



HAL
open science

Commande par mode glissant floue appliquée à un système de conversion d'énergie éolienne

Tarek Aounallah, Nawal Ferhat, Najib Essounbouli, Abdelaziz Hamzaoui,
Farid Bouchafaa

► To cite this version:

Tarek Aounallah, Nawal Ferhat, Najib Essounbouli, Abdelaziz Hamzaoui, Farid Bouchafaa. Commande par mode glissant floue appliquée à un système de conversion d'énergie éolienne. Les rencontres francophones sur la logique floue et ses applications,, Nov 2024, Brest, France. hal-04820641

HAL Id: hal-04820641

<https://hal.science/hal-04820641v1>

Submitted on 5 Dec 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Commande par mode glissant floue appliquée à un système de conversion d'énergie éolienne

Fuzzy Sliding Mode Control of a wind energy conversion system

T. AOUNALLAH¹ N. FERHAT^{1,2} N. ESSOUNBOULI¹ A. HAMZAOU¹ F. BOUCHAFAA²

¹ Université de Reims Champagne-Ardenne, CReSTIC, Campus Moulin de la Housse, 51100 Reims, France

² Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, LINS, BP 32 El Alia Bab Ezzouar, 16111, Alger, Algérie

tarek.aounallah@univ-reims.fr

nawal.ferhat@univ-reims.fr

najib.essounbouli@univ-reims.fr

abdelaziz.hamzaoui@univ-reims.fr

fbouchafa@gmail.com

Résumé :

Cette étude porte sur la mise en œuvre d'une approche de contrôle robuste pour un système de conversion d'énergie éolienne basé sur un générateur asynchrone à double alimentation. L'objectif est de proposer une technique de contrôle qui, appliquée au convertisseur côté générateur, puisse assurer une extraction maximale de l'énergie éolienne. Le schéma de contrôle étudié combine la technique par mode glissant d'ordre fractionnaire avec des systèmes flous adaptatifs Takagi-Sugeno. Les lois de contrôle qui en résultent améliorent la robustesse et les performances de suivi du système tout en éliminant le problème du chattering issu de la partie discontinue de la commande par mode glissant conventionnel. La stabilité globale du système est démontrée via la théorie de Lyapunov. Les résultats de simulation, obtenus via MATLAB/Simulink, illustrent l'efficacité de l'approche proposée.

Mots-clés :

Systèmes Flous Adaptatifs, Commande par mode glissant, Approche fractionnaire, GADA.

Abstract:

This paper presents a new robust control approach for a wind power conversion system based on a Doubly Fed Induction Generator (DFIG). The objective is to propose a control technique which, applied to the Generator side converter, can ensure a maximum extraction of wind energy. The studied control scheme combines the fractional sliding mode technique with the Takagi-Sugeno adaptive fuzzy systems. The resulting control laws improve the robustness and tracking performance of the considered system while eliminating the chattering problem of the conventional sliding control method. The system stability is demonstrated using the Lyapunov theory. Simulation results, obtained via MATLAB/Simulink, illustrate the effectiveness of the proposed approach.

Keywords:

Adaptive Fuzzy Systems, Sliding Mode Control, Fractional Approach, DFIG.

1 Introduction

L'industrie éolienne constitue un axe important du développement énergétique durable. Cette filière a énormément évolué ces dernières années, permettant aux différents types d'éoliennes de fournir des rendements plus importants et une meilleure intégration aux réseaux électriques[1]. Dotés de convertisseurs de puissance, les générateurs asynchrones à double alimentation (GADA) sont largement utilisés dans les systèmes de conversion d'énergie éoliens à vitesse variable. Le schéma de contrôle est composé d'une boucle interne dédiée à la régulation du courant et d'une boucle externe traitant du contrôle de vitesse/couple du générateur. Différentes commandes ont été développées pour améliorer les performances des systèmes éoliens [2].

Parmi ces méthodes, on peut citer les approches basées sur les correcteurs du type Proportionnelle Intégrale (PI) [3]–[4], la technique du backstepping [5]–[6], le contrôle par mode Glissant (MG) [7]–[8], etc.

