

## Conception d'un contrôleur à logique flou basé sur la théorie des modes glissants appliquée à la machine asynchrone triphasée

Rim Fèyrouz Abdelgoui <sup>1</sup>\*, Mokhtar Zerikat <sup>1</sup> et Rachid Taleb <sup>2</sup>

Laboratoire d'Automatique et d'Analyse des Systèmes, LAAS  
Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique  
Maurice-Audin d'Oran, Algérie

<sup>2</sup> Laboratoire Génie Electrique et Energies Renouvelables, LGEER  
Département d'Electrotechnique, Université Hassiba Benbouali  
Chlef, Algérie

(reçu le 10 Mars 2018 - accepté le 30 Mars 2018)

**Résumé** - Le moteur asynchrone est apprécié dans le domaine industriel en raison de ses avantages de simplicité de construction, de robustesse et de faible coût d'achat et d'entretien. En revanche, il présente des difficultés inhérentes lors de leurs exploitations d'où la loi de commande classique ne répond pas aux exigences demandées telle que la robustesse. Dans ce contexte, l'application de la commande par mode de glissement nous a offert une robustesse par rapport aux variations paramétriques du moteur, malheureusement cette stratégie de commande a présenté un inconvénient majeur du au phénomène de broutement, Pour remédier à ce problème nous avons combiné la commande par mode glissant et la commande à base de la logique floue pour rallier les avantages des deux stratégies. Les résultats obtenus par la combinaison de deux stratégies mode glissant et la logique floue, ont fourni des performances meilleurs vis-à-vis aux variations des paramètres et une élimination du phénomène de broutement.

**Abstract** - Induction motors are being applied today to a wider range of applications requiring variable speed. In this work, a novel fuzzy sliding mode structure has been proposed for induction motor speed control. The performance and robustness of this controller scheme have evaluated under a variety of operating conditions of the induction motor drive. From this study, it can be concluded that FSMC controller overcomes the chattering problem and improve greatly the robustness of the drive speed. The obtained results demonstrated the effectiveness of the proposed control scheme. Given the complexity and the presence of strong nonlinearities. System performance, both in steady state error in speed and dynamic conditions, was found to be excellent and there is not any overshoot.

**Mots-Clés:** Moteur asynchrone - Commande vectorielle indirecte - Commande par mode de glissement - Logique floue - Robustesse - CMG-Flou.

### 1. INTRODUCTION

Que ce soit pour accroître l'efficacité énergétique ou pour optimiser et améliorer les contrôles des procédés, les industriels s'équipent de plus en plus d'entraînements à vitesse variable par moteurs électriques. La machine à induction est appréciée dans le domaine industriel en raison de ses avantages de simplicité de construction, de robustesse et de faible coût d'achat et d'entretien. Dans cet objectif, plusieurs outils sont proposés dans la littérature, dont on cite la logique floue et la commande à structure variable.

Connu par sa robustesse et sa simplicité de mise en œuvre, le mode glissant a été largement utilisé pour commander une large classe de systèmes non linéaires [5]. Cette commande permet d'assurer en plus des bonnes performances de poursuite, une dynamique rapide et un temps de réponse court [4]. Cependant, la nature commutant (discontinue) de cette technique peut provoquer l'effet de broutement, appelé en anglais

---

\* rf.abdelgoui@gmail.com

'chattering', qui consiste en des variations brusques et rapides du signal de commande, ce qui peut exciter les hautes fréquences du processus et l'endommager [6].

Pour résoudre les ce problème, des nouvelles stratégies de commande basées sur l'expertise de l'opérateur ont été élaborées, les bases de cette théorie généralisent la notion d'appartenance d'un objet à un ensemble donné, de plus les systèmes à base de logique floue sont apparentés aux systèmes experts, en ce sens qu'il s'appuie sur une base de connaissance et sur des règles de traitement de celle-ci, ainsi ,un contrôleur flou peut être vu comme un système expert particulier ayant pour objectif de remplacer un opérateur qualifié dans son observation et son jugement, il permet alors le traitement des idées humaines souvent incertaines [8].

