HAL
open science

Commande par modes glissants d'ordre supérieur et observateur grand gain de la génératrice asynchrone double alimentation d'une éolienne

Brice Beltran, Mohamed Benbouzid, Tarek Ahmed-Ali, Omar Benzineb

To cite this version:

Brice Beltran, Mohamed Benbouzid, Tarek Ahmed-Ali, Omar Benzineb. Commande par modes glissants d'ordre supérieur et observateur grand gain de la génératrice asynchrone double alimentation d'une éolienne. CIFA'10, Jun 2010, Nancy, France. 6p. hal-00531332

HAL Id: hal-00531332

https://hal.science/hal-00531332v1

Submitted on 2 Nov 2010

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 modes glissants d'ordre supérieur et observateur grand gain de la génératrice asynchrone double alimentation d'une éolienne

Brice BELTRAN[1], Mohamed BENBOUZID[1], Tarek AHMED-ALI[2] et Omar BENZINEB[1]

[1]Université de Brest, EA 4325 LBMS
IUT de Brest – Rue de Kergoat – CS 93837, 29238 Brest Cedex 03, France
brice.beltran@dga.defense.gouv.fr, Mohamed.Benbouzid@univ-brest.fr et Omar.Benzineb@univ-brest.fr

[2]Université de Caen, UMR CNRS 6072 GREYC
Campus Côte de Nacre, Boulevard du Maréchal Juin – BP 5186, 14032 Caen Cedex, France
Tarek.Ahmed-Ali@greyc.ensicaen.fr

Résumé—**Le rendement d'une éolienne dépendant essentiellement de la puissance du vent, de la courbe de puissance de la turbine et de l'habilité de la génératrice à répondre aux fluctuations du vent, cet article propose alors une stratégie de commande robuste de la génératrice asynchrone double alimentation d'une éolienne qui permet d'optimiser sa production énergétique (rendement). Pour ce faire, il est mit en œuvre un observateur grand gain pour estimer le couple aérodynamique et des commandes par mode glissant d'ordre supérieur. La stratégie globale ainsi proposée a été validée sur une éolienne tripale de 1.5 MW en utilisant le simulateur FAST.**

Mots-clés—**Eolienne, génératrice asynchrone double alimentation, commande, modes glissants d'ordre supérieur, observateur grand gain.**

NOMENCLATURE

v	=	Vitesse du vent (m/sec) ;
ρ	=	Densité de l'air (kg/m^3) ;
R	=	Rayon du rotor (m) ;
P_a	=	Puissance aérodynamique (W) ;
T_a	=	Couple aérodynamique (Nm) ;
λ	=	Vitesse spécifique ;
$C_p(\lambda)$	=	Coefficient de puissance ;
ω	=	Vitesse du rotor/partie mécanique (rad/sec) ;
T_g	=	Couple de la génératrice (Nm) ;
K	=	Coefficient de rigidité total (Nm/rad sec) ;
J	=	Inertie totale (kg m^2) ;
V (I)	=	Tension (courant) (V, A) ;
P (Q)	=	Puissance active (réactive) ;
ϕ	=	Flux (Wb) ;
T_{em}	=	Couple électromagnétique (Nm) ;
R_s (R_r)	=	Résistance statorique (rotorique) (Ω) ;
L_s (L_r)	=	Inductance statorique (rotorique) (H) ;
M	=	Inductance mutuelle (H) ;
σ	=	Coefficient de dispersion, $\sigma = 1 - M^2/L_sL_r$;
θ_r	=	Position rotorique ;
ω_r (ω_s)	=	Vitesse angulaire (vitesse synchrone) ;
g	=	Glissement ;
p	=	Nombre de paires de pôles.

I. INTRODUCTION

De nombreux travaux de recherche sur la commande d'éoliennes ont été menés. Grâce à eux, les dernières générations d'éoliennes fonctionnent avec une vitesse variable et disposent d'une régulation pitch [1]. Nous pouvons ainsi modifier la vitesse de rotation et l'angle de calage de chacune des pales, nous permettant alors d'améliorer la production de l'aérogénérateur. Néanmoins, il reste encore à introduire plus d'intelligence dans le fonctionnement des aérogénérateurs.

L'objectif de cet article est de proposer une commande robuste de la génératrice qui puisse optimiser la production de l'éolienne c'est-à-dire, améliorer la qualité de l'énergie produite et le rendement énergétique. Mais aussi de diminuer les charges mécaniques de fatigue, qui aurait pour conséquence de rendre possible la fabrication d'aéroturbines plus légères améliorant de ce fait la productivité. La commande doit donc tenir compte du comportement du système dans son ensemble. De même, les perturbations provenant du vent doivent également être considérées.

L'aérogénérateur étudié est une éolienne tripale à axe horizontal et régulation pitch utilisant une Génératrice Asynchrone Double Alimentation (GADA). En effet, le but étant de réduire les coûts, la puissance transitant par les convertisseurs est moindre pour cette configuration en comparaison avec une génératrice asynchrone à cage ou synchrone. La stratégie de commande proposée, schématiquement illustrée par la Fig. 1, se décompose alors en deux principaux blocs : *1)* Le bloc *observateur grand gain et commande par mode glissant* définissant le couple que doit fournir la génératrice afin d'optimiser le rendement, et *2)* le bloc *contrôle par mode glissant du 2nd ordre* qui commande la GADA à travers les convertisseurs.

