

## Commande par mode glissant d'ordre supérieur d'une GASDE intégrée dans un système éolien à double rotor

H. Kahal \*, R. Taleb, Z.E. Boudjema et A. Bouyekni

Département d'Electrotechnique, Université Hassiba Benbouali, Chlef, Algérie  
Laboratoire Génie Electrique et Energies Renouvelables, LGEEER

(reçu le 10 Mars 2018 - accepté le 30 Mars 2018)

**Résumé** - La commande par orientation des flux réalisée par un régulateur proportionnel intégral (PI) de la Génératrice Asynchrone Double Etoile (GASDE) présente plusieurs inconvénients, tels que la complication des paramètres de contrôle, des performances dynamiques médiocres et une robustesse réduite. Par conséquent, sur la base d'un modèle d-q de la GASDE associé à deux convertisseurs AC-DC, on propose un schéma de commande avancé basé sur le mode glissant d'ordre supérieur. La commande par mode glissant classique a un grand effet de chattering sur la tension continue à la sortie des deux redresseurs. Dans le but de résoudre ce problème, le contrôle par mode glissant supérieur est utilisé. Les résultats de simulation montrent l'avantage de la méthode proposée sur l'efficacité et la robustesse face à la variation paramétriques de la GASDE.

**Abstract** - Traditional field oriented control using proportional integral (PI) regulator for the voltage DSIGs driven have many disadvantages such parameter tuning complication, mediocre dynamic performances and reduced robustness. Therefore, based on a d-q model of the DSIG supplied by two AC-DC converters, this article proposes an advanced control scheme based on high order sliding mode (HOSMC). The usual sliding mode control (SMC) has large chattering on the DC voltage result on the exit of the two rectifiers. With the purpose to solve this problem, the high order sliding mode control is used. The simulation results show the advantage of the proposed method in the efficiency and robustness against parameters variation of the DSIG.

**Keywords:** DSIG - SMC - HOSMC - Dual rotor wind turbine - AC-DC converter - PI regulator.

### 1. INTRODUCTION

Ces dernières années, l'énergie éolienne est devenue la ressource renouvelable la plus utilisée. Elle peut s'installer dans le monde entier [1-3]. Cette énergie ne cause pas de gaz à effet de serre ou d'autres polluants. Les éoliennes modernes utilisent une électronique de puissance avancée pour assurer un contrôle efficace du générateur et assurer un fonctionnement compatible avec le système d'alimentation [4].

Malgré ces avancements, le rendement de l'éolien reste borné par la limite de Betz qui atteint un maximum de 59 % [5]. Pour améliorer le rendement de l'aérogénérateur, on utilise une éolienne à double rotor.

Il existe de nombreuses technologies de générateurs, parmi lesquelles la génératrice asynchrone double étoile. La GASDE a un enroulement stator de plus que le générateur d'induction ordinaire. Ils sont décalés spatialement de 30 degrés électriques avec des points neutres isolés [6]. Dans cet article, un modèle GASDE simplifié est également fourni.

La stratégie de contrôle d'une structure variable utilisant la commande par mode glissant a fait l'objet de nombreuses études et des recherches [7, 8]. Cependant, ce type de commande a un défaut essentiel, qui est le phénomène de chattering. Une façon d'améliorer les performances de la commande par mode glissant consiste à utiliser un contrôleur par mode glissant d'ordre supérieur [9].

---

\* hous.kahal@gmail.com

Ce document est structuré comme suit. On présente dans la section 2, la modélisation de l'éolien double étoile avec sa commande. La modélisation de la GASDE est présentée dans la section 3. La commande par orientation du flux d'un GASDE et la commande par mode glissant est développée dans la section 4. Enfin, les conclusions de ce travail sont tirées.

## 2. EOLIENNE A DOUBLE ROTOR

Cette éolienne est composée de deux rotors sur un axe horizontal. Le grand rotor de rayon  $R_2$  est dit principal, il développe un couple important. Le petit rotor de rayon  $R_1$  est dit secondaire. Il développe un couple moins important [5, 10].

