



Contrôle d'une génératrice synchrone à aimants permanents dédiée à la conversion de l'énergie éolienne par la commande directe du couple

Halim Chennoufi*, L. Lamri, Ahmed Lokmane Nemmour et Abdelmalek Khezzerar

Laboratoire d'Electrotechnique de Constantine,
Université Mentouri, Constantine, Algérie

Résumé - Dans cette communication, nous étudions le contrôle de la tension à la sortie d'une génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) connectée à un onduleur/redresseur à MLI. La méthode de contrôle directe du couple (D.T.C) est testée pour la GSAP. Ce dispositif est destiné à une application de conversion d'énergie éolienne dans le cas d'un site isolé. Des résultats de simulation sont présentés à l'aide du logiciel MATLAB et son environnement SIMULINK. Les caractéristiques de réponses aux variations de la vitesse du rotor mettent en évidence la qualité de la DTC.

1. INTRODUCTION

L'intérêt pour l'utilisation des énergies renouvelables augmente, car les populations sont de plus en plus concernées par les problèmes environnementaux. Parmi les énergies renouvelables, l'énergie éolienne est maintenant largement utilisée [1, 2].

Les éoliennes basées sur une génératrice asynchrone à rotor bobiné présentent l'inconvénient de nécessiter un système de bagues et de balais et un multiplicateur, induisant des coûts significatifs de maintenance en particulier pour les projets off-shore situés en milieu salin.

Pour limiter ces inconvénients, certains constructeurs ont développé des éoliennes basées sur des machines synchrones à grand nombre de paires de pôles et couplées directement à la turbine, évitant ainsi le multiplicateur [3, 4]. Si de plus la génératrice est équipée d'aimants permanents, le système de bagues et de balais est éliminé.

Le générateur éolien, qui est basé sur une turbine à vitesse variable et une génératrice synchrone à aimants permanents est raccordé à un bus continu par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance MLI [5]. Toutefois, en fonctionnement autonome, la vitesse de rotation et la charge n'étant pas fixes, la tension statorique peut varier dans de grandes proportions. Il devient alors nécessaire d'utiliser un système de régulation approprié afin de maintenir la tension de sortie à une amplitude et une fréquence constantes. Des travaux ont été réalisés dans ce sens [6-9] en contrôlant le dispositif constitué d'une GSAP connectée à un redresseur commandés en Modulation de Largeur d'Impulsion (M.L.I).

L'utilisation d'un redresseur à M.L.I permet, en contrôlant la fréquence des signaux de référence, de maintenir un couple négatif afin que la machine fonctionne en génératrice. Par ailleurs, le déphasage entre les signaux de référence et les courants statoriques permet de contrôler le flux de la puissance réactive.

* h_chennoufi@yahoo.fr

Le système étudié pouvant être réduit à la machine connectée au redresseur débitant sur une charge équivalente, l'objectif du système de contrôle est de maintenir constante la tension du bus continu. Dans cette communication, nous présentons les performances de la commande basée sur le contrôle direct du couple (D.T.C) testée pour la GSAP.

Après l'introduction du système étudié, nous présenterons le modèle de la machine. Ce dernier, issu du modèle classique dans le repère de Park.

La deuxième partie est dédiée à la présentation de la stratégie de commande testée.

Enfin, dans la dernière partie de la communication, nous présenterons des résultats de simulation lors de variations de la vitesse du rotor.

2. LE SYSTEME ETUDIE

Le système global étudié est constitué d'une turbine éolienne, d'une GSAP et d'un onduleur/redresseur à M.L.I. Dans le cas d'un fonctionnement en autonome avec une charge équilibrée, il est possible de ramener la charge du côté continu. Par conséquent, l'étude de la commande peut se restreindre à celle de la tension continue à la sortie du redresseur à M.L.I. Le système étudié est alors simplifié comme montré à la figure 1.

