

Entrainement à Vitesse variable

TC Machine Asynchrone

Cindy Iskandar (161862)

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

I. INTRODUCTION

Plusieurs applications dans le domaine industriel nécessitent le fonctionnement d'une machine asynchrone à une vitesse qui est variable. Ces machines nécessitent alors une commande afin de faire varier leur vitesse. Il est intéressant alors d'apprendre comment commander la machine asynchrone. Pour effectuer ceci, nous allons prendre la machine FLSES 280 M ($P_n = 90 \text{ kW}$; $U_n = 400 \text{ V}$; $I_n = 151 \text{ A}$) et lui appliquer la commande vectorielle.

II. PARAMETRES

D'après l'étude effectuée durant le semestre précédent, on a adopté la résistance statorique comme étant égale à $R_s = 0.9 * R_r = 0.0242 \Omega$. Les paramètres nécessaires pour effectuer la commande de la machine sont les suivants :

$$R_r = 0.0269 \Omega ; R_s = 0.02416 \Omega$$

$$L_s = L_r = 0.02162 \text{ H} ; M_{sr} = 0.02101 \text{ H}$$

$$\text{Coefficient de dispersion : } \sigma = 0.05524 \text{ SI}$$

Constantes de temps statoriques et rotoriques :

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} = 0.8055 \text{ s} ; T_s = \frac{L_s}{R_s} = 0.895 \text{ s}$$

$$\text{De plus : } P_{friction} = f \cdot \Omega^2 = \alpha P_n \quad \text{avec} \quad \alpha = 1.5\%$$

$$\text{D'où } f = \frac{\alpha P_n}{\Omega^2} = 1.4108 * 10^{-4} \text{ SI.}$$

En simulant la machine asynchrone en boucle ouverte à vide, on remarque que la vitesse atteint, après un régime transitoire de 1.3 s, sa vitesse à vide qui est égale à la vitesse de base qui est de 3000 tr/min. de plus on remarque l'allure du couple en régime transitoire.

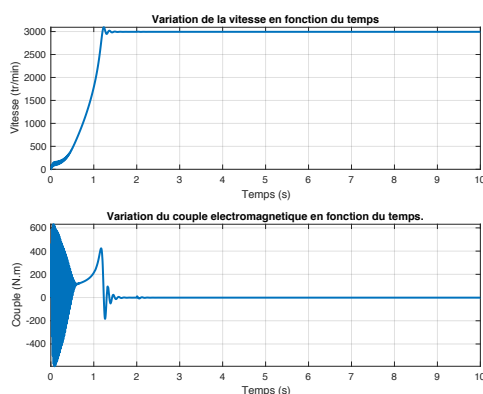


Figure 1. Variation de la vitesse et du couple électromagnétique en fonction du temps (en BO).

Pour pouvoir commander la machine il faut ajouter 3 régulateurs : régulateur du flux, du couple et de la vitesse. Ces derniers doivent être dimensionnés suivant les données de la machine.

III. REGULATEURS

Pour dimensionner les régulateurs on a adopté la méthode de compensation pôles par zéros. Le correcteur compensera alors le pôle le plus proche de l'axe des imaginaires (le plus petit en valeur absolue). Par exemple, soit $H(p)$ une fonction de transfert du second ordre, elle est de la forme :

$$H(p) = \frac{k}{(p-p_1)(p-p_2)} \quad \text{avec} \quad |p_1| < |p_2|.$$

Le correcteur sera de la forme : $C(p) = \frac{p-p_1}{k.p}$.

On aura alors la fonction intégratrice mise en jeu, reste alors la fonction proportionnelle.

Pour calculer le gain correspondant à chaque correcteur il faut étudier le cas de chaque boucle, d'abord à l'aide d'une fonction approximée qui est

de la forme $F_a(p) = \frac{k}{(p-p_1)}$ et ensuite à l'aide de la fonction de transfert réelle :

- Pour la boucle de flux, le flux doit atteindre 95% de sa valeur en un temps de l'ordre de T_r . Donc le gain proportionnel doit être égal à $k_\varphi = \frac{1}{0.3 * T_r}$.

- Pour la boucle de couple, on remarque que la constante de temps de flux en boucle fermée intervient comme paramètre dans la fonction de transfert du couple : $T_{\varphi BF} = 0.3 * T_r$.

