

Commande et Estimation des Paramètres du Moteur Synchrone à Aimants Permanents Entraînant une Charge à Inertie Variable.

Bouchahed.A¹, Belhamra.A², Larba.M³

^{1,2,3}Laboratoire des Systèmes Electromécaniques Université Badjet Mokhtar - Annaba
bouchahed_1980@yahoo.fr , belhamraali@yahoo.fr

Résumé : Le présent papier traite de la commande vectorielle du moteur synchrone à aimants permanents à pôles saillants associé à une charge mécanique variable (multi-masses). Le MSAP est alimenté par un onduleur de tension à trois niveaux commandé par la technique MLI. Pour améliorer les performances de la commande vectorielle du MSAP. On utilise un observateur d'ordre complet, (Luenberger). Ce qui nous permet une estimation de la vitesse, position et du couple résistant.

Les résultats de la simulation des différents paramètres montrent l'efficacité de l'observateur et la robustesse de la commande utilisée pour une gamme de vitesses, et une variation du couple résistant.

Mots clés : Moteur Synchrone à aimants permanents, observateur d'ordre complet (Luenberger), onduleur de tension à trois niveaux, commande vectorielle.

I. Introduction

Pour les entraînements à vitesse variable, les moteurs synchrones à aimants permanents remplacent les moteurs à courant continu et les moteurs à inductions dans certaines applications industrielles. Ils ont l'avantage d'un rendement, un facteur de puissance et couple massique élevés [1 – 2].

La commande vectorielle (par flux orienté), assure un bon fonctionnement du MSAP en haute performance dynamique et statique [3 - 4], comparables à celles des machines à courant continu [5]. Elle permet aussi de commander et contrôler séparément les courants et le couple.

Dans ce travail nous avons utilisé un observateur d'état d'ordre complet qu'il permet une

Estimation des paramètres de la charge entraînée par le MSAP, il a fait une amélioration des performances dynamiques et statiques (temps de réponse, erreur statique, dépassement).

Les résultats de la simulation montrent la robustesse de la commande vectorielle pour différents tests appliqués au MSAP et sa charge mécanique.

II. Modélisation du MSAP

On prend le modèle du moteur synchrone à aimants permanents, exprimé dans le référentiel lié au rotor comme suit :

Les tensions du moteur données par :

$$\left\{ \begin{array}{l} u_d = R_s \cdot i_d + L_d \cdot \frac{di_d}{dt} - p \cdot \omega_r \cdot L_q \cdot i_q \\ u_q = R_s \cdot i_q + L_q \cdot \frac{di_q}{dt} + p \cdot \omega_r \cdot L_d \cdot i_d + p \cdot \omega_r \cdot \phi_f \\ \phi_d = L_d \cdot i_d + \phi_f \\ \phi_q = L_q \cdot i_q \\ C_{em} = p \cdot [(L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q + \phi_f \cdot i_q] \end{array} \right. \quad (1)$$

III. Modélisation de la charge mécanique

La modélisation de la charge mécanique est donnée par le système proposé suivant :

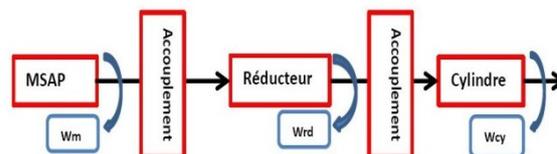


Fig.1. système électromécanique

$$\begin{cases}
 J_m \frac{d(\omega_m)}{dt} = -f_m \omega_m - C_T + C_{em} \\
 J_{rd} \frac{d(\omega_{rd})}{dt} = -f_{rd} \omega_{rd} + C_T \\
 J_{cy} \frac{d(\omega_{cy})}{dt} = -f_{cy} \omega_{cy} + C_T - C_r \\
 C_T = K_i (\omega_m - \omega_{rd}) \\
 C_r = K_i (\omega_{rd} - \omega_{cy})
 \end{cases} \quad (2)$$

