

Performances des structures mutuelles adaptatives MRAS et MRAS-Flou appliquées au contrôle sans capteur de vitesse pour actionneurs asynchrones

Abdelkader Mechernene ⁽¹⁾, Mokhtar Zerikat ⁽²⁾, Nordine Benouzza ⁽³⁾

⁽¹⁾ Département de GEE, Université Abou-Bekr Belkaïd, Tlemcen

⁽²⁾ Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Oran

⁽³⁾ Département d'Electrotechnique, Université des Sciences et de la Technologie, Oran

mechernene_aek@hotmail.com, mokhtar.zerikat@enset-oran.dz, benouzza@yahoo.com

Reçu le : 27/12/2014

Accepté le : 22/04/2015

Résumé : Le présent article est consacré à la comparaison des performances de deux structures adaptatives basées sur l'approche MRAS, appliquées au contrôle sans capteur de vitesse pour moteurs asynchrones. Les deux structures proposées intègrent l'estimation de la vitesse et celle des résistances du moteur. Ces deux techniques ont pour objectif l'amélioration des performances de l'estimation de la vitesse, mais aussi de maintenir le découplage du contrôle vectoriel, en cas de variations des résistances. L'analyse des résultats obtenus montre une amélioration des performances en faveur de l'estimateur flou, à grande vitesse, mais également aux faibles vitesses, où l'on constate une perte de l'observabilité.

Mots clés : Moteur asynchrone, Logique floue, Système adaptatif à modèle de référence, Estimation de la vitesse, Robustesse paramétrique.

NOMENCLATURE

V, I, ψ	Tension, courant, flux magnétique
v_{sd}, v_{sq}	Tensions statoriques d'axes d et q
$v_{s\alpha}, v_{s\beta}$	Tensions statoriques d'axes α et β
i_{sd}, i_{sq}	Courants statoriques d'axes d et q
$i_{s\alpha}, i_{s\beta}$	Courants statoriques d'axes α et β
ψ_{rd}, ψ_{rq}	Composantes du flux rotorique d'axes d et q
$\psi_{s\alpha}, \psi_{s\beta}$	Tensions statoriques d'axes α et β
R_{sn}, R_{rn}	Résistances statorique et rotorique nominales
R_s, R_r	Résistances statorique et rotorique
L_s, L_r, L_m	Inductances statorique, rotorique et mutuelle
T_s, T_r	Constantes de temps du stator et du rotor: $T_s = L_s / R_s$; $T_r = L_r / R_r$
σ	Coefficient de dispersion : $\sigma = 1 - (L_m^2 / L_s L_r)$
C_r, C_{em}	Moments du couple électromagnétique et du couple de charge
K_f, J	Coefficient de frottement et inertie des parties en rotation
ω_s, ω_r	Pulsations statorique, rotorique et de glissement : $\omega_s = \omega_r + \omega_{gl}$
θ_s, Ω	Position du flux rotorique et vitesse du rotor: $\Omega = \omega_r / p$

$$K_{sr} \quad K_{sr} = (R_s / R_{sn}) = (R_r / R_{rn})$$

1. INTRODUCTION

Ces dernières années, la commande sans capteur de vitesse du moteur asynchrone est devenue une préoccupation majeure pour les industriels, et une thématique de recherche importante pour la communauté scientifique. Ainsi, de nombreuses stratégies de commande sans capteur ont été développées afin de doter la machine asynchrone de hautes performances assurant des dynamiques rapides et précises. Une grande partie des méthodes proposées est basée sur des observateurs d'état tels que l'observateur déterministe de Luenberger [1], le filtre stochastique de Kalman [2] ou les estimateurs avec système adaptatif à modèle de référence (MRAS) [3] [4].

Mais ces techniques dépendent du modèle mathématique du moteur asynchrone, pour lequel on observe la perte de l'observabilité à basse vitesse. De plus dans cette zone de fonctionnement, les phénomènes d'induction sont fortement diminués et l'information vitesse disparaît. Donc, les performances dynamiques se dégradent à basses vitesses ce qui s'aggrave avec la dérive des paramètres du moteur. Aussi, la commande sans capteur du moteur asynchrone reste problématique à faible vitesse, et ces techniques échouent à se substituer au capteur de vitesse.

