

ROBUSTESSE DE LA COMMANDE ADAPTATIVE DE VITESSE D'UNE MACHINE ASYNCHRONE

MOHAMED ABID¹, ABDEL GHANI AISSAOUI¹, BOUBEKEUR DEHIBA¹,
AHMED TAHOUR²

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

Ce travail présente une stratégie de commande adaptative directe, appliquée à la commande en vitesse d'une machine asynchrone alimentée en tension. L'objectif est de résoudre le problème de robustesse vis-à-vis de la variation des conditions de travail et de la variation des paramètres internes de la machine. La commande proposée comporte un régulateur adaptatif par logique floue pour effectuer l'adaptation paramétrique. Différents régimes transitoires ont été simulés pour apprécier l'utilisation de la logique floue pour le régulateur adaptatif de la vitesse au sein de la commande vectorielle de la machine asynchrone: démarrage et inversion de rotation, à vide et en charge, application de couple résistant, variations paramétriques. Les résultats permettent d'illustrer, tant au niveau de performances que de robustesse, l'apport d'une telle commande adaptative pour des entraînements électriques avec machine asynchrone.

1. INTRODUCTION

La commande de la machine asynchrone (MAS) 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. 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. Ainsi, le recours à des algorithmes de commande robuste est souhaitable aussi bien en stabilisation qu'en

¹ Laboratoire IRECOM, Université Sidi Bel Abbès, Algérie, irecom_mabid@yahoo.fr.

² Centre Universitaire, Bechar, Algérie.

poursuite de trajectoire [2, 4, 5, 6, 8]. Le régulateur par logique flou adaptatif (RLFA) qui, par sa nature, est non-linéaire, posséderait cette robustesse [1, 3, 7, 9].

Dans cet article, les performances du réglage par commande adaptative de la vitesse d'une MAS avec orientation direct du flux sont analysées par simulation numérique. Nous nous attachons à résoudre le problème de robustesse à savoir :

- robustesse vis-à-vis de la variation des conditions de travail telle que le changement de charge, de moment d'inertie,
- robustesse vis-à-vis de la variation des paramètres internes de la machine telle que les résistances et les inductances.

La commande adaptative par la logique floue est utilisée donc pour effectuer deux sortes d'adaptations majeures :

1. adaptation aux conditions d'opération,
2. adaptation à la variation des paramètres internes de la machine.

Nous commençons par la présentation du modèle de la machine asynchrone dans le repère de PARK en vue de la commande vectorielle. L'estimation du flux est basée sur l'intégration des équations des bobinages statoriques dans un référentiel (α, β) lié au stator. Ensuite, on propose un algorithme de commande adaptative basée sur la logique floue.

Enfin, les résultats obtenus avec l'algorithme proposé ainsi que les tests de robustesse vis-à-vis des perturbations sont analysés.

2. COMMANDE VECTORIELLE

Pour la commande vectorielle nous utilisons le modèle de la MAS dans le repère (d, q) .

Grâce à une représentation dans un repère lié au champ tournant dont l'axe d est aligné avec le vecteur flux rotorique, $(\Phi_{rd} = \Phi_r$ et $\Phi_{rq} = 0)$ par conséquent, on peut écrire[3] :

$$\dot{I}_{sd} = -\lambda I_{sd} + \omega_s I_{sq} + \frac{K}{\tau_r} \Phi_{rd} + \frac{1}{\sigma L_s} V_{sd} ; \quad (1)$$

$$\dot{I}_{sq} = -\omega_s I_{sd} - \lambda I_{sq} - P\Omega K \Phi_{rd} + \frac{1}{\sigma L_s} V_{sq} ; \quad (2)$$

$$\dot{\Phi}_{rd} = \frac{L_m}{\tau_r} I_{sd} - \frac{1}{\tau_r} \Phi_{rd} ; \quad (3)$$

$$\dot{\Phi}_{rq} = \frac{L_m}{\tau_r} I_{sq} - (\omega_s - P\omega) \Phi_{rd} ; \quad (4)$$

$$\dot{\Omega} = \frac{3 PL_m}{2 JL_r} \Phi_{rd} I_{sq} - \frac{1}{J} C_r - f\Omega, \quad (5)$$

