

## Commande par mode glissant d'ordre 2 pour une capture maximale d'énergie d'une turbine éolienne

Abdelkader Bouyekni \*, Rachid Taleb, Zinelaabidine Boudjema et Mohammed Moumna

Laboratoire Génie Electrique et Energies Renouvelables, LGEER  
Université Hassiba Benbouali, Chlef, Algérie

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

**Résumé** - *L'objectif de cet article est la contribution à l'amélioration des méthodes et différentes lois de commande permettant un fonctionnement optimal dans la chaîne de conversion mécanique de l'éolienne. De manière à maximiser en permanence la puissance produite, en recherchant le point de fonctionnement à puissance maximale communément appelé (Maximum Power Point Tracking) MPPT. Il a pour finalité la mise en place d'une modélisation et simulation numérique portée sur la turbine éolienne en matière de commande en vitesse. Une commande comparative entre trois contrôleurs, telle que PI classique, commande par mode glissant d'ordre 1, 'CMG 1' et commande par mode glissant d'ordre 2, 'CMG 2' est présentée.*

**Abstract** - *The purpose of this article is to contribute to the improvement of control methods and laws for optimal operation in the mechanical conversion chain of the wind turbine. In order to maximize the power produced continuously, one searching the operating point at maximum power commonly called (Maximum Power Point Tracking) MPPT. Its purpose is to implement a modelling and a numerical simulation carried out on the wind turbine in terms of speed control. Comparative control between three controllers such as Classic PI, 1<sup>st</sup> order sliding mode control, 'CMC 1' and 2<sup>nd</sup> order sliding mode control, 'CMC 2'.*

**Keywords:** Wind energy conversion system, 'WECS' - MPPT - Sliding mode control.

### 1. INTRODUCTION

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique et, d'une manière, une bonne adéquation entre les caractéristiques couples/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable [1].

Dans cet article, on s'intéresse essentiellement à la modalisation et au contrôle de la turbine éolienne avec l'application de plusieurs stratégies de commande. Un type de lois de commande robuste, simple à calculer et à mettre en œuvre, même pour des systèmes non linéaires, est la commande par mode glissant qui présente plusieurs avantages telle que le comportement dynamique du système et la robustesse.

Cependant, la discontinuité de la commande engendre des oscillations de fréquence élevée une fois atteint le régime glissant, phénomène connu sous le nom de chattering.

Ce phénomène est le plus grand défaut des commandes par mode glissant, car il peut causer une perte de précision, et surtout une usure prématurée des actionneurs ou du système, en plus de générer un bruit sur des systèmes mécaniques.

Dans la littérature, plusieurs méthodes ont été développées par les chercheurs afin de réduire ce phénomène [2, 3]. La stratégie de commande en mode glissant d'ordre 2 appliquée sur une turbine éolienne afin de minimiser l'effet du phénomène de chattering et l'amélioration de la robustesse du système sera présentée.

---

\* aek.bouyekni81@gmail.com

## 2. MODELISATION DE LA TRUBINE EOLIENNE

Pour une turbine à axe horizontal, la puissance mécanique capturée à partir du vent est donnée par [4]:

$$P_t = \frac{1}{2} C_p (\lambda, \beta) \cdot R^2 \cdot \rho \cdot v^3 \quad (1)$$

Où,  $R$ , est le rayon de la turbine (m),  $\rho$ , est la densité de l'air ( $\text{kg/m}^3$ ),  $v$ , la vitesse du vent (m/s) et  $C_p$ , est le coefficient de puissance qui est fonction de la vitesse relative  $\lambda$ , et l'angle de calage des pales  $\beta$  (deg), l'équation approximative de  $C_p$  est donnée par:

$$C_p = (0.5 - 0.167)(\beta - 2) \sin\left(\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)}\right) - 0.0018(\lambda - 3)(\beta - 2) \quad (2)$$

La vitesse relative est donnée par:

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_t}{V_v} \quad (3)$$

Où,  $\Omega_t$  est la vitesse de la turbine.

L'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre mécanique de la génératrice est donné par:

$$\left(\frac{J_t}{G^2} + J_t\right) \frac{d\Omega_g}{dt} + f_v \Omega_g = C_g - C_{em} \quad (4)$$

Avec  $C_{em}$ , le couple électromagnétique de la génératrice.

Dans ce travail, nous avons utilisé le profil du vent donné par la figure 1.

