

# Control flou d'une MADA intégrée dans une éolienne

KOUADRIA Mohamed Abdeldjabbar, ALLAOUI Tayeb, KOUADRIA Selmane

Laboratoire de génie électrique et génie informatique, université de TIARET

abdeldjabbar14@yahoo.fr, allaoui\_tb@yahoo.fr

**Resumé**— Ce papier présente une contribution au contrôle d'une MADA intégrée dans une éolienne en utilisant les algorithmes flous. Pour cela, la modélisation de la MADA avec la structure en cascade redresseur-onduleur à MLI a été établie. Une simulation numérique de la MADA, alimentée par la structure en cascade et commandée par les stratégies mises au point, a été effectuée. Les résultats de simulations montrent que l'algorithme flou donne une meilleure réponse transitoire par rapport au régulateur PI avec un temps de réponse inférieur et un dépassement réduit. D'autre part, il arrive à maintenir de bonnes performances et une bonne stabilité en présence de variation paramétrique telle que la résistance comparativement au régulateur PI.

**Mot clé**— MADA, MLI, commande vectorielle, PI classique, PI flou.

## I. INTRODUCTION

L'énergie éolienne est l'une des sources extraordinaire des énergies renouvelables en raison de son caractère propre et mise à disposition gratuite [1].

Le développement des éoliennes représente un grand investissement dans le domaine de la recherche technologique.

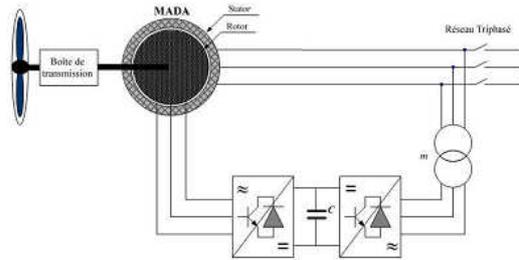


Fig 1. Schéma de principe d'une éolienne basée d'une MADA

La machine asynchrone à double alimentation présente des avantages distincts par rapport à la machine asynchrone à cage d'écurie conventionnelle. La MADA peut être alimentée et contrôlée par l'un ou les deux côtés statorique et rotorique.

Cette structure est appelée aussi la cascade hyposynchrone. Elle permet de contrôler la puissance active

et réactive statorique à la fois en régime permanent et transitoire [1].

Dans notre travail, nous nous intéressons à la commande des puissances active et réactive de la génératrice asynchrone à double alimentation (MADA) entraînée à une vitesse autour de celle de synchronisme. Ainsi que le rotor de cette dernière est alimenté par un redresseur associé à un onduleur de tension MLI. L'objectif est de minimiser l'interaction entre les deux puissances et d'assurer un bon découplage en utilisant un algorithme flou pour les différents modes de commandes (directe et indirecte).

## I. MODÉLISATION DE LA MADA

En général, l'étude du comportement dynamique des machines électriques peut se faire suivant la transformation de Park pour différents référentiels [1] [2].

Les expressions électriques dans le repère (d,q) :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_m) \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_m) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (1)$$

Les expressions des flux statoriques et rotoriques dans le repère (d, q) :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = l_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \Phi_{qs} = l_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \Phi_{dr} = l_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \Phi_{qr} = l_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (2)$$

Le couple électromagnétique de la machine asynchrone à double alimentation est donné par l'expression suivante:

$$C_{em} = -P \frac{M}{L_r} \Phi_{ds} i_{qr} \quad (3)$$

Dans l'hypothèse où le réseau auquel est connecté la MADA est stable, le flux  $\Phi_{ds}$  devient alors constant. Le choix de ce repère rend le couple électromagnétique produit par la machine et par conséquent la puissance active uniquement dépendant du courant rotorique d'axe q.

L'expression de la tension statorique devient alors :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \Phi_{ds} \end{cases} \quad (4)$$

Dans un repère diphasé quelconque les puissances actives et réactives sont exprimées par :

$$\begin{cases} P = V_{ds} i_{ds} - V_{qs} i_{qs} \\ Q = V_{qs} i_{ds} - V_{ds} i_{qs} \end{cases} \quad (5)$$

Les expressions des tensions rotoriques :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{di_{dr}}{dt} - g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{di_{qr}}{dt} + g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{dr} + g \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (6)$$

## II. COMMANDE DE PUISSANCE

Dans cette partie, on va présenter la régulation indépendante des puissances actives et réactive de la MADA en basant sur un régulateur classique PI.