L'approche utilisant un système adaptatif à modèle de référence basée sur les flux rotoriques, développé par C. Schauder [4], est de mise en œuvre simple et fournit de ses bonnes performances, toutefois les variations de la résistance statorique affectent sa précision à faible vitesse. Les approches basées sur les forces électromotrices [5], ou sur la puissance réactive [6] ont été suggérées, cependant les performances obtenues sont encore souvent limitées.

D'autre part, la plupart des travaux relatés dans la littérature traitent séparément les problèmes de suppression du capteur de vitesse et de la sensibilité paramétrique de la commande vectorielle essentiellement liée aux variations de la résistance rotorique. Il s'avère donc que l'estimation simultanée des résistances est de la plus haute importance pour un fonctionnement stable et précis dans une large gamme de vitesse, et spécialement dans la région des faibles vitesses [7]-[8].

L'objectif de ce travail consiste en la comparaison des approches MRAS-Mutuel et MRAS-Mutuel-Flou, intégrant l'estimation des résistances, afin de développer une commande à flux rotorique orientée sans capteur,

robuste, précise, rétablissant le découplage entre le flux et le couple électromagnétique.

2. APPROCHE MRAS-MUTUEL

L'approche du MRAS-Mutuel est basée sur la comparaison de deux estimateurs de flux rotoriques, obtenues par des formulations différentes. Initialement développé par V. Vasic et al [9], elle permet l'estimation de la vitesse et de la résistance statorique du moteur. Pour l'estimation des composantes du flux rotorique, les deux estimateurs nécessitent uniquement la mesure des tensions et des courants statoriques exprimés dans le repère (α, β) .

Le premier estimateur, repose sur les équations statoriques d'un modèle en tension, indépendant de la vitesse et lié explicitement à la résistance statorique. Son expression est donnée par le système d'équation (1) :

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} = \frac{L_r}{L_m} \cdot (v_{s\alpha} - R_s \cdot i_{s\alpha} - \sigma \cdot L_s \cdot \frac{di_{s\alpha}}{dt}) \\ \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} = \frac{L_r}{L_m} \cdot (v_{s\beta} - R_s \cdot i_{s\beta} - \sigma \cdot L_s \cdot \frac{di_{s\beta}}{dt}) \end{cases} \quad (1)$$

Le deuxième estimateur est décrit par les équations rotoriques d'un modèle en courant, lié explicitement à la vitesse et indépendant de la résistance statorique. Le système d'équation (2) détermine son modèle :

$$\begin{cases} \frac{d\hat{\psi}_{r\alpha}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} \cdot i_{s\alpha} - \frac{1}{T_r} \cdot \hat{\psi}_{r\alpha} - \hat{\omega}_r \cdot \hat{\psi}_{r\beta} \\ \frac{d\hat{\psi}_{r\beta}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} \cdot i_{s\beta} + \hat{\omega}_r \cdot \hat{\psi}_{r\alpha} - \frac{1}{T_r} \cdot \hat{\psi}_{r\beta} \end{cases} \quad (2)$$

Pour l'estimation de la vitesse, le modèle en tension est utilisé comme modèle de référence et le modèle en courant sert de modèle ajustable. L'identification de la résistance statorique est obtenue en permutant les rôles des estimateurs. Deux mécanismes d'adaptation prennent en entrée les signaux d'erreur $e_{\psi r}$ et e_{RS} , significatifs des écarts existant entre les deux estimateurs de flux.

$$e_{\psi r} = \hat{\psi}_{r\beta V} \cdot \hat{\psi}_{r\alpha I} - \hat{\psi}_{r\alpha V} \cdot \hat{\psi}_{r\beta I} \quad (3)$$

$$e_{RS} = i_{s\alpha} \cdot (\hat{\psi}_{r\alpha V} - \hat{\psi}_{r\alpha I}) + i_{s\beta} \cdot (\hat{\psi}_{r\beta V} - \hat{\psi}_{r\beta I}) \quad (4)$$

$(\hat{\psi}_{r\alpha V}, \hat{\psi}_{r\beta V})$ et $(\hat{\psi}_{r\alpha I}, \hat{\psi}_{r\beta I})$ étant respectivement les composantes du flux rotorique fournies par les estimateurs en tension et en courant.