En ce qui concerne la méthode par mode glissant, cette approche de contrôle est basée sur le principe d'un système à structure variable où la trajectoire d'état est amenée vers la surface de glissement à l'aide d'une logique de commutation appropriée. L'avantage est qu'en régime

glissant, la technique de contrôle MG se révèle insensible aux perturbations externe et variations paramétriques du système. Néanmoins, cette commande a été longtemps limitée par les oscillations issues des termes discontinues de la commande. Ce phénomène, appelé "chattering", a trouvé depuis de nombreuses solutions, telles que la méthode de la couche limite [9], le passage à une commande par mode glissant d'ordre supérieur [10], ou bien l'association avec les méthodes de la logique floue [11]. Au cours des dernières années, un intérêt particulier a été accordé à l'application du concept de calcul d'ordre fractionnaire dans des différents algorithmes de contrôle [12]. L'objectif est d'étendre les définitions mathématiques traditionnelles à un ordre approprié, ce qui permet d'obtenir des lois de contrôle plus précises et plus robustes qui améliorent les propriétés de convergence du système contrôlé.

Ce travail propose d'utiliser une méthode de contrôle fractionnaire robuste pour extraire la puissance maximale du système de conversion éolien à vitesse variable en présence de perturbations externes et de variations paramétriques. L'approche développée concerne un système équipé d'un générateur asynchrone et est orientée vers le contrôle du convertisseur côté générateur. La contribution de cet article est de proposer une approche qui combine les systèmes de logique floue adaptatifs Takagi-Sugeno avec un contrôleur par mode glissant d'ordre fractionnaire. L'objectif est d'exploiter les avantages de la méthode MG : bonnes performances de suivi, insensibilité aux incertitudes et aux variations paramétriques, tout en éliminant le problème de la "chattering". La stabilité du système est démontrée via la théorie de Lyapunov. Les résultats de simulation de l'approche de contrôle proposée ont été comparés, via Matlab/Simulink, aux méthodes par modes glissants classiques d'ordre entier et fractionnaire. Ce travail est organisé comme suit : la section 2 décrit le modèle GADA. La section 3 est dédiée au schéma de contrôle proposé. La section 4 concerne les résultats de simulation et enfin la conclusion dans la section 5.

2 Modélisation du système

La figure 1 montre un système de production d'énergie éolienne basé sur une GADA. Le rotor du générateur est connecté au réseau via des convertisseurs de puissance back-to-back. Le dispositif de production d'énergie électrique donne un aperçu global de la configuration sélectionnée. Le fonctionnement à "vitesse variable" consiste à contrôler la génératrice de manière à ce qu'elle produise le maximum d'énergie en fonction de l'intensité du vent capté.

Les techniques d'extraction de puissance maximale déterminent la vitesse de la turbine nécessaire permettant d'obtenir les performances souhaitées.

