



HAL
open science

Commande par platitude d'un système de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable connectée au réseau.

Merzak Aimene, Alireza Payman, Brayima Dakyo

► To cite this version:

Merzak Aimene, Alireza Payman, Brayima Dakyo. Commande par platitude d'un système de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable connectée au réseau.. Symposium de Génie Électrique 2014, Jul 2014, Cachan, France. hal-01065390

HAL Id: hal-01065390

<https://hal.science/hal-01065390>

Submitted on 18 Sep 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Commande par platitude d'un système de conversion de l'énergie éolienne à vitesse variable connecté au réseau.

Merzak Aimene, Alireza Payman et Brayima Dakyo.

Laboratoire GREAH, Faculté de sciences Techniques, Université du Havre

75, rue Bellot - 76058 Le Havre cedex FRANCE.

E-mail: merzak.aimene@univ-lehavre.fr

RESUME -Dans cet article, une nouvelle méthode de commande non linéaire basée sur la platitude différentielle est appliquée pour un système de conversion d'énergie éolienne raccordé au réseau. Le principe de la commande est basé sur la planification des trajectoires des composantes du vecteur représentatif de la variable de sortie du système. Cette planification permet à la commande de fonctionner en poursuite de point de puissance maximal d'une éolienne (PPPM). L'avantage principal de la méthode proposée est le bon contrôle du système, même pendant le régime transitoire.

Le système étudié comprend une éolienne à axe horizontal à trois pales, une génératrice synchrone à aimants permanents (MSAP) avec un nombre élevé de pôles qui permet un couplage direct à la turbine sans multiplicateur de vitesse. La génératrice est connectée au réseau via une interface d'électronique de puissance et un filtre. Un profil aléatoire de la vitesse du vent a été utilisé, afin d'illustrer les différents contrôles effectués. Les résultats de la simulation obtenus sous Matlab/Simulink sont discutés pour valider la stratégie de commande.

Mots-clés—Commande, platitude, vitesse variable, turbine éolienne, MSAP, PPPT, gestion de l'énergie.

1. INTRODUCTION

Le problème du changement climatique, le prix élevé du pétrole, la résistance croissante concernant l'utilisation du charbon, du pétrole et de l'uranium sont les causes principales du développement rapide de la production de l'énergie éolienne. A la fin de 2010, la capacité éolienne installée dans le monde a atteint 193 GW, celle de fin 2013 est de 273 GW et il est prévu qu'elle devrait augmenter de plus de 400% et atteindre 1.107 GW en 2030 [1].

Les éoliennes peuvent fonctionner à vitesse fixe déterminée par la fréquence du réseau, ou à vitesse variable induite par l'entraînement du générateur par une turbine dont la rotation est adaptée en temps réel à la vitesse du vent. Plus particulièrement dans ce cas la connexion électrique au réseau se fait par l'intermédiaire d'un convertisseur de fréquence à pleine échelle [2]. Diverses topologies et différentes méthodes ont été proposées pour la production de l'énergie électrique et pour le contrôle de la puissance fournie au réseau. Dans ce papier, une nouvelle stratégie de commande basée sur la propriété de platitude différentielle est proposée. Elle s'applique à la commande d'un système d'entraînement de

turbine éolienne à vitesse variable avec un raccordement électrique au réseau tel que présenté sur la figure 1. Cette méthode a été initialement utilisée avec succès :

Pour gérer l'énergie dans un système électrique hybride [3,4].

Pour contrôler la rotation d'un moteur synchrone à aimant permanent [5, 6]

Pour contrôler le fonctionnement d'une machine asynchrone [7, 8].

Dans [7], il a été montré que ce type de contrôle peut améliorer les performances du système en régime transitoire en comparaison avec une commande vectorielle classique. Le principal avantage de cette méthode de commande est la capacité d'anticiper le comportement des variables d'état du système tant en régime transitoire qu'en régime permanent. Le système de commande est basé sur la planification des trajectoires de références pour la variable de sortie du système.

Pour démontrer l'efficacité de la méthode de commande proposée, nous présentons des résultats de simulation sous Matlab/Simulink pour une éolienne de 5 MW.