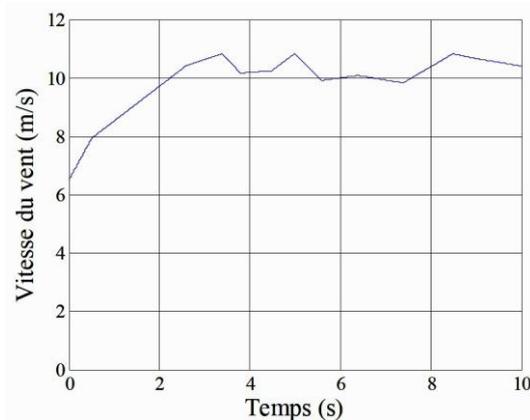


Fig. 1: Profil du vent appliqué

## 3. CONTROLE DE LA VITESSE MECANIQUE

Le couple électromagnétique développé est à tout instant égal à sa valeur de référence.

$$C_{em} = C_{em}^* \quad (5)$$

$C_{em}$ , le couple électromagnétique de la génératrice;  $C_{em}^*$ , le couple électronique de référence.

La vitesse est influencée par l'application des trois (03) couples, selon l'équation suivante: un couple éolien, un couple électromagnétique et un couple résistant [5].

$$\frac{d\Omega_{mec}}{dt} = -\frac{1}{J_t}(C_g - f\Omega_{mec} - C_{em}) \quad (6)$$

Où  $\Omega_{mec}$ , est la vitesse mécanique.

Le couple électromagnétique de référence  $C_{em}$ , permettant d'obtenir une vitesse mécanique de la génératrice égale à la vitesse de référence  $C_{em}^*$  est obtenu par une relation inverse indirecte:

$$C_{em}^* = R_{\Omega}(\Omega_{em}^* - C_{mec}) \quad (7)$$

$R_{\Omega}$ , régulateur de vitesse;  $\Omega_{mec}^*$ , vitesse mécanique de référence.

Cette vitesse de référence dépend de la vitesse de la turbine à fixer avec  $\Omega_{turbine}^*$  pour maximiser la puissance extraite. En prenant en compte le gain du multiplicateur, nous avons donc:

$$\Omega_{em}^* = g \cdot \Omega_{turbine}^* \quad (8)$$

Avec  $\Omega_{turbine}^*$ , vitesse de la turbine de référence.

### 3.1 Commande en vitesse par mode glissant d'ordre 2

La commande par mode glissant (CMG) est l'une des approches de contrôle non linéaire les intéressantes qui existent dans la littérature. Néanmoins, quelques inconvénients surviennent dans sa mise en œuvre pratique, comme phénomène de chattering et les efforts mécaniques indésirables [6, 7]. Afin de réduire les effets de ces phénomènes, la commande par mode glissant d'ordre supérieur se présente comme une solution très attractive [8].

Afin de conserver la caractéristique d'atténuation de chattering tout en limitant le nombre de capteurs nécessaires pour la mise en œuvre de la commande, dans notre étude, nous nous sommes limités au mode glissant d'ordre 2.

Le but de ce type de contrôleurs est de générer un régime glissant du second ordre sur une surface  $S$  par l'annulation de  $S$  elle-même, ainsi que sa dérivée  $\dot{S}$  en un temps fini ( $S = \dot{S} = 0$ ).

La caractéristique principale de cette stratégie est que la partie discontinue apparaît sur la dérivée de la commande  $\dot{u}$ . Finalement lorsque l'on fait le calcul de la commande du système  $u = \int \dot{u}$ , elle devient continue limitant ainsi le phénomène de chattering.

#### 3.1.1 L'algorithme du super-twisting

L'algorithme du super-twisting parmi les algorithmes de mode glissant d'ordre 2 les plus utilisés. Cet algorithme ne s'applique qu'aux systèmes de degré relatif 1. Son intérêt réside dans la réduction du chattering, dû à la continuité du signal de commande.

Cette commande se décompose en un terme algébrique et un terme intégral. On peut donc considérer cet algorithme comme une généralisation non linéaire d'un PI [9].

L'algorithme du Super-Twisting, à l'instar des autres algorithmes de la même catégorie, nécessite uniquement l'information sur  $S$  et entraîne l'annulation de celle-ci et  $\dot{S}$  en un temps fini. Il permet aussi de construire un dérivateur appelé généralement différenciateur exact [10].

