

LA COMMANDE ADAPTATIVE PAR MODÈLE DE RÉFÉRENCE DE LA MACHINE SYNCHRONE

ABDEL GHANI AISSAOUI¹, MOHAMED ABID¹, HAMZA ABID², AHMED TAHOUR²

Mots clé : Machine synchrone, Commande adaptative, Commande vectorielle, Contrôle de la vitesse.

Cet article présente une application de la commande adaptative par modèle de référence pour le réglage de la vitesse de la machine synchrone. Cette stratégie de control permet de forcer le système commandé de suivre le modèle de référence désiré. Différents régimes transitoires ont été simulés pour apprécier l'utilisation de la logique floue pour la commande adaptative de la vitesse de la machine synchrone : démarrage et inversion de sens de rotation, à vide et en charge. Les résultats de simulation montrent les hautes performances et la robustesse de cette commande.

1. INTRODUCTION

Les moteurs synchrones sont largement utilisés dans les applications industrielles à cause de leur caractéristiques : hautes performances, faible inertie, un grand facteur de puissance, etc.

Les nouvelles applications industrielles nécessitent des variateurs de position/vitesse ayant de hautes performances dynamiques, une bonne précision en régime permanent, une haute capacité de surcharge et une robustesse aux différentes perturbations. Ces dernières années plusieurs techniques ont été développées pour permettre au variateur synchrone d'atteindre ces performances. Le control vectoriel permet un découplage entre les variables de la commande, et donne de hautes performances dynamiques pour une large gamme d'application. Pour pallier aux variations des paramètres du système et aux perturbations externes, des techniques modernes d'automatique telle que le contrôle robuste, contrôle adaptatif et le contrôle à structure variable ont été appliquées. Dans cet article, on propose d'utiliser un contrôle adaptatif en se basant sur des inférences floues.

¹Laboratoire IRECOM, Université Sidi Bel Abbes Faculté d'ingénieur, Département d'électrotechnique Sidi Bel Abbes 22000, Algerie, IRECOM aissaoui@yahoo.fr

²Laboratoire AML, Université Sidi Bel Abbes Faculté d'ingénieur, Département d'électronique Sidi Bel Abbes 22000, Algerie

La commande de la machine synchrone (MS) doit prendre en compte les spécificités propres à cette machine : l'ordre élevé du modèle, les non-linéarités du fonctionnement et de modélisation ainsi que le couplage entre les différentes grandeurs de commande. De plus, les paramètres de la machine dépendent généralement du point de fonctionnement et varient soit avec la température (résistance), soit avec l'état magnétique de la machine (inductance), sans compter que la charge peut être variable. Ces variations paramétriques affectent les performances du système de commande lorsqu'on utilise un régulateur ou une loi de commande à paramètres fixes. Ainsi, le recours à des algorithmes de commande robuste est souhaitable aussi bien en stabilisation qu'en poursuite de trajectoire [1, 2, 3]. Le régulateur par logique floue adaptatif (RLFA), qui par sa nature est non-linéaire, possède cette robustesse [2, 4].

Dans notre travail, les performances du réglage par commande adaptative de la machine synchrone autopilotée (MSA) alimentée en tension avec orientation direct du flux sont analysées par simulation numérique. Nous commençons par la présentation du modèle de la machine synchrone dans le repère de Park en vue de la commande vectorielle et on donne un bref aperçu sur l'onduleur de tension. Après, on développe un algorithme de commande adaptative en se basant sur des inférences floues. Le contrôle de la vitesse est effectué avec un régulateur par logique floue adaptative (RLFA). Enfin, nous simulons le fonctionnement en temps réel de l'ensemble Onduleur-MS-Commande. Les résultats obtenus avec l'algorithme proposé de RLFA ainsi que les tests de robustesse vis-à-vis des perturbations sont analysés.

