

# Commande Adaptative par Modèle de Référence Appliquée à la Machine Synchrone à Aimants Permanents Dotée d'un Observateur d'Etat

W. Hachefi<sup>1</sup>, Y.MENASRIA<sup>2</sup>, D. Rahem<sup>1</sup> and A. Djouambi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Electrical Engineering and Automatic Laboratory, Oum El Bouaghi University

<sup>2</sup> Department of Electrical Engineering, Annaba University,

[wahidhachefi@gmail.com](mailto:wahidhachefi@gmail.com)

[rahem\\_djamel@yahoo.fr](mailto:rahem_djamel@yahoo.fr)

**Résumé** – L'objectif de cet article est de présenter une stratégie de commande pour la régulation de la vitesse d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP). Le control vectoriel permet un découplage entre les variables de la commande, et donne de hautes performances dynamiques pour une large gamme d'application. Cependant, pour pallier aux variations des paramètres du système et aux perturbations externes, des techniques modernes telles que le contrôle adaptatif ont été appliquées. La commande adaptative par modèle de référence dotée d'un observateur d'état permet de forcer le système commandé à suivre le modèle de référence désiré en utilisant des lois d'adaptation, pour l'ajustement automatique en temps réel des régulateurs des boucles de commande.

Les résultats de simulation montrent les hautes performances et la robustesse de cette commande plus particulièrement pour l'amélioration des performances de l'ensemble convertisseur-machine par rapport à la commande vectorielle. L'intérêt de la commande adaptative apparaît essentiellement au niveau des perturbations paramétriques.

**Mots Clés** – FOC, MSAP, Commande Adaptative, Modélisation, Perturbation.

## I. INTRODUCTION

L'intérêt de la commande des machines électriques est motivé par le fait que ces dernières constituent l'actionneur peu coûteux et peu encombrant pour la plupart des entraînements industriels. Dans l'industrie, il semblerait que le marché des variateurs de vitesse connaisse un grand essor et que le souhait des concepteurs soit axé vers l'obtention de meilleures performances de l'ensemble convertisseur-machine. Les machines à aimants permanents ont été conçues depuis longtemps, mais c'est seulement au cours de ces dernières décennies, après la mise de nouveau matériaux pour la confection des aimants permanents possédant une grande énergie magnétique spécifique qu'elles commencent à avoir un large emploi grâce aux avantages présentés à savoir : rapport élevé du couple/courant, rendement et facteur de puissance élevés, faible bruit et robustesse[1].

Vue que certains problèmes qui persiste lors du fonctionnement des moteurs à aimants permanents et qui n'arrive pas les méthodes analytiques basé sur les équation du champ (utilisées pour le dimensionnement et l'optimisation du

moteur) a les ressoudent complètement comme par exemple : les oscillations du couple, les bruits acoustiques, control de la position du rotor avec ou sans capteur, control des pertes,...Et aussi certaines applications industrielles des moteurs à aimants permanents à des vitesses très grandes demande un bon rapport couple/inertie et un rendement élevé. Pour ces raisons, on a recours à l'emploi des lois de commande qui nous permettent de trouver des solutions à ces problèmes ou au moins de minimiser le maximum leurs effets.

Nous présentons dans cet article deux types de stratégies de commande, le contrôle vectoriel qui est toujours d'actualité et la commande adaptative développés pour la commande d'une machine synchrone à aimants permanents alimentée par un onduleur de tension MLI.

## II. MODELISATION DE LA MSAP

La mise en forme d'un modèle mathématique basée sur des équations différentielles pour un moteur MSAP facilite largement son étude en vue de sa commande dans les différents régimes de fonctionnement.

Le modèle d'une machine synchrone à aimants permanents dans le référentiel (abc) peut être exprimé par les équations suivantes [2,3] :

$$\begin{cases} V_a = R_s i_a + L_a \frac{d}{dt} i_a + e_a \\ V_b = R_s i_b + L_b \frac{d}{dt} i_b + e_b \\ V_c = R_s i_c + L_c \frac{d}{dt} i_c + e_c \\ C_{em} = \frac{Pm}{\Omega} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} e_a = \Phi_f P \cos(P\theta + \frac{\pi}{2}) \\ e_b = \Phi_f P \cos(P\theta - \frac{\pi}{6}) \end{cases} \quad (2)$$

Les tensions générées par l'onduleur peuvent être écrites comme suit [3]:

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{pmatrix} U_{dc} \quad (3)$$

Où  $U_{dc}$  est la tension continue d'alimentation de l'onduleur générée par une source de tension continue. A noter que les commandes ( $S_a$ ,  $S_b$  et  $S_c$ ) des interrupteurs sont établies suite à une comparaison des signaux de commande de l'onduleur avec le signal de la modulatrice ou la porteuse [1].