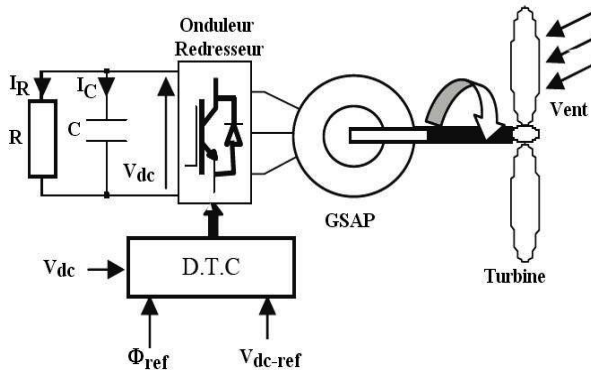


Fig. 1: Schéma de principe du système étudié

R représente la résistance de charge ramenée du côté continu et C est la capacité de filtrage en sortie de redresseur.

3. MODELE DE LA GENERATRICE SYNCHROME A AIMANTS PERMANENTS

Les équations de la GSAP, peuvent être écrites dans un repère lié au rotor comme suit:

$$\begin{aligned}
 \varphi_d &= L_d i_d + \varphi_r \\
 \varphi_q &= L_q i_q \\
 -v_d &= R_s i_d + P \varphi_d - \omega_r \varphi_q \\
 -v_q &= R_s i_q + P \varphi_q + \omega_r \varphi_d \\
 \Gamma &= P(\varphi_d i_q - \varphi_q i_d)
 \end{aligned} \tag{1}$$

où φ_r , L_d , L_q sont respectivement le flux des aimants permanents et les inductances statorique directe et en quadrature.

L'équation du couple s'écrit finalement par:

$$\Gamma = \frac{P|\varphi_s|}{2L_d L_q} \left[2\varphi_r L_q \sin \gamma - |\varphi_s| (L_q - L_d) \sin 2\gamma \right] \quad (2)$$

La dérivée du couple est donnée par:

$$\frac{d\Gamma}{dt} = \frac{P|\varphi_s|}{2L_d L_q} \left[2\varphi_r L_q \gamma \cos \gamma - 2|\varphi_s| (L_q - L_d) \gamma \cos 2\gamma \right] \quad (3)$$

La dérivée du couple en fonction du temps est toujours positive si l'angle γ est maintenu dans la plage $[-\pi/2, \pi/2]$ et dans ce cas l'augmentation du couple est proportionnelle à l'augmentation de l'angle γ si l'amplitude du flux statorique est constante.

Autrement dit, le flux statorique doit être contrôlé de manière à maintenir son amplitude constante alors que sa vitesse de rotation doit être commandée d'une façon très rapide pour obtenir un changement maximal du couple instantané [5].

Avec un flux statorique constant, la condition pour $d\Gamma/dt$ positif autour de $\gamma = 0$ est donnée par:

$$|\varphi_s| < \frac{L_q}{L_q - L_d} \varphi_r \quad (4)$$

La condition pour le maximum de l'angle admissible γ est obtenue par:

$$\gamma_m = \cos^{-1} \times \left\{ \frac{a/|\varphi_s| - \sqrt{(a/|\varphi_s|)^2 + 8}}{4} \right\} \quad (5)$$

$$\text{Où } a = \frac{\varphi_r L_q}{L_q - L_d} \quad (6)$$

Pour maintenir la dérivée du couple positive, l'angle de couple devrait être également commandé pour ne pas dépasser γ_m qui correspond au couple maximum [11, 15].

4. CONTROLE DE LA GENERATRICE SYNCHROME A AIMANTS PERMANENTS

L'objectif de la commande proposée est de contrôler la tension continue en entrée de l'onduleur V_{dc} . A partir de la valeur désirée de la tension continue, il est possible d'exprimer celle de la puissance de référence par:

$$P_{ref} = V_{dc_ref} \times i_{dc} \quad (7)$$

où i_{dc} représente le courant de sortie du redresseur.

En négligeant les différentes pertes, on obtient alors directement l'expression du couple électromagnétique de référence par :

$$\Gamma_{ref} = \frac{P_{ref}}{\Omega} \tag{8}$$

Le contrôle de la tension V_{dc} peut donc s'effectuer par l'intermédiaire du réglage du couple électromagnétique, ce qui revient à la même démarche que celle utilisée dans le cas d'une commande classique en fonctionnement moteur.