2. MODELISATION DE LA MACHINE

En tenant compte des hypothèses simplificatrices, les équations électriques de la machine synchrone dans le repère de Park s'écrivent [5, 6]:

$$\begin{aligned} v_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega \phi_{qs} \\ v_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \omega \phi_{ds} \\ v_f &= R_f i_f + \frac{d}{dt} \phi_f \end{aligned} \quad (1)$$

L'équation mécanique de la machine synchrone s'écrit :

$$J \frac{d}{dt} \Omega = C_e - C_r - B\Omega, \quad (2)$$

où le couple électromagnétique peut être exprimé par :

$$C_e = p(\phi_{ds}i_{qs} - \phi_{qs}i_{ds}), \quad (3)$$

tel que :

$$\Omega = \frac{d}{dt} \theta, \quad (4)$$

$$\theta = \int \Omega dt, \quad (5)$$

$$\theta_e = p\theta, \quad (6)$$

$$\omega = p\Omega. \quad (7)$$

Les relations flux-courants sont données par :

$$\begin{aligned} \phi_{ds} &= L_{ds}i_{ds} + M_{fd}i_f, \\ \phi_{qs} &= L_{qs}i_{qs}, \\ \phi_f &= L_f i_f + M_{fd}i_{ds}, \end{aligned} \quad (8)$$

avec : R_s – résistance d'une phase statorique, R_f : résistance de l'inducteur ; L_{ds} , L_{qs} – respectivement inductance statorique directe et en quadrature ; L_f : inductance de l'inducteur, M_{fd} – inductance mutuelle entre l'inducteur et l'induit ; ϕ_{ds} , ϕ_{qs} – respectivement flux d'enroulement d'axes directe et en quadrature ; ϕ_f – flux produit par l'inducteur ; C_e – couple électromagnétique, C_r – couple résistant, p – nombre de paire de pôles ; B – coefficient de frottement visqueux ; Ω – vitesse angulaire mécanique du rotor ; ω – vitesse angulaire électrique du rotor, θ – angle de position géométrique ; θ_e – angle de position électrique.

3. ONDULEUR DE TENSION

L'expression sous forme matricielle des tensions simples de l'onduleur au moyen des fonctions logiques de connexion est obtenue par [7] :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{1l} \\ F_{2l} \\ F_{3l} \end{bmatrix} U_c. \quad (9)$$

Avec la fonction logique de connexion F_{cl} définie par :

- $F_{c1} = 1$ si l'interrupteur T_{c1} est fermé,
- $F_{c1} = 0$ si l'interrupteur T_{c1} est ouvert,
- U_c - tension d'alimentation de l'onduleur.

4. COMMANDE VECTORIELLE

Cette technique consiste à maintenir le flux de réaction d'induit en quadrature avec le flux rotorique produit par le système d'excitation comme cela est le cas dans une machine à courant continu.

Pour un fonctionnement optimal à couple maximal, la solution la plus simple pour une machine synchrone est de maintenir le courant direct i_{ds} égale à zéro et à réguler la vitesse par le courant en quadrature i_{qs} via la tension v_{qs} [5, 6, 9, 10].

En tenant compte de l'équation (3) et (8) et en maintenant i_f constant et $i_{ds} = 0$, l'expression du couple électromagnétique s'écrit :

$$C_e(t) = \lambda i_{qs}(t), \quad (10)$$

avec : $\lambda = pM_{fd}i_f$.

En maintenant les conditions précédentes, les équations de v_{ds} et v_{qs} sont couplés, on est donc amené à implanter un découplage qui consiste à l'introduction des termes de compensation F_{emd} et F_{emq} , les tensions v_{ds} et v_{qs} ne dépend respectivement que de i_{ds} et i_{qs} (Fig. 1) [9].

On définit les termes de compensation par :

$$\begin{aligned} F_{emd} &= \omega L_{qs} i_{qs}, \\ F_{emq} &= -\omega L_{ds} i_{ds} + \omega M_{af} i_f. \end{aligned} \quad (11)$$

La Fig. 1 montre le schéma bloc du découplage du système avec les termes de compensation.

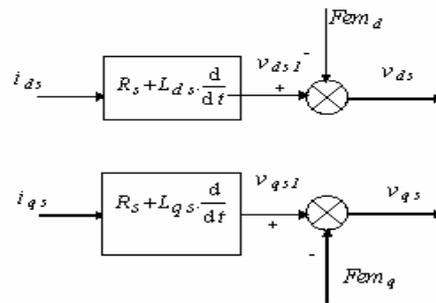


Fig. 1 – Découplage du système.