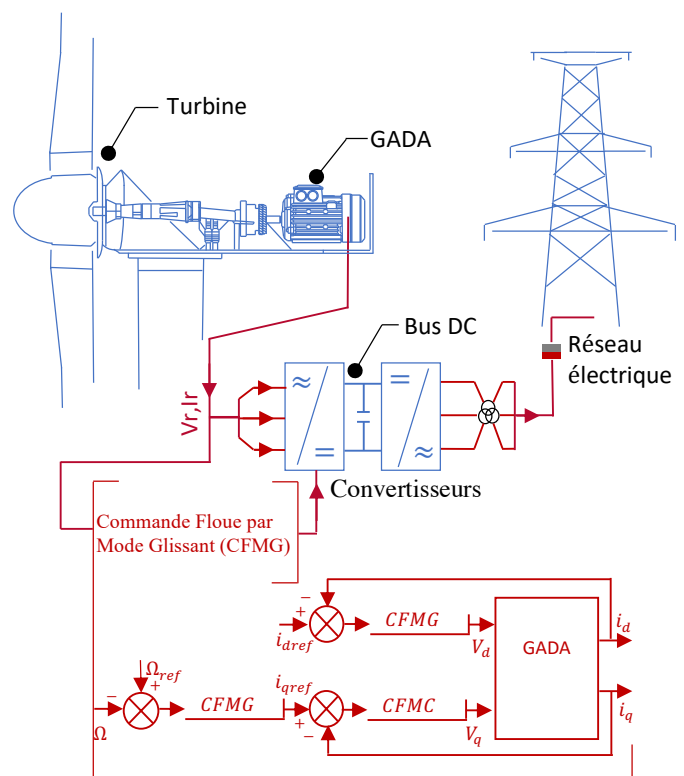


FIGURE 1 – Schéma général représentant la configuration sélectionnée d'une éolienne à vitesse variable

Diverses stratégies de contrôle peuvent être appliquées à chaque partie de ce système (turbine éolienne, convertisseur côté rotor et convertis-

seur côté réseau). Néanmoins, ce travail de recherche est principalement orienté vers l'étude de la commande de la génératrice.

La dynamique est représentée par le modèle mathématique suivant :

$$\begin{cases} \dot{I}_{dr} = -\gamma_r I_{dr} + \omega_r I_{qr} + \alpha_s \beta \varphi_{ds} - \beta V_{ds} \\ \quad + \left(\frac{1}{\sigma_r}\right) V_{dr} \\ \dot{I}_{qr} = -\gamma_r I_{qr} - \omega_r I_{dr} + \beta \omega \varphi_{ds} - \beta V_{qs} \\ \quad + \left(\frac{1}{\sigma_r}\right) V_{qr} \\ \dot{\varphi}_{ds} = -\alpha_s \varphi_{ds} + \alpha_s L_m I_{dr} + V_{ds} \\ \dot{\omega} = -P^2 \frac{\mu}{j} (I_{dr} \varphi_{qs} - I_{qr} \varphi_{ds}) + \frac{P}{j} \Gamma_m - \frac{f}{j} \omega \end{cases} \quad (1)$$

Où : $\alpha_s = \frac{R_s}{L_s}$; $\sigma_r = L_r \left(1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}\right)$; $\gamma_r = \frac{R_r}{\sigma_r} + \frac{R_s L_m^2}{L_s^2 \sigma_r}$; $\beta = \frac{L_m}{L_s \sigma_r}$; $\mu = \frac{3L_m}{2L_s}$; $\omega_r = \omega_s - \omega$.

Avec :

$V_{(dq)s}, V_{(dq)r}$	Tensions du stator et du rotor le long de l'axe dq
$\varphi_{(dq)s}, \varphi_{(dq)r}$	Flux du stator et du rotor le long de l'axe dq
$R_{s/r}$	Résistances du stator et du rotor
$I_{(dq)s}, I_{(dq)r}$	Courants du stator et du rotor le long de l'axe dq
$L_{s/r}, L_m$	Inductances du stator, du rotor et de l'inductance mutuelle
ω	Pulsation du réseau
$\omega_{s/r}$	Pulsations électriques respectivement du rotor et du stator
f	Coefficient de frottement
j	Moment d'inertie de la machine
P	Nombre de paires de pôles
Γ_m	Couple mécanique

La puissance fournie par le générateur est calculée comme suit :

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} (V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs}) \\ Q_s = \frac{3}{2} (V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs}) \end{cases} \quad (2)$$

Où : P_s , Q_s sont les puissances active et réactive du stator. Après certaines transformations mathématiques, nous aboutissant aux expressions suivantes :

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = F_1 + X_2 + \Delta_1 \\ \dot{X}_2 = F_2 + U + \Delta_2 \end{cases} \quad (3)$$

Avec :