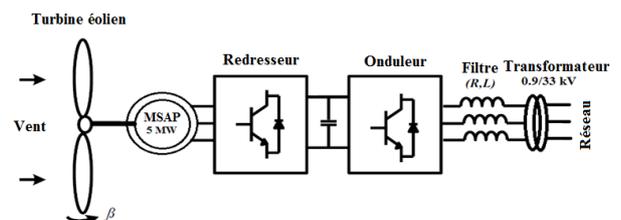


Fig.1: Structure de système étudié.

2. MODELISATION DU SYSTEME

Le système Fig.1, se compose d'un aérogénérateur à MSAP connectée au réseau via deux convertisseurs tête-bêche (back-to-back). Dans ce qui suit, le modèle de chaque sous-système sera présenté.

2.1. Turbine éolienne

La puissance éolienne est définie par l'équation (1) [5, 9-11] :

$$P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3 \quad (1)$$

Où: ρ est la densité de l'air ($\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$), S présente la surface balayée par la turbine et v représente la vitesse du vent et R est le rayon de la turbine ou la longueur de la pale.

La puissance aérodynamique récupérée au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors:

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

Le coefficient de puissance C_p dépend de ratio de vitesse spécifique λ (rad) et de l'angle d'orientation des pales β (deg), λ est donnée par l'équation (3):

$$\lambda = \frac{\Omega_{tur} \cdot R}{v} \quad (3)$$

Où: Ω_{tur} présente la vitesse de rotation de la turbine (rad/s).

2.2. Machine synchrone à aimants permanents

Le modèle général de la MSAP est obtenu en considérant l'onde fondamentale de la répartition du flux dans l'entrefer de la machine, et en supposant que la composante homopolaire est négligée [9-11]

Pour définir aisément la stratégie de commande du système, le modèle analytique de la MSAP dans le référentiel lié au rotor est exprimée comme suit:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_d p & -\omega_s \cdot L_q \\ \omega_s \cdot L_d & R_s + L_q p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_s \cdot \psi_f \end{bmatrix} \quad (4)$$

Où: V_{d-q} sont les tensions d'axe $d-q$, I_{d-q} présentent les courants d'axe $d-q$, L_{d-q} représentent les inductances d'axe $d-q$, R_s est la résistance des enroulements statoriques et ψ_f présente le flux des aimants permanents.

Les puissances active et réactive au stator sont données par l'équation (5), [9-11]:

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} (V_d \cdot I_d + V_q \cdot I_q) \\ Q_s = \frac{3}{2} (V_q \cdot I_d - V_d \cdot I_q) \end{cases} \quad (5)$$

En fonctionnement génératrice, l'équation mécanique est exprimée comme suit:

$$C_m - C_{em} = J_t \cdot \frac{d\Omega_{tur}}{dt} + f \cdot \Omega_{tur} \quad (6)$$

Où C_m est le couple mécanique de l'arbre de la machine, C_{em} présente le couple électromagnétique de la machine, J_t représente l'inertie du rotor, f est le coefficient de frottement et Ω_{tur} présente la vitesse du rotor. Le couple électromagnétique C_{em} peut être exprimé dans le repère $d-q$ comme suit:

$$C_{em} = \frac{3}{2} p [\psi_f + (L_d - L_q) I_d] I_q \quad (7)$$

2.3. Réseau électrique

Le modèle dynamique du réseau électrique est donné par l'équation (8) [9-11]:

$$\begin{cases} V_{rd} = V_{id} - R_r \cdot I_{rd} - L_r \cdot \frac{dI_{rd}}{dt} + \omega_r \cdot L_r \cdot I_{rq} \\ V_{rq} = V_{iq} - R_r \cdot I_{rq} - L_r \cdot \frac{dI_{rq}}{dt} - \omega_r \cdot L_r \cdot I_{rd} \end{cases} \quad (8)$$

Où: L_r , R_r sont l'inductance et la résistance du filtre, V_{rd-q} présentent les composantes $d-q$ de la tension du réseau, V_{id-q} sont les composantes $d-q$ de la tension de sortie de l'onduleur, I_{rd-q} sont les composantes $d-q$ du courant injecté au réseau et ω_r représente la fréquence du réseau.