5. COMMANDE ADAPTATIVE DE LA MACHINE SYNCHRONE

On peut résoudre le problème de la variation des paramètres, qui entraînent des conséquences sur les performances du système et même une instabilité du système dans les cas extrêmes, par les techniques de la commande adaptative où le régulateur s'adapte aux conditions du fonctionnement du système.

Les configurations de la commande adaptative classique demandent un grand volume de calcul parce que leurs algorithmes sont très complexes ce qui nous incite à opter pour d'autres méthodes robustes et simples. En effet la logique floue ne demande pas autant de calcul, car les algorithmes se composent d'opérations répétitives. L'intégration de la logique floue dans la commande adaptative est aussi une solution forte intéressante [9, 12]. Nous nous intéressons à la commande adaptative avec modèle de référence. Dans ce système de commande, le modèle de référence définit comment doit idéalement répondre à un signal de commande. La Fig. 2 montre le schéma bloc de cette technique de commande.

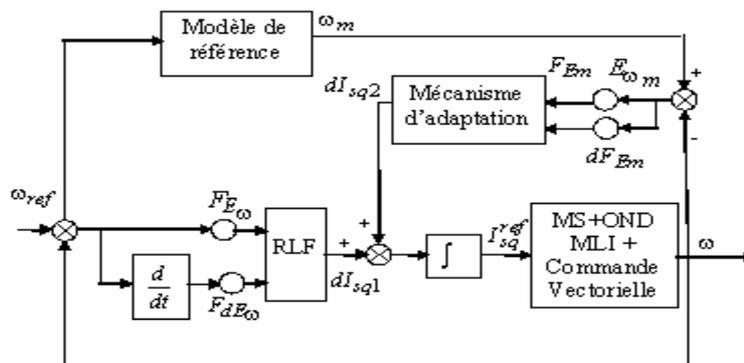


Fig. 2 – Schéma bloc de la commande proposée.

L'approche choisie est l'adaptation du signal de sortie en raison de sa simplicité. La configuration de cette approche consiste en deux boucles en parallèle : une boucle d'asservissement de vitesse avec un RLF direct et une boucle d'adaptation, qui se compose d'un modèle de référence et d'un mécanisme d'adaptation par logique floue. Le principe de fonctionnement de la boucle d'adaptation se résume comme suit :

Pour une consigne d'entrée ω_{ref} , le modèle de référence produit un signal ω_m qui est la réponse désirée. Autrement dit nous utilisons le modèle de référence pour définir la performance désirée qui correspond aux critères de conception comme le temps de réponse, le dépassement, etc. La sortie du modèle de référence ω_m est comparée avec la réponse du système afin de produire un signal de correction pour

réduire la différence. Il y a deux signaux qui entrent dans le bloc d'adaptation par logique floue (Fig. 2) : l'erreur entre la sortie du modèle de référence et la vitesse de la MS, et la dérivée de cette erreur qui peuvent être donnés à l'instant k comme suit :

$$E_{\omega_m} = \omega_m(k) - \omega(k); \quad (12)$$

$$dE_{\omega_m} = E_{\omega_m}(k) - E_{\omega_m}(k-1). \quad (13)$$

Ces grandeurs d'entrée sont traitées par le système d'adaptation en utilisant les règles de la logique floue pour produire un signal d'adaptation $dI_{sq2}(k)$ qui est ajouté à la sortie du RLF direct.

$$dI_{sq}^{ref}(k) = dI_{sq1}^{ref}(k) + dI_{sq2}^{ref}(k). \quad (14)$$

En intégrant ce signal, le courant de référence s'obtient par :

$$\begin{aligned} I_{sq}^{ref}(k) &= I_{sq}^{ref}(k-1) + dI_{sq}^{ref}(k) \\ &= I_{sq}^{ref}(k-1) + (dI_{sq1}^{ref}(k) + dI_{sq2}^{ref}(k)). \end{aligned} \quad (17)$$

Le modèle de référence représente les dynamiques du système avec les paramètres nominaux. Pour un système complexe comme MS, il est très difficile de construire des dynamiques nominales exactes, à cause de son ordre élevé et sa non linéarité. Le modèle de référence choisi est montré à la Fig. 3.