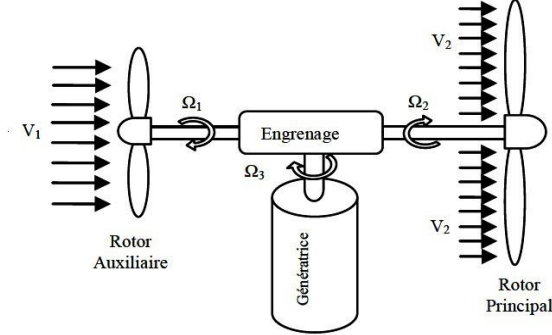


Fig. 1: Composants d'une éolienne à double rotor

### 2.1 Modélisation de l'éolien à double rotor

Appliquant le principe de superposition, nous avons donc la relation cinématique suivante:

$$\Omega_3 = \eta_1 \Omega_1 + \eta_2 \Omega_2 \quad (1)$$

avec,  $\eta_1$  et  $\eta_2$ , qui sont positifs.

Nous supposons que l'efficacité de l'engrenage est de 100 %, on peut écrire la conservation de l'énergie:

$$\sum_{k=1}^3 P_k = \Omega_1 T_1 + \Omega_2 T_2 + \Gamma (\eta_1 \Omega_1 + \eta_2 \Omega_2)^2 = 0 \quad (2)$$

L'équation dynamique de l'éolien contrarotatif est représenté par l'équation [11],

$$\begin{pmatrix} \dot{\Omega}_1 \\ \dot{\Omega}_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{J_1 J_2 + n_1^2 J_2 J_3 + n_2^2 J_1 J_3} \begin{pmatrix} J_2 + n_2^2 J_3 & -n_1 n_2 J_3 & n_1 J_2 \\ -n_1 n_2 J_3 & J_1 + n_1^2 J_3 & n_2 J_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Avec  $J$  est le multiplicateur de Lagrange.

La puissance cinétique du vent à travers le rotor secondaire est donnée par la relation suivante,

$$P_1 = 1/2 \rho \pi R_1^2 V_1^3 \quad (4)$$

Le couple aérodynamique développé par le rotor secondaire est donné par,

$$T_1 = \frac{C_p \rho \pi R_1^2 V_1^3}{2\Omega_1} \tag{5}$$

La puissance cinétique du vent à travers le rotor principal, est donnée par la relation suivante,

$$P_2 = 1/2 \rho \pi R_2^2 V_2^3 \tag{6}$$

Le couple aérodynamique développé par le rotor principale est donné par,

$$T_2 = \frac{C_p \rho \pi R_2^2 V_2^3}{2\Omega_2} \tag{7}$$

### 2.2 Commande l'éolienne double rotor

L'approche la plus classique consiste à contrôler la vitesse de rotation par un régulateur PI. La figure 2 montre une partie de notre système bouclé et corrigé par un régulateur PI.

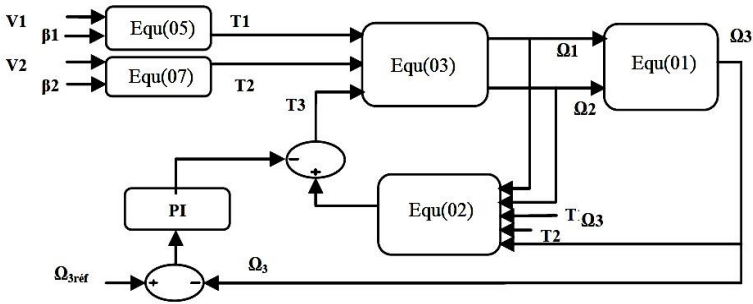


Fig. 2. La commande par un régulateur PI de l'éolien à double rotor

## 3. MODELISATION DE LA GASDE

### 3.1 Les équations des tensions

Les expressions des tensions aux stators et du rotor sont définies par le système d'équation suivant,

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{ds1} = -R_{s1} i_{ds1} + \frac{d}{dt} \phi_{qs1} - \omega_s \phi_{qs1} \\ v_{qs1} = -R_{s1} i_{qs1} + \frac{d}{dt} \phi_{qs1} + \omega_s \phi_{ds2} \\ v_{ds2} = -R_{s2} i_{ds2} + \frac{d}{dt} \phi_{ds2} - \omega_s \phi_{qs2} \\ v_{qs2} = -R_{s2} i_{qs2} + \frac{d}{dt} \phi_{qs2} + \omega_s \phi_{ds2} \\ 0 = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{qr} \\ 0 = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \phi_{dr} \end{array} \right. \tag{8}$$