Dans cet article on propose la synthèse de trois stratégies de commandes: la commande par mode de glissement, la commande floue et la commande mode glissant-floue pour les appliquer à une machine asynchrone dans le but d'améliorer la poursuite de trajectoires, garantir la stabilité, la robustesse aux variations des paramètres et le rejet de perturbation. Ensuite une étude comparative entre ces trois stratégies de commande est faite afin de montrer les performances de chaque commande.

## 2. MODULATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Le processus à commander est constitué d'un moteur asynchrone à cage commandé en tension par un onduleur à deux niveaux piloté par une MLI de type sinus-triangle. On exprime alors son modèle dynamique dans le repère de Park par un système d'équations différentielles [1]:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_{sd} = -\gamma i_{sd} + \omega_s i_{sq} + \frac{k}{T_r} \phi_{rd} + \frac{1}{\sigma \cdot L_s} v_{sd} \\ \frac{d}{dt} i_{sq} = -\gamma i_{sq} - \omega_s i_{sd} - p\Omega k + \frac{1}{\sigma \cdot L_s} v_{sq} \\ \frac{d}{dt} \phi_{rd} = \frac{M}{T_r} i_{sd} - \frac{1}{T_r} \phi_{rd} \\ \frac{d}{dt} \Omega = p \frac{M}{J L_r} \phi_{rd} i_{sd} - \frac{1}{J} C_r - \frac{f}{J} \Omega \end{cases} \quad (1)$$

avec,

$$k = \frac{M}{\sigma L_s L_r}, \quad \gamma = \frac{R_s + R_r}{\sigma L_s} \frac{M^2}{L_r^2}, \quad \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}, \quad T_r = L_r / R_r$$

## 3. COMMANDE PAR MODE GLISSANT FLOUE

La commande par mode glissant maintient la robustesse et améliore les performances du système. Cependant, le phénomène de chattering représente son principal défaut. Pour surmonter ce problème, une combinaison de commande par logique floue 'FLC' et la commande par mode de glissement 'CMG' a été proposée [3, 5]. Les régulateurs de la vitesse et le flux rotorique sont substitués par un régulateur mode glissant-flou proposé comme il est montré sur la figure 1 [1, 4].

### 3.1 Synthèse de la commande par mode glissant

En mode glissant, la commande est définie par l'équation suivante [1, 3, 5]:

$$u_{CMG} = u_{eq} + u_c \quad (2)$$

avec,  $u_{CMG}$ , grandeur de commande;  $u_{eq}$ , grandeur de commande équivalente;  $u_c$ , grandeur de commande discontinue.

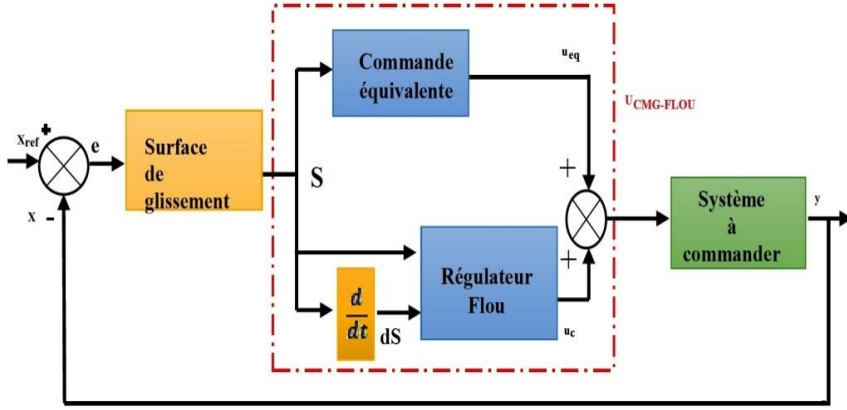


Fig. 1: Schéma de la commande CMG-Flou

$$u_c = -K_c \cdot \text{sign}(S(x)) \quad (3)$$

Les deux variables à contrôler sont la vitesse de rotation  $\Omega$  et le flux rotorique  $\varphi_r$ , on considère par conséquent, les deux surfaces  $S_1(\Omega)$  et  $S_2(\varphi_r)$  [1].