La loi de commande du Super-twisting est formée de deux parties. La première  $u_1$  est définie par sa dérivée par rapport au temps, tandis que la deuxième  $u_2$  est continue et en fonction de la variable de glissement. Pour un mode glissant réel, la loi de commande sera donnée par:

$$u_{dis} = -u_1 - u_2 \quad (9)$$

$$\dot{u}_1 = \alpha \cdot \text{sign}(S) , u_2 = \beta \cdot |S|^{(0,5)} \cdot \text{sign}(S) \quad (10)$$

### 3.1.2 Application sur la commande de la turbine éolienne

Considérant la surface de glissement donnée par l'équation (11), l'expression suivante peut être écrite. Où  $Y(t,x)$  et  $\Lambda(t,x)$  sont des fonctions incertaines qui satisfont:

$$Y > 0 , |Y| > \lambda , 0 < K_m < A < K_M \quad (11)$$

En se basant sur l'algorithme de Super-Twisting introduit par Levant dans (11), la commande par mode glissant d'ordre 2 proposée contient deux parties [12]

$$u = \dot{u}_1 + u_2 \quad (12)$$

Avec,  $\dot{u}_1 = -k \cdot \text{sign}(S)$ ,  $u_2 = 1 \cdot |S|^\gamma \cdot \text{sign}(S)$

Afin d'assurer la convergence des surfaces glissantes vers zéro dans un temps fini, les gains de la commande proposée peuvent être choisis comme suit [12].

$$\begin{cases} k > \lambda / K_m \\ l^2 \geq \frac{4\lambda}{K_m^2} \frac{K_M \cdot (k + \lambda)}{K_m (k - \lambda)} \\ 0 < \gamma \leq 0.5 \end{cases} \quad (13)$$

## 4. RESULTATS DE SIMULATION ET DISCUSSIONS

Dans cette section, nous allons présenter les résultats de simulation par le logiciel Matlab/Simulink de la commande par mode glissant d'ordre 2 de la turbine éolienne. Une comparaison de cette dernière avec la commande par mode glissant d'ordre 1 classique et celle dotée d'un PI classique est élaborée dans cette section.

Les paramètres de la machine utilisée dans la simulation sont illustrés dans le **Tableau 1**. Deux catégories de tests ont été effectués, à savoir: suivi de consigne et robustesse vis-à-vis des variations paramétriques.

**Tableau 1:** Paramètres de la turbine [1]

Paramètres	Symbole	Valeur
Puissance de l'éolienne	P	1.5 MW
Rayon de l'éolienne	R	35.25 m

Gain du multiplicateur	G	90
Inertie de l'arbre	J	1000 kg.m <sup>2</sup>

### 4.1 Test de suivi de consigne de vitesse

L'objectif principal de ce test est l'étude et la comparaison du comportement des trois types de contrôleurs utilisés (PI, CMG 1 et CMG 2) utilisés dans cette étude en matière de suivi de consigne de régulation proposée et l'effet du phénomène de chattering sur la qualité de la vitesse mécanique de la turbine (figure 2).

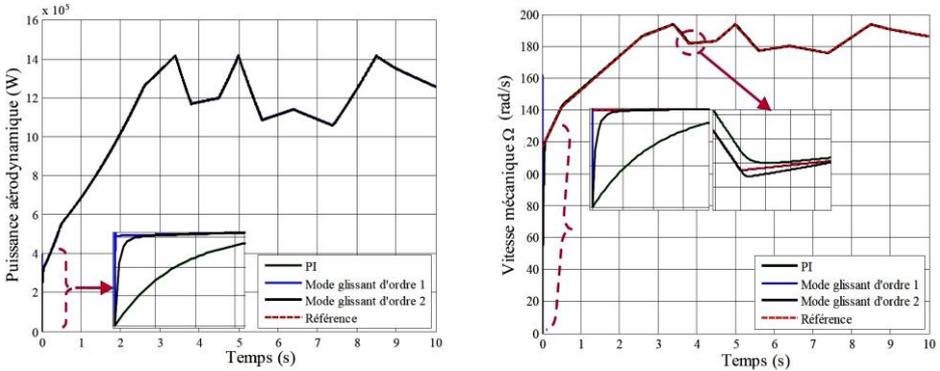
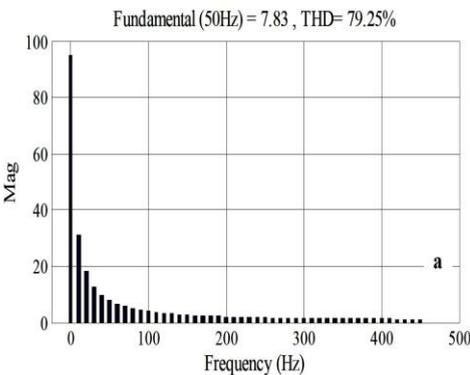


