

Entrainement à Vitesse variable

TC Machine à courant continu

Cindy Iskandar (161862)

Résumé - Dans le travail qui suit, on effectue l'étude, la commande et l'analyse d'une machine à courant continu à l'aide de : MATLAB/Simulink.

I. INTRODUCTION

Le fonctionnement de beaucoup de machines : pompes, ventilateurs, engins de levage...etc. ne peut pas se faire à vitesse constante, et ceci à cause des performances requises de la machine en question. Ces machines nécessitent alors une commande afin de faire varier leur vitesse. Il est intéressant alors d'apprendre comment commander la machine à courant continu. Pour effectuer ceci, nous allons prendre la machine MCC 11-1 ($P_n = 336 \text{ kW}$; $U_n = 600 \text{ V}$; $I_n = 560 \text{ A}$) et la commander par des boucles de courant et de vitesse mises en cascade.

II. PARAMETRES

D'après le catalogue fourni par Leroy Somer^[1] la machine en question est caractérisée par une puissance d'excitation : $P_{fn} = 5.5 \text{ kW}$.

La tension de l'induit étant de 600 V , nous allons prendre la tension d'excitation : $U_{fn} = 360 \text{ V}$.

Les paramètres calculés sont les suivants :

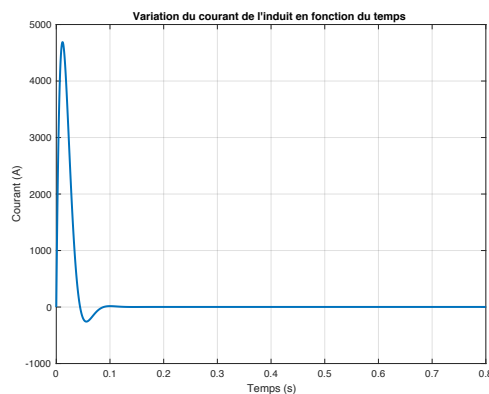
$$R_f = \frac{U_{fn}^2}{P_{fn}} = 23.56 \Omega ; I_{fn} = \sqrt{\frac{P_{fn}}{R_f}} = 15.27 \text{ A}$$

L_f est estimée comme étant : $L_f \in [100 \text{ H}; 200 \text{ H}]$

On impose alors : $L_f = 180 \text{ H}$

$$\varphi_0 = \frac{U_n - R I_n}{\Omega_n} = 6.3 \text{ Wb} ; M_{fd} = \varphi_0 / I_n = 0.41 \text{ H}$$

En simulant la MCC en boucle ouverte pour une tension nominale, on observe les résultats suivants :



On remarque qu'il y a un dépassement qui atteint les 4700 A à vide. D'où l'importance d'ajouter des correcteurs de courant et de vitesse.

III. FROTTEMENTS VISQUEUX

Afin de modéliser la machine à courant continu en boucle ouverte sur MATLAB, il est nécessaire de

$$P_u = C_n \Omega_n = \eta_n P_n = 309 \text{ kW} ; P_{jn} + P_{mn} + P_{Fen} = P_n - \eta_n P_n ; P_{Fen} = \frac{2}{3} P_{mn} ; P_{mn} = 887 \text{ kW}$$

$$\text{D'où } f = \frac{P_{mn}}{\Omega_n^2} = 0.1146 \text{ SI.}$$

IV. RESISTANCE VARIABLE

En pratique, la résistance de l'induit varie avec la température, et ceci suivant l'équation suivante :

$$R(T) = R_0 (1 + \alpha \Delta T(t)) ; \alpha = 0.00398 \text{ SI}$$

$$\Delta T(t) = \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) (T_f - T_0) ; T_f = 115^\circ \text{C}$$

$$T_0 = 40^\circ \text{C} ; R_0 = \lim_{\infty} \frac{R(T_f)}{1 + \alpha \Delta T(\infty)} = 0.0624 \Omega$$

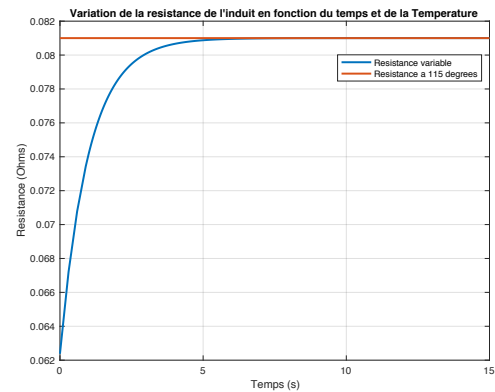


Figure 1. Variation de la résistance de l'induit avec la température

V. REGULATEURS

Pour dimensionner les régulateurs de courant et de vitesse nous avons adopté la méthode suivante : nous calculons la fonction de transfert de la boucle en question en boucle ouverte le régulateur sera de la forme : $C(p) = \frac{1}{p * H_{bo}(p)}$.