### 3.2 Les équations des flux

Les expressions des flux au stator et du rotor sont définies par le système d'équation suivant,

$$\begin{cases} \phi_{ds1} = -L_{s1} i_{ds1} - L_m (i_{ds1} + i_{ds2}) + L_{md} (-i_{ds1} - i_{ds2} + i_{dr}) - L_{dq} i_{qs2} \\ \phi_{qs1} = -L_{s1} i_{qs1} - L_m (i_{qs1} + i_{qs2}) + L_{mq} (-i_{qs1} - i_{qs2} + i_{qr}) - L_{dq} i_{ds2} \\ \phi_{ds2} = -L_{s2} i_{ds2} - L_m (i_{ds1} + i_{ds2}) + L_{md} (-i_{ds1} - i_{ds2} + i_{dr}) + L_{dq} i_{qs1} \\ \phi_{qs2} = -L_{s2} i_{qs2} - L_m (i_{qs1} + i_{qs2}) + L_{mq} (-i_{qs1} - i_{qs2} + i_{qr}) - L_{dq} i_{ds1} \\ \phi_{dr} = L_r i_{dr} + L_{md} (-i_{ds1} - i_{ds2} + i_{dr}) \\ \phi_{qr} = L_r i_{qr} + L_{md} (-i_{qs1} - i_{qs2} + i_{qr}) \end{cases} \quad (9)$$

### 3.3 L'expression du couple électromagnétique

L'expression du couple électromagnétique de la GASDE s'écrit,

$$C_{em} = (3/2)(p/2)(L_m / L_{Dr})(i_{qs1} + i_{qs2})\phi_{dr} - (i_{ds1} + i_{ds2})\phi_{dr} \quad (10)$$

## 4. STRATEGIE DE COMMANDE DE LA GASDE

### 4.1 Commande vectorielle

Dans cette stratégie de commande, le vecteur de champ coïncide avec l'axe  $d-q$ . Alors la composante  $\phi_{qr}$  est égale à zéro et  $\phi_{dr}$  est constante.

L'application de la commande sur le modèle de la GASDE donnée par les équations de tensions [12].

$$i_{qr} = -\frac{(\omega_s - \omega_r) \phi_r^*}{R_r} \quad (11)$$

L'expression finale du couple électromagnétique

$$C_{em}^* = p \frac{L_m}{L_m + L_r} (i_{qs1} + i_{qs2}) \phi_r^* \quad (12)$$

L'objectif de la commande est de maintenir la tension à la sortie des deux redresseurs à la valeur désiré.

L'expression de la puissance de référence est écrite:

$$V_{dc} i_{dc} = P^* = P_{ele} = C_{em} \cdot \Omega \quad (13)$$

Le couple est contrôlé par les courants en quadrature  $i_{qs1}$  et  $i_{qs2}$  des deux étoiles,

$$i_{qs1} + i_{qs2} = \frac{(L_m + L_r) C_{em}^*}{p L_m \phi_r^*} \quad (14)$$

### 4.2 Commande par mode glissant

Le but de la commande par mode glissant consiste à maintenir la dynamique du système sur une surface  $S$  qui est défini comme,

$$S = \{x : e(x, t) = 0\} \quad (15)$$

$e$ , vecteur de l'erreur de suivi.

Cette commande doit être choisie de telles sortes de critères de stabilité de Lyapunov soient satisfaits.

$$\mathfrak{S} = 1/2 S(x)^2 \tag{16}$$

$$\dot{\mathfrak{S}} = S(x) \dot{S}(x) \tag{17}$$

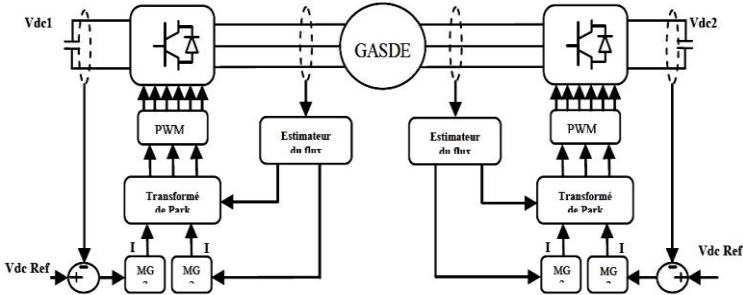


Fig. 3: Commande par mode glissant d'ordre supérieur de la GASDE

La fonction de contrôle satisfera les conditions d'atteinte sous la forme suivant,

$$U^{com} = U^{eq} + U^n \tag{18}$$

$U^{com}$ , Vecteur de commande;  $U^{eq}$ , Vecteur de commande équivalent;  $U^n$ , facteur de correction.

