

Commande adaptative par les modes de glissement d'une éolienne à base d'une MADA pilotée par un convertisseur matriciel

A. Djoudi ¹*, H. Chekireb ², S. Bacha ³, E.M. Berkouk ² et S. Makloufi ¹

¹ Centre de Développement des Energies Renouvelables, 16340, Algiers, Algeria

² Laboratoire de Contrôle des Procédés, Ecole Nationale Polytechnique
B.P. 182, 10 Avenue Hassan Badi, El-Harrach, Algiers, Algeria

³ Institut Polytechnique de Grenoble, G2ELAB, Saint Martin d'Hères, 38420, France

(reçu le 15 Février 2014 – accepté le 30 Mars 2015)

Abstract - *In this paper; an adaptive sliding mode control is presented to command the active and reactive stator powers. This control law presents height robustness compared with others laws due to its on-line identification of the rotor resistance, who is sensible with temperature evolution. The active stator power reference is given by an MPPT algorithm (Maximum Power Point Tracking) to extract the maximum of wind power available at the turbine, and the reactive stator power reference is determinate to ameliorate the power factor of the grid that the DFIG is connected. The role of the Matrix Converter, that connects the power grid to the rotor of the DFIG, is to generate the rotor voltage necessary to control the active and reactive stator powers. The performances of our approach are confirmed by a simulation results.*

Résumé - *Dans le présent article, une commande adaptative par les modes de glissement des puissances statoriques est présentée. Cette loi de commande présente une haute performance comparant à d'autres lois de commande grâce à une identification en temps réel de la résistance rotorique, qui est très sensible avec la température. La référence de la puissance active statorique est donnée par un algorithme MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui va nous permettre d'extraire le maximum de puissance au niveau de la turbine, et la référence de la puissance réactive statorique est donnée afin d'améliorer le facteur de puissance du réseau électrique auquel la MADA est connectée. Le rôle du convertisseur matriciel qui connecte le réseau au circuit rotorique de la MADA est de générer les tensions rotoriques nécessaires pour la commande des puissances statoriques. Les performances de notre approche sont confirmées par des résultats de simulation.*

Keywords: MPPT - DFIG (Doubly Fed Induction Generator) - Reactive & Active Stator Powers – Rotor Resistance On-Line Identification – Matrix Converter.

1. INTRODUCTION

L'énergie éolienne est parmi les énergies renouvelables où plusieurs pays ont commencé à investir dans ce domaine d'une façon remarquable à cause des raisons économiques et écologiques. Pour cela, un grand nombre des travaux de recherche sont dédiés afin d'améliorer l'efficacité de la chaîne de conversion éolienne.

Dans le présent travail, nous nous intéressons à élaborer une loi de commande robuste adaptative par les modes de glissement des puissances active et réactive statoriques, d'une machine asynchrone à double alimentation, et qui constitue la partie générateur d'une éolienne à axe horizontal.

La commande directe adaptative par les modes glissants présente des avantages par rapport à d'autres lois de commande [1, 2, 12], grâce à sa synthèse qui est basée sur le

* ab.djoudi@cder.dz

modèle couplé de la MADA et qui tient en compte les variations de la résistance rotorique, qui est très sensible à la température [8], en utilisant un algorithme d'adaptation pour son identification.

Dans le cas d'une chaîne de conversion à base d'une MADA, la commande est la tension rotorique générée par le convertisseur back-to-back. Vu à ses avantages par rapport à d'autres types de convertisseurs Alternatif/Alternatif, le convertisseur matriciel est choisi dans notre étude pour générer les tensions rotoriques.

Le présent article est organisé en cinq paragraphes. Une modélisation de la MADA en mode génératrice, l'élaboration de la commande adaptative par les modes glissants, ensuite une brève modélisation du convertisseur matriciel. On termine notre article par des résultats de simulation, et une conclusion.