3. STRATEGIE DE COMMANDE DU SYSTEME

Comme il est montré sur la figure 1, la MSAP est connecté au réseau à travers deux convertisseurs tête-bêche. Le convertisseur côté machine (CCM) commande la vitesse de rotation de l'éolienne et donc du couple tandis que le convertisseur côté réseau (CCR) assure le contrôle de la puissance réactive et la tension du bus continu. Cette interface fournit un découplage des commandes nécessaires coté réseau et coté génératrice. Dans cet article, une méthode classique est utilisée pour le contrôler le CCR. La nouvelle méthode basée sur la platitude différentielle est proposée pour contrôler le CCM.

3.1. Description de la platitude différentielle

Le concept de platitude a été introduit par M. Fliess, J.Lévine, Ph. Martin et P. Rouchon [5, 9]. Ce concept, permet de contrôler le comportement dynamique d'un système, en utilisant un formalisme d'algèbre différentielle.

Un système dynamique avec l'état x et l'entrée u défini par l'équation $\dot{x} = f(x, u)$ est un système plat si et seulement si il existe une sortie plate y telle que: $y = \mathcal{A}(x, u, \dot{u}, \dots, u^{(q)})$, ou x et u peuvent s'écrire comme fonctions dépendantes de cette sortie plate ainsi que de ses dérivées successives, de telle sorte que [5, 9]:

$$x = \mathcal{B}(y, \dot{y}, \dots, y^{(r)}) \quad (9)$$

$$u = \mathcal{C}(y, \dot{y}, \dots, y^{(r+1)}) \quad (10)$$

Où :

$$x \in R^n, u \in R^m, y \in R^m.$$

$$f: R^n \times R^m \rightarrow R^n, \mathcal{A}: R^n \times (R^m)^{q+1} \rightarrow R^m, \mathcal{B}: (R^m)^{r+1} \rightarrow R^n$$

et $\mathcal{C}: (R^m)^{r+2} \rightarrow R^m$ sont des fonctions régulières.

Dans un système plat, toutes les variables d'état et de commande sont exprimées en fonction d'une sortie plate choisie et ses dérivées successives sans intégrer les équations différentielles [5-9, 12-14]. Par conséquent, pour commander un système, les trajectoires de références doivent être planifiées dans un premier temps sur les éléments de la variable de sortie, ensuite les composantes de la variable de commande peuvent être calculées.

La commande par platitude différentielle offre de nombreux avantages par rapport aux commandes classiques utilisées, tels que des commandes linéaires avec deux boucles [14] ou la commande non linéaire par mode glissant avec un correcteur PI [4]. La commande par platitude fournit une bonne performance à la robustesse et des incertitudes paramètres [12].

3.2. Platitude du système dynamique

A partir de l'équation mécanique et du modèle de la MSAP, on peut écrire le système d'état (11). Les trois variables d'état considérées sont ici les courants I_d, I_q (les courants de la machine dans le repère du Park) et Ω (la vitesse de rotation).

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ \Omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} \cdot (-R_s \cdot I_d + V_d + p \cdot \Omega \cdot L_q \cdot I_q) \\ \frac{1}{L_q} \cdot (-R_s \cdot I_q + V_q - p \cdot \Omega \cdot (L_d \cdot I_d + \psi_f)) \\ \frac{1}{J} \cdot (p \cdot \psi_f \cdot I_q - C_{em} - f \cdot \Omega) \end{bmatrix} \quad (11)$$

Les vecteurs d'état x et de commande u sont définis par :

$$x = [I_d, I_q, \Omega]^T \in \mathbb{R}^3 \quad (12)$$

$$u = [V_d, V_q]^T \in \mathbb{R}^2 \quad (13)$$

La sortie plate y doit être de même ordre que le vecteur de commande (13). On définit la vitesse mécanique et le flux d'axe d comme composantes de cette sortie plate, comme présenté par l'équation (14):

$$y = \begin{cases} y_\Omega = \Omega \\ y_d = \psi_d \end{cases} \quad (14)$$

A partir de (11) on arrive à écrire:

$$\begin{cases} I_d = \frac{\psi_d - \psi_f}{L_d} = f_{I_d}(y_d) \\ I_q = \frac{1}{p \cdot \psi_f} \cdot (J \cdot \dot{y}_\Omega + C_{em} + f \cdot \Omega) = f_{I_q}(y_\Omega, \dot{y}_\Omega) \\ \Omega = y_\Omega = f_\Omega(y_\Omega) \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} V_d = R_s \cdot f_{I_d}(y_d) + L_q \cdot \frac{d}{dt} f_{I_d}(y_d) - p \cdot y_\Omega \cdot L_q \cdot f_{I_q}(y_\Omega, \dot{y}_\Omega) \\ V_q = R_s \cdot f_{I_q}(y_\Omega, \dot{y}_\Omega) + L_q \cdot \frac{d}{dt} f_{I_q}(y_\Omega, \dot{y}_\Omega) \\ \quad + p \cdot y_\Omega \cdot (L_d \cdot f_{I_d}(y_d) + \psi_f) \end{cases} \quad (16)$$