$$U^n = K \cdot \text{sat}(S(x)/\delta) \tag{19}$$

$\text{sat}(S(x)/\delta)$ , fonction de saturation;  $\delta$ , épaisseur de la couche limite. On propose la méthode Slotine [13].

$$S(x) = \left( \frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} e \tag{20}$$

$e$  est le vecteur d'erreur;  $\lambda$  est un coefficient positif et  $n$  est le degré relatif.

Nous choisissons l'erreur entre la tension mesurée et la tension de référence en tant que surface en mode glissant soit écrite comme suivant,

$$S = V_{dc}^* - V_{dc} \tag{21}$$

La dérivée de premier ordre, donne,

$$\dot{S} = \dot{V}_{dc}^* - \dot{V}_{dc} \tag{22}$$

Le mode de glissement existera seulement si les conditions existent

$$\dot{S} \cdot S < 0 \tag{23}$$

### 4.3 Commande par mode glissant d'ordre supérieur

En agissant sur les dérivées temporelles d'ordre supérieur, réduisant le phénomène de chattering et évitant des efforts mécaniques tout en conservant les avantages de la

commande par mode glissant [14]; en considérant la surface du mode glissant donnée par (21), l'expression suivante peut s'écrire:

$$\begin{cases} \dot{S} = \dot{V}_{dc}^* - \dot{V}_{dc} \\ \ddot{S} = Y(t, x) + \Lambda(t, x)I_{Rq} \end{cases} \quad (24)$$

En basant sur l'algorithme du mode glissant d'ordre supérieur introduit par [14], le contrôleur s'écrit,

$$I_{Rq} = v_1 + v_2 \quad (25)$$

avec,  $\dot{v}_1 = -k \cdot \text{sign}(S)$  et  $v_2 = -1 \cdot |S|^\gamma \cdot \text{sign}(S)$

Afin d'assurer la convergence des surfaces de glissement à zéro, les gains peuvent être choisis [12]

$$\begin{cases} k > \lambda / K_m \\ l^2 \geq \frac{4\lambda K_m (k + \lambda)}{K_m^2 K_m (k - \lambda)} \\ 0 < \gamma \leq 0.5 \end{cases} \quad (26)$$

## 5. RESULTATS DE SIMULATION ET DISCUSSIONS

La simulation est faite par le logiciel Matlab/Simulink, les caractéristiques de la GASDE sont données dans le **tableau 2**.

Le schéma proposé pour la simulation est présenté à la figure 5, les deux redresseurs sont connectés à la GASDE. L'objectif est de faire une comparaison entre les deux méthodes de commande.

Avec le contrôleur PI et le contrôleur en mode glissant d'ordre supérieur, deux tests ont été réalisés: le test de poursuite et la robustesse par rapport aux variations des paramètres de la génératrice.

### 5.1 Simulation de la turbine

D'après la simulation de l'éolienne double rotor présentée en figure 2,. On peut voir sur la figure 4 que la puissance de l'arbre de la génératrice est égale à la somme des puissance captée par les deux turbines. On peut déduire que l'éolienne double rotor est plus efficace que l'éolienne à un seul rotor.

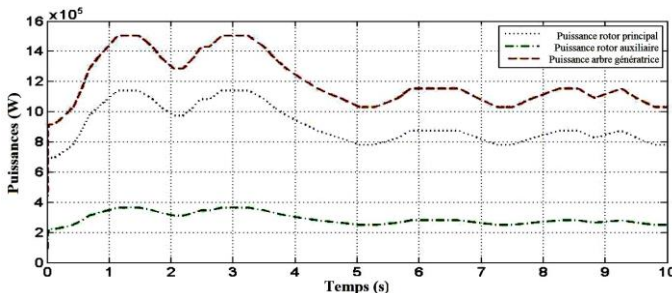


Fig. 4: Puissances des deux turbines et la puissance sur l'arbre de la génératrice

### 5.2 Test de poursuite

La tension et le courant à travers l'étoile 1 est présenté sur la figure 5. Les résultats de ce test montrent que les tensions à la sortie des deux redresseurs suivent parfaitement leurs références, comme le montre la figure 6. Il est clair que le contrôleur par mode glissant d'ordre supérieur réagit plus rapidement que le contrôleur PI; l'erreur statique est presque nulle pour les deux régulateurs. A partir de ces résultats, nous pouvons dire que le régulateur par mode glissant d'ordre supérieur est plus efficace qu'un régulateur PI.