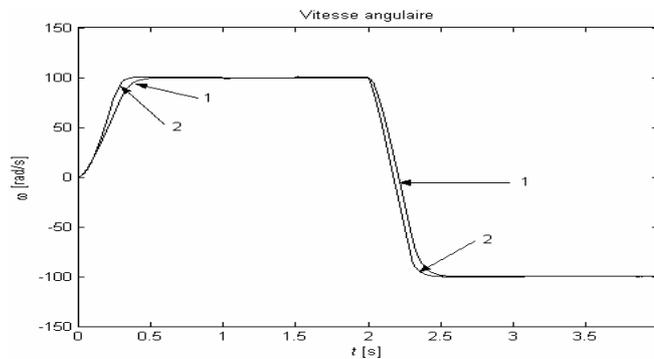


Fig. 3 – Réponse du système à la régulation par modèle de référence à une consigne trapézoïdale : 1) la référence, 2) la réponse du système.

La structure interne du mécanisme d'adaptation par logique floue est identique à celle d'un RLF. Il se compose de trois blocs : Fuzzification (F), Inférence (I), Défuzzification (D). La Fig. 4 montre le mécanisme d'adaptation par logique floue.

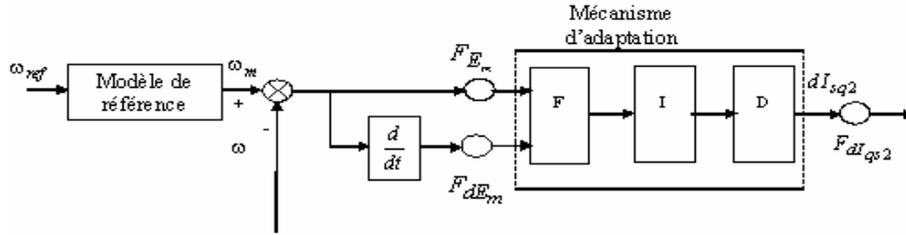


Fig. 4 – Mécanisme d’adaptation par logique floue.

La matrice d’inférence pour le mécanisme d’adaptation est donnée dans la Tableau 1.

Table1

Base de règles pour le contrôle de la vitesse

du		dE _n				
		GN	N	ZR	P	GP
E _n	GN	GN	GN	N	N	ZR
	N	GN	N	N	ZR	P
	ZR	N	N	ZR	P	P
	P	N	ZR	P	P	GP
	GP	ZR	P	P	GP	GP

Avec GN est grand négatif, N est négatif, ZR est zero, P est positif et GP est grand positif.

Les ensembles flous des variables e , Δe et u et leurs fonctions d’appartenances correspondantes sont présentés dans les Figs. 5, 6 et 7, respectivement.