$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix}$	Vecteur d'état
$U = \begin{bmatrix} V_{qr} \\ V_{dr} \end{bmatrix}$	Entrée du système
$X_1 = \begin{bmatrix} \omega \\ \varphi_s \end{bmatrix}$	Sortie contrôlée
$X_2 = \begin{bmatrix} I_{qr} \\ I_{dr} \end{bmatrix}$	Vecteur des courants du rotor

et :

$$\begin{cases} F_1 = (1 - b_1^{-1}(\cdot)) \dot{X}_1 + b_1^{-1}(\cdot) f_1(\cdot) \\ \Delta_1 = [\Delta_{11} \quad \Delta_{12}]^T = b_1^{-1}(\cdot) \delta_1(\cdot) \\ F_2 = (1 - b_2^{-1}(\cdot)) \dot{X}_2 + b_2^{-1}(\cdot) f_2(\cdot) \\ \Delta_2 = [\Delta_{21} \quad \Delta_{22}]^T = b_2^{-1}(\cdot) \delta_2(\cdot) \end{cases} \quad (4)$$

Où :

f_1	b_1	δ_1
$\begin{bmatrix} -\frac{f}{j} \omega \\ -\frac{R_s}{L_s} \varphi_{ds} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & A_1 \varphi_{ds} \\ \frac{R_s}{L_s} L_m & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{P}{j} \Gamma_m \\ \frac{1}{j} V_{ds} \end{bmatrix}$
f_2	b_2	δ_2
$\begin{bmatrix} A_2 I_{dr} + A_3 I_{qr} + A_4 \varphi_{ds} \\ A_2 I_{qr} - A_3 I_{dr} + A_5 \omega \varphi_{ds} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} L_s A_6 & 0 \\ 0 & L_s A_6 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} L_m V_{ds} A_6 \\ L_m V_{qs} A_6 \end{bmatrix}$

À noter que :

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{1}{j} P^2 \frac{L_m}{L_s} ; A_2 = \frac{-L_s^2 - R_s}{L_r L_s^2 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_r L_s}\right)} ; A_3 = \omega_s - \omega \\ A_4 &= R_s A_6 ; A_5 = \frac{A_6}{L_s} ; A_6 = A_2 \left(\frac{-L_s}{L_s^2 + R_s}\right) \end{aligned}$$

3 Synthèse du contrôleur

Cette section vise à trouver l'entrée de contrôle appropriée, qui peut garantir le suivi asymptotique de la sortie X vers le signal de référence. L'expression générale du modèle du générateur est donnée par :

$$\dot{X} = F + U_c + \Delta \quad (5)$$

Il convient de noter que le schéma de commande sélectionné nécessite le contrôle des composantes vitesse et flux ($X = X_1$, $F = F_1$, $U_c = X_2$ et $\Delta = \Delta_1$), et des courant direct et

en quadrature ($X = X_2, F = F_2, U_c = U$ et $\Delta = \Delta_2$).

3.1 Méthode de contrôle par MG fractionnaire

L'opérateur intégrro-différentiel d'ordre fractionnaire ${}_{t_0}D_t^m$ est donné comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} {}_{t_0}D_t^m = \begin{cases} \frac{d^m}{dt^m} & \Re(m) > 0 \\ 1 & \Re(m) = 0 \\ \int_{t_0}^t (dt)^{-m} & \Re(m) < 0 \end{cases} \\ \text{A noter que :} \\ \left| \begin{array}{l} m : \text{est l'ordre fractionnaire.} \\ \Re(m) : \text{la partie réelle de } m. \\ t_0 \text{ and } t : \text{limites du domaine} \\ \text{des opérateurs fractionnaires} \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (6)$$

L'expression générale de la surface de glissement d'ordre fractionnaire est donnée par :

$$\left\{ \begin{array}{l} S = e + K_s D_t^{-\mu} e \\ e = X_{ref} - X \end{array} \right. \quad (7)$$

La loi de commande $U_c(x)$ est définie comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} U_c(x) = U_{ceq}(x) + U_{cn}(x) \\ \text{A noter que :} \\ \left| \begin{array}{l} U_{ceq}(x) : \text{Commande équivalente.} \\ U_{cn}(x) : \text{Commande en commutation.} \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (8)$$