La fonction de commutation est choisie comme suit

$$\begin{cases} S_1 = K_1 e_\omega + \dot{e}_\omega \\ S_2 = K_2 e_{\varphi_r} + \dot{e}_{\varphi_r} \end{cases} \quad (4)$$

avec,

$$e_\omega = \Omega^{\text{ref}} - \Omega, \quad e_{\varphi_r} = \varphi_r^{\text{ref}} - \varphi_r$$

Les dérivées successives de la surface de glissement  $S_1$  et  $S_2$  définie comme suit:

$$\begin{cases} \dot{s}_1 = \left( \ddot{\Omega}^{\text{ref}} + K_1 \dot{\Omega}^{\text{ref}} + \frac{C_r}{J} \right) + \left( -K_1 + \frac{f\Omega}{J} \right) h_1 - \mu (i_{sq} h_2 + \varphi_r h_4) - \frac{1}{\sigma L_s} \mu \varphi_r u_{sd} \\ \dot{s}_2 = \left( \ddot{\varphi}_r^{\text{ref}} + K_2 \dot{\varphi}_r^{\text{ref}} \right) + \left( -K_2 + \frac{1}{T_r} \right) h_2 - \frac{M}{T_r} h_2 - \frac{M}{T_r \sigma L_s} u_{sq} \end{cases} \quad (5)$$

avec,

$$\begin{aligned} h_1 &= \mu \varphi_{rq} i_{sq} + \omega_s i_{sq} - \frac{1}{J} C_r - \frac{f}{J} \Omega, \quad h_2 = \frac{M}{T_r} i_{sd} - \frac{1}{T_r} \varphi_{rd}, \quad \mu = p \frac{M}{j L_r} \\ h_3 &= -\gamma i_{sd} + \omega_s i_{sq} + \frac{k}{T_r} \varphi_{rd}, \quad h_4 = -\gamma i_{sq} - \omega_s i_{sd} + p \Omega k \varphi_{rd} \end{aligned}$$

Le système (5) peut être réorganisé dans la forme matricielle suivante:

$$\begin{cases} F_1 = \left( \ddot{\Omega}^{\text{ref}} + K_1 \dot{\Omega}^{\text{ref}} + \frac{T_L}{J_m} \right) + \left( -K_1 + \frac{f_m \Omega}{J_m} \right) h_1 - \mu (i_{sq} h_2 + \varphi_r h_4) \\ F_2 = \left( \ddot{\varphi}_r^{\text{ref}} + K_2 \dot{\varphi}_r^{\text{ref}} \right) + \left( -K_2 + \frac{1}{T_r} \right) h_2 - \frac{M}{T_r} h_2 \end{cases} \quad (6)$$

Et vérifier pour satisfaire le critère de Lyapunov (  $S_i \cdot \dot{S}_i < 0$  ), on doit avoir [1]:

$$\begin{cases} U_{eq} = \frac{1}{\mu \varphi_r} F_1 + v_{\Omega} \text{sign}(S_1) \\ U_c = \frac{T_r}{M} F_2 + v_{\varphi_r} \text{sign}(S_2) \end{cases} \quad (7)$$

$v_{\Omega}$  et  $v_{\varphi_r}$  sont des gains positifs.

### 3.2 Synthèse de la commande par logique floue

Une commande floue FLC est introduite pour remplacer la fonction , de telle sorte que la trajectoire d'état peut atteindre et se déplacer sur le long de la surface de changement, une bonne dynamique en régime permanent peut être obtenue par la combinaison de la CMG et la FLC [1, 3, 5].

## 4. RESULTATS DE SIMULATION

Afin de conclure sur les performances de l'utilisation d'une commande par mode glissant floue, nous allons présenter les simulations réalisées sur une machine asynchrone alimentée par un onduleur de tension commandé en tension, le schéma bloc de cette simulation est présenté par la figure 2.

