

Exploitation robuste d'une éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation

Abdelhak Djoudi ^{1*}, Hachemi Chekireb ²,
Djohra Saheb – Koussa ¹ et El Madjid Berkouk ²

¹ Division Energie Eolienne, Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER
B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger, Algérie

² Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, ENP
B.P. 182, 10 Avenue Hassen Badi, El-Harrach, Alger, Algérie

(reçu le 20 Juillet 2012 – accepté le 29 Décembre 2012)

Résumé – Dans cet article, nous nous intéressons à l'élaboration d'une loi de commande robuste par les modes glissants de la puissance active et de la puissance réactive statorique d'une machine asynchrone à double alimentation 'MADA', qui constitue la partie génératrice d'une éolienne à vitesse variable. La référence de la puissance active statorique est donnée afin d'extraire le maximum de la puissance du vent disponible au niveau des pales de la turbine tout en appliquant une méthode MPPT 'Maximum Power Point Tracking' qui ne nécessite aucune connaissance sur le vent et sur les caractéristiques de la turbine. Les résultats obtenus ont montré qu'il est possible de régler les puissances statoriques, même en présence des variations paramétriques, et que la méthode MPPT développée permet d'atteindre un rendement maximum de la chaîne éolienne.

Abstract – This paper is dedicated to elaborate a robust sliding mode control of stator powers of doubly fed induction machine 'DFIG' that presents the generator element of variable speed wind turbine. The stator active power reference is given through an MPPT algorithm to extract the maximum of wind power available at the turbine pales without any knowledge of turbine characteristic and wind speed. The simulation results getting proved that it's possible to control the stator powers even the presence of parametric variations and to achieve the maximum point without any knowledge of turbine characteristic and wind speed.

Mots-clés: Mode de Glissement – MPPT – MADA - Commande Non Linéaire – Robustesse - Commande des Puissances.

1. INTRODUCTION

La consommation d'énergie, dans le courant du siècle dernier, a considérablement augmenté à cause de l'industrialisation massive. Les prévisions des besoins en énergie pour les années à venir ne font que le confirmer. Pour subvenir aux besoins en énergie de la société actuelle, il est nécessaire de trouver des solutions adaptées et de les diversifier.

Actuellement, il y a principalement deux façons possibles d'agir. La première est de diminuer la consommation des récepteurs d'énergie et d'augmenter la productivité des centrales énergétiques en améliorant respectivement leur efficacité.

Une deuxième méthode consiste à trouver et développer de nouvelles sources d'énergie. Dans l'immédiat, nous disposons des ressources inépuisables en énergies renouvelables, que nous sommes en mesure d'exploiter de plus en plus facilement et proprement.

* abdelhak.djoudi@cder.dz

Néanmoins, longtemps négligées, les techniques d'extraction de la puissance de ces ressources demandent des recherches et des développements plus approfondis visant à fiabiliser, baisser les coûts 'fabrication, d'usage et de recyclage' et d'augmenter l'efficacité énergétique [1].

Dans ce contexte, notre étude s'intéresse à la filière éolienne où plusieurs pays sont déjà résolument tournés vers l'énergie éolienne. La multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie.

Dans ce cadre, le présent article décrit une exploitation d'une éolienne à base d'une 'MADA', vue de ses avantages par rapport aux autres machines surtout dans le dimensionnement du convertisseur [3].

Notre contribution, dans cet article, est de développer une commande non linéaire robuste par les modes de glissement des puissances statoriques et une méthode MPPT pour but d'extraire le maximum de la puissance disponible au niveau des pales de la turbine, et cela sans aucune connaissance sur la vitesse du vent et des caractéristiques de la turbine éolienne.

Pour cela, dans la seconde partie, est présenté un aperçu général sur le système éolien étudié, et dans la troisième et la quatrième partie sont exposés les modèles mathématiques de la 'MADA' et de la turbine éolienne.

La commande par mode de glissement et la méthode MPPT sont développées respectivement en cinquième et sixième partie de ce papier.

Tandis qu'en septième partie, sont présentés les résultats de la simulation du système éolien pour un profil du vent et on termine ce travail par une conclusion.