L'expression mathématique de U_{ceq} est donnée par :

$$U_{ceq} = \dot{X}_{ref} - F + K_s D_t^{-\mu} e \quad (9)$$

La fonction de Lyapunov est donnée par :

$$V = \frac{1}{2} S^T S \quad (10)$$

Sa dérivée temporelle est :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{V} = S^T \dot{S} \\ = S^T (\dot{X}_{ref} - F - X - \Delta) \end{array} \right. \quad (11)$$

L'expression mathématique de U_{cn} est donnée comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{cn} = cS + k \text{sign}(S) \\ c \text{ et } k > 0, |\Delta| \leq k, \end{array} \right. \quad (12)$$

Alors, l'expression de \dot{V} devient :

$$\dot{V}(x) = -cS^2 - S(k \text{sign}(S) + \Delta) \quad (13)$$

Ainsi, $\dot{V} \leq 0$, ce qui correspond à l'exigence de stabilité.

3.2 Méthode de contrôle floue par MG fractionnaire

Afin d'éliminer le problème de chattering, les systèmes de logique floue (\hat{u}) sont utilisés pour remplacer les termes en commutations " $K \text{sign}(S(x))$ " [13]-[14].

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{u}(S|\theta) = \theta^T \xi(S) \\ \text{A noter que :} \\ \left| \begin{array}{l} \hat{u}^*(S|\theta^*) = \theta^{*T} \xi(S) \\ = K^* \text{sign}(S(x)) \\ \hat{u}^*(S|\theta^*) : \text{la valeur optimale.} \\ \tilde{u}(S|\tilde{\theta}) = \hat{u}(S|\theta) - \hat{u}^*(S|\theta^*) \\ \tilde{u}(S|\tilde{\theta}) : \text{l'erreur d'approximation} \\ \text{minimale.} \\ \theta : \text{le vecteur de conclusion ajustable.} \\ \xi : \text{la matrice de régression.} \\ \tilde{\theta} = \theta - \theta^* \\ \tilde{\theta} : \text{l'erreur d'estimation} \\ \theta^* : \text{la valeur optimale de } \theta. \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (14)$$

Ce changement mathématique nous amène à introduire une nouvelle fonction de Lyapunov :

$$V = \frac{1}{2}S_1^T S + \frac{1}{2\gamma}\tilde{\theta}^T \tilde{\theta} \quad (15)$$

où γ désigne le taux d'apprentissage.

En appliquant la dérivée temporelle à l'équation (15), on obtient l'expression suivante :

$$\dot{V} = \begin{matrix} -\tilde{\theta}^T \left[S\xi - \frac{1}{\gamma}\dot{\tilde{\theta}} \right] \\ -S \left(\tilde{\theta}^* \xi + cS + \Delta \right) \end{matrix} \quad (16)$$

Pour garantir la stabilité qu'implique $\dot{V} \leq 0$, nous choisissons la loi adaptative suivante :

$$\dot{\tilde{\theta}} = \gamma S \xi \quad (17)$$

Ainsi, $\dot{V}(x)$ devient alors :

$$\dot{V}(x) = -cS^2 - S(k^* \text{sign}(S) + \Delta) \leq 0 \quad (18)$$

et en choisissant les valeurs appropriées de c et $k^* > 0$, $|\Delta| \leq k^*$, on obtient $\dot{V} \leq 0$

4 Simulations et résultats

Dans cette section, nous proposons d'évaluer les performances de l'approche développée en présence de perturbations externes et de variations paramétriques via MATLAB/Simulink pour une GADA de 1,5 kW.

Une procédure d'identification a d'ailleurs permis de définir ses paramètres électriques (Tableau 1).

TABLEAU 1 – Paramètres électriques de la GADA

R_s	2.25 Ω
R_r	0.7 Ω
L_s	0.1232H
L_r	0.1122H
L_m	0.1118
P	2
f	0

Dans un premier temps, nous soumettons la

génératrice à des perturbations externes traduisant des variations d'une part de l'intensité de la vitesse de rotation mécanique et d'autre part, de couple générateur (reflétant une fluctuation de la puissance électrique).