De plus, la courbe du couple doit atteindre 95% de sa valeur en un temps de l'ordre de $\sigma * T_s$, d'où : $k_{couple} = \frac{1}{0.3 * \sigma * T_s}$.

- Pour la boucle de vitesse, on mesure l'instant du premier pic de la courbe de couple, on aura alors la constante de temps en boucle fermée du couple : $T_{couple BF} = 0.0495 \text{ s}$

La courbe de vitesse doit atteindre 95% de sa valeur en un temps de l'ordre de 0.5 s, d'où : $k_{\omega} = \frac{1}{0.3 * 0.5}$. On aura alors dimensionné les régulateurs du flux, du couple et de la vitesse chacun comme étant un PI afin d'annuler l'erreur statique et d'accélérer le système suivant les ordres désirés.

IV. APPLICATION DES REGULATEURS SUR LES FONCTIONS DE TRANSFERT

En intégrant chaque régulateur dans sa boucle correspondante et avec sa fonction de transfert correspondante, on obtient les résultats suivants :

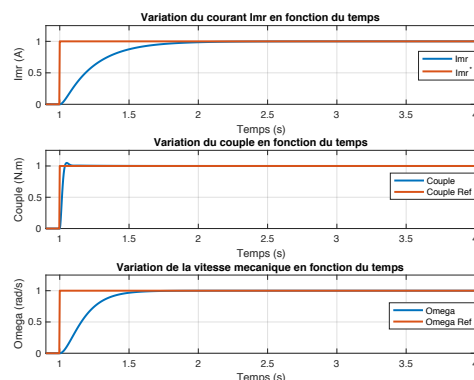


Figure 2. Variation du flux, du couple et de la vitesse en fonction du temps avec les fonctions de transfert.

IV. APPLICATION DES REGULATEURS SUR LE MODELE DE LA MCC

Après avoir intégré les régulateurs dans leurs boucles correspondantes et après avoir conçu les fonctions donnant w_{mr} et la courbe en cloche on simule le modèle de la machine avec la commande obtenue.

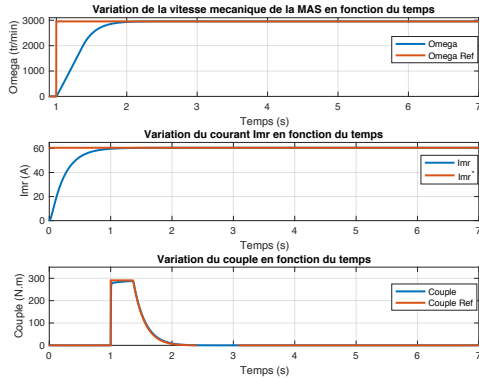


Figure 3. Variation de la vitesse, du flux et du couple en fonction du temps quand la machine est à vide.

On observe le comportement de la machine à vide. On remarque que la vitesse atteint sans dépassement son régime permanent en un temps de montée égal à 0.7 s. De même, le flux ne subit pas de dépassement et son temps de montée est respecté ($t=0.71s < T_r=0.8s$). Pour le couple, il atteint sa valeur nominale en $0.02s < (\sigma \cdot T_s=0.049s)$. Donc la machine est proprement commandée lorsqu'elle fonctionne à vide.

Pour un couple résistant constant nominal, on obtient les résultats suivants :

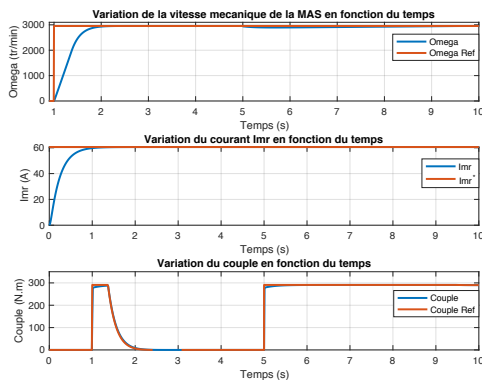


Figure 4. Variation de la vitesse, du flux et du couple en fonction du temps et pour un couple résistant constant nominal.

On observe les mêmes caractéristiques que pour la machine à vide concernant la vitesse et le flux. Pour le couple, on remarque qu'au début ($t < 5s$) il possède la même allure, ceci est à cause du fait que la machine tourne à vide car on n'a pas encore ajouté le couple constant. A $t=5s$, on remarque que le couple suit sa référence échelon en un temps de

montée similaire à précédemment. Donc le correcteur reste valide pour un couple constant.