Le système d'équations (1) peut être écrit dans le référentiel de park (d-q) selon:

$$\begin{cases} V_d = R i_d - L \Omega i_q + L \frac{di_d}{dt} \\ V_q = R i_q + L \Omega i_d + L \frac{di_q}{dt} + P\Phi \\ C_{em} = P(\Phi_f i_{q+} (L_d - L_q) i_d i_q) \end{cases} \quad (4)$$

L'équation mécanique est définie par la relation :

$$C_{em} = J \frac{d\Omega}{dt} + f \Omega + C_r \quad (5)$$

avec :  $J$  l'inertie des parties tournantes,  $f$  le frottement visqueux,  $\Omega$  la vitesse mécanique du rotor,  $C_r$  le couple de charge et  $C_{em}$  le couple électromagnétique.

### III. STRATEGIES DE COMMANDE DU MSAP

#### A. Commande Vectorielle.

La technique de la commande vectorielle est utilisée pour établir un modèle linéaire et transformer la machine à aimants permanents en une structure équivalente à la machine à courant continu à excitation séparée.

La stratégie la plus souvent utilisée consiste à maintenir le courant  $i_d$  à une valeur nulle et réguler la vitesse et/ou la position par le courant  $i_q$  via la tension  $V_q$ . Lorsque le courant  $i_d$  est nul, le modèle simplifié de la MSAP est donné par les équations suivantes [2,3] :

$$\begin{cases} V_d = -L_q P i_q \\ V_q = R i_q + L \frac{di_q}{dt} + P\Phi \\ C_{em} = P(\Phi_f i_q) \\ J \frac{d\Omega}{dt} + f \Omega = C_{em} - C_r \end{cases} \quad (6)$$

Compte tenu de la dynamique de la partie électrique qui est principalement du premier ordre, nous pouvons utiliser des correcteurs classiques du type proportionnel intégral pour générer les signaux de commande vers les bras de l'onduleur

de tension. La structure de la boucle de courant selon l'axe (q) avec un correcteur P.I. est représentée par le schéma de la figure qui suit :

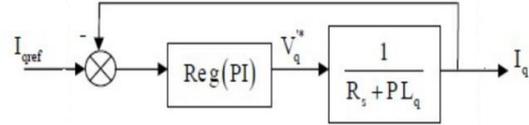


Fig. 1 Commande du courant par un régulateur PI.

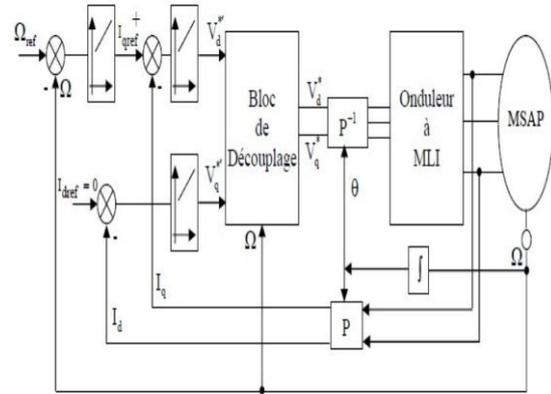


Fig. 2 Structure d'une commande vectorielle d'une MSAP

#### B. Commande adaptative avec modèle de référence

La commande adaptative est une commande par retour d'état, elle est représentée par deux boucles [5,6]:

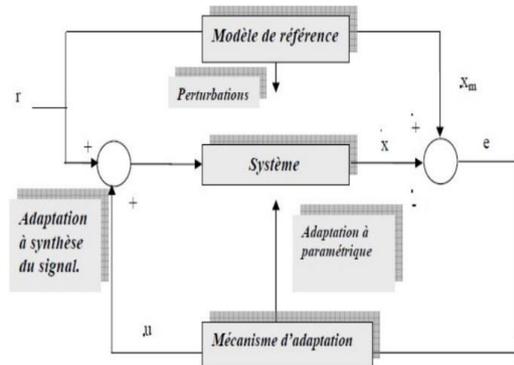


Fig. 3 Structure d'une commande adaptative avec modèle de référence

La boucle à contre réaction (boucle classique) comporte le procédé et le régulateur à paramètres ajustables.