avec : $\tau_r = \frac{L_r}{R_r}$; $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$; $K = \frac{L_m}{\sigma L_s L_r}$; $\lambda = \frac{1}{\tau_s \sigma} + \frac{1}{\tau_r} \left(\frac{1 - \sigma}{\sigma} \right)$ Φ_{rd} – flux rotorique relatif à l'axe d ; Φ_{rq} – flux rotorique relatif à l'axe q ; I_{sd} – courant statorique relatif à l'axe d ; I_{sq} – courant statorique relatif à l'axe q ; C_e – couple électromagnétique ; d, q – indice d'axes ; s, r – indices relatifs aux stator et rotor ; R_s, R_r – résistance d'enroulement statorique et rotorique respectivement ; L_s, L_r – inductance cyclique statorique et rotorique respectivement ; L_m – inductance mutuelle ; P – nombre de paire de pôles ; J – moment ; f – coefficient de frottement ; ω – vitesse de rotation électrique.

Le choix des courants statoriques I_{sd}, I_{sq} se justifié par le fait qu'ils sont mesurables, tandis que celui du flux rotoriques se justifie par le fait que l'on veut contrôler la norme du flux rotorique dans le cadre de la commande vectorielle.

3. ESTIMATION DU FLUX MAGNÉTIQUE

Pour reconstituer le flux magnétique, on a pris un algorithme d'estimation basé sur l'intégration des équations des bobinages statoriques dans un référentiel (α, β) lié au stator; cet algorithme d'estimation est défini par les expressions suivantes :

$$\dot{\hat{\Phi}}_{r\alpha} = \frac{L_r}{M_{sr}} (U_{s\alpha} - R_s I_{s\alpha} - \sigma L_s \dot{I}_{s\alpha}); \quad (6)$$

$$\dot{\hat{\Phi}}_{r\beta} = \frac{L_r}{M_{sr}} (U_{s\beta} - R_s I_{s\beta} - \sigma L_s \dot{I}_{s\beta}). \quad (7)$$

On définit θ_s , l'angle que fait le vecteur du flux rotorique Φ_r avec l'axe dans le repère (α, β) ,

$$\theta_s = \arctan \left(\frac{\hat{\Phi}_{r\beta}}{\hat{\Phi}_{r\alpha}} \right). \quad (8)$$

Par conséquent, avec la connaissance des paramètres du moteur, les tensions et les courants statoriques sont mesurés, l'estimation des flux rotorique est obtenue à l'aide de l'estimateur établi suivant les équations (6) et (7).

4. COMMANDE ADAPTATIVE DE LA MACHINE ASYNCHRONE

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 incitent 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 [1, 6, 9]. 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. 1 montre le schéma bloc de cette technique de commande.

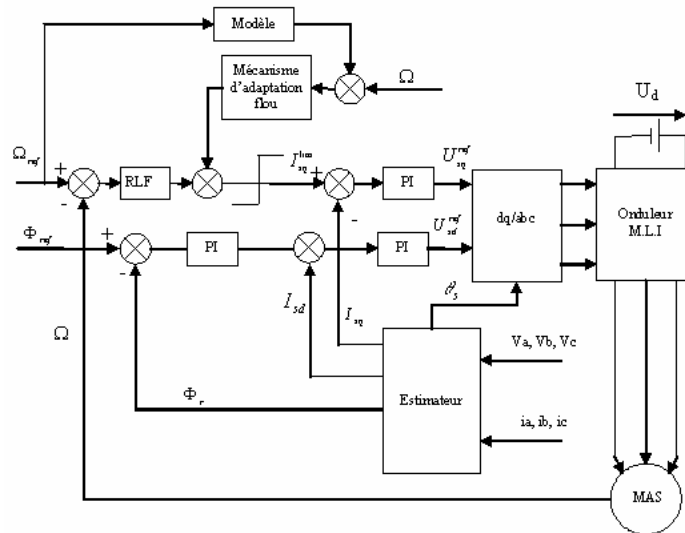


Fig. 1 – Schéma bloc de la commande proposée.

5. COMMANDE ADAPTATIVE DE LA MAS

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 en 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 désiré. 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 comparé 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. 3) : l'erreur entre la sortie du modèle de référence et la vitesse du MAS, et la dérivation de cette erreur qui peuvent être donnés à l'instant k comme suit:

$$E_{\Omega_m} = \Omega_m(k) - \Omega(k); \quad (9)$$

$$dE_{\Omega_m} = E_{\Omega_m}(k) - E_{\Omega_m}(k-1). \quad (10)$$

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.

$$dI_{sq}^{ref}(k) = dI_{sq1}^{ref}(k) + dI_{sq2}^{ref}(k). \quad (11)$$

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

$$I_{sq}^{ref}(k) = I_{sq1}^{ref}(k-1) + dI_{sq}^{ref}(k) = I_{sq}^{ref}(k-1) + (dI_{sq1}^{ref}(k) + dI_{sq2}^{ref}(k)). \quad (12)$$

Le modèle de référence représente les dynamiques du système avec les paramètres nominaux. Pour un système complexe comme MAS, 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 dans ce travail est une fonction de transfert de premier ordre similaire de la fonction mécanique de la MAS.