R_s : Résistance d'une phase statorique

L_q : L'inductance de l'axe q

L_d : L'inductance de l'axe d

ϕ_f : Le flux délivré par les aimants

J_m : Inertie du moteur

f_m : Coefficient de frottement Visqueux (Moteur)

J_{rd} : Inertie réducteur

f_{rd} : Coefficient de frottement Visqueux (réducteur)

J_{cy} : Inertie cylindre

f_{cy} : Coefficient de frottement Visqueux (cylindre)

C_{em} : Couple électromagnétique

C_T : Couple transmis à l'arbre du moteur

C_r : Couple résistant

K_i : Rapport de transmission

ω_m : Vitesse de rotation (Moteur)

ω_{rd} : Vitesse de rotation (réducteur)

ω_{cy} : Vitesse de rotation (cylindre)

p : Nombre de paire de pole

IV. Stratégies de la commande vectorielle

Le système présenté par la figure (2) régit le fonctionnement du MSAP et sa charge

mécanique. La commande vectorielle est la solution la plus utilisée pour contrôler et commander séparément les variables du MSAP et sa charge à entrainer, cette technique de commande donne une meilleure dynamique sur le couple, et fait une commande semblable à celle des machines à courant continu, en posant le courant $i_{d^*} = 0$, et permet de régler les vitesses et les positions du système (figure (2)) par la composante i_q . Le schéma ci-dessous représente la structure complète de la commande vectorielle du MSAP entrainant une charge à inertie variable (multi-masses).

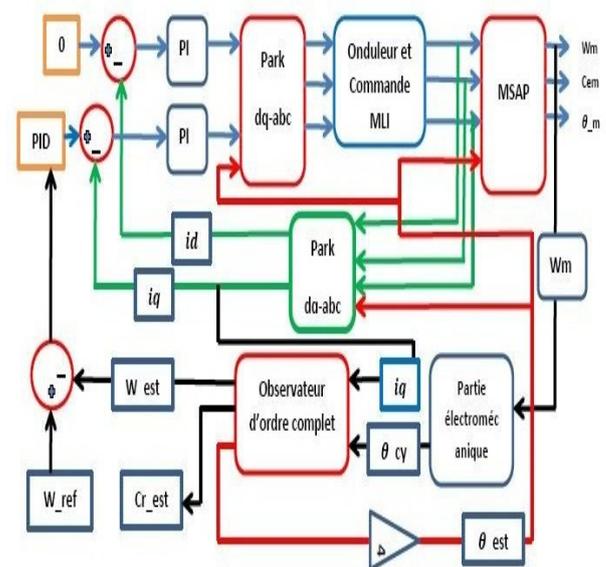


Fig.2. schéma fonctionnel de la structure de commande

Régulation et contrôle des courants

L'asservissement et la régulation des courants statoriques ont été faits par des régulateurs PI qu'ils sont représentés par la fonction de transfert suivante:

$$R(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (3)$$

Boucle de régulation de la vitesse par PID

La boucle de régulation en vitesse est représentée par la figure (3).

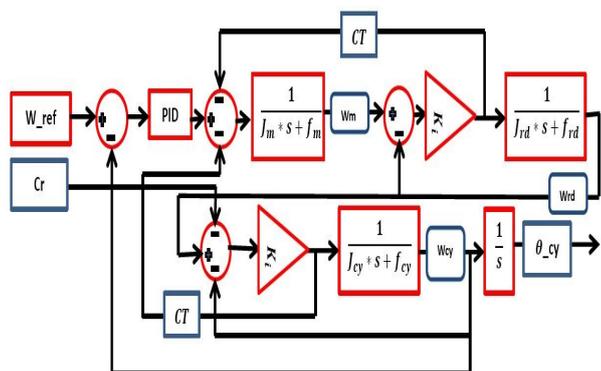


Fig.3. Boucle de régulation de la vitesse par PID

La fonction de transfert du régulateur PID est donnée par :

$$K_{pw} + \frac{1}{K_{iw} * s} + K_{dw} \tag{4}$$

Les paramètres du régulateur sont déterminés comme suit :