- Concernant la boucle de courant :

La fonction de transfert en boucle ouverte se calcule en prenant en compte le passage à la tension électronique sous forme d'un gain : $k_{conv} = \frac{U_n}{\varepsilon_n}$; la fonction de transfert modélisant la MCC (à vide) :

$$H_i = \frac{J * p + f}{L * J * p^2 + (R * J + f * L) * p + \varphi_0 + f * R} ; \text{ le gain du shunt non inductif servant à capter le courant de l'induit : }$$

$$k_s = \frac{1}{240} \Omega^{-1} ; \text{ le gain permettant la mise à l'échelle du courant : } k_a = \frac{\varepsilon_n}{k_s I_n}.$$

Nous pourrions prendre en compte l'effet du filtre de Butterworth (filtre passe-bas de bande passante de 30 Hz) mais ceci n'affecte pas les pôles de la fonction de transfert résultante mais les zéros donc nous pouvons l'omettre.

$$\text{D'où : } H_{boi} = k_s * k_{conv} * k_a * H_i.$$

- Concernant la boucle de vitesse :

La fonction de transfert de la boucle de vitesse se calcule en prenant compte de la fonction de transfert modélisant la MCC (à vide) : $H_{vi} = \frac{\varphi_0}{J \cdot p + f}$; le gain de la génératrice tachymétrique qui capte la vitesse angulaire du rotor : $k_{tachy} = \frac{90}{\Omega_n}$; le gain de la mise à échelle de la vitesse : $k_e = \frac{\varepsilon_n}{k_{tachy} \Omega_n}$; sachant que la boucle de courant est beaucoup plus rapide que la boucle de vitesse nous pouvons alors l'assumer comme étant un gain : $k_{courant} = \frac{I_n}{\varepsilon_n}$.
D'où : $H_{bov} = k_{tachy} * k_{courant} * k_e * H_{vi}$.

Les régulateurs étant calculés, reste à attribuer l'action proportionnelle à chacun (pour assumer la fonction PI de chacun) :

- Sachant que nous voulons accélérer le courant de 3 à 5 fois et sachant que la constante de temps électrique s'écrit : $\tau_{elec} = \frac{L}{R} = 0.0077 \text{ s}$, on a intérêt alors à avoir : $T_{ibfc} \in \left[\frac{\tau_{elec}}{3}, \frac{\tau_{elec}}{5} \right]$ et $K_{ci} = \frac{1}{T_{ibfc}}$.
- La constante de temps mécanique de la machine s'écrit : $\tau_{mec} = \frac{J}{f}$. Or, pour la machine MCC 11-1, on remarque que la constante de temps mécanique est de 60 s. Donc tenant compte de la puissance mécanique de la machine (309 kW), on impose $\tau_{mec_{mod}} / \tau_{mec_{mod}} \in [3 ; 5 \text{ s}]$. On a intérêt à avoir alors : $T_{vbfc} \in \left[\frac{\tau_{mec_{mod}}}{3}, \frac{\tau_{mec_{mod}}}{5} \right]$ et $K_{cv} = \frac{1}{T_{vbfc}}$.

VI. APPLICATION DES REGULATEURS SUR LES FONCTIONS DE TRANSFERT

En intégrant les régulateurs dans la boucle de courant et la boucle de vitesse et en modifiant les gains de chaque régulateur on obtient les résultats idéaux pour la machine à courant continu tournant à vide avec ses fonctions de transfert.

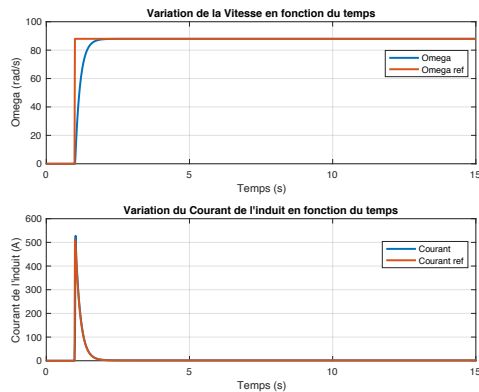


Figure 2. Allure de la vitesse et du courant pour les fonctions de transferts.