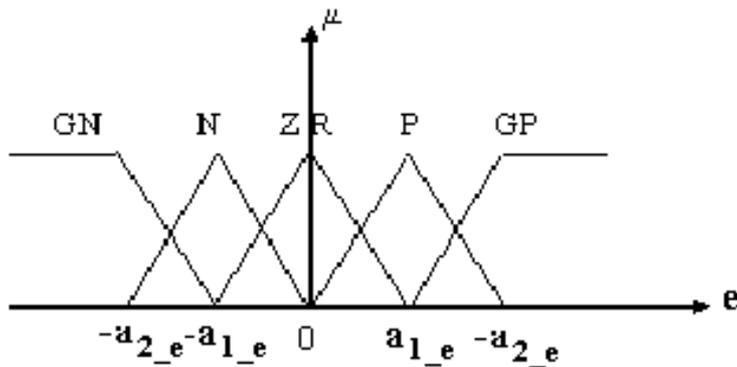
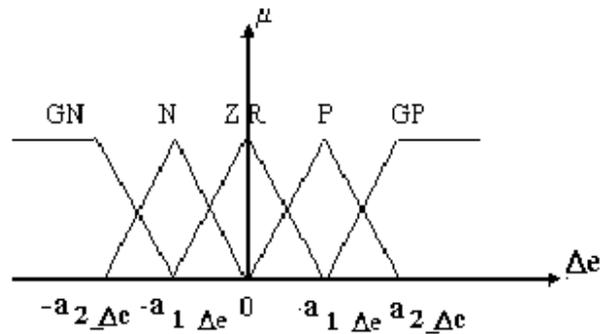
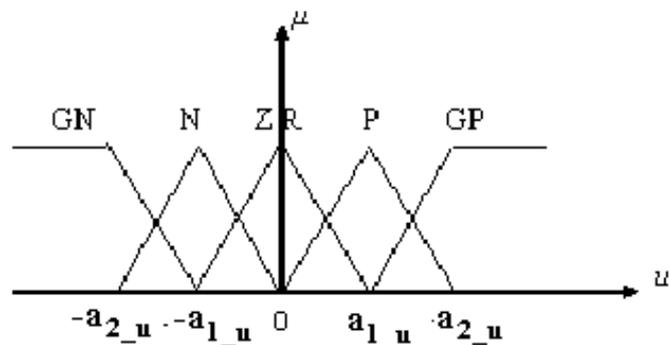


Fig. 5 – Fonction d’appartenance pour e .

Fig. 6 – Fonction d'appartenance pour Δe .Fig. 7 – Fonction d'appartenance pour la grandeur de commande u .

Dans cet article, les fonctions d'appartenance de type triangulaire et trapézoïdales, la méthode de raisonnement max-min et la méthode de défuzzification par centre de gravité sont utilisés comme ils sont fréquemment cités dans la littérature [8, 13].

6. RÉSULTATS ET SIMULATION DU SYSTÈME GLOBALE

6.1. DESCRIPTION DU SYSTÈME

Le système étudié est illustré par la Fig. 8. La machine synchrone est alimentée en tension à fréquence et amplitude variables par un onduleur de tension à MLI, dont le circuit d'excitation est alimenté par une source de tension constante. La source de tension est obtenue par un redresseur en pont triphasé en série avec un circuit de filtrage.

Par ailleurs, lors de la commande en vitesse de la MS, le courant i_{qs} peut atteindre des valeurs inadmissibles, nous utilisons un bloc de saturation qui permet son limitation. Le régulateur RLFA désigne un régulateur adaptatif par logique floue de la vitesse. Les régulateurs PI_{id} et PI_{iq} sont de type PI, désignent respectivement, le régulateur du courant direct i_{ds} , et le régulateur du courant en quadrature i_{qs} .

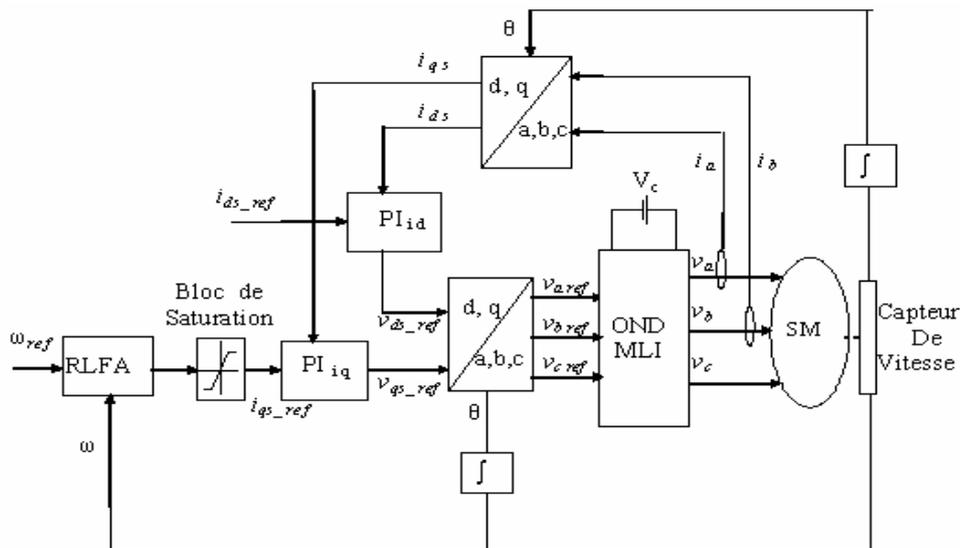


Fig. 8 – Schéma bloc de la commande proposée.