Contrôle direct du couple

Le contrôle direct de couple (DTC) basé sur l'orientation du flux statorique, utilise les valeurs instantanées du vecteur de tension. Un onduleur triphasé peut fournir huit vecteurs tensions de base instantanés, parmi lesquels deux sont nuls [11-13]. Ces vecteurs sont choisis à partir d'une table de commutation en fonction des erreurs du flux et du couple et de la position du vecteur flux statorique.

Dans cette technique, on n'a plus besoin de la position du rotor pour choisir le vecteur tension. Cette particularité définit la DTC comme une méthode bien adaptée pour le contrôle sans capteur mécanique des machines à courant alternatif.

Pour fixer l'amplitude du flux statorique, l'extrémité du vecteur flux doit avoir une trajectoire circulaire. Pour cela, le vecteur tension appliqué doit toujours être perpendiculaire au vecteur flux. Mais comme on n'a que huit vecteurs, on est obligé d'accepter une variation d'amplitude autour de la valeur fixe souhaitée. Ceci est réalisé par des comparateurs à hystérésis pour le flux et le couple. La figure 2 donne la structure du contrôle direct du couple adoptée pour l'application étudiée.

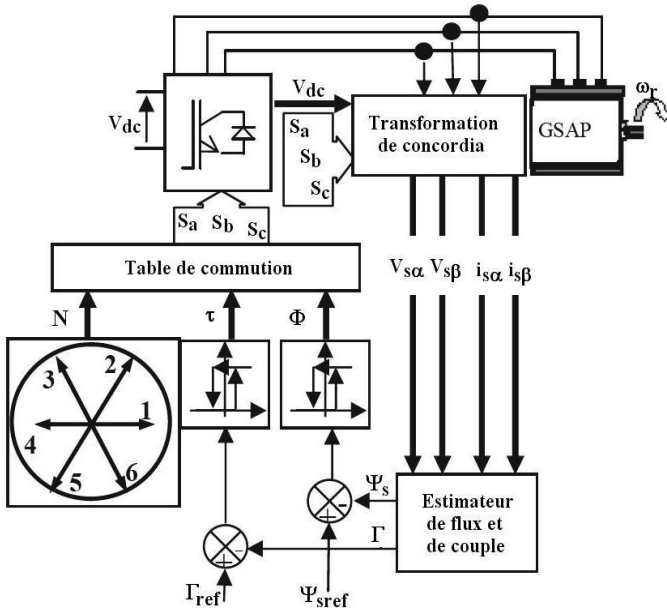


Fig. 2: Schéma de la commande directe du couple de la GSAP

Ainsi en sélectionnant un vecteur approprié, l'extrémité du flux peut être contrôlée et déplacée de manière à maintenir l'amplitude du vecteur flux à l'intérieur d'une certaine fourchette. Le choix de V_s dépend de la variation souhaitée pour le module du flux mais également de l'évolution souhaitée pour sa vitesse de rotation et par conséquent pour le couple.

Ainsi en sélectionnant un vecteur approprié, l'extrémité du flux peut être contrôlée et déplacée de manière à maintenir l'amplitude du vecteur flux à l'intérieur d'une certaine fourchette. Le choix de V_s dépend de la variation souhaitée pour le module du flux mais également de l'évolution souhaitée pour sa vitesse de rotation et par conséquent pour le couple.

On délimite généralement l'espace d'évolution de φ_s dans le référentiel fixe (stator) en le décomposant en six zones symétriques par rapport aux directions des vecteurs de tensions non nuls. La position du vecteur flux dans ces zones est déterminée à partir de ces composantes. Lorsque le vecteur flux se trouve dans une zone numérotée i , les deux Vecteurs V_i et V_{i+3} ont la composante de flux la plus importante.

En plus leur effet sur le couple dépend de la position du vecteur flux dans la zone (ambiguïté sur le couple). Ainsi ils ne sont jamais appliqués. Le contrôle du flux et du couple est assuré en sélectionnant un des quatre vecteurs non nuls ou un des vecteurs nuls. Le rôle du vecteur tension sélectionné est décrit sur la figure 3.