2. MODELISATION DE LA MADA EN MODE GENERATRICE

En définissant le vecteur d'état par,

$$(I_{rd}, I_{rq}, \Phi_{rd}, \Phi_{rq}, \omega)^T = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)^T,$$

la représentation d'état de la MADA en mode génératrice est donnée par:

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

Avec,

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

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

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

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

$$f_5 = c_1 (x_4 x_1 - x_3 \cdot x_2) + c_2 (C_g - C_{vis})$$

$$a_1 = \left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{1}{\sigma T_r} \right); \quad a_2 = \frac{1}{\sigma L_r T_s}; \quad a_3 = \frac{1}{\sigma L_r}$$

$$a_4 = \frac{(1 - \sigma)}{\sigma L_m}; \quad b = R_r; \quad c_1 = \frac{p^2}{j}; \quad c_2 = \frac{p}{j}$$

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 des flux courants au rotor;

V_{rd} / V_{rq} , Composante d'axe d/q de la tension de commande au rotor;

T_r / T_s , représente la constante 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 + turbine).

3. ELABORATION DE LA COMMANDE ADAPTATIVE PAR LES MODES DE GLISSEMENT

Deux étapes sont envisagées pour la synthèse de cette commande-

3.1 Identification de la résistance rotorique

Pour estimer la valeur de la résistance rotorique, nous proposons le système dynamique suivant:

$$\frac{d\hat{x}_1}{dt} = A_1 + a_3 \cdot V_{rd} + W \text{sign}(x_1 - \hat{x}_1) \quad W > 0 \quad (2a)$$

Avec,

$$A_1 = - \left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{\hat{R}_r}{\sigma L_r} \right) \hat{x}_1 + \omega_s \cdot x_2 + a_2 \cdot x_3 - a_3 \cdot x_5 \cdot x_4 - a_4 \cdot V_{sd}$$

x_3 et x_4 sont obtenus par,

$$x_{3,4} = L_s \cdot x_{1,2} + L_m \cdot I_{sd,q} \quad (2b)$$

I_{sd} / I_{sq} , Composante d'axe d/q des courants au rotor;

La dynamique de l'erreur entre la première équation du (1) et (2a) est donné par,

$$\dot{\tilde{x}}_1 = - \left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{R_r}{\sigma L_r} \right) x_1 + \left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{\hat{R}_r}{\sigma L_r} \right) \hat{x}_1 - W \text{sign}(\tilde{x}_1), \tilde{x}_1 = x_1 - \hat{x}_1 \quad (3)$$

On peut récrire la relation (3) sous la forme (4), comme suite,

$$\dot{\tilde{x}}_1 = - \left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{R_r}{\sigma L_r} \right) \tilde{x}_1 + \frac{E_R}{\sigma L_r} \hat{x}_1 - W \text{sign}(\tilde{x}_1) \quad (4)$$

Pour estimer la valeur de la résistance rotorique, on propose une fonction de Lyapunov définie positive comme suivant,

$$V = 1/2 \tilde{x}_1^2 + 1/2 E_R^2 \quad (5)$$

Avec, $E_R = R_r - \hat{R}_r$

La dérivée de la fonction de Lyapunov est donnée par,

$$\dot{V} = - \left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{R_r}{\sigma L_r} \right) \cdot \tilde{x}_1^2 + \frac{E_R}{\sigma L_r} \hat{x}_1 \hat{x}_1 - E_R \dot{E}_R - W |\tilde{x}_1| |\tilde{x}_1| \quad (6)$$

Sachant que la variation de la résistance rotorique est constante par rapport à celle des grandeurs d'états électriques, alors,

$$\dot{V} = - \left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{R_r}{\sigma L_r} \right) \cdot \tilde{x}_1^2 + \frac{E_R}{\sigma L_r} \hat{x}_1 \tilde{x}_1 - E_R \hat{R}_r - W |\tilde{x}_1| \quad (7)$$

Pour que \dot{V} soit définie négative, on prend,

$$\dot{\hat{R}}_r = - \frac{\hat{x}_1 \tilde{x}_1}{\sigma L_r} \quad (8)$$

Dans ces conditions, \hat{R}_r , converge vers R_r .