### A. Commande directe

Il a été mis en évidence le lien entre, d'une part la puissance active et la tension  $V_{qr}$  et d'autre part la puissance réactive et la tension  $V_{dr}$ .

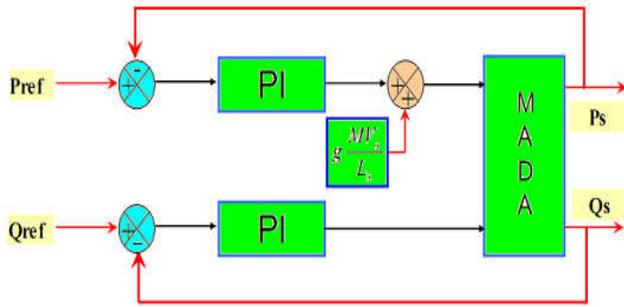


Fig. 2 Schéma bloc de la commande directe

### B. Commande indirecte

Nous aboutissons au schéma bloc présenté dans la figure (3) sur lequel on distingue bien les deux boucles de régulation pour chaque axe, l'une contrôlant le courant et l'autre la puissance [5] [6].

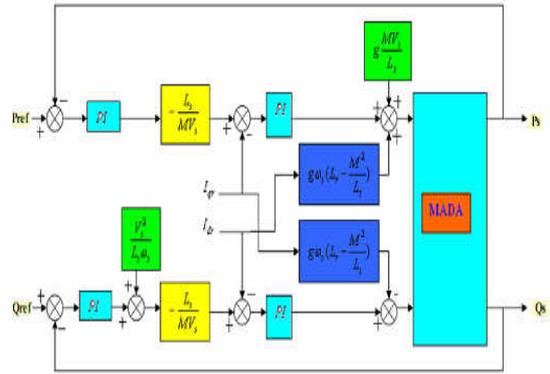


Fig 3. Schéma bloc de la commande directe.

## III. RESULTAT DES SIMULATIONS

Dans cette partie, on va illustrer les résultats de simulation de la commande des puissance par un PI classique d'une machine asynchrone à double alimentation et à flux statorique orienté.