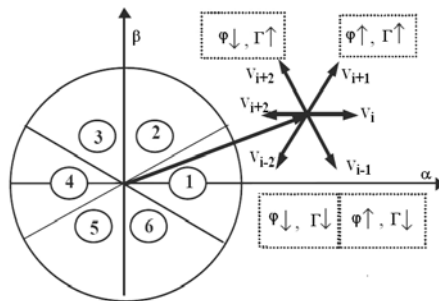


Fig. 3: Sélection du vecteur de tension selon la zone N=1

Plusieurs tables de commutation peuvent être utilisées pour contrôler le couple. Chaque table influe sur le comportement de la machine en terme de couple, d'ondulation des courants, de fréquence de commutation et possibilités de fonctionnement dans deux ou quatre quadrants. Le **Tableau** suivant montre quatre tables de commutation possibles.

Tableau 1: Tables de commutation possibles

	$\Gamma \uparrow \varphi_s \uparrow$	$\Gamma \uparrow \varphi_s \downarrow$	$\Gamma \downarrow \varphi_s \uparrow$	$\Gamma \downarrow \varphi_s \downarrow$
Stratégie 1	V_{i+1}	V_{i+2}	V_0, V_7	V_0, V_7
Stratégie 2	V_{i+1}	V_{i+2}	V_i	V_0, V_7
Stratégie 3	V_{i+1}	V_{i+2}	V_i	V_{i+3}
Stratégie 4	V_{i+1}	V_{i+2}	V_{i-1}	V_{i-2}

Le couple électromagnétique est contrôlé en contrôlant l'amplitude et la vitesse de rotation du vecteur flux statorique, aussi lorsqu'on applique des vecteurs tensions nuls pour diminuer l'amplitude de ce dernier, il reste à sa position dans le cas d'une machine asynchrone puisque le flux statorique est uniquement déterminé par la tension statorique. Par contre dans le cas de la MSAP, le flux statorique φ_s continue à changer même lorsque le vecteur tension nul est appliqué parce que les aimants permanents tournent avec le rotor.

Par conséquent, les vecteurs tensions nuls ne sont pas utilisés dans la DTC de la MSAP. En d'autres termes, le flux statorique doit être toujours en mouvement par rapport au flux rotorique. On a donc choisi la 4^{ème} stratégie et sa table de commutation est la suivante:

Tableau 2: Table de commutation

Couple	Flux	1	2	3	4	5	6
$C_{cpl} = 1$	$C_{flx} = 1$	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1
	$C_{flx} = 0$	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2
$C_{cpl} = 0$	$C_{flx} = 1$	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
	$C_{flx} = 0$	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4

La table de commande donnée ci-dessus est construite en fonction de l'état des variables C_{flx} du correcteur de flux et C_{cpl} du correcteur du couple et de la zone N de la position de flux statorique φ_s .

Avec: $V_1 = [1 \ 0 \ 0]$; $V_2 = [1 \ 1 \ 0]$; $V_3 = [0 \ 1 \ 0]$; $V_4 = [0 \ 1 \ 1]$; $V_5 = [0 \ 0 \ 1]$; $V_6 = [1 \ 0 \ 1]$.

A partir de la position du vecteur φ_s , nous pouvons obtenir le numéro du secteur N (N=1 à 6) par la relation suivante:

$$(2N-3)\pi/6 < \theta < (2N-1)\pi/6$$

Il est à noter que dans le cas de la commande directe du couple, l'effet de la non linéarité des matériaux est implicitement pris en compte étant donné que les grandeurs d'état électriques sont constituées par les flux [12].

5. RESULTATS DE SIMULATION

Le fonctionnement du dispositif complet a été simulé sous l'environnement Matlab®-Simulink® avec une période d'échantillonnage de 100 μ s. Dans cette stratégie de commande, la référence de la tension à la sortie du redresseur est prise égale à $V_{dc-ref} = 600$ V et la variation de la vitesse rotorique est donnée à la figure 4. Dans ce qui suit, nous présentons des résultats de simulation.