$$K_{iw} = 4 * \frac{(J_m + J_{rd} + f_{cy})}{T^2}$$

Avec :

$$T = \frac{L_q}{R_s}$$

$$K_{pw} = K_{iw} * T$$

$$w_v = \sqrt{\frac{K_{iw}}{(J_m + J_{rd} + f_{cy})}}$$

$$K_{dw} = K_{iw} - \frac{(J_m + J_{rd} + f_{cy}) * w_v}{w_v}$$

V. Conception de l'observateur d'ordre complet

Pour estimer les variables d'état du moteur synchrone à aimants permanents entraînant une charge à inertie variable, on utilise un observateur d'état d'ordre complet, qui fait une estimation de $(\omega_{cy}, \theta_{cy}, C_r)$.

La conception de l'observateur d'état est basée sur les mesures des positions (moteur, cylindre), et les courants statorique [6]. La figure(4) représente l'observateur d'ordre complet (Luenberger).

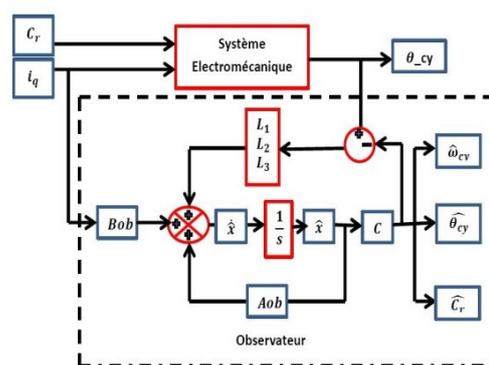


Fig.4. modèle de l'observateur associé au système

Pour former un système d'équations de l'observateur d'ordre complet, on a besoin à des conditions préalables. On suppose que :

Les postions du système électromécanique sont égales $(\theta_m \theta_{rd} \theta_{cy})$;

Le rapport de transmission $K_i = 1$ (c'est -à-dire on prend le réducteur comme une masse pleine) ;

On prend le coefficient de rigidité $K_t = 0$, (c'est -à-dire qu'il n'y a aucune torsion entre les arbres de transmissions).

Le système d'équations de l'observateur est comme suit :

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \tag{5}$$

Avec : $u = i_q$ et θ_{cy} , $K_m = p \cdot \phi_f$

$$\begin{cases} J_m \cdot \frac{d(\omega_m)}{dt} = J_{rd} \cdot \frac{d(\omega_{rd})}{dt} = J_{cy} \cdot \frac{d(\omega_{cy})}{dt} ; \\ \frac{d(\theta_m)}{dt} = \frac{d(\theta_{rd})}{dt} = \frac{d(\theta_{cy})}{dt} ; \\ J_{eq} = (J_m + J_{rd} + J_{cy}) ; \\ (J_{eq}) \frac{d(\omega_{cy})}{dt} = +f_m \cdot \omega_m^{\wedge} + K_i (\omega_m^{\wedge} - \omega_{rd}^{\wedge}) - C_{em} + f_{rd} \cdot \omega_{rd}^{\wedge} - K_i (\omega_{rd}^{\wedge} - \omega_{cy}^{\wedge}) - f_{cy} \cdot \omega_{cy}^{\wedge} + K_i (\omega_{rd}^{\wedge} - \omega_{cy}^{\wedge}) - \widehat{C}_r ; \\ \frac{d(\theta_m^{\wedge})}{dt} = \frac{d(\theta_{rd}^{\wedge})}{dt} = \frac{d(\theta_{cy}^{\wedge})}{dt} = \omega_m^{\wedge} = \omega_{rd}^{\wedge} = \omega_{cy}^{\wedge} ; \\ \frac{d(\widehat{C}_r)}{dt} = \omega_{cy}^{\wedge} - \omega_{cy}^{\wedge} ; \end{cases} \tag{6}$$