La structure interne du mécanisme d'adaptation par logique flou est identique à celle d'un RLF. Il se compose de trois bloc : fuzzification (F), inférence (I), défuzzification (D). La Fig. 2 montre les fonctions d'appartenance avec les univers de discours pour les variables flous E_{Ω} , dE_{Ω} , dI_{sq} . La Fig. 3 montre le mécanisme d'adaptation par logique floue.

L'inférence : méthode max-prod ; la défuzzification : méthode des hauteurs.

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

Tableau 1

La matrice d'inférence pour le mécanisme d'adaptation

dI_{sq}		dE_{Ω}		
		N	Z	P
E_{Ω}	N	N	N	Z
	Z	N	Z	P
	P	Z	P	P

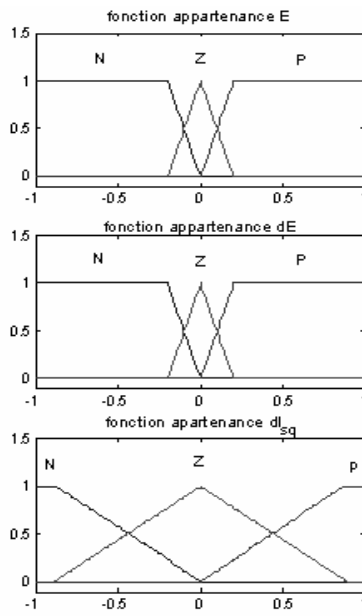


Fig. 2 – Répartition floue : fonctions d'appartenance avec les univers de discours pour les variables flous E_{Ω} , dE_{Ω} , dI_{sq}

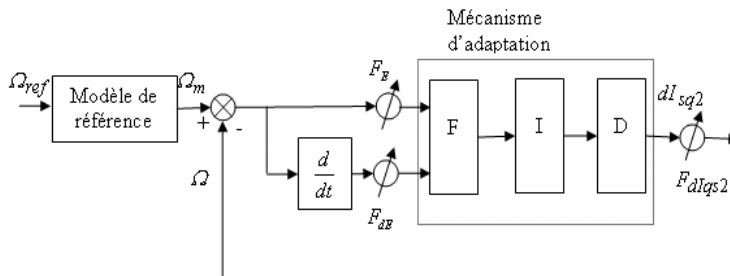


Fig. 3 – Mécanisme d'adaptation par logique floue.

6. RÉSULTATS ET SIMULATION DU SYSTÈME GLOBALE

6.1. DESCRIPTION DU SYSTÈME

Le système étudié est illustré par la Fig. 1. La MAS est alimentée en tension. La commande vectorielle appliquée est de type directe. Le régulateur de vitesse est de RLFA, du flux et du courant I_{sq} (couple), I_{sd} sont de type PI. Le flux Φ_r et θ_s sont estimés par un estimateur.

L'ensemble de commande-onduleur-MAS est simulé par le logiciel Matlab/Simulink.

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. 4 montre les réponses du système avec régulateur adaptatif par logique floue. Il est simulé la réponse du système à une consigne trapézoïdale de vitesse. Aux instants 1 et 2 s le système est soumis à une application puis une élimination d'une perturbation de couple résistant $C_r = 30$ Nm.