2. DESCRIPTION GENERALE DE LA CHAINE

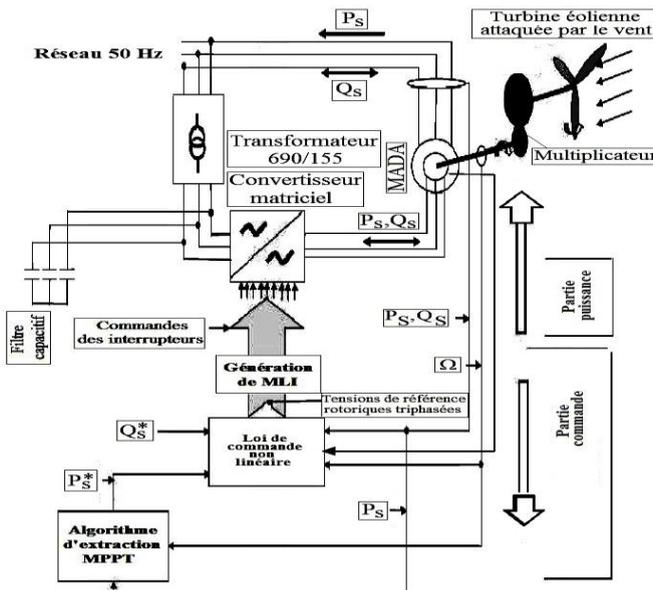


Fig. 1: Représentation des éléments de la chaîne éolienne

Comme le montre la figure 1, l'éolienne est une chaîne de conversion d'énergie en deux étapes, la première, c'est la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique à l'intermédiaire d'une turbine, et la deuxième est de l'énergie mécanique au niveau de l'arbre de la turbine en énergie électrique via une génératrice à double alimentation où son stator est connecté directement au réseau, et son rotor aussi via un convertisseur statique qui nous permet de délivrer les tensions de commande nécessaires des puissances statoriques, où la référence de la puissance statorique est fournie à partir d'un algorithme MPPT pour permettre d'attendre un grand rendement de la conversion cinétique/mécanique.

3. MODELISATION DE LA MADA

Le fonctionnement de la 'MADA' en mode génératrice est modélisé dans un repère de Park, tel que sa composante 'd' coïncide avec le vecteur tension du réseau. En définissant le vecteur d'état défini par $(I_{rd}, I_{rq}, \Phi_{rd}, \Phi_{rq}, \omega)^T = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)^T$, ce modèle est donné par la représentation d'état suivante:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = f_1(x) + a_3 \times V_{rd} \\ \frac{dx_2}{dt} = f_2(x) + a_3 \times V_{rq} \\ \frac{dx_3}{dt} = f_3(x) + V_{rd} \\ \frac{dx_4}{dt} = f_4(x) + V_{rq} \\ \frac{dx_5}{dt} = f_5(x) \end{cases} \quad (1)$$

Avec,

$$f_1 = -a_1 \times x_1 + \omega_s \times x_2 + a_2 \times x_3 - a_3 \times x_5 \times x_4 - a_4 \times V_{sd}$$

$$f_2 = -\omega_s \times x_1 - a_1 \times x_2 + a_2 \times x_4 + a_3 \times x_5 \times x_3 - a_4 \times V_{sq}$$

$$f_3 = -b \times x_1 + \omega_s \times x_4 - x_5 \times x_4$$

$$f_4 = -b \times x_2 - \omega_s \times x_3 + x_5 \times x_3$$

$$f_5 = C_1 \times (x_4 \times x_1 - x_3 \times x_2) + C_2 \times (C_g - C_{vis})$$

$$a_1 = \left(\frac{1}{\sigma \times T_s} + \frac{1}{\sigma \times T_r} \right); \quad a_2 = \frac{1}{\sigma \times L_r \times T_s}; \quad a_3 = \frac{1}{\sigma \times L_r}; \quad a_4 = \frac{(1 - \sigma)}{\sigma \times L_m}; \quad b = R_r;$$

$$C_1 = \frac{p^2}{J}; \quad C_2 = \frac{p}{J}$$

où,

L_s , L_r et L_m sont respectivement l'inductance au stator, au rotor et mutuelle.

R_s / R_r est la résistance statorique/rotorique.

I_{rd} / I_{rq} composante d'axe d/q des courants au rotor.

Φ_{rd} / Φ_{rq} composante d'axe d/q du flux au rotor.

V_{rd} / V_{rq} composante d'axe d/q de la tension de commande au rotor.