II. MODELISATION DE LA TURBINE

La modélisation de la turbine est inspirée de [2]. La puissance disponible du vent traversant une surface A_v est définie par

$$P_{vent} = \frac{1}{2}\rho A_v v^3 \tag{1}$$

La puissance captée par l'éolienne est alors

$$P_a = \frac{1}{2}\rho\pi R^2 C_p(\lambda) v^3 \tag{2}$$

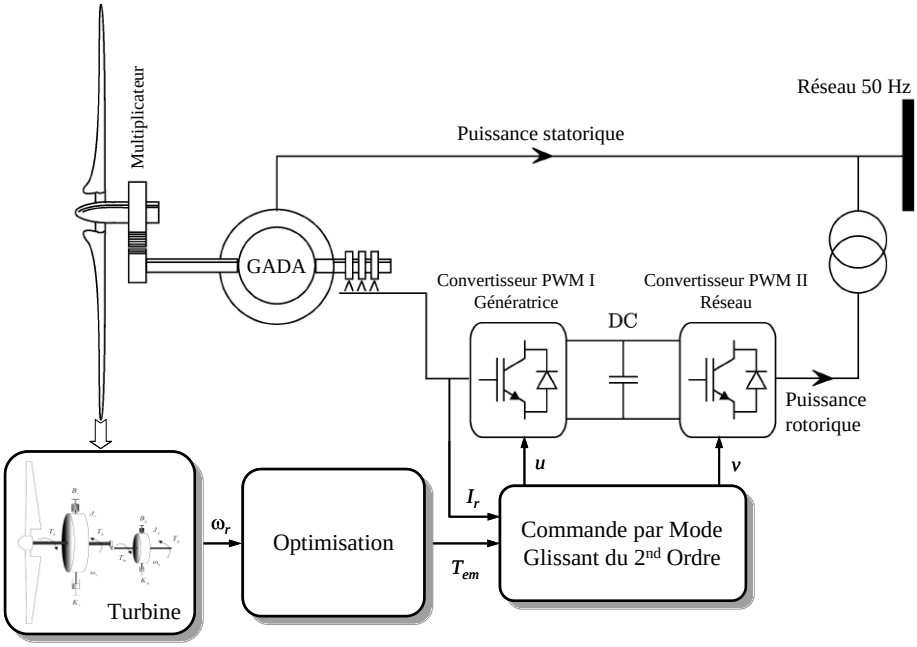

Fig. 1. Principe de la stratégie de commande.

Le coefficient de puissance est défini par le ratio de la puissance capté par la turbine sur la puissance du vent.

$$C_p = \frac{P_a}{P_{vent}} \tag{3}$$

C_p est fonction de la vitesse spécifiqueλ définie par

$$\lambda = \frac{R\omega}{v} \tag{4}$$

La puissance captée par l'éolienne peut être exprimée par

$$P_a = \omega T_a \tag{5}$$

Des équations ci-dessus, on peut déduire l'expression du couple aérodynamique.

$$T_a = \frac{1}{2}\rho\pi R^3 C_q(\lambda)v^2 \tag{6}$$

L'expression de la dynamique de la turbine est exprimée par [2]

$$J\dot{\omega} = T_a - K\omega - T_{em} \tag{7}$$

III. Optimisation de la Puissance Produite

Le couple de référence issue du bloc optimisation doit répondre à deux problématiques : la maximisation de la puissance et la gestion des zones de fonctionnement de l'éolienne [2]. Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible présente un maximum défini par la limite de Betz. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent. La Figure 2 illustre un exemple de courbes de puissance d'une éolienne [3].

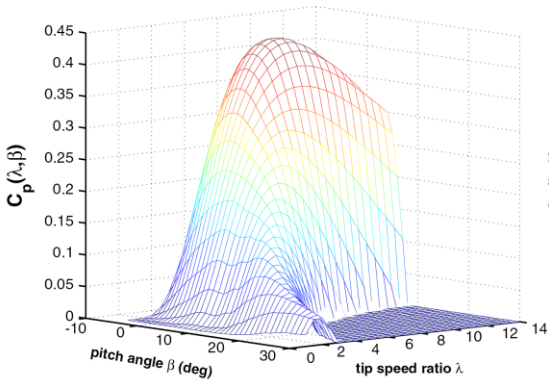

Fig. 2. Coefficient de puissance.

D'autant plus, que pour extraire de manière efficace la puissance du vent, tout en maintenant en sécurité le régime, l'éolienne doit être exploitée selon les 3 zones, qui relient la vitesse du vent, la vitesse maximale du rotor admissible, et la puissance désirée (Fig. 3). Dans la zone I, l'éolienne est arrêtée car le vent n'est pas assez fort pour que la production d'énergie soit rentable vis-à-vis de l'énergie de fonctionnement.