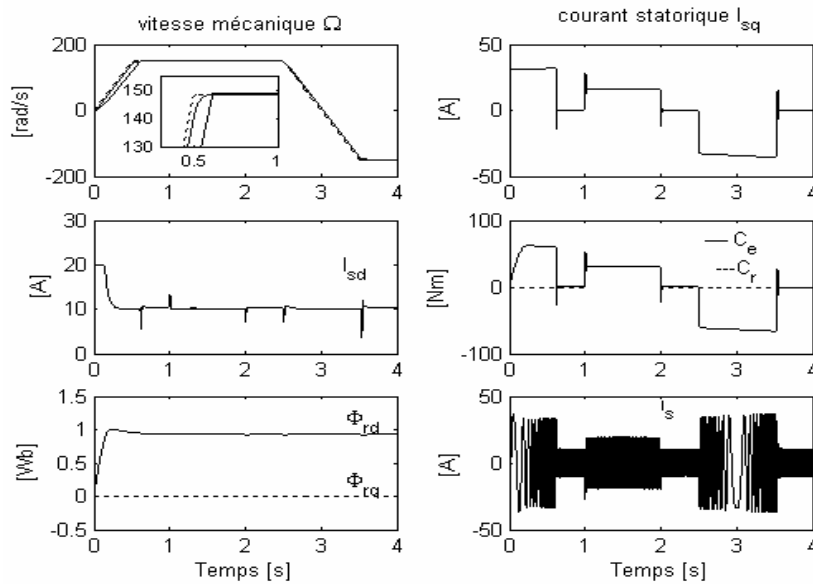


Fig. 4 – Réponse du système avec régulation floue adaptative de la vitesse.

La Fig. 4 montre que le découplage entre le flux et couple est parfaitement réalisé aux régimes permanents. Elle présente aussi des meilleures performances vis-à-vis la poursuite de référence et le rejet de la perturbation avec limitation du courant La réponse en vitesse est sans dépassement et avec un rejet de perturbation très rapide.

6.3. ÉTUDE DE LA ROBUSTESSE DU SYSTÈME

Afin de tester la robustesse de la commande proposée, on a étudié l'influence des variations des paramètres sur les performances de réglage de 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 rotorique, $R_r = mR_{r_n}$, $0.5 \leq m \leq 1.5$, avec $J = J_n$;
2. variation de la résistance rotorique, $R_r = mR_{r_n}$, $0.5 \leq m \leq 1.5$, avec $J = 2J_n$.

Il est simulé la réponse du système à une consigne trapézoïdale de vitesse. Aux instants 1 et 2s le système est soumis à une application puis une élimination d'une perturbation de couple résistant $C_r = 30$ Nm.

Les Figs. 5 et 6 représentent les tests de robustesse de la commande avec RLFA vis à vis de la variation de la charge et la résistance rotorique.

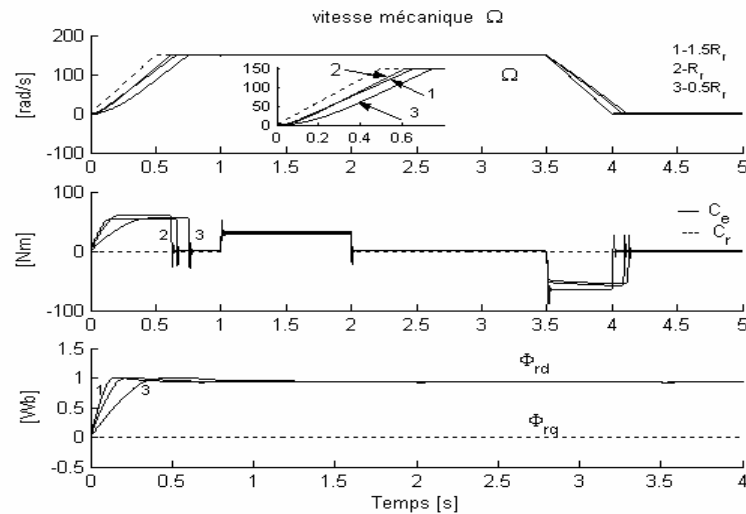


Fig. 5 – Réponse du système aux variations de la charge et résistance R_r avec $J = J_n$.