VII. APPLICATION DES REGULATEURS SUR LE MODELE DE LA MCC

Après avoir intégré les régulateurs dans la boucle de courant et la boucle de vitesse et après avoir modifié

les gains de chaque régulateur afin d'obtenir les résultats désirés on observe le comportement de la machine à vide et pour différents genres de couples : couple constant, couple proportionnel à la vitesse et couple proportionnel au carré de la vitesse.

Quand la machine fonctionne à vide, on témoigne un pic de courant qui atteint sa valeur nominale et puis diminue pour atteindre 1 A. Alors que la vitesse atteint sa valeur nominale à 1.5 s. Ceci est à cause de l'absence d'un couple résistant qui puisse s'opposer à la rotation de la machine (mis à part les frottements visqueux de la machine qui sont toujours présents).

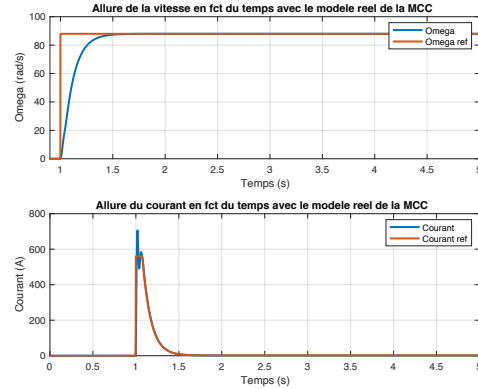


Figure 3. Variation de la vitesse et du courant en fonction du temps et pour la MCC fonctionnant à vide.

Pour un couple résistant nominal proportionnel à la vitesse on remarque que la vitesse atteint son régime permanent en 1.75 s et présente une erreur statique non nulle, ceci est à cause de l'incertitude des paramètres constructeur. Le courant présente un dépassement de 25% puis atteint sa valeur nominale qui est de 560 A ce qui est acceptable (on remarque aussi que l'erreur statique du courant es nulle).

Quand le couple résistant est proportionnel à la vitesse mais n'est pas égal au couple nominal, on remarque que le courant présente un dépassement mais réduit et se stabilise a une valeur qui est inférieure au courant nominal ce qui est logique car « le couple est l'image du courant ».

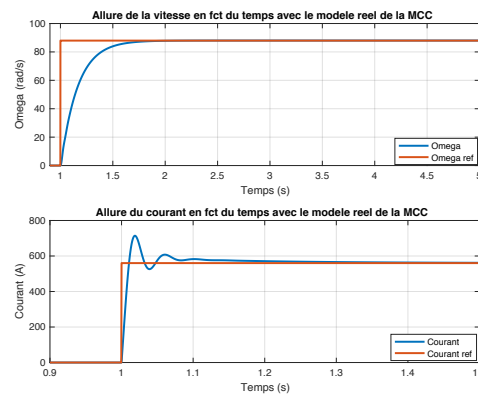


Figure 4. Variation de la vitesse et du courant en fonction du temps et pour un couple résistant nominal proportionnel à la vitesse.

Pour un couple résistant proportionnel au carré de la vitesse on remarque que la vitesse atteint sa valeur nominale plus rapidement que lorsque le couple

résistant était proportionnel à la vitesse, ceci est dû au fait que la valeur du couple résistant augmente beaucoup plus rapidement que lorsque ce dernier était proportionnel à la vitesse. Donc, en examinant l'équation mécanique de la machine : $J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r(t)$, la différence $C_{em} - C_r(t)$ s'annule plus rapidement qu'avant donc la vitesse atteint sa valeur nominale plus rapidement.

Pour le courant, on remarque que le dépassement de 25% reste présent et que le premier pic apparaît pour une durée de 20 ms. Donc les conditions restent respectées malgré le fait que l'erreur statique prend plus de temps pour s'annuler.

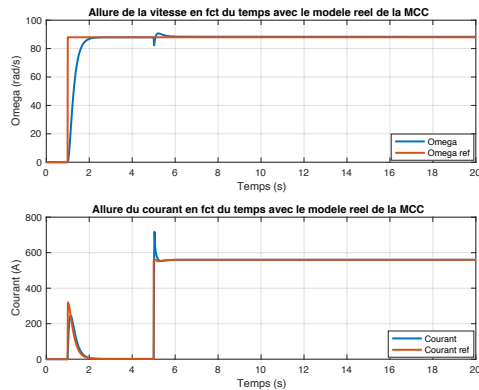


Figure 5. Variation de la vitesse et du courant en fonction du temps et pour un couple résistant proportionnel au carré de la vitesse.