T_r / T_s représente la constance de temps rotorique/statorique.

C_g est le couple issu du multiplicateur et C_{vis} est celui du aux frottements au niveau de la 'MADA'.

P , ω , σ et J représentent respectivement le nombre de paires de pôles, la pulsation mécanique, le coefficient de dispersion et l'inertie du système (rotor plus turbine).

4. LA TURBINE EOLIENNE

Les entrées de la turbine sont la vitesse du vent, l'angle d'orientation des pales, et la vitesse de rotation de la turbine. Le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine est représenté sur la figure 2.

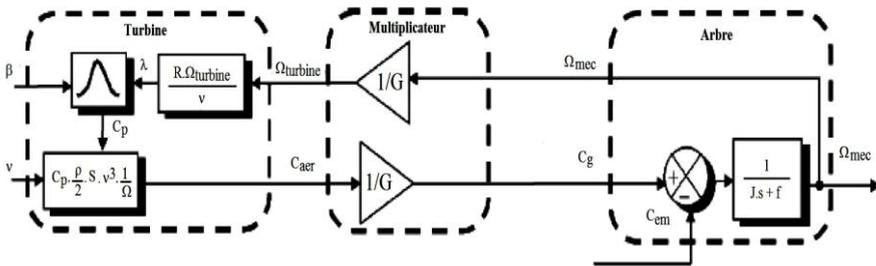


Fig. 2: Modélisation de la turbine

Où,

- ρ est la densité de l'air.
- S est la surface circulaire balayée par la turbine. Le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale.
- v est la vitesse du vent.
- Ω représente la vitesse de rotation.
- G est le coefficient du multiplicateur.
- C est une notation du couple.
- C_p est le coefficient de puissance, λ le ratio de vitesse et β l'angle de l'orientation de la pale.

5. COMMANDE NL PAR MODE DE GLISSEMENT

Notre objectif, dans ce paragraphe, est de développer une commande non linéaire 'NL' par les modes de glissement de la puissance active P_s et la puissance réactive Q_s statoriques de la 'MADA' fonctionnant en mode génératrice et connectée au réseau électrique. Dans le repère de Park défini précédemment, ce système a comme grandeurs d'entrée, la tension appliquée au rotor (V_{rd} , V_{rq}) et comme grandeurs de sortie, la puissance active et réactive au stator (P_s , Q_s) définies par:

$$\begin{cases} P_s = V_{sq} \times I_{sq} = d_1 \times x_2 + d_2 \times x_4 \\ \quad = h_1(x) \\ Q_s = V_{sq} \times I_{sd} = d_1 \times x_1 + d_2 \times x_3 \\ \quad = h_2(x) \end{cases} \quad (2)$$

avec, $d_1 = -\frac{L_m}{L_r} \times V_{sq}$ et $d_2 = -\frac{V_{sq}}{L_r}$

Le modèle (1) de la MADA est de la classe non linéaire affine en la commande:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x) \times u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (3)$$

où,

$$u \in \mathbb{R}^2, x \in \mathbb{R}^5 \text{ et } y \in \mathbb{R}^2$$

$$f = (f_1, f_2, f_3, f_4, f_5)^T, g = \begin{pmatrix} a_3 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & a_3 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}^T,$$

$$u = \begin{pmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \end{pmatrix} \text{ et } y = \begin{pmatrix} y_1 = h_1(x) = P_s \\ y_2 = h_2(x) = Q_s \end{pmatrix}$$

On désire réguler les grandeurs de sortie y_1 et y_2 à leurs valeurs de référence respective $P_{ref} = y_{1ref}$ et $Q_{ref} = y_{2ref}$. Dans ce but, on définit les erreurs de réglage, qui sont les surfaces de glissement S_1 et S_2 suivantes:

$$\begin{cases} S_1 = y_1 - y_{1ref} \\ S_2 = y_2 - y_{2ref} \end{cases} \quad (4)$$

La dynamique de S_1 et S_2 sont telles que:

$$\begin{cases} \dot{S}_1 = \frac{\partial S_1}{\partial X} \times \dot{x} \\ \quad = \frac{\partial h_1}{\partial X} \times (f(x) + g(x) \times u) - \dot{y}_{1ref} \\ \dot{S}_2 = \frac{\partial S_2}{\partial X} \times \dot{x} \\ \quad = \frac{\partial h_2}{\partial X} \times (f(x) + g(x) \times u) - \dot{y}_{2ref} \end{cases} \quad (5)$$