Pour un couple résistant proportionnel à la vitesse :

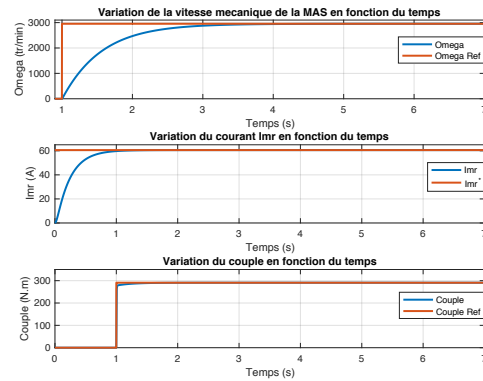


Figure 5. Variation de la vitesse, du flux et du couple en fonction du temps pour un couple résistant proportionnel à la vitesse.

On remarque que le temps de montée du flux est toujours vérifié ($t_m=0.71s$). Pour la vitesse, le temps de montée est plus long (1.6s) à cause du fait que les correcteurs sont dimensionnés suivant le coefficient de frottement uniquement et ne prennent pas en considération le coefficient k_c du couple résistant en question. Concernant le couple, on remarque que le temps de montée reste égal à 0.012 s, mais puisque ce dernier est proportionnel à la vitesse alors il atteint sa valeur nominale lorsque la vitesse atteint son régime permanent, ce qui explique alors la consigne de couple sous forme d'échelon. Pour un couple proportionnel au carré de la vitesse on obtient les mêmes allures, mais la vitesse atteint son régime permanent en 0.7s.

Pour un couple résistant inversement proportionnel à la vitesse, on observe les résultats ci-dessous :

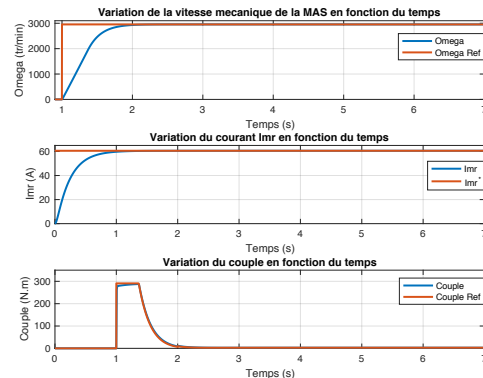


Figure 6. Variation de la vitesse, du flux et du couple en fonction du temps et pour un couple résistant inversement proportionnel à la vitesse.

On observe les mêmes résultats concernant le flux et la vitesse. Pour le couple on obtient toujours le même temps de montée mais l'allure de la consigne

est similaire à celle que lorsque la machine est à vide.

Donc on remarque que quel que soit le couple résistant appliqué à la machine, les allures du flux, de la vitesse et du couple ne changent pas et respectent toujours les temps de montée calculés.

De plus, on remarque que durant tous les essais le flux rotorique suivant l'axe q reste nul, ceci revient à confirmer le principe de la commande vectorielle qui consiste à orienter l'axe d suivant le flux, ce qui contribue à l'annulation de la composante du flux suivant q.

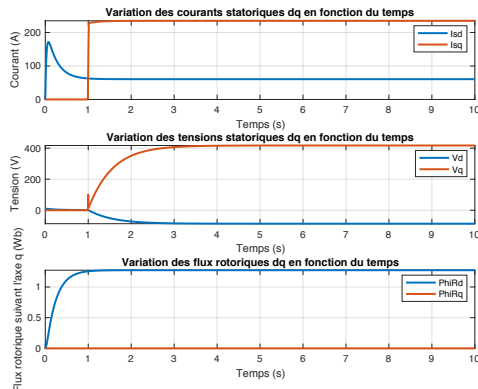


Figure 7. Variation des tensions et courants statoriques et flux rotoriques suivant les axes d et q pour un couple résistant pro. a la vitesse nominal en fonction du temps.

V. RESULTATS POUR UNE COMMANDE EN ESCALIER

Appliquons une commande de vitesse en escalier et observons les résultats correspondants. Le couple résistant choisi est quelconque et nominal.