Pour un couple résistant constant on remarque que le courant après 1 s présente un dépassement brutal de 1 à 520 A puis diminue et revient constant à 1 A. Ceci est dû au démarrage. Il faut fournir le courant nécessaire dans un temps assez limité à cause du gain élevé du correcteur de vitesse. Quand nous appliquons un couple résistant constant sur la machine (à $t=5s$) on remarque que le courant subit un dépassement de 25 % puis se stabilise à sa valeur nominale en une durée de 40 ms (et ceci à cause de la dynamique de la machine). Pour la vitesse, on remarque qu'elle subit qu'elle atteint sa valeur nominale en 2s. Quand nous appliquons le couple résistant on remarque que la vitesse subit une faible perturbation et puis revient à sa valeur nominale.

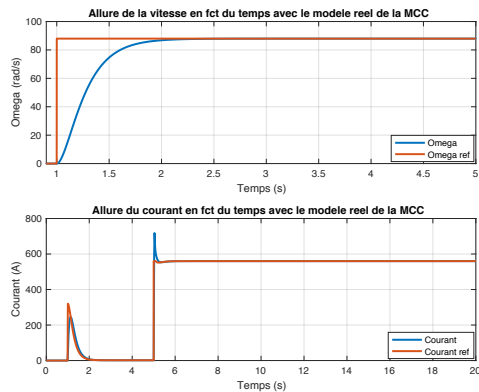


Figure 6. Variation de la vitesse et du courant en fonction du temps pour un couple résistant constant.

VIII. RESULTATS POUR UNE COMMANDE EN ESCALIER

Effectuons une commande de vitesse en escalier. Le couple résistant choisit étant nominal proportionnel à la vitesse :

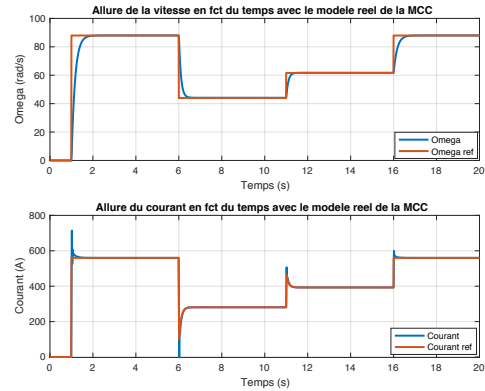


Figure 7. Variation de la vitesse et du courant pour une commande en escalier en fonction du temps.

IX. SIMPOWER

En se référant au modèle DC7 mais en remplaçant les paramètres de la machine et ceux des correcteurs nous obtenons les résultats suivants (pour une vitesse en escalier et un couple résistant proportionnel à la vitesse avec $C_{ri} = 20 * \Omega$) :

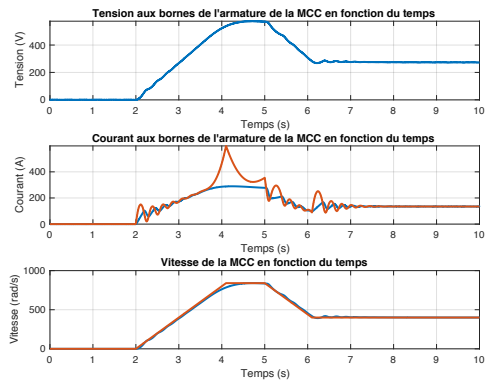


Figure 8. Tension et courant de l'induit ; Vitesse de rotation de la machine en fonction du temps.

On remarque que la vitesse suit sa référence mais atteint une valeur maximale de 86 rad/s. Le couple résistant n'étant pas nominal le courant atteint alors une valeur inférieure à sa valeur nominale mais conforme aux résultats obtenus en Simulink pour C_{ri} . Le régulateur de courant de SimPower étant conçu pour une machine de 200 HP (149 kW) donc le gain maximal $k = 149000/86^2$ est de 21 N.m.s. C'est pourquoi le système ne marche pas pour un gain $k > 20$ N.m.s donc pour le couple nominal de la machine MCC 11-1 ($k = 40$ N.m.s). Ce correcteur n'est pas remplaçable par le nôtre car il est responsable des impulsions des IGBTs.

X. CONCLUSION

Nous avons alors réussi à commander une machine à courant continu en s'aidant d'une boucle de

courant et d'une boucle de vitesse mis en cascade. Chaque boucle est munie d'un correcteur dimensionné qui annule l'erreur statique et qui accélère/décélère le système (courant et vitesse).

XI. REFERENCES

- [1] LEROY, SOMER, LSK - Moteurs à courant continu, 12th ed. France: Nidec, 2017.