Le système (5) peut encore s'écrire sous la forme compacte suivante:

$$\begin{cases} \dot{S}_1 = L_f \times h_1 + L_g \times h_1 \times u - \dot{y}_{1ref} \\ \dot{S}_2 = L_f \times h_2 + L_g \times h_2 \times u - \dot{y}_{2ref} \end{cases} \quad (6)$$

Pour assurer l'attractivité et la convergence des surfaces S_1 et S_2 vers zéro, nous leurs imposons la dynamique suivante:

$$\begin{cases} \dot{S}_1 = -K_s \text{sign}(S_1) - G_s \times S_1 \\ \dot{S}_2 = -K_s \text{sign}(S_2) - G_s \times S_2 \end{cases} \quad (7)$$

Avec, $K_s > 0$ et $G_s > 0$

En résolvant le système (7), on trouve:

$$V_{rd} = \frac{B_1(x) - K_s \text{sign} \times (Q_s - Q_{sref})}{(d_2 + d_1 \times a_3)} \tag{8}$$

$$V_{rq} = \frac{B_2(x) - K_s \text{sign} \times (P_s - P_{sref})}{(d_2 + d_1 \times a_3)} \tag{9}$$

Où,

$$B_1(x) = (-d_1 \times a_1 - G_1 \times d_1 - b \times d_2) x_1 + (d_1 \times \omega_s) x_2 + (a_2 \times d_1 - K_s \times d_2) x_3 + (d_2 \times \omega_s) x_4 + (-d_1 \times a_3 - d_2) x_5 x_4 - d_1 \times a_4 \times V_{sd} \tag{10}$$

$$B_2(x) = -(d_1 \times \omega_s) x_1 + (-d_1 \times a_1 - G_s \times d_1 - b \times d_2) x_2 + (d_2 \times \omega_s) x_3 + (a_2 \times d_1 - K_s \times d_2) x_4 - (-d_1 \times a_3 - d_2) x_5 x_4 - d_1 \times a_4 \times V_{sq} \tag{11}$$

Il est à noter que les gains du régulateur sont choisis de manière à obtenir une bonne dynamique de la réponse et une robustesse satisfaisante, tout en assurant une faible énergie de la commande. Ceci nécessite la recherche d'un compromis entre ces exigences.

6. LA STRATEGIE MPPT PROPOSEE

Plusieurs travaux ont été consacrés aux stratégies assurant une recherche du point maximal de la puissance sans la connaissance de la courbe caractéristique $C_p(\lambda)$ de la voilure. Ces travaux sont relatifs au pilotage des éoliennes à base des machines synchrone ou asynchrone à simple alimentation [7-9]. En l'absence de toute connaissance de la caractéristique de la voilure, des règles de décision doivent être établies afin d'assurer la convergence vers le point optimal. Les règles proposées dépendent de la variation de la puissance active totale ΔP fournie au réseau.

Le **Tableau 1** donne les règles de décision à suivre pour générer la référence de la puissance active statorique afin de capter le maximum de la puissance du vent. La variable P est la puissance totale en valeur absolue fournie au réseau à l'instant k et P_{sref} est la puissance statorique de référence à fournir au réseau à l'instant $(k+1)$.

Tableau 1: Règles de la stratégie MPPT proposée

Si	Alors
$\Delta P(k) > 0$	$\Delta P_{sref}(k+1) < 0$
$\Delta P(k) < 0$	$\Delta P_{sref}(k+1) > 0$

7. SIMULATION DE LA CHAINE EOLIENNE

Données de la turbine éolienne
Nombre de pales: 3
Diamètre d'une pale: $R = 35.5$ m
Caractéristique de la voilure:
$C_p = 0.5 \sin(\pi(\lambda + 0.1) / 18,2)$
Gain du multiplicateur: $G = 65$