La réponse de la tension continue à la sortie du redresseur est donnée par la figure 5. On peut constater que la tension est bien régulée et rapide. Cela est également le cas de la rejection des perturbations constituées dans notre cas par les variations de la vitesse. La référence du flux statorique est prise égale à $\Phi_{sref} = 0.867$ Wb.

La figure 6 montre l'évolution de flux statorique. Une fois le régime transitoire dépassé, la valeur du module du flux reste proche de celle de référence et n'est pas influencée par les variations de la vitesse.

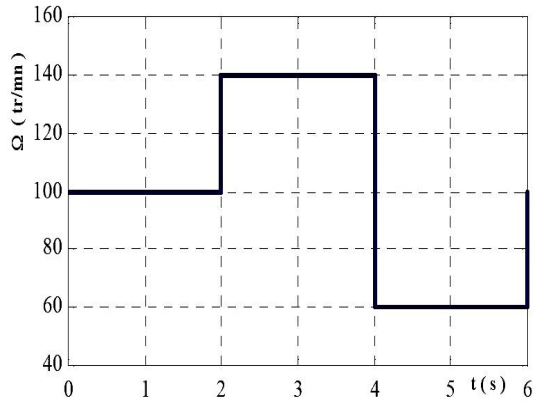


Fig. 4: Vitesse d'entraînement

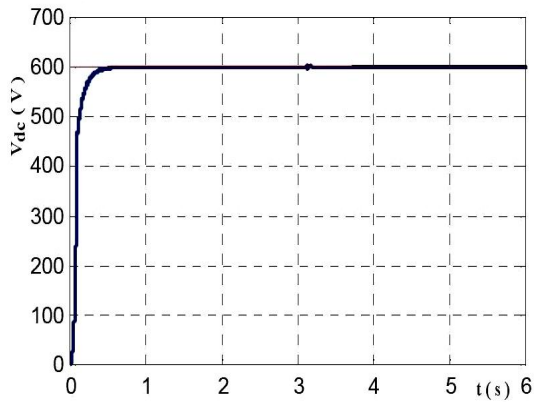


Fig. 5: Tension redressée

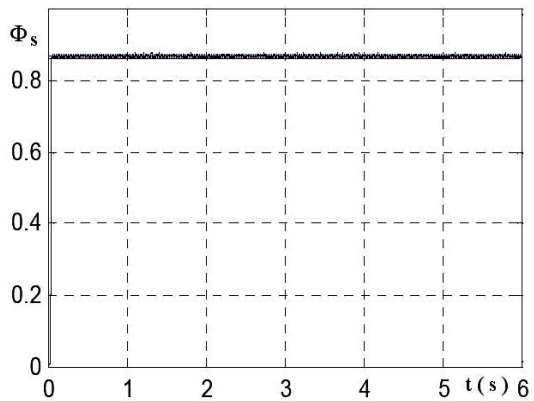


Fig. 6: Flux statorique

La figure 7 montre l'évolution des deux composantes du flux statoriques $\Phi_{s\alpha}$ et $\Phi_{s\beta}$.

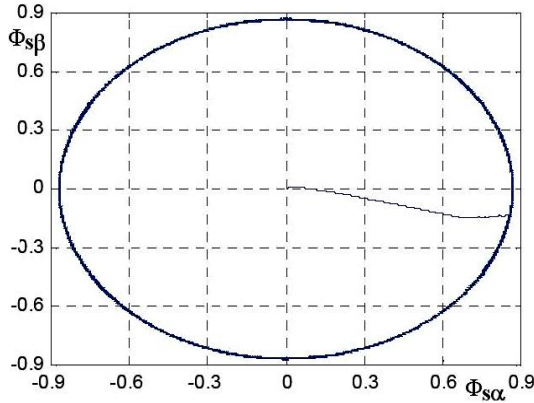


Fig. 7: Trajectoire de flux statorique

Sur la figure suivante, nous présentons l'allure des flux statoriques $\Phi_{s\alpha}$ et $\Phi_{s\beta}$. Nous remarquons nettement la variation de la fréquence due à celle de la vitesse. En revanche, les amplitudes du flux demeurent constantes suite à la régulation de ce dernier (Fig. 8).

