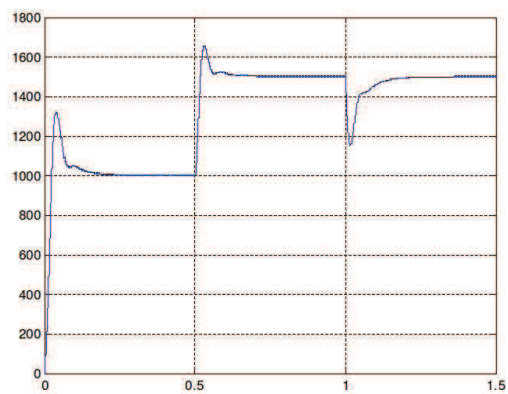


Figure 23: Courbe de la vitesse

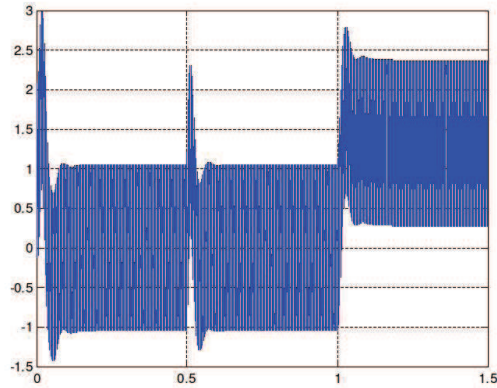


Figure 24: Courbe du courant

8.2 Analyse des résultats

A fin de tester la faisabilité de la commande mise en place, et d'apparaître les points forts et faibles de cette commande, on a procédé premièrement par la variation consigne pour un couple de charge constant ($T_{ch}=0$), puis de la variation de ce dernier avec une vitesse de référence constante.

On constate d'après les graphes ci-dessus que:

- ④ la vitesse de rotation suit les variations de la consigne pour un couple de charge constant;
- ④ la vitesse est maintenue constante pour différents couples de charge;
- ④ maîtrise du dépassement du courant d'alimentation;
- ④ limitation de forts courants lors du démarrage ou changement de fonctionnement (vitesse ou couple de charge).

On peut conclure que :

❶ Une commande en boucle fermée est nécessaire pour le contrôle de la vitesse du MDC;

❷ La commande en tension reste suffisante pour le contrôle de la vitesse des machines de faibles puissances, en revanche, pour celles de fortes puissances, elle n'est pas recommandée et nécessite un contrôle de courant, c'est la commande en cascade.

9 Conclusion Générale

Dans ce TP, on a pu:

- mieux comprendre l'indispensabilité de la régulation de vitesse et de courant et la procédure à suivre pour identifier la correction à apporter pour avoir de meilleures performances.
- se familiariser avec Plecs et le simulink de MATLAB malgré que ça nous ait pris beaucoup de temps et d'essais, ce qui nous servira sûrement dans l'avenir.