<u>Données de la 'MADA'</u>	
Puissance nominale:	$P_N = 1.5 \text{ MW}$
Nombre de paires de pôles:	$p = 2$
Fréquence réseau:	$f = 50 \text{ Hz}$
Résistance statorique:	$R_s = 0.012 \Omega$
Résistance rotorique:	$R_r = 0.021 \Omega$
Inductance statorique:	$L_s = 0.0137 \text{ H}$
Inductance rotorique:	$L_r = 0.0137 \text{ H}$
Inductance mutuelle:	$L_m = 0.0135 \text{ H}$
Coefficient de viscosité:	$f = 7.1 \times 10^{-3}$
Inertie totale vue côté 'MADA':	$J = 50 \text{ kg.m}^2$
Tension du réseau: 690 V, 50 Hz	
Gains du régulateur: $G_s = 12 \times 10^3$ et $K_s = 5 \times 10^4$	
Gains de l'observateur: $L_{s1} = 10^6$ et $L_{s2} = 10^6$	
<u>Variations paramétriques</u>	
Variations paramétriques des résistances statorique et rotorique de 20 %	

Les résultats montrent que la procédure MPPT a permis de détecter la puissance maximale. La puissance active du stator P_s (Fig. 3) suit celle de la référence déduite par la procédure MPPT.

La puissance réactive Q_s au stator varie dans une faible bande autour de zéro (référence nulle), même en présence des variations paramétriques au niveau des résistances statorique et rotorique. (Fig. 4)

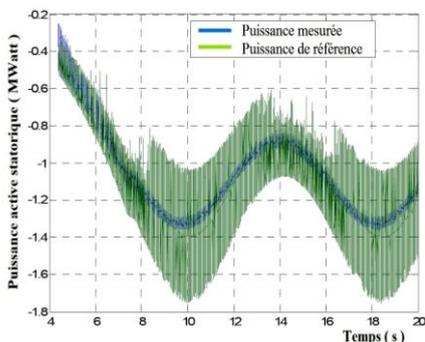


Fig. 3: Variation de la puissance active au stator et sa référence

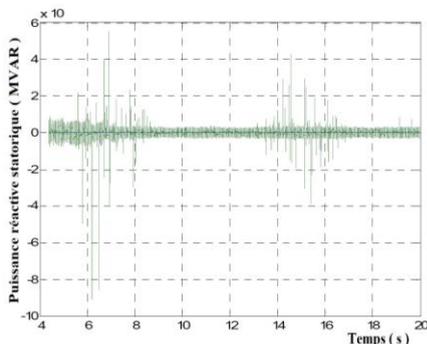


Fig. 4: Variation de la puissance active au stator et sa référence

La vitesse de rotation de la chaîne est stabilisée (Fig. 5) et reste proche de la vitesse optimale que doit suivre la turbine pour extraire le maximum de puissance.

Le régime de la vitesse du vent imposé à l'entrée de l'éolienne est conforme à la plage de fonctionnement de la 'MADA', car les courants varient dans une plage admissible pour la machine utilisée. (Fig. 6)

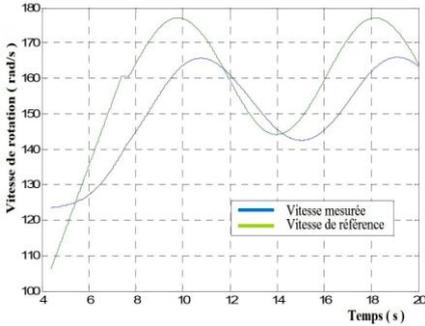


Fig. 5: Vitesse de rotation du rotor et vitesse optimale

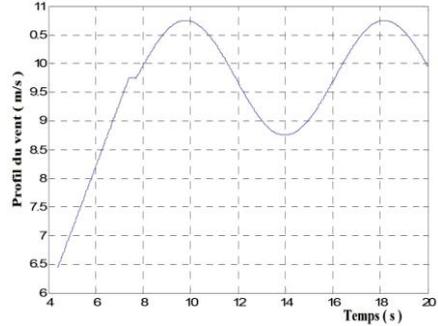


Fig. 6: Profil de la vitesse du vent en fonction du temps

L'amplitude des flux varie faiblement pour la plage de fonctionnement de la 'MADA'. Cependant des pics, dus à l'effet du convertisseur statique, apparaissent au niveau des courants mais ils peuvent être atténués par un filtrage adéquat.

Il est à noter que la puissance rotorique de commande est inférieure de 23 % de la puissance statorique, donc cela confirme la bonne conduite de la chaîne.