Dans un second temps, l'évaluation de l'impact dû à la variation de l'inductance mutuelle L_m sur les systèmes de contrôle considérés est effectuée.

Une comparaison complète entre des schémas de contrôle d'ordre entier et fractionnaire est présentée.

De plus, il convient de noter que les principales abréviations utilisées dans ce papier sont résumées dans le tableau 2.

TABLEAU 2 – Abréviations des approches étudiées

Abréviations	Significations
PI	Proportional Integral
CMG	Commande par Mode Glissant
CFMG	Commande Fractionnaire par Mode Glissant
CF1MG	Commande Floue1 par Mode Glissant
CFF1MG	Commande Fractionnaire Floue1 par Mode Glissant

4.1 Perturbations externes

La réponse du système, obtenue lors de perturbations externes et illustrées sur les figures 2, 3 et 4, met en évidence les améliorations apportées au système de contrôle considéré. Les perturbations mentionnées ci-dessus concernent des variations de couple et des fluctuations de vitesse mécanique. Ces améliorations concernent le temps de réponse, la réduction des dépassements et des phases d'oscillation. En outre, il convient de mentionner que la tension de sortie reste constante pour toutes les approches étudiées.

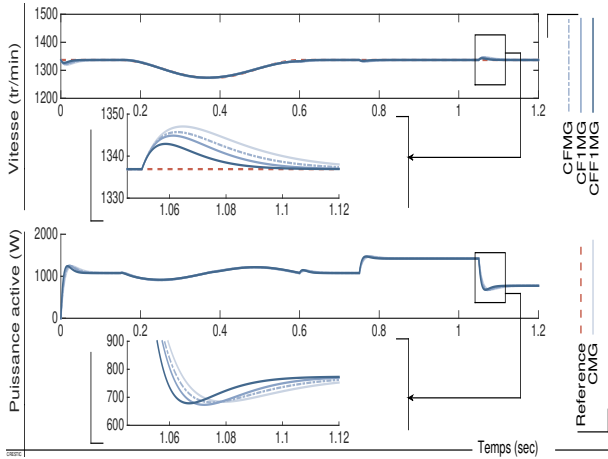


FIGURE 2 – Signaux de vitesse/puissance obtenus en présence de perturbations externes.

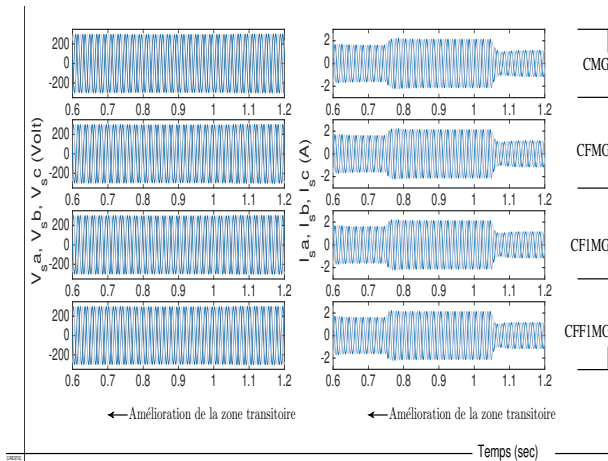


FIGURE 3 – Signaux de tension/courant du stator obtenus en présence de perturbations externes.

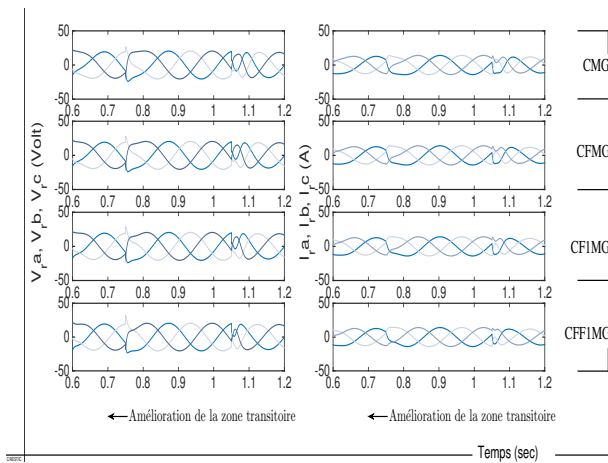


FIGURE 4 – Signaux de tension/courant du rotor obtenus en présence de perturbations externes.