$$\begin{cases} (J_{eq}) \frac{d(\omega_{cy})}{dt} = +f_m \cdot \omega_m^{\wedge} + K_i (\omega_m^{\wedge} - \omega_{rd}^{\wedge}) - C_{em} + f_{rd} \cdot \omega_{rd}^{\wedge} - K_i (\omega_{rd}^{\wedge} - \omega_{cy}^{\wedge}) - f_{cy} \cdot \omega_{cy}^{\wedge} + K_i (\omega_{rd}^{\wedge} - \omega_{cy}^{\wedge}) - \widehat{C}_r ; \\ \frac{d(\theta_m^{\wedge})}{dt} = \frac{d(\theta_{rd}^{\wedge})}{dt} = \frac{d(\theta_{cy}^{\wedge})}{dt} = \omega_m^{\wedge} = \omega_{rd}^{\wedge} = \omega_{cy}^{\wedge} ; \\ \frac{d(\widehat{C}_r)}{dt} = \omega_{cy}^{\wedge} - \omega_{cy}^{\wedge} ; \end{cases} \tag{7}$$

$$\dot{\hat{x}} = \begin{bmatrix} \hat{\omega}_{cy} \\ \hat{C}_r \end{bmatrix};$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -(\hat{f}_m + \hat{f}_{rd} + \hat{f}_{cy}) / (J_m + J_{rd} + J_{cy}) & -1 / (J_m + J_{rd} + J_{cy}) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ K_m \\ 0 \end{bmatrix}; \quad C = [1 \ 0 \ 0];$$

$$\dot{\hat{x}} = A \times \begin{bmatrix} \hat{\omega}_{cy} \\ \hat{C}_r \end{bmatrix} + B \times i_q + |L_2| \times (y(t) - \hat{y}(t)); \quad (8)$$

$$\text{Où } y(t) = \theta_{cy} \text{ et } \hat{y}(t) = [1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} \hat{\theta}_m \\ \hat{C}_r \end{bmatrix};$$

$$\dot{\hat{x}} = A \times \begin{bmatrix} \hat{\omega}_{cy} \\ \hat{C}_r \end{bmatrix} + B \times i_q + |L_2| \times \theta_{cy}; \quad (9)$$

Les coefficients de la matrice de gains ($L = L_1, L_2, L_3$) assurent la dynamique et la convergence de l'observateur et du système [6-7-8]. Ces derniers sont déterminés à partir d'un polynôme caractéristique de A (observateur). En conservant la condition sur la matrice $A - LC$.

VI Résultats de la simulation

Après l'établissement des différentes lois de commande vectorielle, nous avons évalué les performances d'estimation par l'observateur d'ordre complet. Nous soumettons notre système de simulation à divers tests (à vide, en charge et inversion du sens de rotation). La figure (5) montre le démarrage du MSAP entraînant une charge à inertie variable pour un échelon de consigne de 60rad/s, nous avons observé la vitesse de cylindre et la vitesse estimée suivant leur référence appliquée. Notons que la vitesse estimée est en rouge et la vitesse de cylindre est en bleu, l'erreur d'estimation de la vitesse et de position sont très faibles.

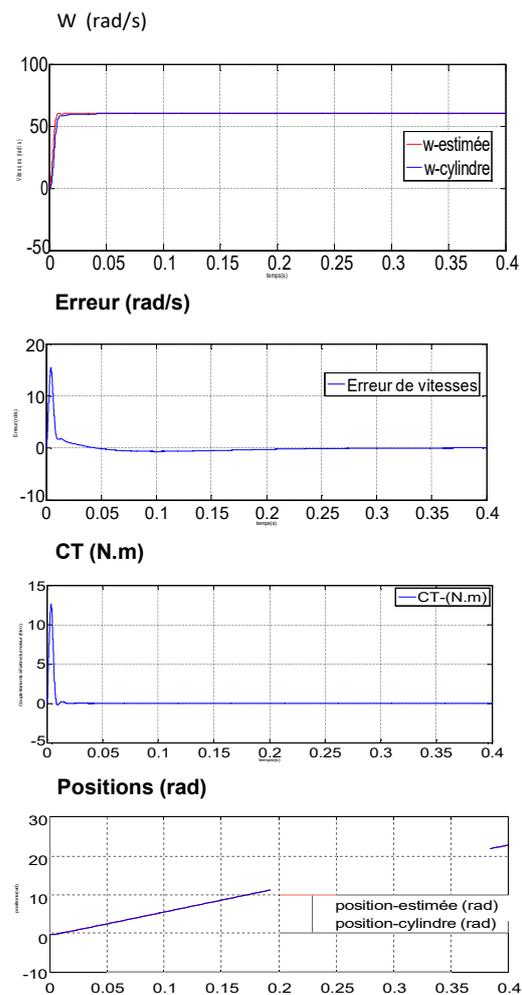
La figure (6) montre le démarrage à vide de $t = [0 \text{ à } 0.2\text{s}]$, suivi par l'introduction du couple de charge égal 1.5N.m à $t = [0 \text{ à } 0.2\text{s}]$. On a observé que le système répond à cette charge appliquée pour différentes caractéristiques (CT, ω_{cy}). Nous avons remarqué que le temps