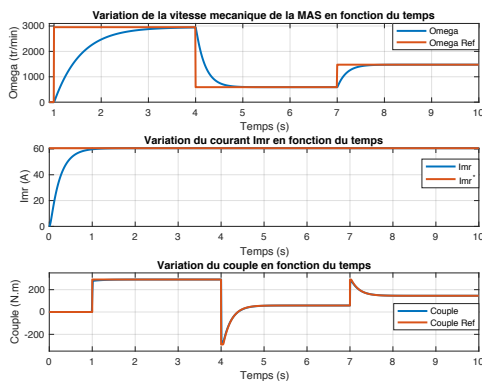


Figure 8. Variation de la vitesse et du flux en fonction du temps pour une consigne de vitesse en escaliers et pour un couple résistant quelconque.

VI. RESISTANCE ROTORIQUE VARIABLE

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

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

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

$$T_0 = 40^\circ \text{C} \quad ; \quad R_0 = \lim_{\infty} \frac{R(T_f)}{1 + \alpha \Delta T(\infty)} = 0.0204 \Omega$$

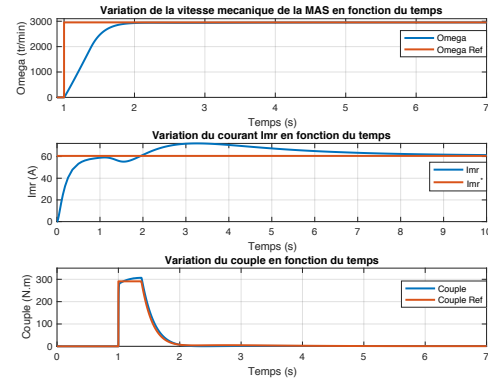


Figure 9. Variation de la vitesse, du couple et du flux (pour une résistance rotorique variable et un couple résistant nul) en fonction du temps.

On remarque qu'il y a un dépassement de flux mais ceci s'avère normal à cause du fait que T_r est prise comme étant une constante. Pour obtenir les bons résultats, on doit ajouter un observateur et un estimateur afin de déterminer T_r pour ensuite pouvoir déterminer l'angle ρ .

VII. RESULTATS APRES AJOUT DE L'ONDULEUR A L'ENTRÉE DE LA MACHINE

Afin de s'approcher de la réalité, il est nécessaire d'ajouter un onduleur triphasé modulé en MLI à l'entrée de la machine et d'observer alors les résultats. Pour effectuer ceci, un signal triangulaire de fréquence égale à 15 kHz a été créé. Ce dernier est comparé aux signaux V_a , V_b et V_c générés par la commande vectorielle, qui sont alors les signaux de référence. On obtient en sortie la commande MLI qu'il faut insérer aux interrupteurs pour obtenir le signal triphasé attendu en sortie, soient alors les signaux c_1 , c_2 et c_3 . Ces signaux varient entre 0 et 1, donc pour les faire varier entre -1 et 1 on effectue l'opération suivante sur chacun d'eux $c'_k = 2 * c_k - 1$. On modélise le convertisseur triphasé en Simulink

par une matrice $H = \frac{U_n}{3} \begin{Bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{Bmatrix}$, U_n étant

la tension composée de la machine. L'entrée de cette matrice est alors les 3 signaux c'_1 , c'_2 et c'_3 . La sortie donne alors les 3 signaux résultants qu'il faut insérer à la machine. Après introduction de l'onduleur la correction est ralentie, il faut alors, accélérer le correcteur de flux après sa stabilisation donc à $t=0.9s$ et ceci pour qu'il suive sa référence.

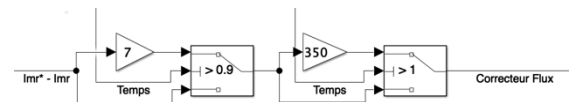


Figure 10. Figure montrant l'accélération de la boucle de flux après le passage du régime transitoire.

Il en est de même pour le couple mais on ralentie en contrepartie la vitesse.

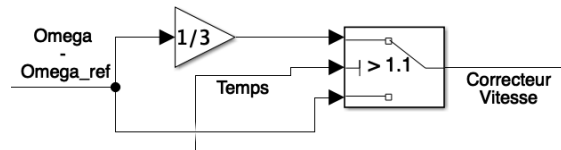


Figure 10. Figure montrant le ralentissement de la vitesse après 1.1 s.

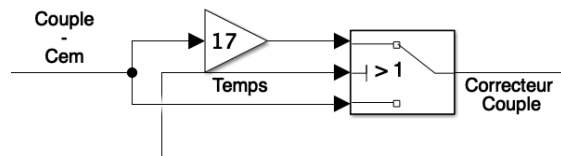


Figure 11. Figure montrant l'accélération de la boucle de couple après 1 s.