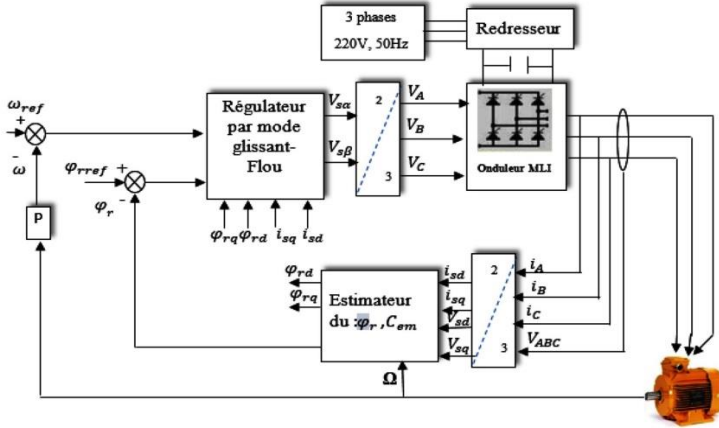


Fig. 2: Schéma de la structure de commande la commande CMG-Flou

### 4.1 Interprétation des résultats

Les essais sont réalisées pour un démarrage à vide avec application d'un couple de charge compris entre 0.8 s et 1.6 s. Puis une inversion du sens de rotation de 150 rad/s à -150 rad/s à l'instant  $t=2.2$  s, la simulation est réalisée en utilisant le logiciel Simulink sous l'environnement Matlab.

#### 4.1.1 Un démarrage à vide suivi par une introduction d'un couple de charge

La figure 3 représente l'évolution du comportement de la MAS, après l'introduction d'un couple de charge. Les résultats montrent une réponse de vitesse satisfaite ou la vitesse atteint sa valeur de consigne avec un dépassement très faible, on note aussi un bon découplage entre le couple électromagnétique et le flux lors de l'application de la charge qui est rapidement rejeté.

#### 4.1.2 Un démarrage à vide suivi d'une inversion du sens de rotation

Les allures présentées sur la figure 4 qu'on obtient, suite à un démarrage à vide suit par une variation de la consigne 150 rad/s à -150 rad/s à l'instant 2.2 s. D'après les résultats illustrés dans la figure 4, on observe que la réponse est très satisfaisante, rapide et précise aussi l'apport de l'introduction d'un contrôleur flou s'est manifesté par une diminution nette du phénomène de chattering.

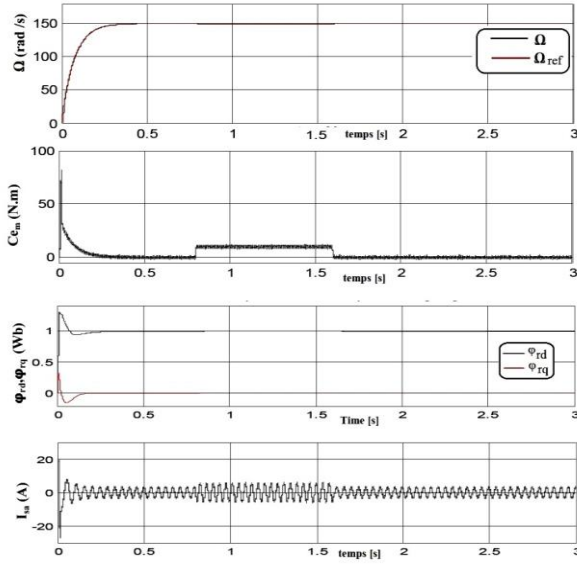


Fig. 3: Performances de la commande CMG-Flou lors d'un démarrage à vide et en charge  $C_n=10$  N.m

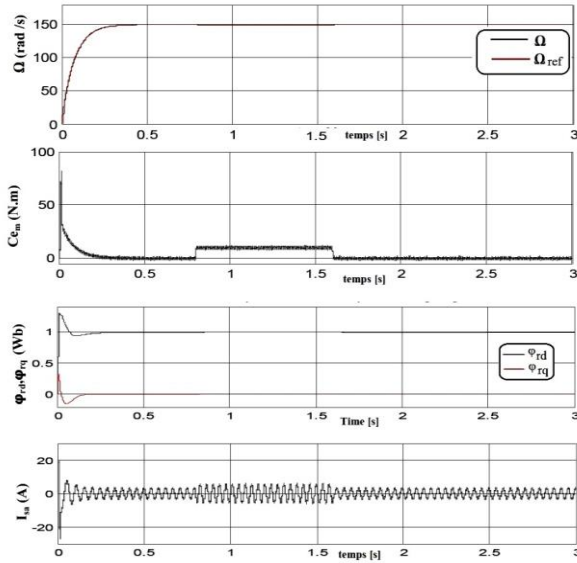


Fig. 4: Performances de la commande CMG-Floue lors d'une inversion de sens de rotation

#### 4.1.3 Essai avec variation des paramètres nominaux

Nous avons prévu une série d'essais dont les tests sont effectués au démarrage à vide suivi de l'application d'un couple de charge de 10 N.m entre  $t = 0.8$  s et 1.6 s.