Or :

$$\begin{cases} V_d = f_{V_d}(y_d, \dot{y}_d, y_\Omega, \dot{y}_\Omega) \\ V_q = f_{V_q}(y_\Omega, \dot{y}_\Omega, \dot{y}_\Omega, y_d) \end{cases} \quad (17)$$

On voit bien que les variables d'état (15) et de commande (17) s'expriment comme fonction des composantes de la sortie plate définie et de ses dérivées successives. Ce qui prouve que le système est plat, avec $y = [y_\Omega, y_d]^T$ est la sortie plate et $u = [V_d, V_q]^T$ est le vecteur de commande.

3.3. Planification des trajectoires

Deux modes de fonctionnement peuvent être définies pour le générateur éolien en fonction de la vitesse du vent. Dans le

premier mode, la vitesse du vent est inférieure à la vitesse nominale v_{nom} qui correspond à la puissance nominale de la MSAP. Comme le montre la figure 2, dans ce mode de fonctionnement, à chaque vitesse de vent, il existe une vitesse de rotation optimale de la turbine correspondant à une puissance maximale. Cette vitesse de rotation optimale est calculée à partir de la vitesse du vent et de la vitesse spécifique donnant un C_p maximum.

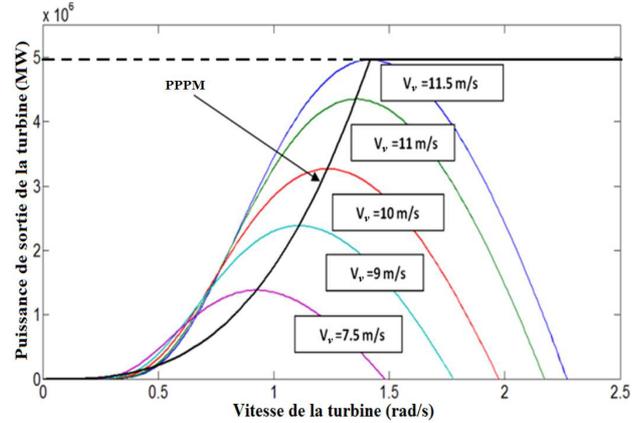


Fig.2: Schéma fonctionnel de poursuite du point de puissance maximale.

Dans le deuxième mode de fonctionnement, la vitesse du vent est supérieure à v_{nom} . Dans ce cas, l'angle de calage de l'éolienne doit être contrôlé de telle sorte que la puissance de la turbine n'excède pas la puissance nominale du générateur. Ceci est obtenu par le contrôle de l'angle de calage. La méthode de contrôle de cet angle utilise un correcteur PI, elle est présentée sur la figure 3 [9-10].

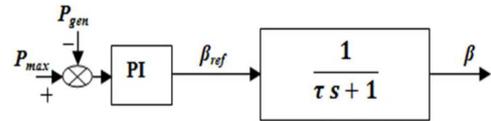


Fig.3: Schéma fonctionnel pour la méthode de contrôle de l'angle de calage.

Ensuite, la référence de la vitesse de rotation $y_{\Omega-ref}$ peut être déduite pour les deux modes de fonctionnement, comme montrée sur la figure 4.

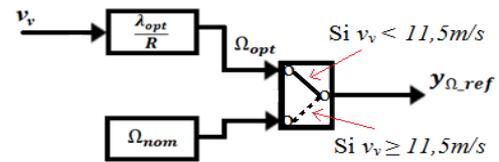


Fig.4: Schéma fonctionnel pour la génération de la trajectoire de référence pour la vitesse de rotation.

A propos de la seconde variable de sortie y_{d-ref} , la constante de flux produite par les aimants permanents, ψ_f est considérée comme la valeur de référence.