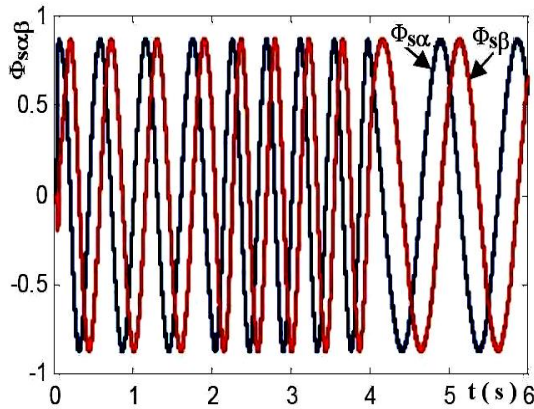


Fig. 8: Flux dans le repère de Concordia

Sur la figure 9, nous représentons les évolutions des courants $i_{s\alpha}$ et $i_{s\beta}$. Ces derniers sont sensibles aux variations de la vitesse pour adapter le couple pour que la tension, et donc la puissance générée, demeurent constantes égales aux valeurs de référence. Nous remarquons également la variation de la fréquence due à celle de la vitesse.

La figure 10 montre l'évolution temporelle d'un courant de phase statorique lors d'une variation de la vitesse. L'amplitude ainsi que la fréquence s'adaptent suite à la variation de la vitesse.

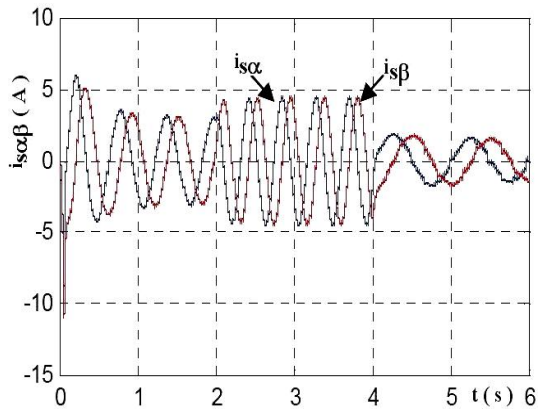


Fig. 9: Courants statoriques dans le repère de Concordia

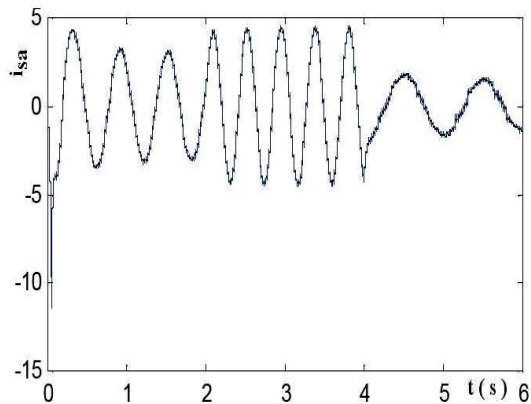


Fig. 10: Courant de phase statorique

6. CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons présenté l'étude du contrôle de la tension continue d'un système constitué d'une génératrice synchrone à aimants permanents débitant sur un redresseur à MLI. La stratégie de commande proposée est basée sur la commande directe du couple afin de garantir bonne performance comme confirmée par les résultats de simulation effectués sous l'environnement Matlab®-Simulink®. Ces derniers semblent donner des résultats très proches en termes de dynamique et de réjection de perturbation.

ANNEXE

Le **Tableau 3** donne les paramètres de la machine étudiée.