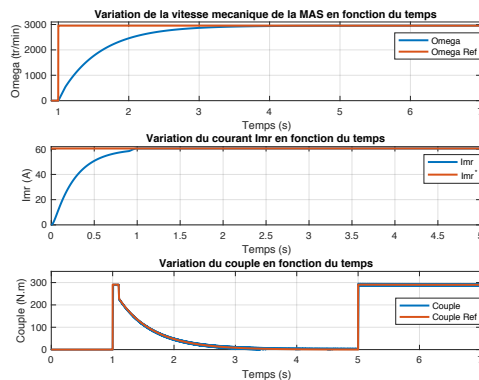


Figure 12. Variation de la vitesse, du flux et du couple en fonction du temps après ajout de l'onduleur et pour un couple constant nominal a $t=5s$.

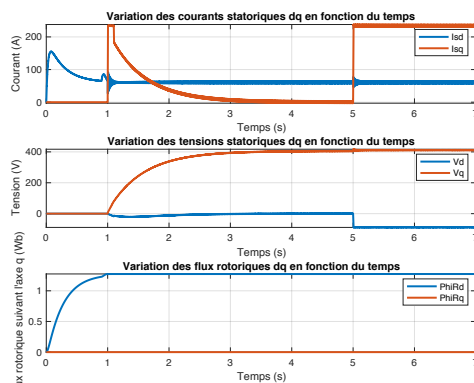


Figure 13. Variation des tensions V_{dq} , courants I_{sd} , I_{sq} et des flux ϕ_{Rd} et ϕ_{Rq} en fonction du temps.

On remarque que le flux, le couple et la vitesse suivent leurs références en respectant leurs temps de montée respectifs sauf pour la vitesse qui a été ralentie par exprès. De plus, on remarque que l'onduleur donne un signal MLI conforme au signal de référence ce qui facilite alors le filtrage du signal en question.

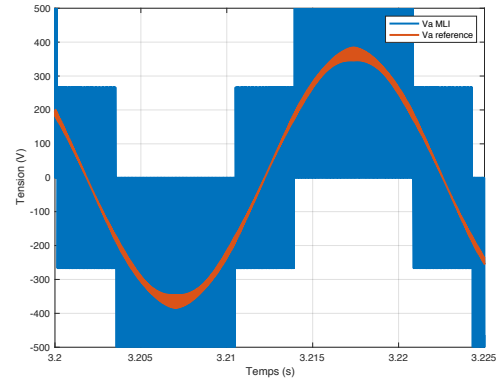


Figure 14. Tension MLI obtenue à la sortie de l'onduleur comparé au signal de référence.

Dans le cas où l'alimentation est idéale et dans le cas où on met un onduleur l'angle ρ conserve la même forme et la même amplitude pour une même consigne.

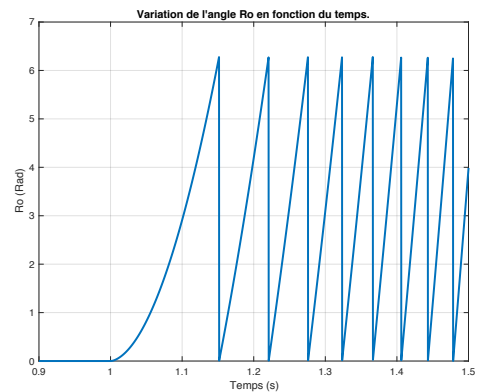


Figure 15. Variation de l'angle ρ en fonction du temps.

VIII. CONCLUSION

Donc, afin de commander une machine asynchrone, il est nécessaire d'effectuer une commande vectorielle. Cette méthode consiste à orienter indirectement le flux rotorique suivant l'axe d pour découpler vitesse et couple afin de rendre la machine asynchrone semblable à la machine a courant continue. Pour effectuer ceci, il faut d'abord connaître les données de la machine et calculer ses paramètres, pour ensuite dimensionner les correcteurs de flux, de couple et de vitesse. Et enfin ajouter un onduleur triphasé pour refléter la réalité.

IX. REFERENCES

- [1] "Simulation de la MLI sinusoïdale/triangle d'un onduleur triphasé". Tahar EL BAHRI