La planification des trajectoires est très importante dans une commande par platitude car elle définit l'évolution de toutes les variables d'état et de commande. Il est donc avantageux d'imposer une trajectoire connue pour prédire analytiquement l'évolution des variables.

Il convient de noter que les contrôleurs PI sont utilisés pour que les courants (I_{rd} , I_{rq}), la tension du bus continu (V_{dc}) et la puissance réactive (Q_r) suivent leurs valeurs de référence.

4. RESULTATS DE SIMULATION

Dans cette section, les résultats de simulation obtenus dans l'environnement Matlab/Simulink sont présentés pour une éolienne de 5 MW où un profil de vent aléatoire à vitesse variable (présenté sur la figure 8) est utilisé pour étudier le comportement du système dynamique.

Les éléments de la variable de sortie plate, Ω et ψ_d , sont présentés sur les figures 9 et 10 respectivement. Chacun des deux suit bien sa propre trajectoire de référence au cours des deux modes de fonctionnement.

La turbine éolienne est commandée pour poursuivre le point de puissance maximale (extraire le maximum d'énergie), lorsque la vitesse du vent est inférieure à sa valeur nominale ($v_{nom}=11,5$ m/s), comme illustrée sur la figure 11. Cependant, lorsque la vitesse du vent est supérieure à la valeur nominale, l'angle de calage représenté sur la figure 12 augmente pour limiter la puissance produite par le générateur à sa valeur nominale.

La figure 13 montre les formes d'onde des variables d'état (I_d, I_q) qui sont en fonctions de la variable de sortie et ses dérivés successives obtenus à partir de (15). Ces résultats permettent de montrer que bien que le courant d'axe q ne soit pas « directement » contrôlé, il suit sa trajectoire de référence $I_{q-ref} = f_{I_q}(y_{\Omega-ref}, \dot{y}_{\Omega-ref})$ calculée à partir de (15) et dépendant de la trajectoire de référence de vitesse $y_{\Omega-ref}$.

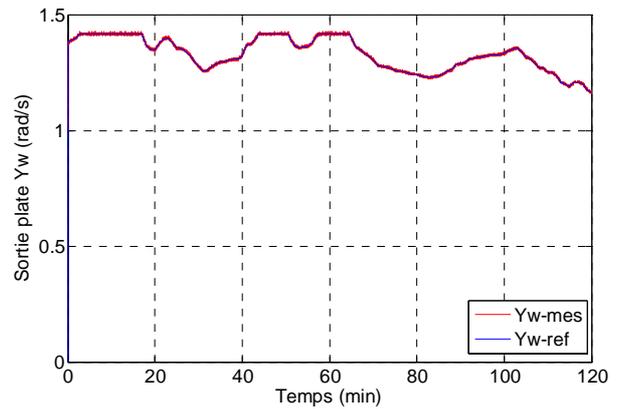


Fig.9: La sortie plate y_{Ω} .

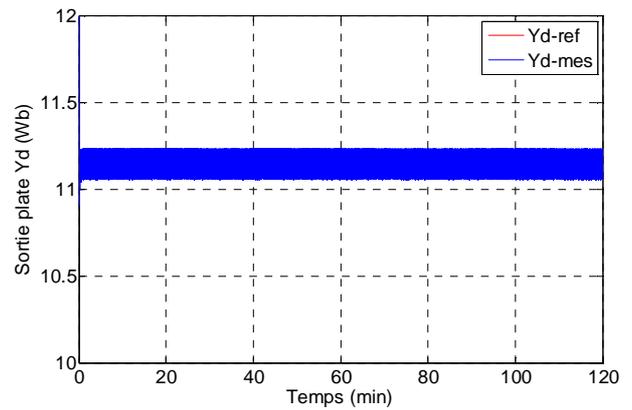


Fig.10: La sortie plate y_d .

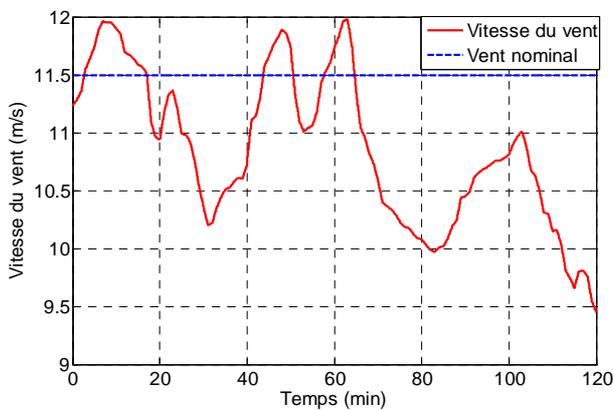


Fig.8: Profil de la vitesse du vent.