Les mécanismes d'adaptation délivrent les valeurs estimées de la vitesse et de la résistance statorique en les réinjectant dans leurs modèles ajustables respectifs, afin de minimiser les écarts e_{ψ_r} et e_{R_s} existant.

Pour fournir une réponse rapide en garantissant la stabilité du système, V. Vasis et al [9] ont proposé deux lois proportionnelles et intégrales pour définir les mécanismes d'adaptation :

$$\hat{\omega}_r = k_{p\omega_r} \cdot e_{\psi_r} + k_{i\omega_r} \cdot \int e_{\psi_r} \cdot dt \quad (5)$$

$$\hat{R}_s = k_{pR_s} \cdot e_{R_s} + k_{iR_s} \cdot \int e_{R_s} \cdot dt \quad (6)$$

$k_{p\omega_r}, k_{pR_s}$ et $k_{i\omega_r}, k_{iR_s}$ sont respectivement les gains des deux contrôleurs PI constituant les mécanismes d'adaptation.

Afin d'améliorer la précision de l'estimateur et maintenir le découplage, lorsque la valeur de la résistance rotorique varie, nous proposons une extension à sa version initiale basée sur l'hypothèse que si les enroulements du moteur sont pratiquement à la même température, ses résistances varient de manière proportionnelle. La valeur de la résistance du rotor peut alors être déterminée par la relation suivante :

$$\hat{R}_r = \hat{R}_s \cdot \frac{R_{rn}}{R_{sn}} \quad (7)$$

La résistance rotorique est déduite à partir de la seule estimation de la résistance statorique, ce qui réduit le coût algorithmique.

La figure 1 illustre la nouvelle structure de l'estimateur MRAS-Mutuel.

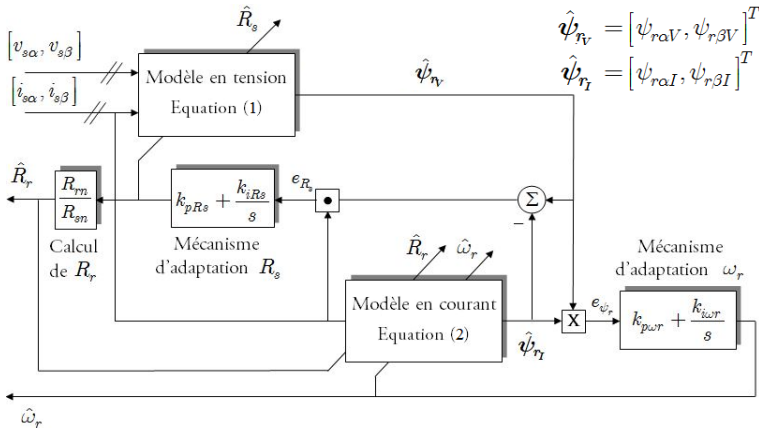


Fig.1- Structure de l'estimateur MRAS-Mutuel proposé

3. APPROCHES DU MRAS-MUTUEL FLOU

L'idée de cette approche consiste à modifier la structure de l'estimateur en remplaçant les régulateurs PI, formant les mécanismes d'adaptation, par deux contrôleurs intelligents de type PI-Flou.

L'analyse du comportement du MRAS-Mutuel montre que les grandeurs significatives sont l'erreur e_{ψ_r} et sa variation de_{ψ_r} ; l'erreur e_{R_s} et sa variation de_{R_s} . La figure 2 montre la structure de l'estimateur MRAS-Mutuel-Flou proposé.

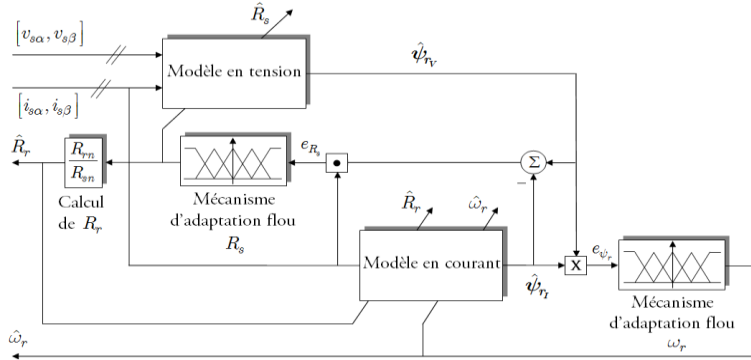


Fig. 2- Structure de l'estimateur hybride MRAS-Mutuel-Flou proposé

Les deux contrôleurs sont choisis à sortie incrémentale et avec des structures identiques comme illustré par la figure 3.