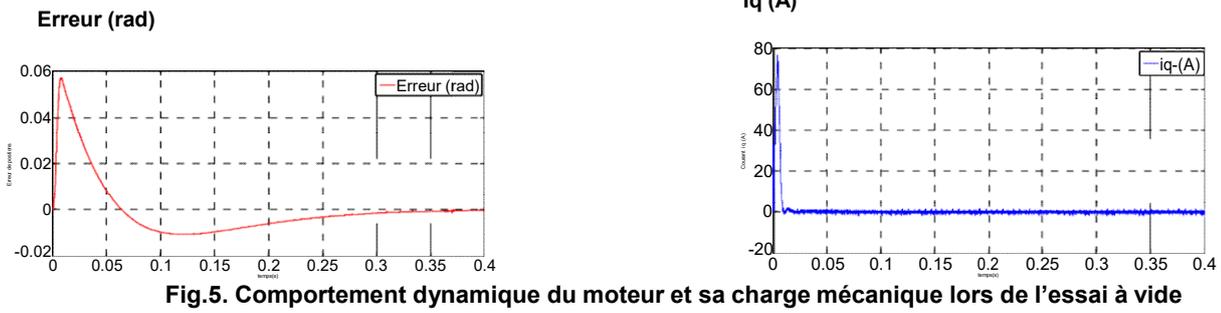
de réponse de la vitesse estimée est mieux que celui de cylindre. Pour l'allure du couple transmis à l'arbre du MSAP l'erreur statique est nulle, et à 0.2s ce couple répond au couple résistant appliqué.

Pour tester la robustesse de la commande vectorielle (figure (7)), en inversant le sens de rotation du MSAP pour un temps $t = [0 \text{ à } 0.2\text{s}]$ la vitesse de consigne $w = 60\text{rad/s}$ et à $t = [0.2 \text{ à } 0.4\text{s}]$ on inverse le sens de rotation à $w = -60\text{rad/s}$ avec $Cr = 1.5\text{N.m}$, on remarque que les résultats des différentes courbes répondent à la consigne appliquée.