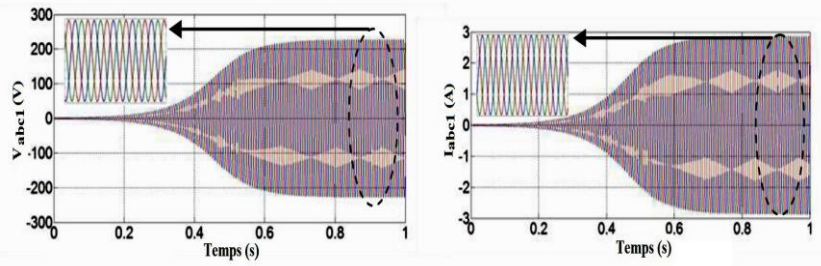


Fig. 5: Tension et le courant de la GASDE

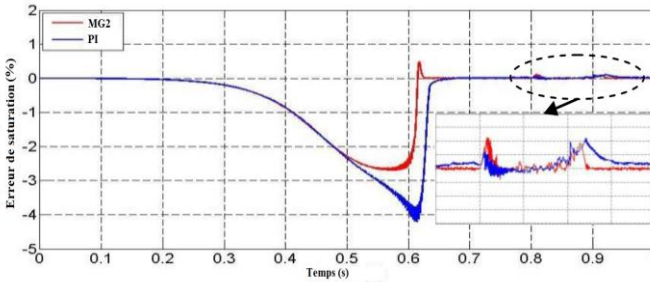


Fig. 6: Test de poursuite

### 5.3 Test de robustesse

Afin de tester le comportement de la machine pendant la saturation, nous allons dans un premier temps modifier les paramètres de la GASDE comme suit: nous avons diminué de 5 % les inductances du stator et du rotor et augmenté la résistance de 10 %.

En comparant les performances de chaque contrôleur comme indiqué sur la figure 7, on déduit que le régulateur en mode glissant d'ordre supérieur est plus rapide et plus stable qu'un régulateur PI, donc nous pouvons conclure que le régulateur en mode glissant d'ordre supérieur est plus efficace qu'un régulateur PI pendant cette variation de paramètre.

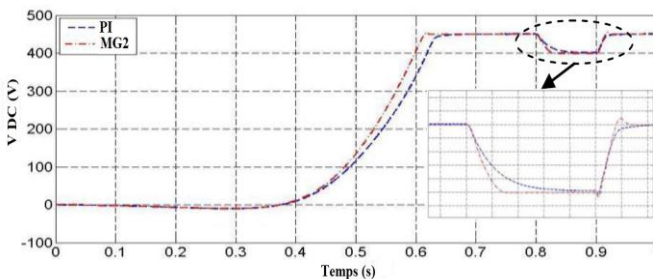


Fig. 7: Test de robustesse

## 6. CONCLUSION

Dans cet article, nous présentons une nouvelle technique de commande de la GASDE muni à deux redresseurs de puissance et associé à un éolien double rotor.

Nous avons utilisé deux techniques de commande: la commande vectorielle et la commande par mode glissant d'ordre supérieur. Les résultats obtenus après simulation montrent l'efficacité du régulateur en mode glissant d'ordre supérieur par rapport à un simple régulateur PI. Selon le test de robustesse qui montre que le régulateur par mode glissant est plus robuste que le régulateur PI face aux variations paramétriques de la GASDE.