La simulation de l'ensemble Commande-Onduleur-MS est réalisée en utilisant le logiciel SIMULINK sous l'environnement MATLAB.

6.2. RÉSULTATS DE SIMULATION

Pour illustrer les performances de commande adaptative au sein de la commande vectorielle, plusieurs essais de simulation ont été effectués. Les résultats obtenus sont présentés sur les figures suivantes.

La Fig. 9 montre la réponse du système avec un régulateur adaptatif par logique floue pour $J=J_n$. Il est simulé la réponse de vitesse à une consigne trapézoïdale $\pm 100 \text{ rad/s}$. Aux instants $t=1 \text{ s}$ et $t=1.5 \text{ s}$ le système est soumis à une application puis une élimination de la charge ($C_r=8 \text{ Nm}$), suivi par une inversion de sens de la consigne de la vitesse à $t=2 \text{ s}$.

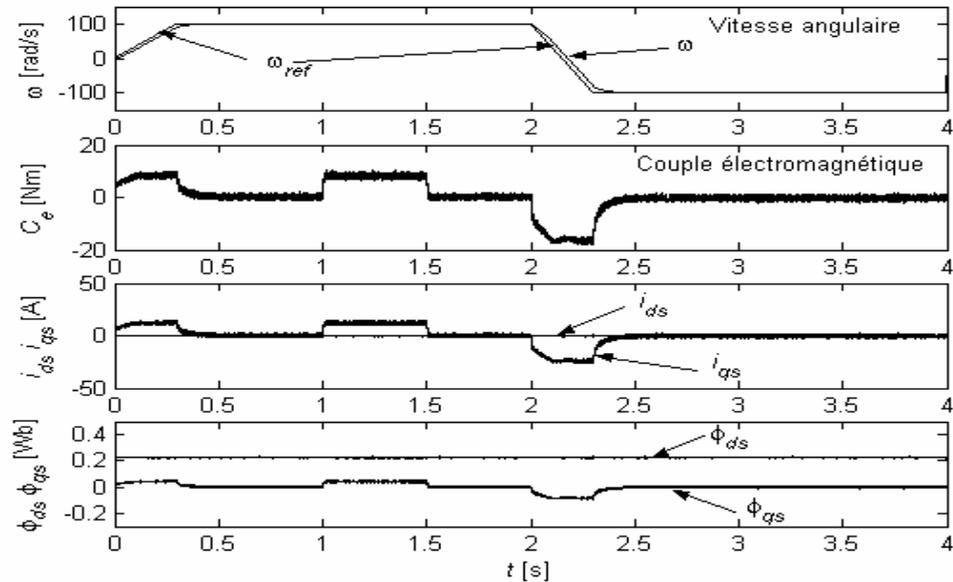


Fig. 9 – Réponse du système avec régulation floue adaptative de la vitesse.

La Fig. 9 montre que le découplage entre le flux et le couple est parfaitement réalisé au régime permanent. Le flux est légèrement perturbé lors des grandes variations de couple. La vitesse suit son modèle de référence avec une légère erreur en régime transitoire.

6.3. ÉTUDE DE LA ROBUSTESSE DU SYSTÈME

Afin de tester la robustesse de la commande proposée, on a étudié l'influence de la variation des paramètres sur les performances de réglage de la vitesse avec limitation de courant.

Les variations introduites dans les essais ressemblent en pratique aux conditions de travail comme échauffement. Deux cas sont considérés :

1. variation de la résistance statorique, $R_s = mR_{sn}$, $0.5 \leq m \leq 1.5$ avec $J = J_n$;
2. variation de la résistance statorique, $R_s = mR_{sn}$, $0.5 \leq m \leq 1.5$ avec $J = 2J_n$.