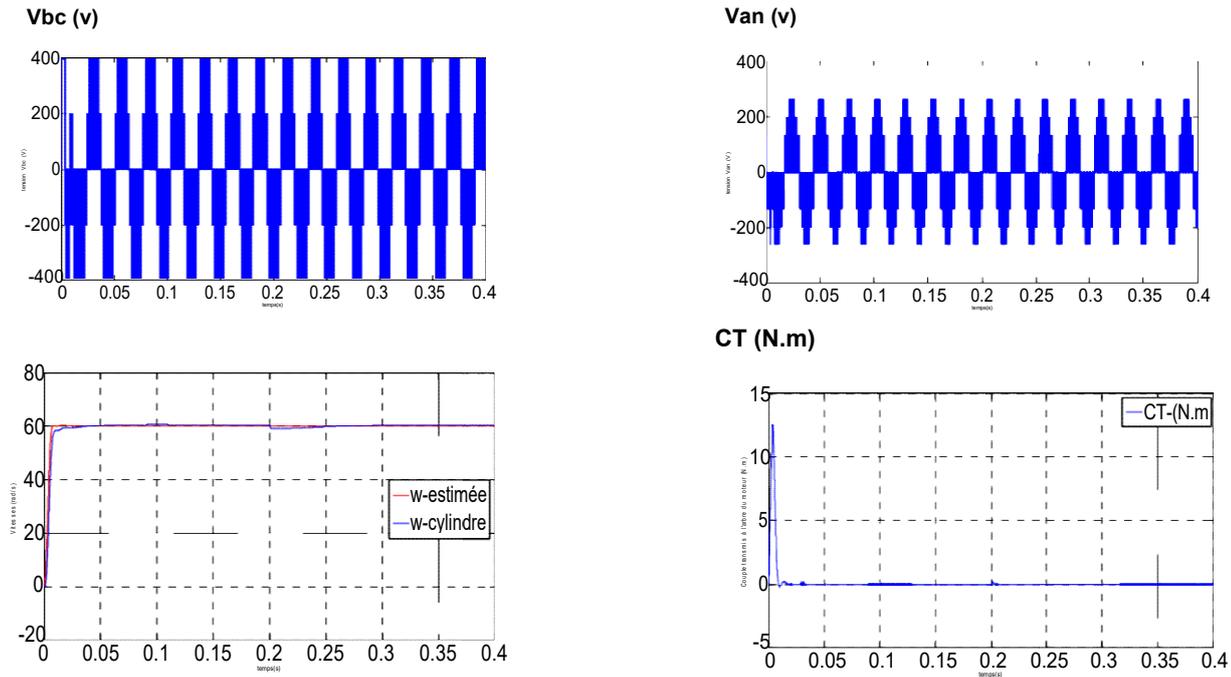
Les résultats de la simulation de la figure(5), (figure (6)) et (7) montrent la robustesse de la commande étudiée, en utilisant un observateur d'état d'ordre complet qui donne une erreur d'estimation pour la vitesse et la position très petite (figure (5)).

VI. a Essai à vide :

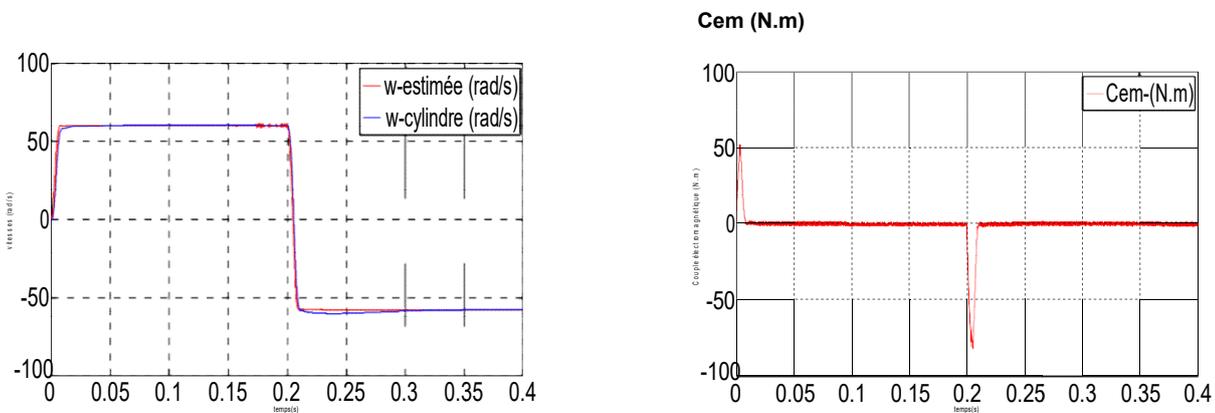




VI. b Essai en charge



VI. c Essai lors de l'inversion du sens de rotation

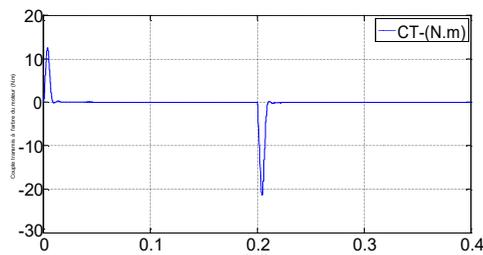


2ème conférence Internationale des énergies renouvelables CIER-2014

International Journal of Scientific Research & Engineering Technology (IJSET)