##### 4.1.3.1 Essai avec variation de la résistance rotorique $R_r$

Pour tester la robustesse de la commande présentée, on a opté pour des variations de -15 % à 20 % de la valeur nominale  $R_m$  durant la simulation.

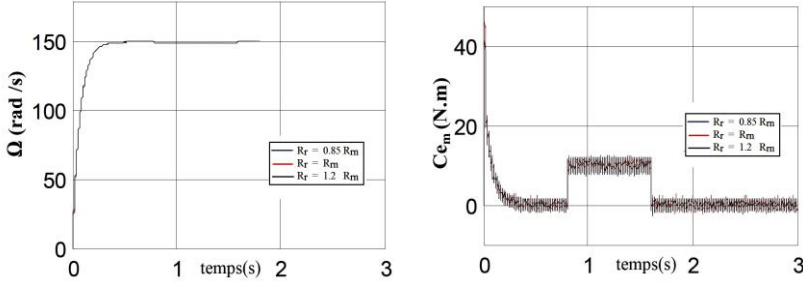


Fig. 5: Performances de la commande CMG-Floue - essai avec variation de  $R_r$

##### 4.1.3.2 Essai avec variation de l'inertie

Pour tester la robustesse de la commande présentée, on a opté pour des variations de -15 % à 20 % de la valeur nominale de  $J_m$  durant la simulation.

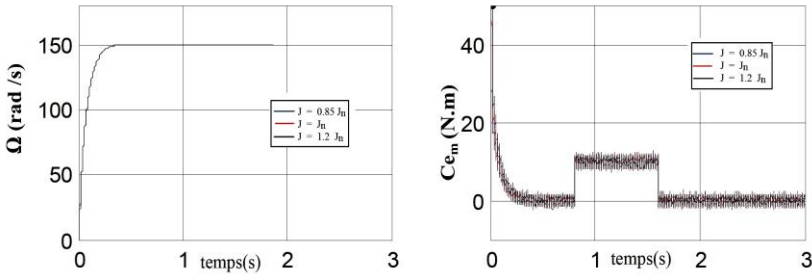


Fig. 6: Performances de la commande CMG-Floue - essai avec variation de  $J$

Vu les résultats présentés dans les figures 5 et 6, obtenus pour des variations de -15% à 20 % de la valeur nominale de  $R_r$  et de  $J$  durant la simulation. On note aucun effet sur les performances de la stratégie de commande CMG-Floue qui est insensible aux variations de la résistance rotorique  $R_r$  et le moment d'inertie.

Le **Tableau 1** donne un récapitulatif des trois (03) commandes étudiées; la commande par mode glissant, 'CMG', la commande par la logique floue, 'FLC' et la commande par mode glissant-flou, 'CMG-Flou'.

**Tableau 2:** Récapitulatif de chaque commande

|                 | Temps de<br>réponse- 5% (s) | Temps de<br>montée (s) | Dépassement<br>(%) | Erreur statique<br>(rad/s) |
|-----------------|-----------------------------|------------------------|--------------------|----------------------------|
| <b>CMG</b>      | 0.1469                      | 0.0835                 | 0.04 %             | 0.015                      |
| <b>FLC</b>      | 0.2221                      | 0.1554                 | 0 %                | 0.3                        |
| <b>CMO-Flou</b> | 0.212                       | 0.1369                 | 0 %                | 0.01                       |

Selon les résultats et le **Tableau 1**, il s'avère des performances très satisfaisantes de poursuite des stratégies de commande CMG, FLC et CMG-Flou, où la vitesse suit correctement la trajectoire de référence donnée avec une erreur quasiment nulle et un rejet parfait de perturbation.