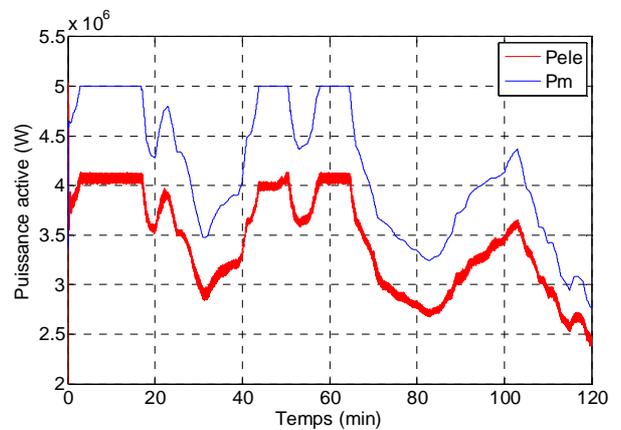


Fig.11: Puissance électrique et mécanique de la MSAP.

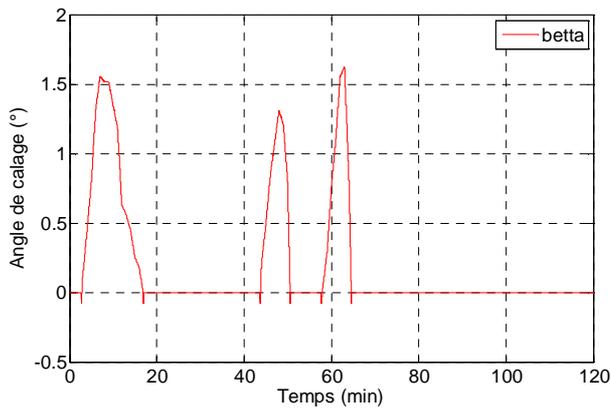


Fig.12: L'angle de calage.

Concernant le courant d'axe d , il est contrôlé à sa valeur de référence $I_d = 0$ via le contrôle du flux ψ_d , cependant le couple électromagnétique dépendant du courant d'axe q ($C_{em} = 1,5 \cdot p \cdot \psi_f \cdot I_q$) présenté sur la figure 14 suit la trajectoire de référence du courant I_{q-ref} . La tension du bus continu est présentée sur la figure 15 où sa valeur de référence est fixée à 4700V. On peut voir que la tension du bus continu suit bien sa référence et elle n'est pas affectée par les variations de la vitesse du générateur.

La figure 16 montre l'évaluation de la puissance réactive absorbée par le système ou délivrée au réseau. On voit bien que la puissance réactive suit avantageusement sa référence. Enfin, le zoom des courants triphasés injectés au réseau sont présentés sur la figure 17. On voit qu'ils sont des courants alternatifs sinusoïdaux de fréquence de 50 Hz.

Ces résultats de simulation prouvent l'efficacité de la stratégie de contrôle proposée pour la commande du système d'énergie éolienne connecté au réseau.

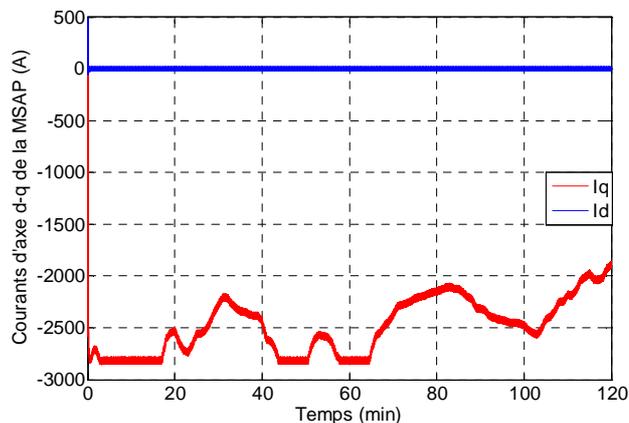


Fig.13: Les courants d'axe d - q de la MSAP.