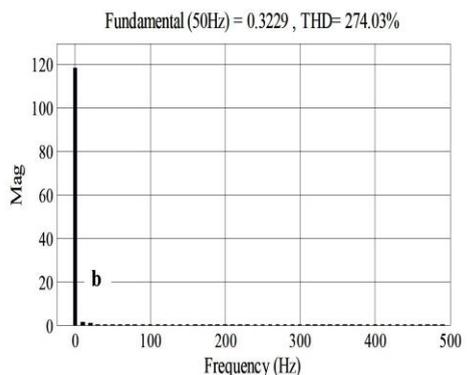
Fig. 2: Commande MPPT avec asservissement de vitesse (Test de suivi de consigne)

Comme le montre cette figure, on remarque pour les trois types de contrôleurs utilisés que la vitesse mesurée suivant sa référence avec une rapidité meilleure et claire, qui est présentée par les régulateurs de type mode glissant par rapport au PI classique.

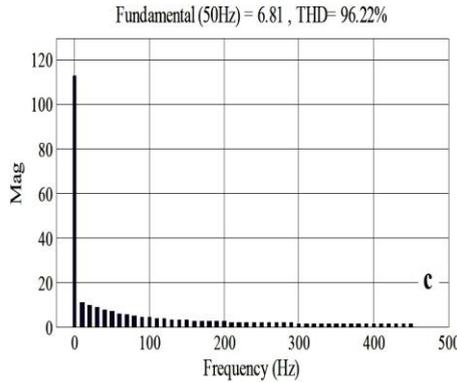
Nous pouvons également remarquer que la puissance aérodynamique possède une forme similaire au profil du vent imposé.



(a) : PI



(b) : CMG 1



(c) : CMG 2

Fig. 3: Spectre d'harmoniques de la vitesse mécanique

D'un autre côté, on remarque d'après la figure 3 qui illustre les spectres d'harmoniques sur la vitesse mécanique de la turbine, des trois types de contrôleurs, obtenus en utilisant la transformée de fourrier rapide (FFT) que le taux d'harmoniques (THD) est réduit pour le contrôleur CMG 2 (THD = 96.22 %) comparé au contrôleur CMG 1 (THD = 274.03 %). Ces résultats nous permettent de conclure que le contrôleur adopté (CMG 2) est plus efficace vis-à-vis la réduction du phénomène de chattering par rapport au CMG 1 classique.

#### 4.2 Test de robustesse

L'objet de ce test est d'observer l'influence de la variation des paramètres interne de la turbine éolienne sur le contrôle MPPT avec asservissement de vitesse étudiés dans cet article, par les différents types de régulateurs utilisés.

Pour cela, nous avons augmenté l'inertie de 50 % de sa valeur nominale. Les résultats de simulation obtenus sont montrés par la figure 4. Cette figure représente l'erreur en pourcentage sur la courbe de vitesse après une variation de l'inertie, telle que l'on remarque que les deux types de régulateurs par mode glissant utilisés, présentent une robustesse claire (en régime dynamique et statique) par rapport au PI classique.

Ce résultat nous permet de conclure que la commande par CMG 2 présente une solution très attractive pour la commande en vitesse des turbines éoliennes.

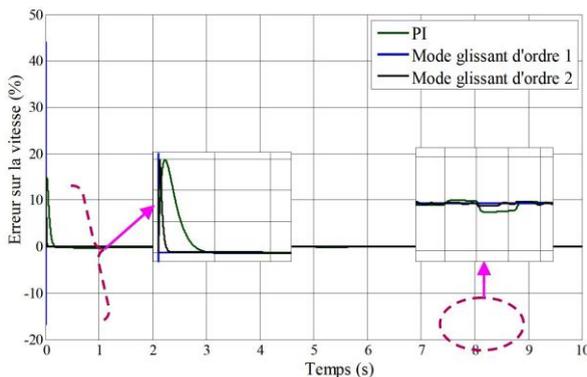


Fig. 4: Test de robustesse vis-à-vis une variation de +50 % du moment d'inertie

## 5. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons présenté la modélisation et la commande de la turbine éolienne, à savoir: les pales, le multiplicateur et l'arbre du rotor. Et dans le but de maximiser la puissance extraite du vent, c'est le MPPT. Nous avons appliqué trois (03) contrôleurs de vitesse sur la turbine éolienne, à savoir: un contrôleur PI classique qui sert de référence de comparaison, un contrôleur par CMG 1 et un contrôleur par CMG 2.