### A. La méthode directe

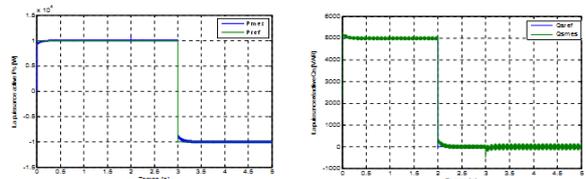


Fig 4. Suivi de consigne de puissances active et réactive

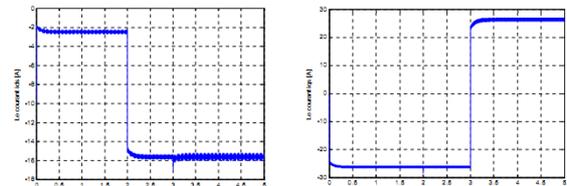


Fig 5. Suivi de consigne de courant statorique

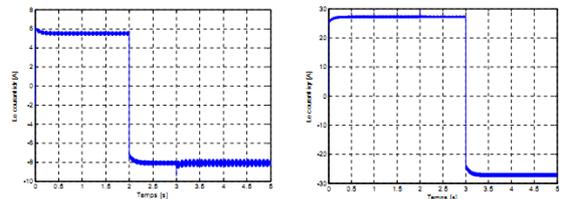


Fig 6. Suivi de consigne de courant rotorique

B. La méthode indirecte :

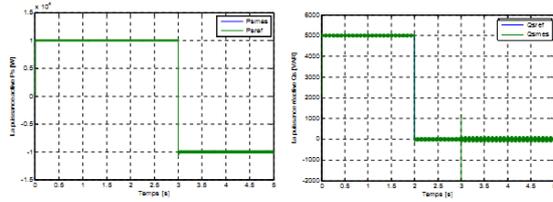


Fig 7. Suivi de consigne de puissances active et réactive statorique

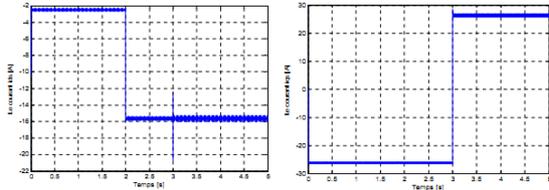


Figure 8. Suivi de consigne de courant statorique

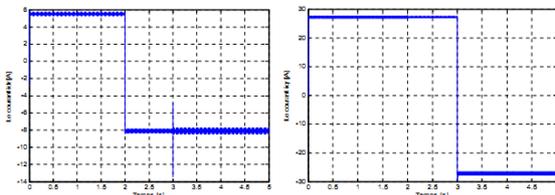


Fig 9. Suivi de consigne de courant rotorique

IV. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS :

Les résultats de simulation présentent les différentes courbes obtenus par les deux commandes, directe et indirecte, des puissances actives et réactives générées au niveau du stator de la MADA. Les deux commandes permettent de découpler les expressions de la puissance active et réactives du générateur ou encore celle du flux et du couple. La composante quadrature du courant rotorique  $i_{qr}$  contrôle la puissance active, et la composante directe  $i_{dr}$  contrôle la puissance réactive échangée entre le stator et le réseau. En ce qui concerne le découplage entre les axes directs et quadratures, il est à noter que celui-ci n'apparaît pas dans le graphe de la puissance active. Cependant dans celui de la puissance réactive l'influence de l'échelon de P y est visible. Néanmoins cette influence est moins conséquente dans la commande indirecte.

Dans cette optique il a été constaté dans le cas de régulateur PI que la commande directe est lente que celle indirecte.

V. CONTROL FLOU

La structure générale d'un régulateur PI-flou est illustré par la figure (10) [7].

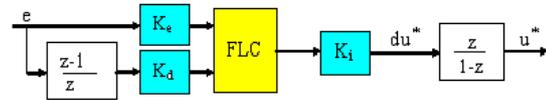


Fig.10. Structure d'un régulateur PI-flou

On considère pour chaque variable de mesure (l'erreur et la variation de l'erreur) 3 sous-ensemble flous notés {N, EZ, P} avec : Négative, Environ Zéro, Positif.

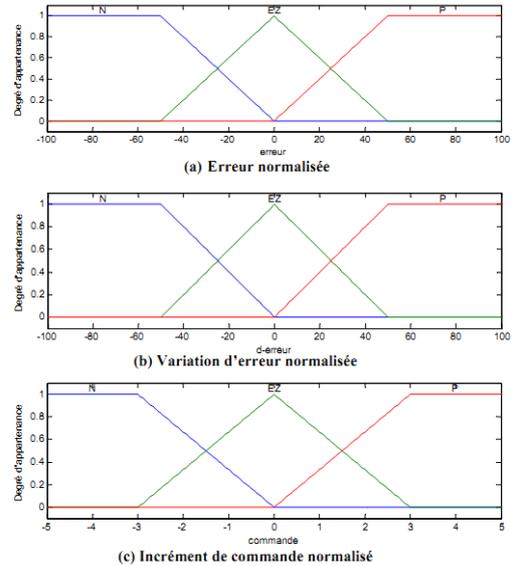


Fig 11. Fonctions d'appartenance des différents variables linguistiques (RLF de puissance)

TABLEAU I  
BASE DE RÈGLE

Les bases de règle est illustré par le tableau suivant :

$\Delta E_i$	<b>Ei</b>	<b>N</b>	<b>EZ</b>	<b>P</b>
<b>N</b>		<b>N</b>	<b>N</b>	<b>EZ</b>
<b>EZ</b>		<b>N</b>	<b>EZ</b>	<b>P</b>
<b>P</b>		<b>EZ</b>	<b>P</b>	<b>P</b>

Les valeurs contenues dans ces cellules ont été déterminées de façon logique en étudiant toutes les combinaisons possibles des variables d'entrée [7].

D'après cette matrice, on peut définir les 9 règles, par exemple :

R1 : Si E est N et  $\Delta E$  est N Alors Commande est N.

R4 : Si E est EZ et  $\Delta E$  est N Alors Commande est N.