Il est simulé la réponse du système à une consigne trapézoïdale de vitesse. Aux instants $t = 1\text{ s}$ et $t = 2\text{ s}$ le système est soumis à une application puis une élimination d'une perturbation de couple résistant $C_r = 8\text{ Nm}$.

Les Figs. 10 et 11 représentent les tests de robustesse de la commande avec RLFA vis à vis de la variation de la charge et la résistance statorique.

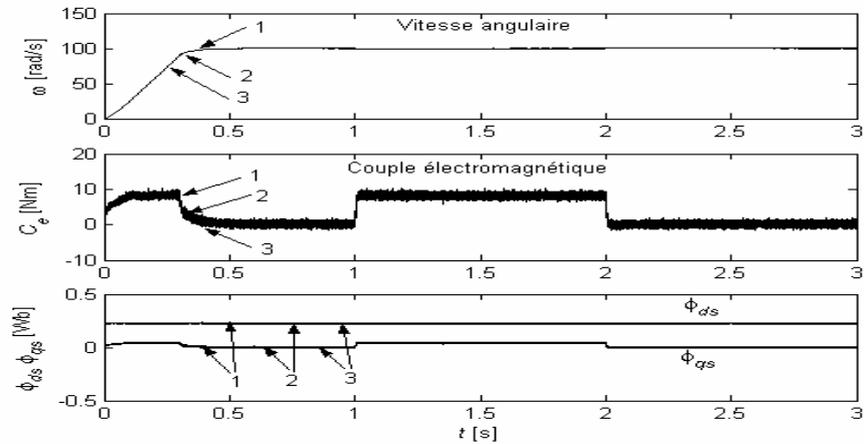


Fig. 10 – Réponse du système aux variations de la charge et résistance R_{Sn} avec $J = J_n$:

- 1) $R_s = 0.5 \cdot R_{Sn}$, 2) $R_s = 1 \cdot R_{Sn}$, 3) $R_s = 1.5 \cdot R_{Sn}$.

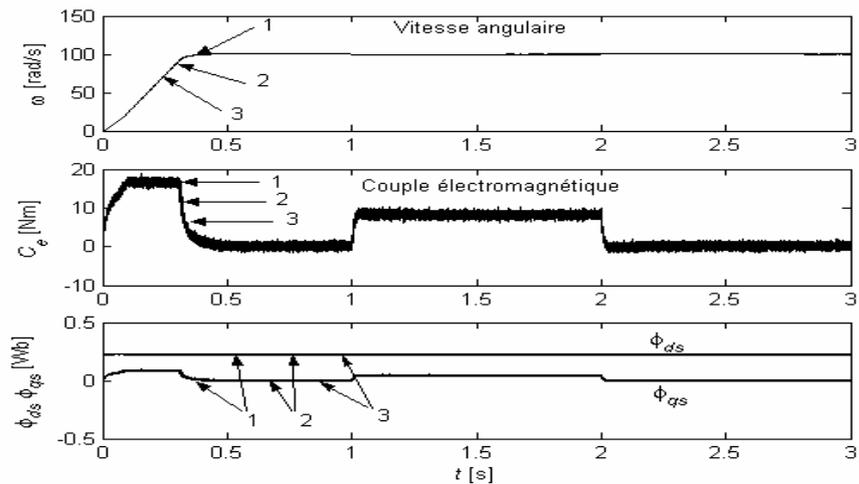


Fig. 11–Réponse du système aux variations de la charge et résistance R_{Sn} avec $J = 2 \cdot J_n$:

- 1) $R_s = 0.5 \cdot R_{Sn}$, 2) $R_s = 1 \cdot R_{Sn}$, 3) $R_s = 1.5 \cdot R_{Sn}$.

Les figures 10 et 11 montrent que le découplage entre le flux et le couple est parfaitement réalisé aux régimes permanents. Le flux est légèrement perturbé lors des grandes variations de couple. La vitesse suit son modèle de référence avec une légère erreur en régime transitoire. Il est montré aussi l'insensibilité de la vitesse aux perturbations externes.

Enfin, la réponse en vitesse est sans dépassement, sans erreur statique et avec un rejet de perturbation très rapide. Malgré les perturbations internes et externes la commande adaptative maintient les performances désirées.