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ u = k_1 y_c - k_2 x_m \end{cases} \quad (7)$$

Le modèle dynamique linéaire de la machine synchrone à aimants permanents obtenu après orientation du champ est donné dans la représentation d'état par [5]:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_q \\ \dot{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{Lq} & -\frac{p\Phi_f}{Lq} \\ \frac{\Phi_f}{J} & -\frac{fr}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{Lq} \\ 0 \end{bmatrix} v_q \quad (8)$$

Le modèle de référence est représenté par les équations suivantes:

$$\dot{x}_m = A_m x_m + B_m y_c \quad (9)$$

L'erreur entre  $x$  et  $x_m$  s'écrit par:

$$\begin{cases} \dot{e} \\ e \end{cases} = \begin{bmatrix} A & -A_m \\ B & -B_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (10)$$

L'objectif de cette commande est d'avoir une matrice  $A_m$  de valeurs propres stables :

$$e(t) = e^{A_m t} \cdot e(0) \quad (11)$$

Pour satisfaire cette condition, cette commande nécessite que :

$$\begin{cases} A - B \cdot K_2 = A_m \\ B \cdot K_1 = B_m \end{cases} \quad (12)$$

D'après Lyapounov, si l'énergie d'un système est décroissante, alors le système tend vers le repos et on peut écrire :

$$A_m^T \cdot P + P \cdot A_m = -Q \quad (13)$$

#### IV. RESULTATS DU SIMULATION

Les dimensions du moteur MSAP sont présentées par le tableau suivant :

TABLE I  
DIMENSION DU MSAP

PARAMETRES	VALEURS
Puissance nominale	1,1 KW
Moment d'inertie	J=0,0034
Nombre de paire de pôles	P=2
Resistance Statorique	Rs=0,84
Inductance longitudinale	Ld=0.014H
Inductance quadratique	Lq=0.014H
Flux rémanent	$\Phi_f = 0.15$

Les figures 4, 5 et 6 présentent les variations de la vitesse et du couple électromagnétique dans le cas de l'application d'un couple de charge à l'instant t=0.3s. On remarque la présence des oscillations surtout dans la courbe du couple.

Les figures 7, 8 et 9 présentent les variations de la vitesse et du couple électromagnétique dans le cas de l'application d'une perturbation à l'instant t=0.5s. On remarque la présence des

fortes oscillations surtout dans la courbe de la vitesse.

Les figures 10 et 11 présentent les variations de la vitesse et du couple électromagnétique pour une commande adaptative du MSAP et dans le cas de l'application d'une perturbation à l'instant t=0.5s. On remarque une diminution des oscillations surtout dans la courbe de la vitesse.

Les figures 12 et 13 présentent les variations de la vitesse et du couple électromagnétique pour une commande adaptative du MSAP et dans le cas de l'application d'une charge à l'instant t=0.2s. On remarque des pics de vitesse et couple, la vitesse se stabilise à une valeur de 58rad/s après un temps de 0.1s.

Les figures 14, 15 et 16 présentent les variations de la vitesse et du couple électromagnétique pour une commande adaptative du MSAP et dans le cas de l'application d'une perturbation et en mêmes temps une charge à l'instant t=0.2s. On remarque une diminution des oscillations surtout dans la courbe de la vitesse.