## VI. RESULTATS DES SIMULATIONS

Dans cette partie, on va illustrer les résultats de simulation de la commande de puissance par un PI flou d'une machine asynchrone à double alimentation et à flux statorique orienté. Tout ce qui a été simulé dans le cas d'un régulateur PI classique sera aussi simulé dans le cas du régulateur flou et présenté dans cette section :

### A. La méthode directe

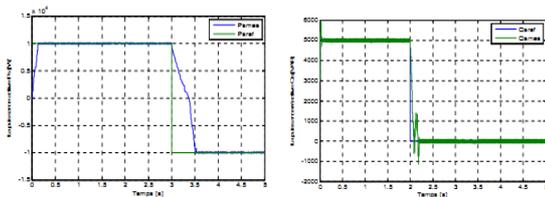


Fig 12 . Suivi de consigne de puissances active et réactive statorique

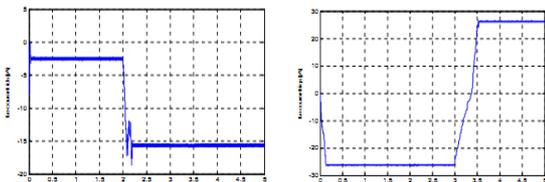


Fig 13. Suivi de consigne de courant statorique

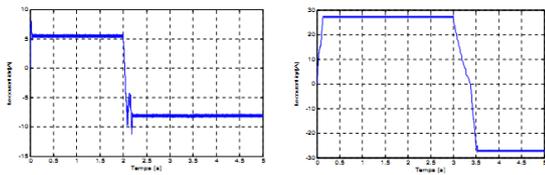


Fig 14. Suivi de consigne de courant rotorique

### B. La méthode indirecte :

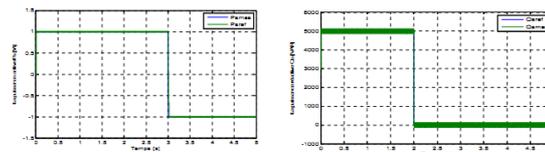


Fig 15. Suivi de consigne de puissances active et réactive statorique

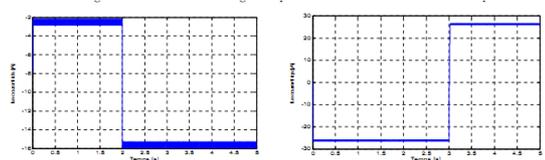


Fig 16. Suivi de consigne de courant statorique

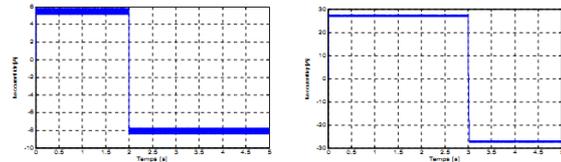


Fig 17. Suivi de consigne de courant rotorique

## VII. COMPARAISON DE RÉGULATEUR CLASSIQUE PI ET LE RÉGULATEUR PI-FLOU

Afin de mesurer les performances du contrôleur flou synthétisé et les comparer avec celles du régulateur classique, il faut définir des critères d'évaluation. Ces critères doivent prendre en compte à la fois l'amplitude maximale de l'erreur de régulation et le temps nécessaire au système pour revenir à la consigne après une perturbation ou pour atteindre une nouvelle référence.

### A. Méthode directe

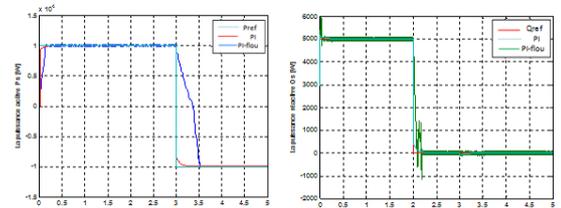


Fig 18. Suivi de consigne de puissances active et réactive statorique par deux régulateurs PI et PI-flou

### B. Méthode indirecte

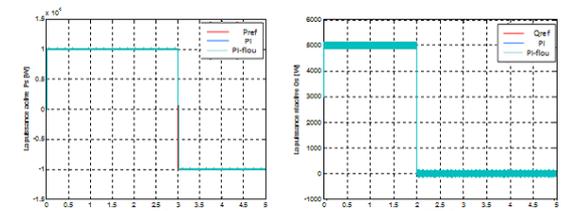


Fig 19. Suivi de consigne de puissances active et réactive statorique par deux régulateurs PI et PI-flou

## VIII. TESTS DE ROBUSTESSE

La robustesse des commandes est un point important, surtout pour les systèmes comportant plusieurs entités en interaction ou les systèmes à fortes variations de paramètres. Il en est de même si la mesure des paramètres ne peut s'effectuer avec précision [3].