3.2 Elaboration de la commande par les modes de glissement

La commande par mode de glissement est une commande non linéaire robuste vis-à-vis aux variations paramétriques et aux erreurs de modélisation. L'application d'une cette commande est intéressante pour commander les puissances active et réactive statoriques.

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 :

$$\begin{cases} P_s = V_{sq} \cdot I_{sq} = d_1 x_2 + d_2 x_4 \\ \quad \quad \quad = h_1(x) \\ Q_s = V_{sq} \cdot I_{sd} = d_1 x_1 + d_2 x_3 \\ \quad \quad \quad = h_2(x) \end{cases} \quad (9)$$

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

Le modèle estimé de la MADA est de la classe non linéaire affine en la commande,

$$\begin{cases} \dot{x} = \hat{f}(x) + g(x) \cdot u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (10)$$

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

$$\hat{f} = \left(\hat{f}_1, \hat{f}_2, \hat{f}_3, \hat{f}_4, \hat{f}_5 \right)^T, \quad g = \begin{pmatrix} a_3 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & a_3 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}^T$$

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

$$\hat{f}_1 = -\hat{a}_1 \cdot x_1 + \omega_s \cdot x_2 + a_2 \cdot x_3 - a_3 \cdot x_5 \cdot x_4 - a_4 \cdot V_{sd}$$

$$\hat{f}_2 = -\omega_s \cdot x_1 - \hat{a}_1 \cdot x_2 + a_2 \cdot x_4 + a_3 \cdot x_5 \cdot x_3 - a_4 \cdot V_{sd}$$

$$\hat{f}_3 = -\hat{b} \cdot x_1 + \omega_s \cdot x_4 - x_5 \cdot x_4$$

$$\hat{f}_4 = -\hat{b} \cdot x_2 - \omega_s \cdot x_3 + x_5 \cdot x_3$$

$$\hat{f}_5 = f_5$$

$$\hat{a}_1 = \left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{R_r}{\sigma L_r} \right) \quad \hat{b} = \hat{R}_r$$

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

$$\begin{cases} S_1 = y_1 - y_{1\text{ref}} \\ S_2 = y_2 - y_{2\text{ref}} \end{cases} \quad (11)$$

La dynamique de S_1 et S_2 est telle que,

$$\begin{cases} \dot{S}_1 = \frac{\partial S_1}{\partial X} \cdot \dot{x} \\ \quad = \frac{\partial h_1}{\partial X} \cdot (\hat{f}(x) + g(x) u) - \dot{y}_{1\text{ref}} \\ \dot{S}_2 = \frac{\partial S_2}{\partial X} \cdot \dot{x} \\ \quad = \frac{\partial h_2}{\partial X} \cdot (\hat{f}(x) + g(x) u) - \dot{y}_{2\text{ref}} \end{cases} \quad (12)$$

Le système (12) peut encore s'écrire sous la forme compacte suivante,

$$\begin{cases} \dot{S}_1 = L_{\hat{f}} \cdot h_1 + L_g \cdot h_1 \cdot u - \dot{y}_{1\text{ref}} \\ \dot{S}_2 = L_{\hat{f}} \cdot h_2 + L_g \cdot h_2 \cdot u - \dot{y}_{2\text{ref}} \end{cases} \quad (13)$$

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

$$\begin{cases} \dot{S}_1 = -K_s \cdot \text{sign}(S_1) - G_s \cdot S_1 \\ \dot{S}_2 = -K_s \cdot \text{sign}(S_2) - G_s \cdot S_2 \end{cases} \quad (14)$$

avec, $K_s > 0$ et $G_s > 0$

En résolvant le système (14), on trouve,

$$V_{rd} = \frac{B_1(x) - K_s \cdot \text{sign}(Q_s - Q_{s\text{ref}})}{(d_2 + d_1 \cdot a_3)} \quad (15)$$

$$V_{rq} = \frac{B_2(x) - K_s \cdot \text{sign}(P_s - P_{s\text{ref}})}{(d_2 + d_1 \cdot a_3)} \quad (16)$$