## ANNEXE

**Tableau 1:** Nomenclature

Symbole	Signification
$R_{s1} R_{s2} R_r$	Résistances de l'étoile 1 et 2 et du rotor
$I_{s1} I_{s2} I_r$	Inductances de fuite su stator(étoile 1 et 2) et rotor
$I_m$	Inductance de fuite mutuelle aux deux étoiles
$I_{dq}$	Inductance inter-saturation cyclique
$\phi_{s1} \phi_{s2} \phi_r$	Flux de l'étoile 1 et 2 et du rotor
$S$	Surface de glissement
$\rho$	Densité de l'air
$C_p$	Coefficients de puissance

**Tableau 2:** Nomenclature

Paramètres	Valeur
Tension nominale	158 V
Fréquence du stator et du rotor	50 Hz
Résistance de l'étoile 1 et 2	1.9 $\Omega$
Résistance du rotor	2.1 $\Omega$
Inductance de l'étoile 1, 2 et rotor	0.0132 H
Inductance mutuelle	0.011 H

**Tableau 3:** Paramètres de l'éolienne double rotor

Paramètres	Valeur
Puissance nominale	1.5 MW
Diamètre du rotor principal	51 m
Diamètre du rotor auxiliaire	26.4 m

## REFERENCES

- [1] Y. Bendjeddou, 'Contribution à l'Etude des Performances d'un Générateur Asynchrone', Mémoire de Magister, Université Hadj Lakhdar, Batna, 2013.
- [2] F. Bu, Y. Hu, W. Huang, S. Zhuang and K. Shi, 'Wide Speed Rang Operation Dual Stator Winding Generator DC Generating System for Wind Power Applications', IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 30, N°2, pp. 561 - 573, 2015.



- [3] M.H. Zamani, G.H. Riahy and M. Abedi, '*Rotor Speed Stability Improvement of Dual Stator Winding Induction Generator Based Wind Farms by Control Windings Voltage Oriented Control*', IEEE, Transactions on Power Electronics, Vol. 31, N°8, pp. 5538 - 5546, 2016.
- [4] O. Anaya-Lara, N. Jenkins, J. Ekanayake, P. Cartwright and M. Hughes, '*Wind Energy Generation: Modeling and Control*', John Wiley & Sons, Ltd, ISBN: 978-0-470-71433-1, 2009.
- [5] A. Yahdou, B. Hemici et Z. Boudjema, '*Commande Robuste d'un Système Eolien Double Axe à Base d'une Génératrice Asynchrone à Double Alimentation*', 2<sup>th</sup> International Conference on Electronics, Electrical and Automatic, Oran, Algeria, 2013.
- [6] L. Liu, J. Li and C. Lu, '*Research on the Real Time Simulation System of Dual Stator Winding Induction Generator with Variable Speed*', 9<sup>th</sup> International Conference on Electronic Measurement and Instruments, Beijing, China, 2009
- [7] H. Kahal, R. Taleb, Z. Boudjemaa and A. Bouyekni, '*Super Twisting Sliding Mode Control of Dual Star Induction Generator for Wind Turbine*'. The Mediterranean Journal of Measurement and Control, MEDJMC, Vol. 13, N°3, pp. 788 - 794, 2017.
- [8] A. Bouyekni, R. Taleb, Z. Boudjemaa, H. Kahal and F. Chabni, '*New Direct Power Control Applied to Doubly Fed Induction Generator for Wind Power Applications*', 3<sup>rd</sup> International Conference on Power Electronics and their Applications ICPEA, Djelfa, Algérie, 2017.
- [9] T. Sun, Z. Chen and F. Blaabjerg, '*Flicker Study on Variable Speed Wind Turbines with Doubly Fed Induction Generators*', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, N°4, pp. 896 - 905, 2006.
- [10] A. Yahdou, B. Hemici and Z. Boudjema, '*Second Order Sliding Mode Control of a Dual-Rotor Wind Turbine System by Employing a Matrix Converter*', Journal of Electrical Engineering, Vol. 16, N°3, pp. 89 - 100, 2016.
- [11] S. Sylvain Rudaz, '*Double Rotor Wind Turbine Control and Optimization*', Master Project Section of Mechanical Engineering, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2009.
- [12] Z. Boudjema, R. Taleb, A. Yahdou and H. Rahal, '*High Order Sliding Mode Control of a DFIM Supplied by Two Power Inverters*', Carpathian Journal of Electronic and Computer Engineering, Vol. 8, N°1 , pp. 23 - 30, 2015.
- [13] J.J.E. Slotine and W. Li, '*Applied Nonlinear Control*', Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, UK, 1991, ISBN: 0-13-040890-5.
- [14] A. Levant, '*Higher-Order Sliding Modes, Differentiation and Output Feedback Control*', International Journal of Control, Vol. 76, N°9-10, pp. 924 - 941, 2003.