Pour les tests de robustesse de la commande par le régulateur flou, nous avons étudié l'influence de la variation de la résistance rotorique sur les performances de la commande.

on peut remarquer que le contrôleur PI flou est robuste comparativement au régulateur classique, car le contrôleur flou est capable de forcer le système à garder son régime avec quelques modifications qui ne peuvent pas diverger complètement les réponses des grandeurs.

### A. La méthode directe

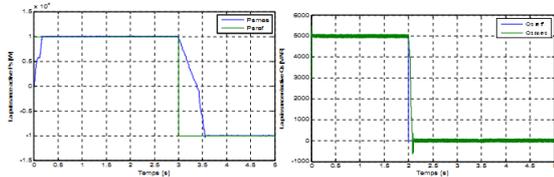


Fig 20. Suivi de consigne de puissances active et réactive statorique avec variation résistance statorique de +25% de  $R_s$  nominale

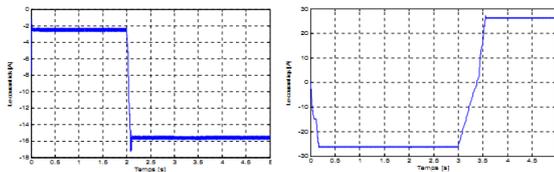


Fig 21. Suivi de consigne courant statorique avec variation résistance statorique de +25%  $R_s$  nominale

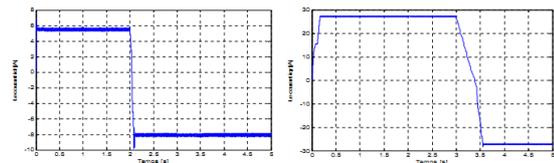


Fig 22. Suivi de consigne courant rotorique avec variation résistance statorique de +25%  $R_s$  nominale

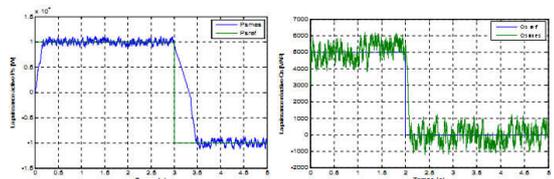


Fig 23. Suivi de consigne de puissances active et réactive statorique avec variation résistance statorique de +50%  $R_s$  nominale

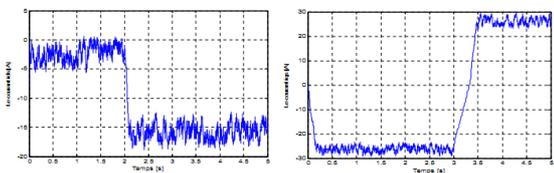


Fig 24. Suivi de consigne courant statorique avec variation résistance statorique de +50%  $R_s$  nominale

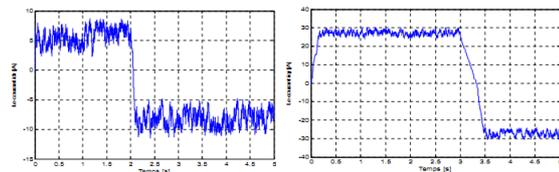


Fig 25. Suivi de consigne courant statorique avec variation résistance statorique de +50%  $R_s$  nominale

### B. La méthode indirecte

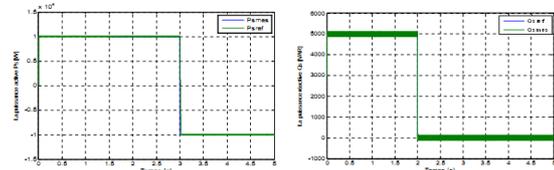


Fig 26. Suivi de consigne de puissances active et réactive statorique avec variation résistance statorique de +25%  $R_s$  nominale