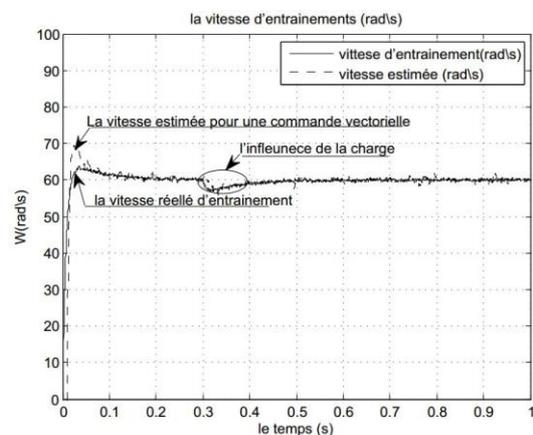


Fig. 4 Variation de la vitesse en charge pour Cr=1

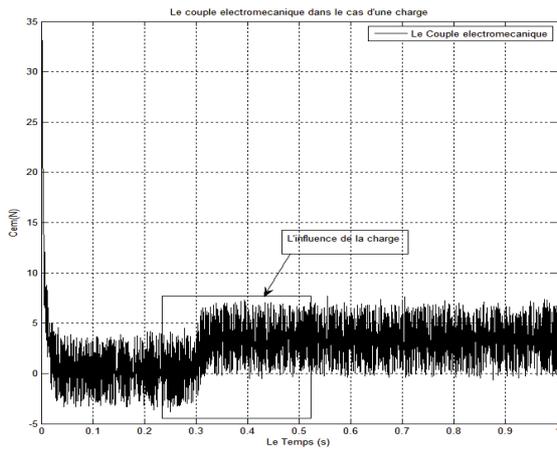


Fig. 5 Variation du couple électromécanique

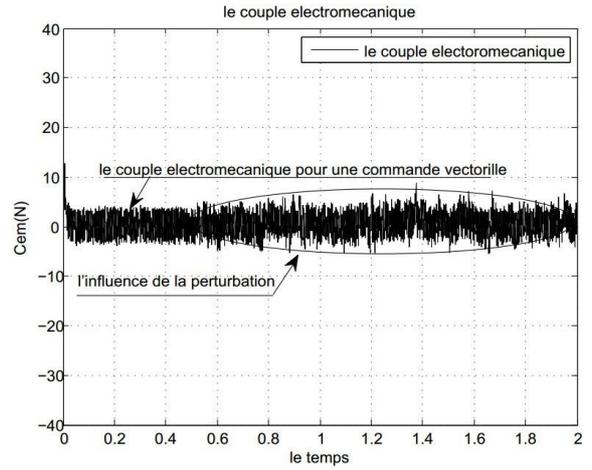


Fig. 8 Variation du couple électromécanique dans le cas de la présence d'une perturbation

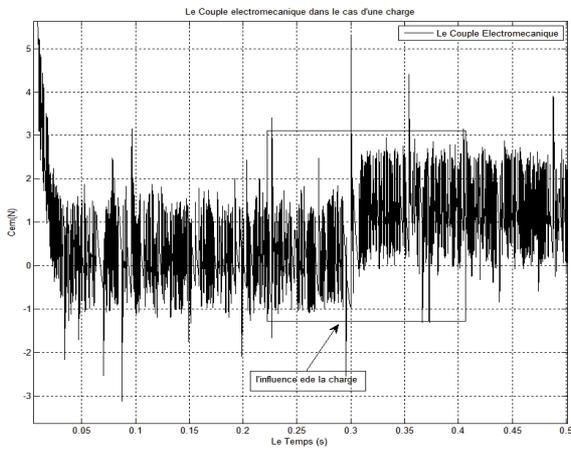


Fig. 6 Variation du couple électromécanique (zoom)

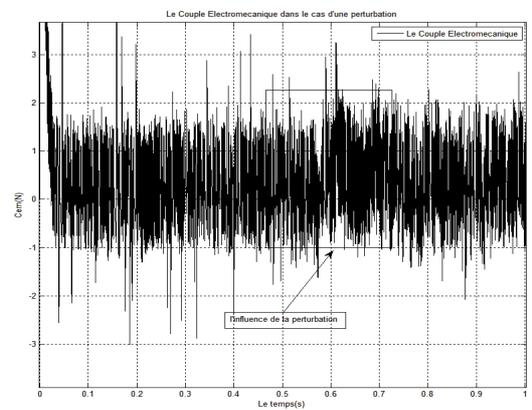


Fig. 9 Variation du couple électromécanique dans le cas de la présence d'une perturbation (zoom)