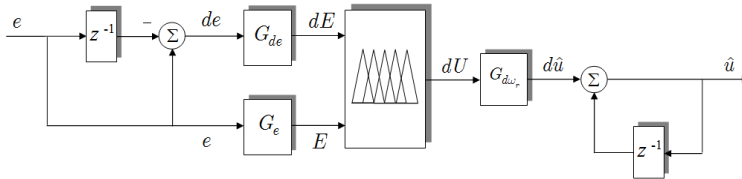


Fig. 3 - Structure de principe des mécanismes flous

Les entrées sont déterminées à l'instant k de la manière suivante :

$$E(k) = G_e \cdot e(k) \quad (8)$$

$$dE(k) = G_{de} \cdot [e(k) - e(k-1)] \quad (9)$$

et les valeurs estimées par deux relations de la forme :

$$\hat{u}(k) = \hat{u}(k-1) + G_{du} \cdot dU(k) \quad (10)$$

Les gains G_e , G_{de} et G_{du} sont introduit pour normaliser et régler les sensibilités les entrées et la sortie des contrôleurs. Des fonctions d'appartenance triangulaires et trapézoïdales ont été retenues. Pour les

deux contrôleurs, l'univers de discours est divisé selon une partition de cinq sous-ensembles flous (NG ; N ; EZ ; P ; PG). La méthode « max-min » de Mamdani a été choisie pour le traitement des inférences, et la méthode de défuzzification est celle du centre de gravité.

La base de règle retenue possède 25 règles données dans le tableau 1.

Tab.1- Matrice d'inférence

$e \backslash de$	du				
	NG	N	EZ	P	PG
NG	NG	NG	N	N	EZ
N	NG	N	N	EZ	PG
EZ	NG	N	EZ	P	PG
P	NG	EZ	P	P	PG
PG	EZ	P	P	PG	PG

La figure 4 représente la partition de l'univers de discours normalisé et les fonctions d'appartenance.

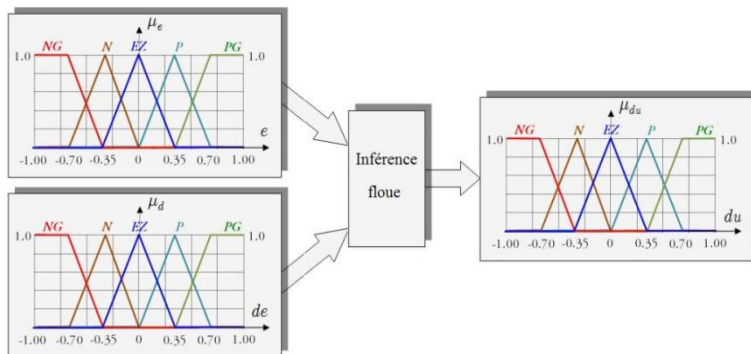


Fig. 4 - Distribution des fonctions d'appartenance

4. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Des tests de simulation ont été effectués sous le logiciel MATLAB/Simulink. Sachant que la perte de l'observabilité est vérifiée lorsque la pulsation statorique ω_s est nulle et la vitesse ω_r du rotor est inchangée, la consigne de vitesse présente des zones d'inobservabilité afin que les tests soient significatifs.

Dans ce but, la consigne de vitesse impose un profil trapézoïdal variant entre +100 et -100 rad/s, présentant deux zones de non-observabilité. L'une, entre 1,7 s et 2,5 s, avec une vitesse nulle et sans couple de charge; l'autre entre 4 s et 4,8 s, à -4 rad/s avec une charge de $C_r = 5$ N.m.

Les figures 5 et 6 montrent le comportement de la commande vectorielle à flux rotorique orienté sans capteur de vitesse, pour des tests avec les paramètres nominaux. Le découplage couple électromagnétique-flux est bien maintenu dans les différentes phases et le passage dans les zones de non-observabilité est satisfaisant.