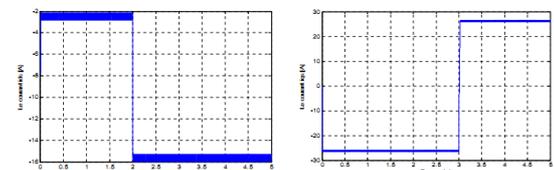


Fig 27. Suivi de consigne courant statorique avec variation résistance statorique de +25%  $R_s$  nominale

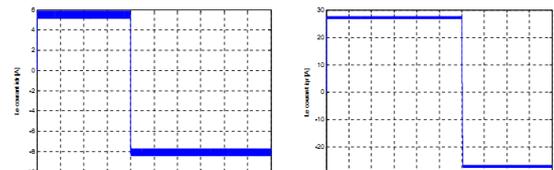


Fig 28. Suivi de consigne courant rotorique avec variation résistance statorique de +25%  $R_s$  nominale

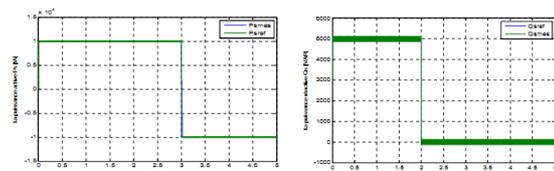


Fig 29. Suivi de consigne de puissances active et réactive statorique avec variation résistance statorique de +50%  $R_s$  nominale

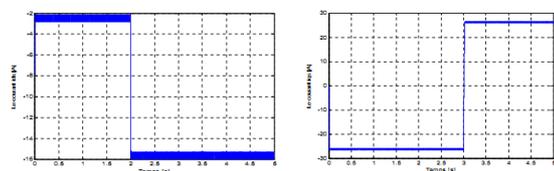


Fig 30. Suivi de consigne courant statorique avec variation résistance statorique de +50%  $R_s$  nominale

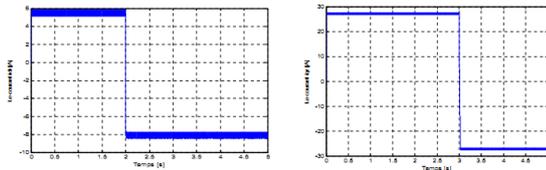


Fig 31. Suivi de consigne courant rotorique avec variation résistance statorique de +50%Rs nominale.

## IX. CONCLUSION

Le réglage par logique floue peut surpasser le réglage par (PI) en ce qui concerne la qualité de la réponse dynamique du système. En effet, ce dernier réduit davantage le temps de réponse en produisant un dépassement limité accompagné de faibles oscillations autour de la consigne en régime permanent, la précision n'est pas aussi bonne que celle d'un régulateur (PI) où l'action intégrale élimine l'erreur statique, ceci suggère alors la combinaison des deux types de régulateurs.

- Un régulateur flou : pour le régime transitoire.
- Un régulateur (PI): pour le régime permanent.

L'inconvénient majeur des régulateurs flous est l'adaptation des gains assurant la stabilité du système. En outre, la commande est calculée seulement à partir des deux valeurs : l'erreur et la variation de l'erreur.

## REFERENCES

- [1] P.E. Vidal, "Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation," Thèse de doctorat de I.N.P de Toulouse, France, 2004.
- [2] F. Poitiers, "Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne," Thèse de Doctorat d'état en Electronique et Génie Electrique, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, 2003.
- [3] S.Khojtit el khil, "Commande Vectorielle d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA)," Thèse de doctorat de I.N.P de Toulouse, France, 2006.
- [4] A. Dendouga, R. Abdessemed, M.L. Bendaas, et A. Chaiba, "Sliding Mode Control of Active and Reactive Powers Generated by a Doubly Fed Induction Generator (DFIG)," *Journal of Electrical Engineering*.
- [5] M. Yamamoto et O. Motoyoshi, "Active and reactive power control for doubly-fed wound rotor induction generator," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 6, 1991, p. 624-629.
- [6] C.C. Lee, "Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller. I," *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, vol. 20, 1990, p. 404-418.
- [7] J.J. Buckley, "Theory of the fuzzy controller: An introduction," *Fuzzy sets and Systems*, vol. 51, 1992, p. 249-258.