7. CONCLUSION

Le travail effectué est une simulation numérique de la commande adaptative au sein de la commande vectorielle directe d'une machine synchrone alimentée en tension.

La commande adaptative proposée est avec un modèle de référence dont le mécanisme d'adaptation est en parallèle avec le régulateur flou de la boucle interne. Les performances du régulateur adaptatif par logique floue a été testée. Les résultats obtenus par simulation montrent que RLFA est très robuste par rapport aux perturbations dues aux variations de la charge, du moment d'inertie et de R_s . La réponse en vitesse poursuit correctement le modèle de référence choisi malgré les perturbations.

L'apport de la commande adaptative proposée pour le contrôle de la vitesse de la machine synchrone est appréciable au niveau de la robustesse aux variations paramétriques interne tel que la résistance statorique et externes tel que l'inertie mécanique. Le bon choix des paramètres de commande donne de bonnes performances.

APPENDIX

Paramètres de la MS:

3 HP, 4 pôles, triphasé, tension de phase 60 V, courant de phase 14 A,
 $J = 0,05 \text{ kg.m}^2$, $B = 0,005 \text{ N.m/s}$, $\lambda = 0,6 \text{ N.m/s}$, $R_s = 0,325\Omega$, $R_f = 0,05 \Omega$,
 $L_{ds} = 8,4 \text{ mH}$, $L_{qs} = 3,5 \text{ mH}$, $M_{fd} = 7,56 \text{ mH}$, $L_f = 8,1 \text{ mH}$, $i_f = 30 \text{ A}$,
 $v_f = 1,5 \text{ V}$

Reçu le 13 Novembre, 2007

REFERENCES

1. J.J.E. Slotine, W. Li, *Applied nonlinear control*, Prentice Hall, USA, 1998.
2. S. Belkhdja, B. Fornel, *Commande adaptative d'une machine asynchrone*, J. Phys III, France, pp. 779–796, Juin 1996.
3. A.Ghazel, B. de Fornel, J.C.Hapiot, *Robustesse d'un contrôle vectorielle de structure minimale d'une machine asynchrone*, J.Phys.III, France, pp. 943–958, 1996.

4. J. Bernal, G. Segulier, *Entraînement électrique à vitesse variable*, Lavoisier Technique et Documentation, 1998.
5. B. K. Bose, *Power electronics and AC drives*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, Newjersey, 1986.
6. G. Sturtzer, E. Smigiel, *Modélisation et commande des moteurs triphasés*, Edition Ellipses, 2000.
7. J.P. Cambonne, Ph. Le Moigne, J.P. Hautier, *Synthèse de la commande d'un onduleur de tension*, J. Phys III, France, pp. 757–778, 1996.
8. L. Baghli, *Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurone et des algorithmes génétiques*, Thèse de doctorat, S.T.I.M.A – Nancy, 1999.
9. K. Kendouci, *Etude comparative des différentes commandes de la machine synchrone à aimants permanents*, Thèse de Magister, Université de science technologique d'Oran, septembre 2003.
10. B. Belabbes, *Commande linéarisante d'un moteur synchrone à aimants permanents*, Thèse de Magister, Université Djilali Liabes, 2000/2001.
11. R. Losano, Damia Taoutaou, *Commande adaptative et applications*, Paris, Hermès, Science Publications, 2000.
12. Mint Ta Cao, *Commande numérique de machines asynchrone par logique floue*, Thèse de doctorat (Ph.D.), Université Laval, 1997.
13. H. Bühler, *Réglage par logique floue*, Presses polytechnique romandes, Lausanne, 1994.

REFERENCE MODEL ADAPTIVE CONTROL OF SYNCHRONOUS MACHINE

Key words: Synchronous machine, Adaptive control, Vectoriel control, Speed control.

This paper presents an application of an adaptive control reference model for synchronous motor speed control. This strategy permit to make the controlled system to track the desired reference model. Different transitory regime were simuled to appreciate the using of fuzzy logic in speed adaptif control with synchronous motor control vector: start up and inverse of the sens of rotation with load and without load. Simulation tests are provided to evaluate the consistency and performance of the proposed control scheme.