Où,

$$B_1(x) = (-d_1 \cdot \hat{a}_1 - G_s \cdot d_1 - \hat{b} \cdot d_2) \cdot x_1 + (d_1 \cdot \omega_s) \cdot x_2 + (a_2 \cdot d_1 - K_s \cdot d_2) \cdot x_3 + (d_2 \cdot \omega_s) \cdot x_4 + (-d_1 \cdot a_3 - d_2) \cdot x_5 \cdot x_4 - d_1 \cdot a_4 \cdot V_{sd} \quad (17)$$

$$B_2(x) = -(d_1 \cdot \omega_s) \cdot x_1 + (-d_1 \cdot \hat{a}_1 - G_s \cdot d_1 - \hat{b} \cdot d_2) \cdot x_2 - (d_2 \cdot \omega_s) \cdot x_3 + (a_2 \cdot d_1 - K_s \cdot d_2) \cdot x_4 - (-d_1 \cdot a_3 - d_2) \cdot x_5 \cdot x_4 - d_1 \cdot a_4 \cdot V_{sq} \quad (18)$$

4. UNE BREVE PRESENTATION DU CONVERTISSEUR MATRICIEL DIRECT

Il y a plusieurs topologies de convertisseur matriciel qui sont proposées dans la littérature. Dans notre étude, on considère le convertisseur matriciel direct figurant dans la figure 1.

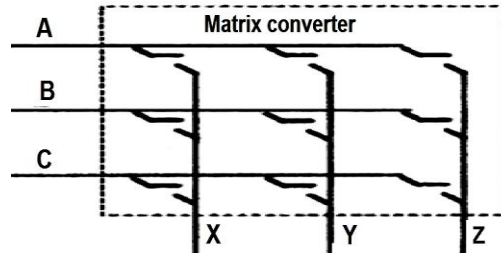


Fig. 1: Structure d'un convertisseur matriciel

Le convertisseur matriciel, comme son nom l'indique, est constitué d'une matrice (3×3) de neuf commutateurs de puissance bidirectionnel, en courant (car la charge bidirectionnel en courant) et bidirectionnelle en tension (car la source est bidirectionnel en tension). La topologie du convertisseur matriciel montre l'existence de trois cellules de commutations (cellule X, cellule Y et cellule Z). Chaque cellule est formée de trois commutateurs.

Afin d'engendrer les tensions de référence à la sortie du convertisseur, plusieurs méthodes de modulation sont présentées dans la littérature. Dans le présent article, on utilise la modulation calculée, [11].

4. RESULTATS DE SIMULATIONS

Avant de commencer à exposer nos résultats de simulations, nous donnons les valeurs des paramètres de la chaîne éolienne, y compris celles des approches développées.

Données de la turbine éolienne

Nombre de pales, 03 ----- Diamètre d'une pale; R = 35.5 m

Caractéristique de la voilure, $C_p = 0.5 \sin\left(\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18.2}\right)$

Gain du multiplicateur, G = 65

Données de la MADA

-Puissance nominale, $P_N = 1.5$ MW

-Nombre de paires de pôles, p = 2

-Fréquence réseau, f = 50 Hz

-Résistance statorique nominale, $R_s = 0.012$ Ω

-Résistance rotorique nominale, $R_r = 0.021$ Ω

- Inductance statorique, $L_s = 0.0137$ H
- Inductance rotorique, $L_r = 0.0137$ H
- Inductance mutuelle, $L_m = 0.0135$ H
- Coefficient de viscosité, $f = 7.1 \times 10^{-3}$
- Inertie totale vue côté MADA, $j = 50$ kg.m²