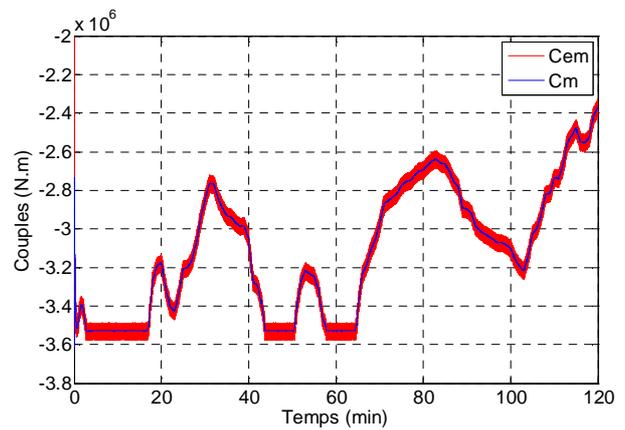


Fig.14: Le couple mécanique et électromagnétique de la MSAP.

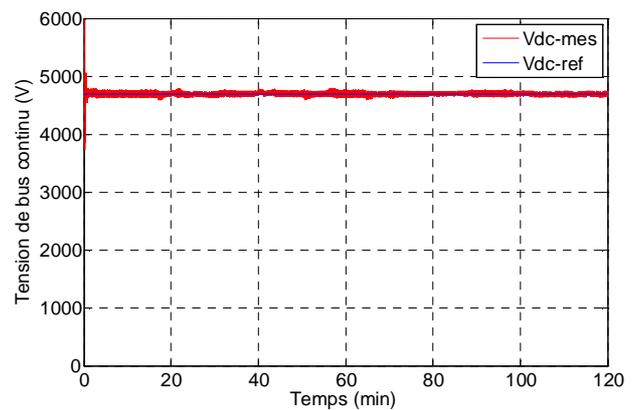


Fig.15: Les courants d'axe d - q de la MSAP.

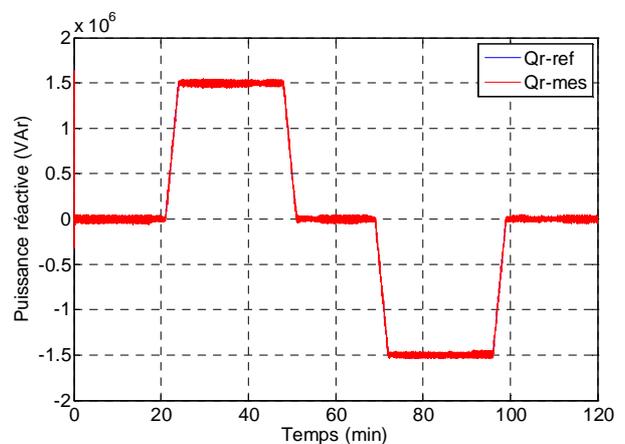


Fig.16: Puissance réactive.

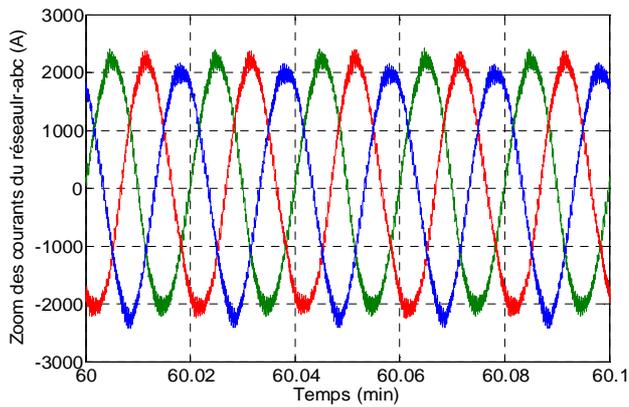


Fig.17: Les courants d'axe $d-q$ de la MSAP.