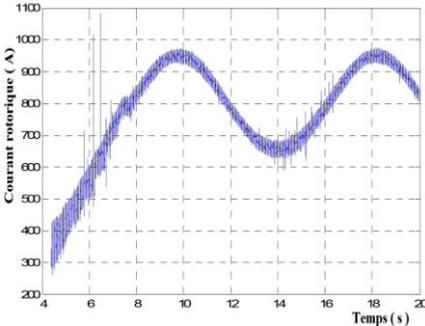


Fig. 7: Variation du courant rotorique en fonction du temps

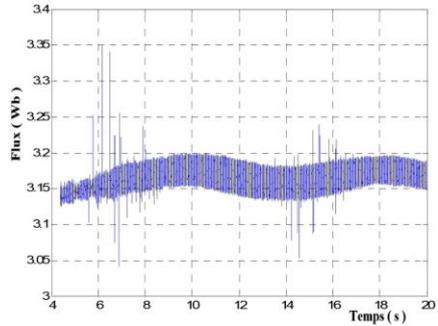


Fig. 8: Variation du flux au rotor en fonction du temps

8. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons développé une commande NL par les modes de glissement de la puissance active et de la puissance réactive d'une 'MADA' entraînée par une éolienne et connectée au réseau électrique. Cette commande a l'avantage de pouvoir compenser les erreurs de modélisation et les variations paramétriques.

De plus, nous avons fourni une procédure MPPT pour assurer la détection de la puissance maximale disponible au niveau de la turbine éolienne. Les résultats des tests par simulation ont permis de vérifier la validité de la méthode proposée.

REFERENCES

- [1] A. Mirecki, '*Etude Comparative de Chaînes de Conversion d'Énergie Dédiées à une Éolienne de Petite Puissance*', Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2005.
- [2] N.A. Nanssens, G. Lambin and N. Bragard, '*Active Power Control Strategies of DFIG Wind Turbines*', IEEE Power Technology, Lausanne, Switzerland, pp. 516 – 521, 1-5 July 2007.
- [3] J. Jeong, Y. Ju, B. Han, '*Wind Power System using Doubly-Fed Induction Generator and Matrix Converter with Simple Modulation Scheme*', Power Electronics and Machines in Wind Applications, PEMWA 2009 IEEE, Lincoln, NE, pp. 1 – 6, 24-26 June 2009.
- [4] L. Huber and D. Borojevic, '*Space Vector Modulated Three-Phase to Three-Phase Matrix Converter with Input Power Factor Correction*', IEEE Transactions Industry Applications, Vol. 31, N°6, pp. 1234 - 1234, 1995.
- [5] M. Venturini and A. Alesina, '*The Generalized Transformer, a New Bidirectional, Sinusoidal Waveform Frequency Converter with Continuously Adjustable Input Power Factor*', Circuits and Systems, IEEE Transactions, Vol. 28, N°4, pp. 319 – 330, 1981.
- [6] J.I Jang, Y.S. Kim and D.C Lee, '*Active and Reactive Power Control of DFIG for Wind Energy Conversion Under Unbalanced Grid Voltage*', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 21, N°3, pp. 750 – 758, 2006.
- [7] B. Chitti Babu , K.B. Mohanty, '*Doubly-Fed Induction Generator for Variable Speed Wind Energy Conversion Systems- Modeling & Simulation*', Applied Power Electronics Conference, APEC 2007 – Twenty Second Annual IEEE, Anaheim, CA, USA , pp. 1334 – 1338, 2007.
- [8] V. Galdi, A. Piccolo and P. Siano, '*Exploiting Maximum Energy From Variable Speed Wind Power Generation Systems By Using An Adaptive Takagi–Sugeno–Kang Fuzzy Model*', Energy Conversion and Management, Vol. 50, N°2, pp. 413 – 421, 2009.
- [9] T. Senjyu, O. Yasutaka, A. Yona and H Sekine, '*Parameter Identification of Wind Turbine for Maximum Power Point Tracking Control*', Proceeding of the International Conference on Electrical Machines and Systems, pp. 248 – 252, Seoul, Korea, October 08 - 11, 2008.
- [10] Y.Y. Hong, S.D Lu and C.S. Chiou, '*MPPT for PM Wind Generator Using Gradient Approximation*', Energy Conversion And Management, Vol. 50, N°1, pp. 82 – 89, 2009.