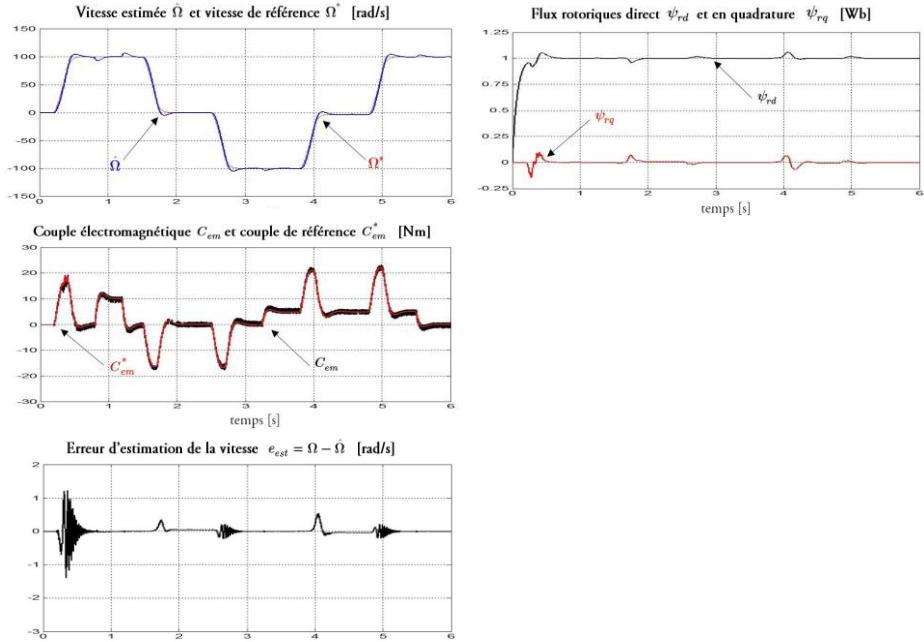


Fig. 5 - Performance de la commande IFOC avec l'estimateur MRAS-Mutuel : Essai avec paramètres nominaux

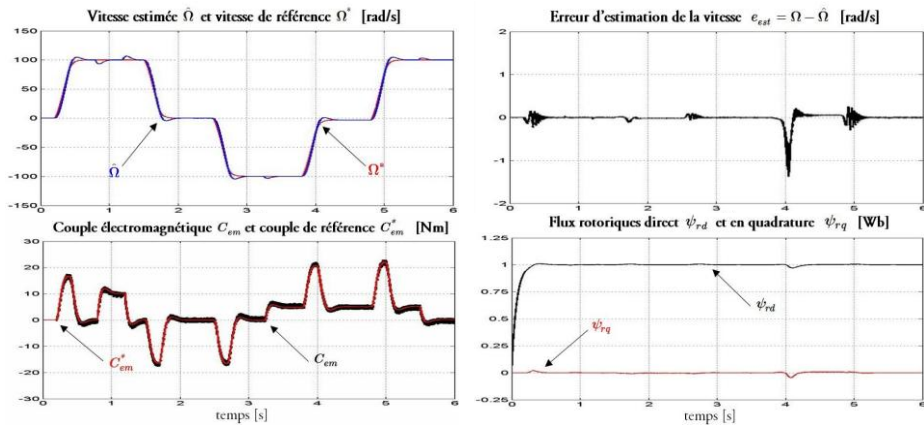


Fig. 6 -Performance de la commande IFOC avec l'estimateur MRAS-Mutuel-Flou :
Essai avec paramètres nominaux

L'erreur d'estimation de la vitesse reste très faible pour les deux estimateurs MRAS-Mutuels, présentant de petites oscillations lors du démarrage et des écarts mineurs lors des changements de vitesse. Toutefois, l'estimateur MRAS-Mutuel-Flou présente un comportement meilleur en termes de précision et de découplage.

Les figures 7 et 8 montrent le comportement de la commande à flux rotorique orienté, associée aux estimateurs MRAS-Mutuel-Flou, pour des fonctionnements avec des variations de -15 et +20% autour des valeurs nominales R_{sn} et R_{rn} des résistances du moteur.