5. CONCLUSIONS

Le but principal de cet article est de développer une méthode de contrôle basée sur la platitude différentielle pour une MSAP utilisée dans un système d'énergie éolienne à vitesse variable connectée au réseau via un convertisseur dos-à-dos. Le modèle de chaque sous-système a été présenté, la platitude différentielle de la MSAP a été démontrée. Ensuite, les trajectoires de référence sont planifiées pour les composantes de la variable de sortie, elles permettent au système de fonctionner en poursuite du point de puissance maximale en rapport avec les fluctuations du vent. Une méthode de commande classique est utilisée pour la régulation de la tension du bus continu et pour la gestion de la puissance réactive échangée entre la machine et le réseau. La stratégie de commande par platitude de la puissance active développée par la turbine couplée à une MSAP proposée ici, est simulée dans l'environnement Matlab/Simulink. Les résultats obtenus indiquent de très bonnes performances du nouveau système de control.

6. REFERENCES

[1] M. Mansour, M. N. Mansouri, M.F.Mmimouni, « Study and Control of a Variable-Speed Wind-Energy System Connected to the Grid», *International Journal of Renewable Energy Research, IJRER*, Vol.1, No.2, pp.96-104,2011.

[2] F.M. González-Longatt et al, «A Simplified Model for Dynamic Behavior of Permanent Magnet Synchronous Generator for Direct Drive Wind Turbines», *IEEE PES Trondheim PowerTech*, 19 -23Jun 2011, Trondheim, Norway.

[3] A. Payman, S.Pierfederici, F. Meibody-Tabar, B. Davat, « An Adapted Control Strategy to Minimize DCBus Capacitors of a Parallel Fuel Cell/Ultracapacitor Hybrid System», *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, pp. 3843-3852, 2011.

[4] A. Payman, S. Pierfederici and F. Meibody-Tabar, «Energy Management in a Fuel cell/Supercapacitor Multisource/Multiloading Electrical Hybrid System», *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, pp. 2681-2691, 2009.

[5] H. Alhamed Aldwaihi and E. Delaleau, «Maximum Power Point Tracker of a Wind Generator Based on The Flatness-Based Control», *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2011 IEEE.

[6] E. Delaleau, A.M. Stankovic', «Flatness-based hierarchical control of the PM synchronous motor», *Proceeding of the 2004 American Control Conference Boston, Massachusetts June 30 - July 2, 2004*.

[7] J. Dannehl, and F.W. Fuchs, « Flatness-Based Control of an Induction Machine Fed via Voltage Source Inverter-Concept, Control Design and Performance Analysis», in *Proc. 32nd Annu. IEEE Ind. Electron. Conf.*, pp.5125,5130, 6-10 Nov. 2006.

[8] E. Delaleau, J-P. Louis, R. Ortega, «Modeling and Control of Induction Motors», *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci.*, Vol.11, No.1, 105-129, 2001.

[9] M. Aimene, A. Payman and B. Dakyo, « Flatness-based Control of a Variable-Speed Wind-Energy System Connected to the Grid», *Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 2014 9th International Conference and Exhibition on, Monaco, France.

[10] D Ikn, M.B. Camara, A. Payman, B Dakyo, «Dynamic Control of Wind Energy Conversion System», *Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 2013 8th International Conference and Exhibition on, Monaco, France.

[11] E. Mahersi, «The Wind energy Conversion System Using PMSGControlled by Vector Control and SMC Strategies», *International Journal of Renewable Energy Research*, 2013.

[12] Houari, H. Renaudineau, J-P. Martin, S. Pierfederici and F. Meibody-Tabar, «Flatness-Based Control of Three-Phase InverterWith Output LC Filter», *IEEE Trans on Ind Electron*, Vol. 59, no.7, July 2012.

[13] M. Fliess, J. Lévine, P. Martin, and P. Rouchon, «Flatness and defect of non-linear systems », *Introductory theory and examples*,*Int. J. Control*, vol. 61, no. 6, pp.1327-1361, 1995.

[14] J. Dannehl and F. W. Fuchs, «Flatness-Based Control of an Induction Machine Fed via Voltage Source Inverter - Concept,Control Design and Performance Analysis», in *Proc. 32nd Annu.IEEE Ind. Electron. Conf.*, pp.5125,5130, 6-10 Nov. 2006.

[15] A.Ghoshal, J. Vinod «A Method To Improve PLL Performance Under Abnormal Grid Conditions», In *National Power Electronics Conference 2007*. Indian Institute of Science, Bangalore, 2007.

[16] G. Michalke, A. Hansen, T. Hartkopf, «Control strategy of a variable speed wind turbine with multipole permanent magnet synchronous generator», *European Wind Energy ConferenceEWEC*, Milan, Italy, 7-10 May 2007.