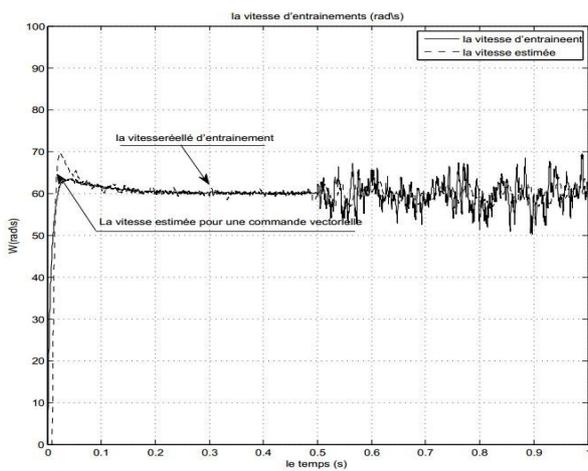


Fig. 7 Variation de la vitesse dans le cas de la présence d'une perturbation

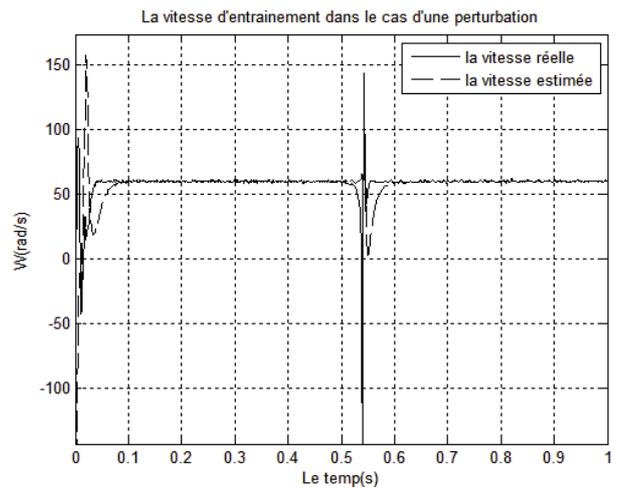


Fig. 10 Variation de la vitesse dans le cas de la présence d'une perturbation pour une commande adaptative

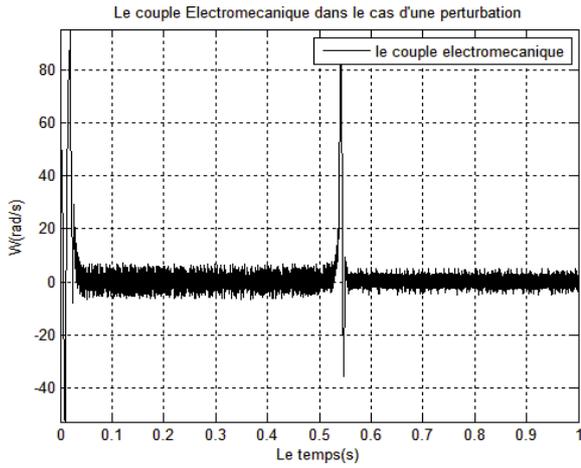


Fig. 11 Variation du couple dans le cas de la présence d'une perturbation pour une commande adaptative

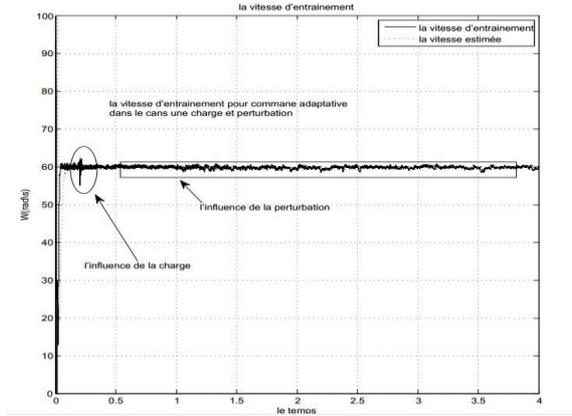


Fig. 14 Variation de la vitesse dans le cas de la présence d'une perturbation et une charge pour une commande adaptative

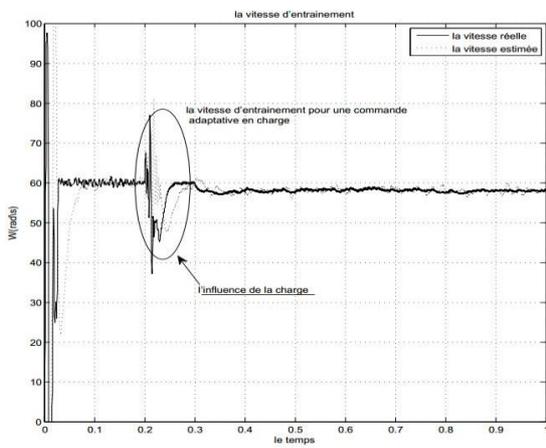


Fig. 12 Variation de la vitesse dans le cas de la présence d'une charge pour une commande adaptative