Ce travail nous a permis d'établir la synthèse de ces trois (03) contrôleurs différents pour la commande de la turbine éolienne. Les simulations numériques qui ont déjà été visualisées et que les nouvelles méthodes utilisées dans le but de l'amélioration des performances de la commande par CMG 2 ont réussi à donner des résultats souhaités représentés par la minimisation du phénomène de chattering dans les grandeurs commandées tout en gardant les qualités et les performances désirées du système.

## REFERENCES

- [1] M. Liserre, R. Cardenas, M. Molinas and J. Rodriguez, 'Overview of Multi-MW Wind Turbines and Wind Parks', IEEE Transactions of Industrial Electronics, Vol. 58, N°4, pp. 1081 - 1095, 2011.
- [2] A. Moualdia, M.O. Mahmoudi and Nezli, 'DPC and DTC Control of a Wind Speed Based on the Doubly Fed Asynchronous Machine', Journal of Electrical Engineering, JEE, Vol. 12, N°2, pp. 39 - 46, 2010.
- [3] Z. Boudjema, A. Meroufel, E. Bounadja and Y. Djerriri, 'Nonlinear Control of a Doubly Fed Induction Generator Supplied by a Matrix Converter for Wind Energy Conversion Systems', Journal of Electrical Engineering, Vol. 13, N°4, pp. 60 - 68, 2013.
- [4] Y. Zhang, J. Hu and J. Zhu, 'Three-Vectors-Based Predictive Direct Power Control of the Doubly Fed Induction Generator for Wind Energy Applications', IEEE Transactions of Power Electronics, Vol. 29, N°7, pp. 3485 - 3500, 2014..
- [5] M. Castilla, J. Miret, J. Matas, A. Borrell and L.G. de Vicuna, 'Direct Rotor Current-Mode Control Improves the Transient Response of Doubly Fed Induction Generator-Based Wind Turbines', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 25, N°3, pp. 722 - 731, 2010.
- [6] W.J. Wang and J.Y. Chen, 'Passivity-Based Sliding Mode Position Control for Induction Motor Drives', IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 20, N°2, pp. 316 - 321, 2005.
- [7] H. Kahal, R. Taleb, Z. Boudjema and A. Bouyekni, 'Super Twisting Sliding Mode Control of Dual Star Induction Generator for Wind Turbine', The Mediterranean Journal of Measurement and Control, Vol. 13, N°3, pp. 788 - 794, 2017.
- [8] M. Rashed, K.B. Goh, M.W. Dunnigan, P.F.A. MacConnell, A.F. Stronach and B.W. Williams, 'Sensor less Second-Order Sliding-Mode Speed Control of a Voltage-Fed Induction-Motor Drive Using Nonlinear State Feedback', IEE Proceedings - Electric Power Application, Vol. 152, N°5, pp. 1127 - 1136, 2005.
- [9] A. Bouyekni, R. Taleb, Z. Boudjema and H. Kahal, 'A New Direct Power Control Applied to Doubly Fed Induction Generator for Wind Power Applications', The 2<sup>nd</sup>

International Conference on Applied Automation and Industrial Diagnostics, ICAAID-17), Djelfa on 16-17 September 2017, Algeria,

- [10] A. Hemdani, M.W. Dagbagi, M. Naouar, L. Idkhajine, I.S. Belkhodja and E. Monmasson, '*Indirect Sliding Mode Power Control for Three Phase Grid Connected Power Converter*', IET Power Electronics, Vol. 8, N°6, pp. 977 - 985, 2015.
- [11] A. Levant and I. Alelishvili, '*Integral High-Order Sliding Modes*', IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 52, N°7, pp. 1278 - 1282, 2007.
- [12] S. Benelghali, M.E.H. Benbouzid, J.F. Charpentier, T. Ahmed-Ali and I. Munteanu, '*Experimental Validation of a Marine Current Turbine Simulator: Application to a PMSG-Based System Second-Order Sliding Mode Control*', IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 58, N°1, pp. 118 - 126, 2011.