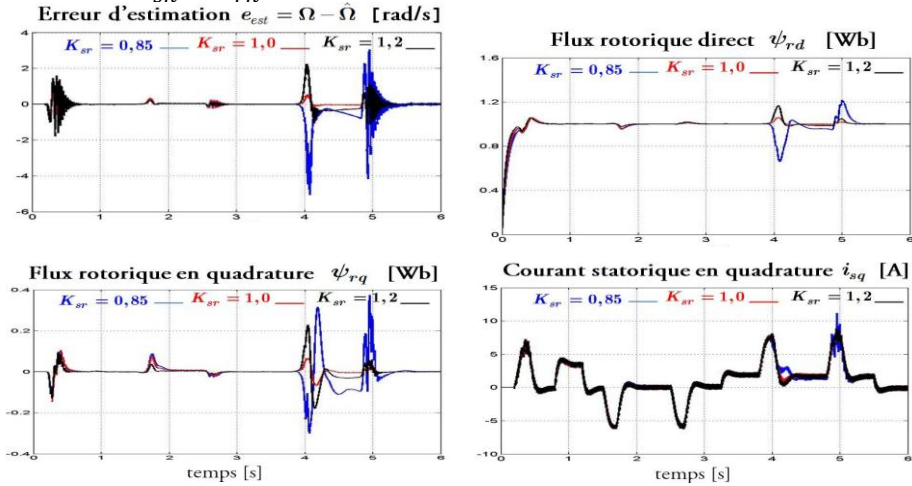
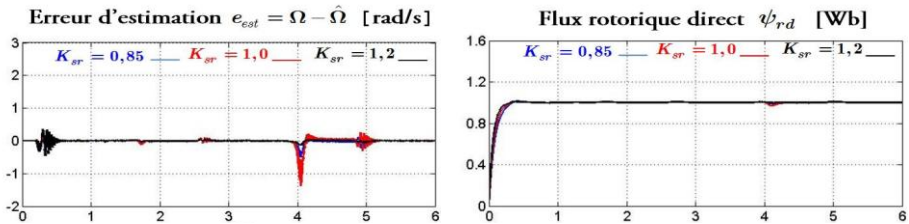


Fig. 7 - MRAS-Mutuel : Essais avec variations de -15 et +20% autour des valeurs nominales des résistances des enroulements du stator et du rotor



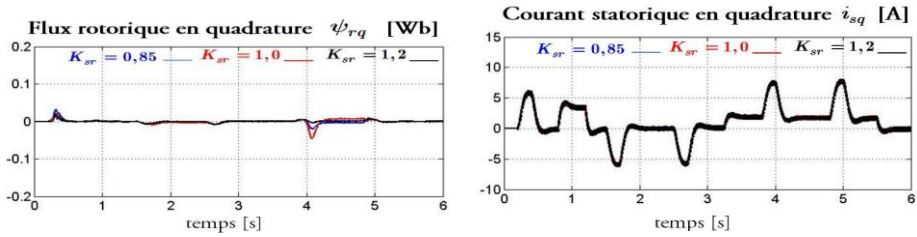


Fig. 8 - MRAS-Mutuel-Flou : Essais avec variations de -15 et +20% autour des valeurs nominales des résistances des enroulements du stator et du rotor

Les réponses montrent une très faible sensibilité aux variations des résistances. Les erreurs d'estimation restent faibles, l'orientation du flux est bien conservée pendant le démarrage et dans les zones d'inobservabilité. On note, dans le cas du MRAS-Mutuel classique, des oscillations plus fortes lors des changements de vitesse. La robustesse de l'estimateur flou est améliorée, les changements de comportement étant plus faibles lorsque les valeurs des résistances varient. La supériorité des performances du MRAS-Mutuel-Flou est donc démontrée.

Les figures 9 et 10 illustrent, pour le MRAS-Mutuel et pour le MRAS-Mutuel-Flou, l'estimation des résistances pour des fonctionnements avec les valeurs nominales, puis avec des variations de -15% et +20%.