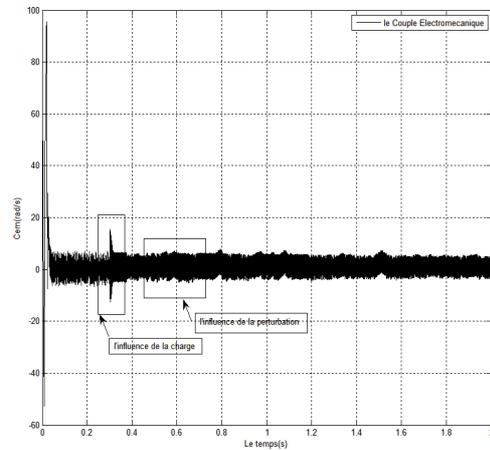


Fig. 15 Couple électromécanique dans le cas d'une charge et une perturbation

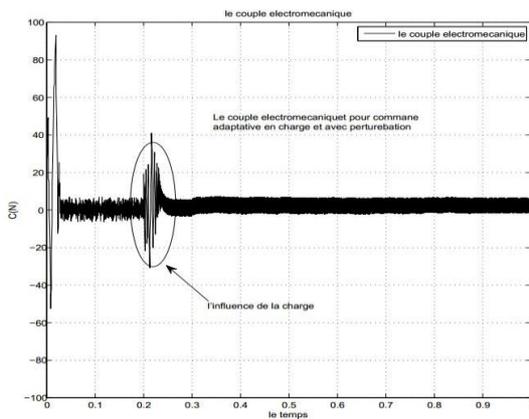


Fig. 13 Variation du couple dans le cas de la présence d'une charge pour une commande adaptative

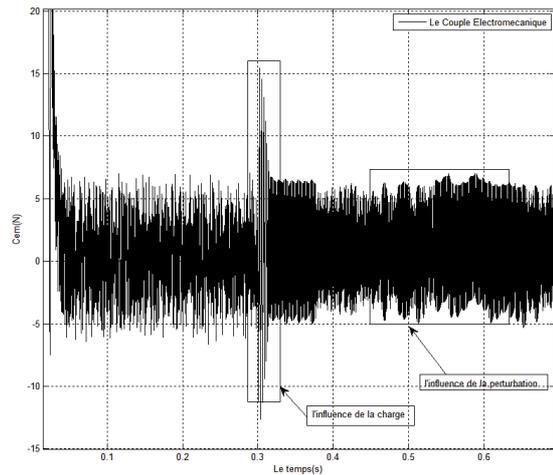


Fig. 16 Couple électromécanique dans le cas d'une charge et perturbation (zoom)

## V. CONCLUSION

Les résultats de simulation obtenus montrent que la commande vectorielle donne des résultats satisfaisants du point de vue découplage de la machine et permet d'avoir un réglage rapide du couple. Mais elle présente des fortes oscillations lors de la présence des perturbations.

Par contre, dans le cas de la commande adaptative, on constate que le régulateur présente une bonne robustesse vis-à-vis de la présence des perturbations

L'algorithme d'adaptation constitue une bonne alternative de commande des MSAP présentant des variations paramétriques.

## REFERENCES

- [1] Ching-Tsai Pan and Jenn-Horng Liaw "A Robust Field-Weakening Control Strategy for Surface- Permanent-Magnet Motor Drives" IEEE Transaction on Energy Conversion, VOL. 20, NO. 4, DECEMBER 2005.
- [2] B. Royns, F. Labrique, et H. Buyse, Mounted 2005 "Commande numérique de moteurs synchrones à aimants permanents de faible puissance", J.Phys. III France 5, 1995, 1255-1268.
- [3] Z. Song, Z. H. C. Jiang et X. Wei " Sensorless control of surface permanent magnet synchronous motor using a new method" Energy conversion and Management 47 2006. ELSEVEIR.
- [4] B. N. MOBARAKEH « Commande vectorielle sans capteur mécanique des machines à aimants permanents ; Méthodes Convergence, Robustesse, Identification en ligne des paramètres » Thèse de Doctorat de L'I.N.P.L, France, 2001.
- [5] Azeddine KADDOURI « Etude d'une commande non-linéaire adaptative d'une machine synchrone à aimants permanents » Thèse de doctorat, Université de Laval, Canada, 2000.
- [6] Djemai M. Rezine R. Boucherit MS. Et Benmansour K. « Analyse géométrique de la commande robuste en position de la machine synchrone à aimants permanents » Conférence Internationale Francophone d'Automatique, CIFA, France, 2006.
- [7] S. J. Wang, C. H. Fang and S. K. Lin "A flux estimation method for a permanent magnet synchronous motor" Journal of Magnetism and Magnetic Materials ELSEVEIR 2004.