Vol.3-pp.105-110, Copyright - IPCO 2015

CT (N.m)



Positions (rad)

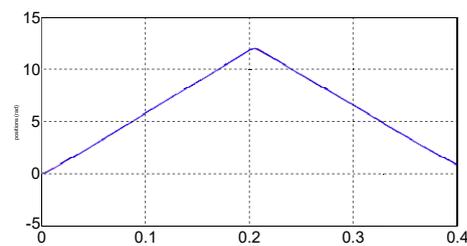


Fig.7. Comportement dynamique du moteur et sa charge mécanique lors de l'inversion du sens de rotation et application de la charge.

VII. Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté la commande vectorielle du moteur synchrone à aimant permanent entraînant une charge mécanique à inertie variable. Et pour estimer la vitesse de rotation mécanique, la position et le couple résistant, nous avons utilisé un observateur d'ordre complet (Luenberger). Les résultats obtenus par la simulation montrent l'efficacité de l'observateur qui a l'avantage d'éliminer les oscillations et les bruits de mesures issus à l'encodeur, et aussi d'améliorer la dynamique de la vitesse. Les régulateurs utilisés dans cette commande sont les contrôleurs PI et PID, pour donner une gamme de réglage des vitesses (basses vitesses, grandes vitesses).

Paramètres du MSAP

$$L_d = 0.006mH; L_q = 0.007mH; R_s = 1.3\Omega;$$

$$\phi_f = 0.17wb; p = 4; J_m = 0.0018kgm^2;$$

$$f_m = 0.004Nm.s.rd^{-1}; J_{rd} = \frac{J_m}{2} kgm^2;$$

$$J_{cy} = \frac{J_m}{2} kgm^2; f_{rd} = \frac{f_m}{2} Nm.s.rd^{-1};$$

$$f_{cy} = \frac{f_m}{2} Nm.s.rd^{-1}; K_i = 1; K_t = 0$$

References

[1] Murat Karabacak a,*, H. Ibrahim Eskikurt b " Speed and current regulation of a permanent magnet synchronous Motor via nonlinear and adaptive backstepping control" **2011 Elsevier**.

[2] Guy STRTZER Eddie SMIGIEL " modélisation et commande des moteurs triphasés, commande vectorielle des moteurs synchrones, commande par contrôleurs DSP" ellipses 2000.

[3] Lv Baofeng, Zhang Guoxiang " Simulation and Research of Control-System for PMSM Based on Sliding Mode Control" 2012 International Conference on Medical Physics and Biomedical Engineering" **2012 Elsevier**

[4] Dejun Liu Changjin che Zhenxiong Zhou " Permanent Magnet Synchronous Motor Control System Based on Auto Disturbances Rejection Controller" 2011 international Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer August 19-22, 2011, Jilin, China " 978-1-61284-722-1/11/&26.00 c2011 IEEE.

[5] Zhao Kaiqi " The Study Improves PI Method for PMSM Vector Control System Based On SVPWM" 978-1-4244-9500-9/11/&26.00 c 2011IEEE

[6] Marcus Alexandre Towar F. de Sousa" Contribution à la conception de lois de commande à caractère robuste pour une machine synchrone entraînant une charge élastique à inertie variable" DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE 2007.

[7] Sebba, A.Chaker, Y.Meslem, S.Hassaine " Commande en Vitesse du Moteur Synchrone à Aimants Permanents Dotée d'un Observateur de LUNBERGER" 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP 2007.

[8] Eric OSTERTAG Professeur à L'Université Louis Pasteur Strasbourg " Commande et estimation multivariable, Méthodes Linéaires et optimisation quadratique " ellipses 2006.