4.2 Variations paramétriques

Cette partie est consacrée à l'évaluation de l'impact de la variation de l'un des paramètres électriques de notre système, à savoir l'inductance mutuelle L_m (de 0 à 40 % puis de 0 à 45 %), sur notre algorithme de contrôle.

Les résultats représentés sur les figures 5, 6 et 7 démontrent clairement une amélioration de la robustesse pour la méthode de contrôle adaptative floue par mode glissant d'ordre fractionnaire.

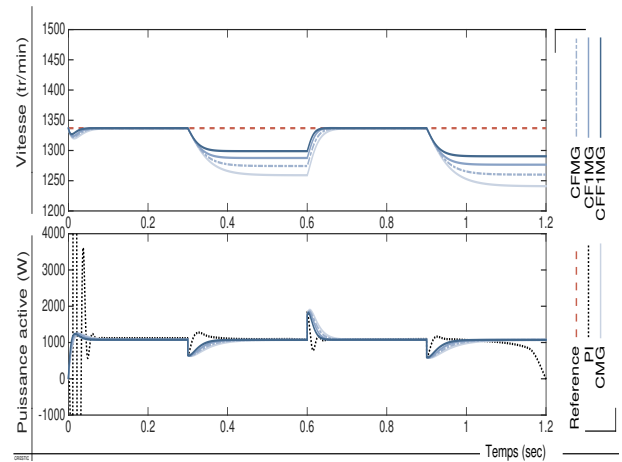


FIGURE 5 – Signaux de vitesse/puissance générés avec des variations paramétriques.

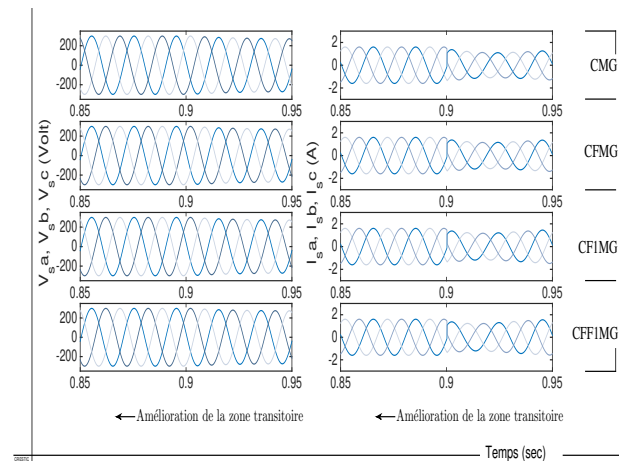


FIGURE 6 – Signaux de tension/courant du stator générés avec des variations paramétriques.

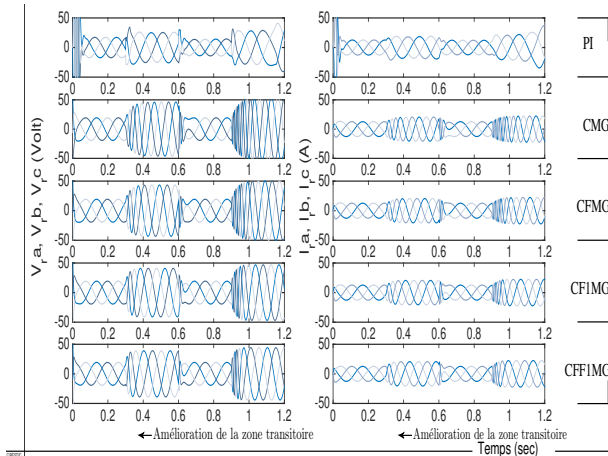


FIGURE 7 – Signaux de tension/courant du rotor générés avec des variations paramétriques.