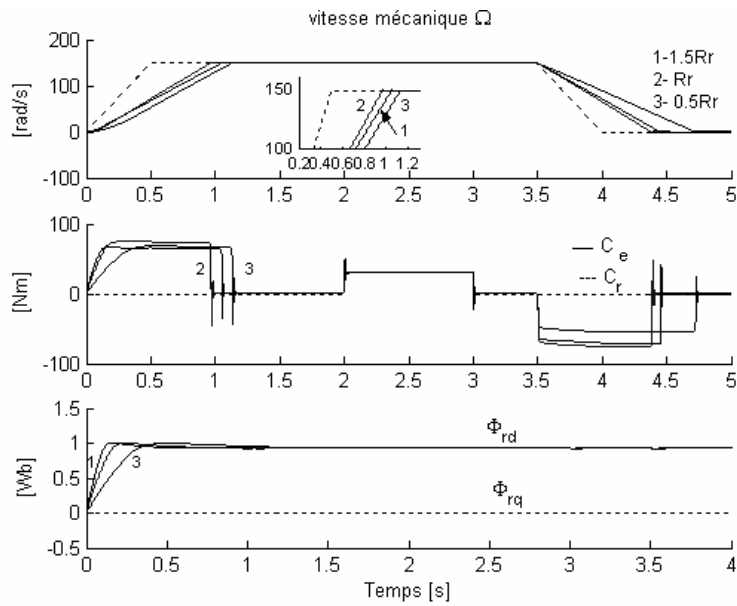


Fig. 6 – Réponse du système aux variations de la charge et résistance R_r avec $J = 2J_n$.

Les Figs. 5 et 6 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 asynchrone alimentée en tension.

La commande adaptative proposée est avec un modèle de référence dont le mécanisme d'adaptation est en parallèle avec le RLF 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_r . La réponse en vitesse poursuit correctement le modèle de référence choisi malgré les des perturbations.

L'apport de la commande adaptative proposé pour le contrôle de vitesse d'une machine asynchrone est appréciable au niveau de la robustesse aux variations paramétriques tel que la résistance rotorique et externes tel que l'inertie mécanique. La mise en œuvre de cette commande présente l'avantage de ne pas nécessiter une identification rigoureuse du constante rotorique τ_r dans une plage de variation limitée. Le bon choix des paramètres de commande donne de bonnes performances.

APPENDIX

Paramètres de la MAS:

$P_u = 7.5\text{kW}$, $U = 220\text{V}$, $R_s = 0.63\Omega$, $R_r = 0.4\Omega$, $L_r = L_m = 0,097\text{H}$, $L_s = 0,091\text{H}$,
 $I_n = 16\text{A}$, $\Phi_n = 0.9\text{Wb}$, $J = 0.22\text{kgm}^2$, $f = 0.001\text{Nms/rd}$, $P = 2$.

Reçu le 6 juillet 2006

REFERENCES

1. P. Vas, J. Chen, A.F. Stronach, *Fuzzy control of AC drives, Power Electronics and variables speed drives*, Conference publication IEE. No. 399, 26–28 Octobre 1994.
2. J.J.E. Slotine, W. Li, *Applied nonlinear control*, Prentice Hall, USA, 1998.
3. L. Baghli, *Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des reseaux de neurone et des algorithmes génétique*, Thèse de doctorat, S.T.I.M.A-nancy, 1999.
4. S. Belkhdja, B. Fornel, *Commande adaptative d'une machine asynchrone*, J. Phys III France, Juin 1996, pp. 779–796,.
5. A.Ghazel, B. de Fornel et J.C.Hapiot, *Robustesse d'un contrôle vectorielle de structure minimale d'une machine asynchrone*, J.Phys., III, France, 1996, pp. 943–958.
6. Rogelo Losano, Damia Taoutaou, *Commande adaptative et applications*. Paris, Hermès, Science Publications, 2000.
7. K. Laroussi, M. Zelmat, *Une comparaison (PI et Floue) appliqué à un moteur asynchrone*, CNEA'04, 24–25 Mai, 2004, Sidi Bel Abbes.
8. J. Bernal, G. Segulier, *Entraînement électrique à vitesse variable*, Lavoisier Technique et Documentation, 1998.
9. Mint Ta Cao, *Commande numérique de machines asynchrone par logique floue*, Thèse de doctorat (Ph.D.), Université Laval, 1997.
10. Cambronne J.P., Le Moigne Ph., et Hautier J.P, *Synthèse de la commande d'un onduleur de tension*, J. Phys., III, France, pp. 757–778, 1996.

ROBUSTNESS OF SPEED ADAPTIVE CONTROL FOR ASYNCHRONOUS MACHINE

MOHAMED ABID, ABDEL GHANI AISSAOUI, BOUBEKEUR DEHIBA, AHMED
TAHOUR

Key words: Asynchronous machine, Adaptive control, Vector control, Speed control.

This paper present a direct adaptive control strategy, applied for asynchronous motor speed control. The aim is to resolve the problem of robustness via the variation of the functioning conditions and the machine parameters. The proposed control method is designed, based on a fuzzy adaptive controller. Different simulations are done to show the interest of using fuzzy logic for speed adaptive controller of the asynchronous motor in transitional regimes: start of the motor, the inversion of the rotation direction, application of the load, and parameters variation. The results show that the fuzzy adaptive control provides best performance and has a high robustness.