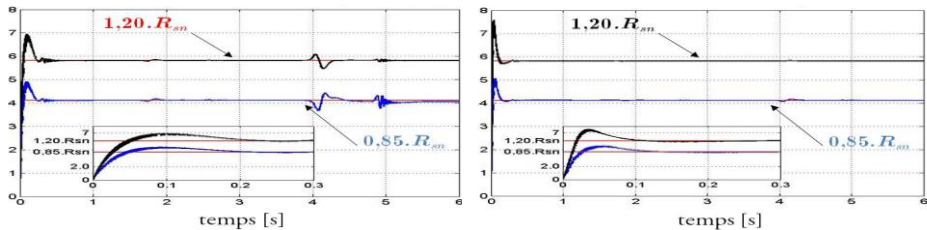


Fig.9 - Estimation de la résistance statorique - Essai avec variations de -15 et +20% autour des valeurs nominales des résistances

L'estimation des résistances converge de manière précise, en 200 ms pour l'estimateur MRAS-Mutuel et 100 ms dans le cas du MRAS-Mutuel-Flou, avec une très forte insensibilité aux modifications de vitesse.

5. CONCLUSION

Cette étude est consacrée à la comparaison des performances de deux estimateurs à structures adaptatives : le MRAS-Mutuel et le MRAS-Mutuel-Flou, appliquées au contrôle sans capteur de vitesse pour

moteurs asynchrones. L'objectif étant, non seulement de supprimer le capteur mécanique de vitesse, mais également de rétablir le découplage entre le flux et le couple électromagnétique du contrôle vectoriel. Les stratégies proposées sont analysées et leurs performances sont évaluées et comparées par des simulations numériques pour des fonctionnements à grande et faible vitesse avec des zones de non-observabilité. Les résultats obtenus confirment la faisabilité des deux approches et montrent la supériorité de l'estimateur MRAS-Mutuel basé sur la logique floue. En effet, cette technique permet d'améliorer les performances de l'entraînement électrique en termes de précision et de robustesse paramétrique de l'estimation en maintenant un découplage efficace et pratiquement insensible à ces variations.

ANNEXES

Paramètres nominaux du moteur asynchrone

1,5 kW ; 220/380 V ; 3,7/6,5 A ; 50 Hz ; 1420 tr/mn ; couplage étoile
 $R_s=4,85 \Omega$; $R_r=3,805 \Omega$; $L_s=0,274$ H ; $L_r=0,274$ H ; $L_m=0,258$ H
 $J=0.031$ kg.m² ; $K_f=0.00334$ N.m.s/rad

REFERENCES

- [1] J. Bocker, S. Mathapati, State of the Art of Induction Motor Control, Proceeding of IEEE International Conference on Electric Machines Drives, Vol. 2, (2007) 1459-1464
- [2] K. Szabat, T. Orłowska-Kowalska, Performance Improvement of Industrial Drives with Mechanical Elasticity using Nonlinear Adaptive Kalman Filter, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55 No. 3, (2008) 1075-1084
- [3] S. Challa, R.N. Ravisankar, An Artificial-Intelligence Based Induction Motor Speed Control and Estimation using Conventional MRAS with Dynamic Reference Model. Journal of Electrical and Electronics Engineering, Vol. 1, No. 2, (2012) 15-21
- [4] C. Schauder, Adaptive Speed Identification for Vector Control of Induction Motors without Rotational Transducers, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28 No. 5 (1992) 1054-1061
- [5] M. Rashed, A.F. Stronach, A Stable Back-EMF MRAS-based Sensorless Low Speed Induction Motor Drive Insensitive to Stator Resistance Variation. IEE Proceedings Electric Power Applications, Vol. 151 No. 6, (2004) 685-693

- [6] H. Keyuan, Z. Ying, H. Shoudao, X. Lei, A MRAS Method for Sensorless Vector Control of Induction Motor based on Instantaneous Reactive Power. International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS'2010) Sapporo Japan, (2010) 1396-1400
- [7] L. Jie, R. Haipeng, H. Qifu, Z. Yanru, A Novel on-line MRAS Rotor Resistance Identification Method Insensitive to Stator Resistance for Vector Control Systems of Induction Machines. IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE'2010), (2010) 591-595
- [8] G. Tarchala, T. Orlowska-Kowalska, M. Dybkowski, MRAS-Type Speed and Flux Estimator with Additional Adaptation Mechanism for the Induction Motor Drive. Transactions on Electrical Engineering, Vol. 1 No. 1 (2012) 7-12
- [9] V. Vasic, S.N. Vukosavic, E. Levi, A Stator Resistance Estimation Scheme for Speed Sensorless Rotor Flux Oriented Induction Motor Drives, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 18 No. 4 (2003) 476-483