5 Conclusion

Dans cet article, une étude d'une méthode de contrôle non linéaire robuste fractionnaire est présentée pour un générateur asynchrone à double alimentation fonctionnant sous perturbations externes et variations paramétriques. L'approche fractionnaire, basée sur le contrôle par mode glissant, est appliquée au convertisseur côté générateur. Les systèmes de logique floue adaptatifs Takagi-Sugeno sont utilisés pour éliminer le problème de chattering. Le théorème de Lyapunov est utilisé pour démontrer la stabilité asymptotique du système contrôlé. Les résultats de comparaisons avec un schéma de contrôle par mode glissant d'ordre entier/ fractionnaire, via MATLAB Simulink, prouvent la pertinence de l'approche fractionnaire floue proposée

Références

- [1] M. S. Alam, F. S. Al-Ismaïl, A. Salem, and M. A. Abido. High-level penetration of renewable energy sources into grid utility : Challenges and solutions. *IEEE access*, 8 :190277-190299, 2020.
- [2] D. S. Simonetti, A. E. Amorim, and F. D. Oliveira. Doubly fed induction generator in wind energy conversion systems. In *Advances in Renewable Energies and Power Technologies, Elsevier*, 461-490, 2018.
- [3] H. Jeon, Y. C. Kang, J. W. Park, and Y. I. Lee. PI control loop-based frequency smoothing of a doubly-fed induction generator. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 12(3) : 1811-1819, 2021.
- [4] A. Chen, D. Xie, D. Zhang, C. Gu, and K. Wang. PI parameter tuning of converters for sub-synchronous interactions existing in grid-connected DFIG wind turbines. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 34(7) : 6345-6355, 2018.
- [5] H. Chojaa, A. Derouich, M. Taoussi, S. E. Chehaidia, O. Zamzoum, M. I. Mosaad, and M. Yesséf, Nonlinear control strategies for enhancing the performance of DFIG-based WECS under a real wind profile. *Energies*, 15(18) : 6650, 2022.
- [6] S. Mensou, A. Essadki, T. Nasser, B. B. Idrissi, L. B. Tarla. Dspace DS1104 implementation of a robust nonlinear controller applied for DFIG driven by wind turbine. *Renewable Energy*, 147 :1759-1771, 2020.
- [7] A. Susperregui, M. I. Martínez, G. Tapiá-Otaegui, and A. Etxeberria. Sliding-mode control algorithm for DFIG synchronization to unbalanced and harmonically distorted grids. *IEEE transactions on sustainable energy*, 13(3) : 1566-1579, 2022.
- [8] B. Yang, T. Yu, H. Shu, J. Dong, and L. Jiang. Robust sliding-mode control of wind energy conversion systems for optimal power extraction via nonlinear perturbation observers. *Applied Energy*, 210 : 711-723, 2018.
- [9] J.J.E Slotine, W. Li and others. *Applied nonlinear control*. Prentice hall Englewood Cliffs, NJ. 199, 1991,
- [10] Y. Krim, D. Abbas, S. Krim, and M.F. Mimiouni. Classical vector, first-order sliding-mode and high-order sliding-mode control for a grid-connected variable-speed wind energy conversion system : A comparative study. *Wind Engineering*, 42 : 16-37, 2018.

- [11] L. Keltoum, B. Leila, and B. Abderrahmen. Speed control of a Doubly-Fed induction motor (DFIM) based on fuzzy sliding mode controller. *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, 10(3) : 20-29, 2017.
- [12] I. Petráš. Fractional-order nonlinear systems : modeling, analysis and simulation. *Springer Science & Business Media*, 2011.
- [13] J. M. Mendel. *Uncertain Rule-Based Fuzzy Logic Systems*. Prentice Hall PTR, USA, 2001.
- [14] J. M. Mendel. *Uncertain rule-based fuzzy systems*. Introduction and new directions, Springer, 684, 2017 .