Tableau 3: Paramètres de la machine

Paramètre	valeur	Paramètre	valeur
P_N	7.5 kW	N_N	100 tr/mn

U_N	300 W	C_N	500 N.m
Φ_N	0.867 Wb	R_s	2.2 Ω
L_{sd}	0.0448 H	L_{sq}	0.1027 H
P	24		

REFERENCES

- [1] K. Ghedamsi, D. Aouzellag and E.M. Berkouk, 'Control of Wind Generator Associated to a Flywheel Energy Storage System', *Renewable Energy*, Vol. 33, N°1, pp. 2145 – 2156, 2008.
- [2] J.T.G. Pierik, J. Morren, E.J. Wiggelinkhuizen, S.W.H. de Haan, T.G. wa Engelen and J. Boezelie, 'Aspects of Offshore Wind Farms II (Erao II) Volume 1: Dynamic Models of Wind Farms', ECN-C--04-050, Delft University of Technology, June 2004.
- [3] M. El Mokadem, 'Modélisation et Simulation d'un Système Hybride pour un Site Isolé. Problématique Liée aux Fluctuations et Variations d'Energie au Point de Couplage', Thèse de Doctorat, Génie électrique, Université du Havre, 131 p., 2006.
- [4] L. Leclercq, 'Apport du Stockage Inertiel Associé à des Eoliennes dans un Réseau Electrique en vue d'Assurer des Services Systèmes'. Thèse de Doctorat, Génie Electrique, Université des Sciences et Technologies de Lille, Villeneuve d'Asq, 171 p, 2004.
- [5] D. Seyoum and C. Grantham, 'Terminal Voltage of a Wind Turbine Driven Isolated Induction Generator Using Stator Oriented Field Control', *Transaction on Industry Applications*, pp. 846–852, 2003.
- [6] A. Nesba, R. Ibtouen and O. Touhami, 'Dynamic Performance of Self-Excited Induction Generator Feeding Different Static Loads', *Serbian Journal of Electrical Engineering*, Vol. 3, N°1, pp. 63 – 76, 2005.
- [7] B. Boukhezzer, L. Lupu, H. Sigerdidjane and M. Hand, 'Multivariable Control Strategy for Variable Speed, Variable Pitch Wind Turbines', *Renewable Energy*, Vol. 32, N°8, pp. 1273 – 1287, 2006.
- [8] P. Tang, G. Yang, M. Luo and T. Li, 'A Current Control Scheme with Tracking Mode for PMSM System', *Systems and Control in Aerospace and Astronautics*, 1st International Symposium, pp. 872 - 876, 2006.
- [9] S. El Aïmani, 'Modelling and Simulation of Doubly Fed Induction Generator for Variable Speed Wind Turbines Integrated in a Distribution Network', In: 10th European Conference on Power Electronics and Application, Toulouse, France, 2003.
- [10] D. Rekioua, T. Rekioua and S. Alloune, 'Switching Strategies in Direct Torque Control of Induction Machine: Modelling and Simulation', in *Proceedings of the 8th International Conference Modelling and Simulation*, Lyon, France, pp. 318 – 321, July 4-7, 2004.
- [11] S. Arnalite, J.C. Burgos and J.L. Rodriguez-Amendo, 'Direct Torque Control of a Doubly-Fed Induction Generator for Variables Speed Wind Turbines', *Electric Power Components and Systems*, Vol. 30, N°2, pp. 199 - 216, 2002.
- [12] D. Sun, F. Weizhong and H. Yikang, 'Study on the Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Drives', *Electrical Machines and Systems*, ICEMS 2001. *Proceedings of the Fifth International Conference*, pp. 571 - 574, 2001.
- [13] J. Luukko and J. Pyrhönen, 'Selection of the Flux Linkage Reference in a Direct Torque Controlled Permanent Magnet Synchronous Motor Drive', *IEEE*, in *Proc. AMC '98-COIMBRA*, pp. 198 - 203, 1998.
- [14] L. Mocarelli and M. Clori, 'Doubly Fed Induction Generator for Wind Turbine Controlled by Direct Torque Control and Voltage Oriented Control', *Aalborg University - Group 901 eph3 - Fall semester*, 2008.
- [15] J. Arbi and I. Slama-Belkhodja, 'Direct Torque Control in Presence of Current Sensor Failure in Variable Speed Wind System: Effect Analysis, Detection and Control Reconfiguration', *Journal of Electrical Systems*, Vol. 4, N°1, pp. 51 – 59, 2008.