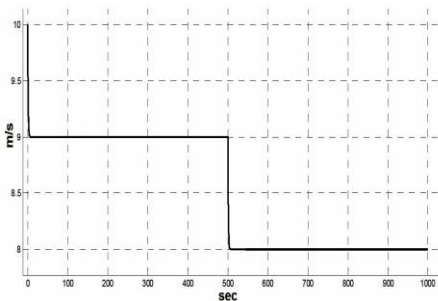
- Tension du réseau, 690 V , 50 Hz
- Gains du régulateur, $G_s = 10^4$ et $K_s = 10^6$
- Gains de l'algorithme d'adaptation, $W = 10^4$
- Variation paramétrique brusque de la résistance statorique de 50 %
- Variation paramétrique brusque de la résistance rotorique dans la figure 2.f
- Commande 'Perturb and Observe' (MPPT)

Face à un profil du vent (Fig. 2a-), le coefficient de puissance de la turbine converge en temps fini à sa valeur maximum, cela confirme la convergence de la vitesse de rotation de la MADA à sa valeur optimale (Fig. 2b-).

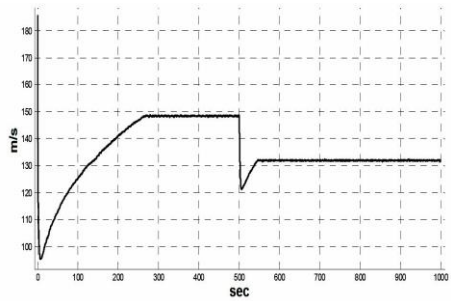
Les puissances statoriques suivent leurs références (Fig. 2d-, Fig. 2 e-). Le courant statorique (Fig. 2g-) et rotorique (Fig. 2h-) varie dans leurs bondes admissibles, et cela même en présence des variations paramétriques au niveau de la résistance statorique (qui atteint 100% de sa valeur nominale).

D'après la figure 2f-, la valeur de la résistance rotorique identifiée utilisant notre loi d'adaptation (donnée par la relation (8)), suit celle de la résistance rotorique avec une erreur de 5 % au maximum.

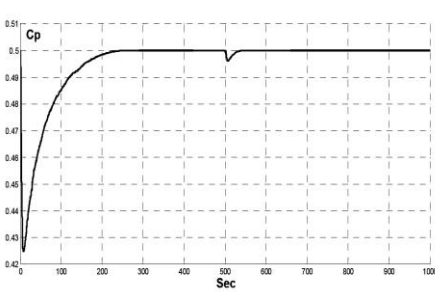
Ces bons résultats sont atteints grâce à la robustesse de la commande par les modes de glissement et par la loi d'identification en temps réel de la résistance rotorique qui est, d'après les résultats de simulation, atteint sa valeur réelle en temps fini même en présence des variations paramétriques au niveau de la résistance statorique.



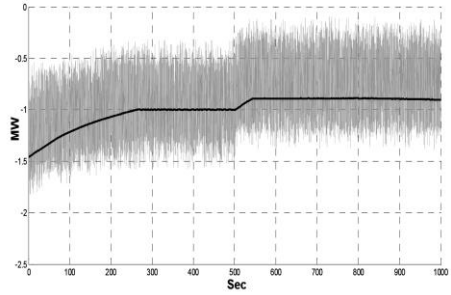
2a- Profil du vent



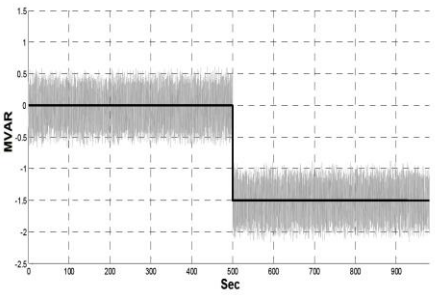
2b- Vitesse de rotation



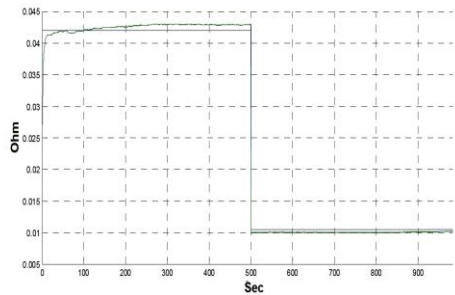
2c- Coefficient de puissance



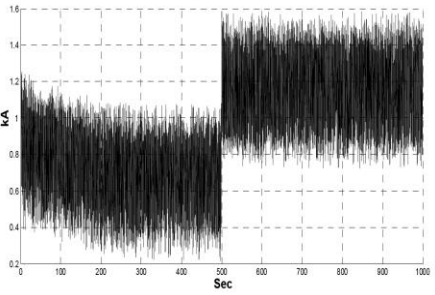
2d- Puissance active stator. et sa référence