On observe qu'il y a des oscillations avec le contrôleur CMG au niveau de l'allure du couple électromagnétique. la combinaison d'un contrôleur FLC, ces oscillations sont fortement atténuées, ceci met en relief l'élimination du phénomène de 'chattering'.

## 6. CONCLUSION

Dans cet article, une nouvelle commande basée sur la combinaison de deux techniques CMG-Floue, a été proposée. Les différents résultats de la simulation obtenus montrent des améliorations des performances et une bonne robustesse vis-à-vis des perturbations du moteur, en l'occurrence sous l'effet des variations des paramètres et de la charge.

Cette combinaison a permis l'élimination de l'effet de phénomène brutement est une bonne poursuite de trajectoire en régime dégradé de fonctionnement du moteur asynchrone étudié.

### ANNEXE: Paramètres de la machine asynchrone

04 pôles, triphasée, une puissance de 1.5 kW, une tension ( $\Delta / Y$ ) de (220/380) V, un courant ( $\Delta / Y$ ) de (6, 4/3, 7) A, un couple nominal de 10 N.m,  $\Omega = 1420$  tr/mn, une fréquence de 50 Hz,  $R_r = 3.805 \Omega$ ,  $R_s = 4.85 \Omega$ ,  $L_r = 0.274$  H,  $L_m = 0.258$  H,  $L_s = 0.274$  H,  $J = 0.031$  kg.m<sup>2</sup>,  $f = 0.00114$  N.m.s/rad.

## REFERENCES

- [1] R.F. Abdelgoui, '*Conception d'un Contrôleur à Logique Floue Basé sur la Théorie des Modes Glissants Appliquée à la Machine Asynchrone Triphasée*', Mémoire de Magister, ENP d'Oran, 2016.
- [2] R.F. Abdelgoui et M. Zerikat, '*Comparaison des Performances des Régulateurs PI et PI-Flou à Gains adaptés pour la Commande Vectorielle Indirecte d'une Machine Asynchrone Triphasée*', Proceeding, Third International Conference on Power Electronics and Electrical Drives, 'ICPEED'14. 10-11 December, Oran, Algérie.
- [3] T. Laamayed, '*Commande Optimale d'une Machine Asynchrone Apport de la Logique Floue*', Mémoire de Magister, Université de Batna, 2008.
- [4] Y. Zouaoui, '*Commande par Mode Glissant des Courants Statoriques de la Machine Asynchrone*', Mémoire de Magister, Université Farhat Abbas de Sétif, 2010.
- [5] I. Bendaas, '*Conception d'une Commande par Mode de Glissement Flou d'un Moteur à Induction*', Mémoire de Magister, Université de Batna, 2011.
- [6] K.M. Arun Prasad, A. Unnikrishnan and N. Usha, '*Fuzzy Sliding Mode Control of a Switched Reluctance Motor*', Global Colloquium in Recent Advancement and Effectual Researches in Engineering, Science and Technology, 'RAEREST', 2016.
- [7] J. Soltani and R. Yazdanpanah, '*Robust Backstepping Control of Induction Motor Drives Using Artificial Neural Networks*', Proceedings of the 5<sup>th</sup> IEEE International Conference on Power Electronics and Motion Control, Vol. 2, pp. 1 - 5, Aug 14-16, 2006.

- [8] L. Barazane, P. Sicard and R. Ouiguini, '*Cascade Fuzzy Variable Structure Control of Induction Motor Based on the Approach of Fuzzy Modelling of Ben-Ghalia*', International Journal of Systems Science, Vol. 40, N°3, pp. 309 - 326, 2009.
- [9] M. Zerikat, M. Chebre et Y. Bendaha, '*Adaptation des Paramètres d'un Contrôleur PI par un FLC Appliqué à un Moteur Asynchrone*', 4<sup>th</sup> International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP', 03 - 04 November, 2007.
- [10] K. Bedoud, B.R. Lakel, M. Ali-Rachedi, S. Lekhchine and T. Bahi, '*Modélisation d'une Chaîne de Conversion d'Energie Eolienne Basée sur une Machine Asynchrone à Double Alimentation*', 21<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique, 26 au 30 Août, Bordeaux, France, 2013.