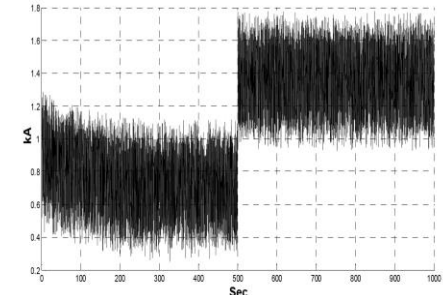
2 e- Puissance réactive et sa référence



2f- Résistance réelle et celle identifiée



2g- Courant statorique



2h- Courant rotorique

Fig. 2: Résultats de simulations

5. CONCLUSION

Il est présenté dans cet article, une commande robuste adaptative par les modes de glissement des puissances statoriques, MADA en mode générateur dans une éolienne à axe horizontal, et cela afin d'atteindre une puissance maximale extraite à partir du vent.

Une telle commande qui a montré sa robustesse vis-à-vis aux variations paramétriques, tout en respectant les plages de variation des grandeurs d'états.

En profitant de ces avantages, le convertisseur matriciel est utilisé dans notre étude afin d'engendrer les tensions rotoriques de commande.

REFERENCES

- [1] N.A. Nanssens, G. Lambin and N. Bragard, 'Active Power Control Strategies of DFIG Wind Turbines', IEEE Power Technology, 1-5 July, Lausanne (Switzerland), pp. 516 – 521, 2007.
- [2] J. Jeong, Y. Ju and 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.
- [3] B. Chitti Babu and 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.
- [4] T. Senjyu, Y. Ochi, A. Yona and H. Sekine, 'Parameter Identification of Wind Turbine for Maximum Power Point Tracking Control', Proceedings of International Conference on Electrical Machines And Systems, pp. 248 – 252, Seoul, Korea, Oct. 8-11, 2007.
- [5] R. Pena, J.C. Clare and G.M. Asher, 'Doubly Fed Induction Generator Using Back-To-Back PWM Converters and Its Applications to Variable speed Wind-Energy Generation', IEE of Proceedings of Electrical Power Applied, Vol. 143, N°3, May 1996.
- [6] M. Yamamoto and O. Motoyoshi, 'Active and Reactive Power Control for Doubly-Fed Wound Rotor Induction Generator', IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 6, N°4, pp. 624 – 629, October 1991.
- [7] A. Miller, E. Muljadi and D.S. Zinger, 'A Variable Speed Wind Turbine Power Control', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 12, N°2, pp. 181 – 186, 1997.
- [8] S.M. Barakati, M. Kazerani, and X. Chen, 'A New Wind Turbine Generation System Based on Matrix Converter', Power Engineering Society General Meeting, pp. 2083 - 2089, IEEE 2005.
- [9] Z. Yan, C. Jin, and V.I. Utkin, 'Sensorless Sliding-Mode Control of Induction Motors', IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 47, N°6, pp. 1286 – 1297, 2000.
- [10] A. Tapia, G. Tapia, J. Xabier Ostolaza and J.R. Sáenz, 'Modeling and Control of a Wind Turbine Driven Doubly Fed Induction Generator', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 18, N°2, pp. 194 – 204, June 2003.
- [11] J. Jeong, Y. Ju and 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.
- [12] A. Djoudi, H. Chekireb, D. Saheb – Koussa et E.M. Berkouk, 'Exploitation Robuste d'une Eolienne à Base d'une Machine à Double Alimentation', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 15, N°4, pp. 629 – 637, 2012.