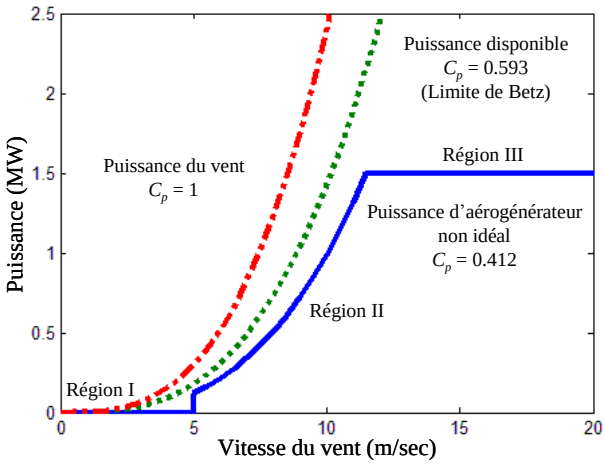

Fig. 3. Courbe typique de la puissance extraite par une éolienne en fonction de la vitesse du vent

Dans la zone II, l'aérogénérateur fonctionne en charge partielle. Ici l'objectif est d'optimiser le rendement énergétique. Ainsi, la vitesse de rotation évolue en fonction de la vitesse du vent de sorte à se maintenir au point de fonctionnement à rendement aérodynamique maximal. Le but étant que le coefficient de puissance soit toujours optimum. La zone III (vent fort) correspond au fonctionnement à pleine charge. Il faut limiter la puissance afin de ne pas détériorer le système.

Pour garantir le rendement maximum de la turbine, il faut maintenir le coefficient de puissance à son maximum.

$$\begin{cases} T_a = k\omega^2 \\ k = \dfrac{1}{2}\pi\rho R^5 \dfrac{C_{p\max}}{\lambda_{opt}^3} \end{cases} \tag{8}$$

Où λ_{opt} est la vitesse spécifique qui nous permet de maximiser la puissance captée. Le but de la stratégie suivante est que T_a converge vers T_{opt} alors que la loi standard impose que $T_g = T_{opt,}$. Cette simplification revient à négliger l'effet de la transmission mécanique induisant une perte de rendement.

Nous allons tout d'abord utiliser un observateur grand gain pour estimer le couple aérodynamique. En comparaisons à un observateur par mode glissant, il nous permet de réduire le phénomène de broutement en pratique [4].

Nous avons $\dot{\omega} = \dfrac{T_a}{J} - \dfrac{K\omega}{J} - \dfrac{T_{em}}{J}$ (9)

En posant les variables suivantes

$$\begin{cases} x_1 = \omega \\ x_2 = \dfrac{T_a}{J} \end{cases} \tag{10}$$

nous obtenons le système suivant :

$$x = \begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 - \dfrac{K}{J}x_1 - \dfrac{T_{em}}{J} \\ \dot{x}_2 = f(t) \end{cases} \tag{11}$$

Avec $\begin{cases} A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\ C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \\ \varphi(x,u) = \begin{bmatrix} \dfrac{-Kx_1 - u}{J} \\ 0 \end{bmatrix} \\ \varepsilon(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ f(t) \end{bmatrix} \end{cases}$

Nous pouvons réécrire le système sous forme matricielle.

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + \varphi(x,u) + \varepsilon(t) \\ y = Cx \end{cases}$$

Considérons l'observateur grand gain suivant [5] :

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + \varphi(\hat{x},u) - \theta\Delta_\theta^{-1}S^{-1}C^TC(\hat{x} - x) \tag{12}$$

Avec $\begin{cases} \Delta_\theta = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \dfrac{1}{\theta} \end{bmatrix} \\ S = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix} \end{cases}$

S étant la solution de l'équation suivante :

$$S + A^TS + SA - C^TC = 0 \tag{13}$$

Posons $\bar{x} = \Delta_\theta(\hat{x} - x)$

En dérivant, nous avons

$$\dot{\bar{x}} = \theta(A - S^{-1}C^TC)\bar{x} + \Delta_\theta\left(\varphi(\hat{x}) - \varphi(x)\right) - \Delta_\theta\varepsilon(t) \tag{14}$$

Pour étudier la convergence nous posons la fonction de Lyapunov suivante :

$$V = \bar{x}^TS\bar{x} \tag{15}$$

En dérivant, nous obtenons

$$\dot{V} = -\theta V - \bar{x}^TC^TC\bar{x} + 2\bar{x}^TS\Delta_\theta\left(\varphi(\hat{x}) - \varphi(x)\right) - 2\bar{x}^TS\Delta_\theta\bar{\varepsilon}(t)$$

et par conséquent

$$\dot{V} \le -\theta V + 2\|\bar{x}\|\lambda_{\max}(S)\left(\left\|\Delta_\theta\left(\varphi(\hat{x}) - \varphi(x)\right)\right\| + \|\Delta_\theta\bar{\varepsilon}(t)\|\right) \tag{16}$$

Maintenant nous pouvons supposer (φ est considérée lipchitzienne) que :

$$\begin{cases} \left\|\Delta_\theta\left(\varphi(\hat{x}) - \varphi(x)\right)\right\| \le \xi\|\bar{x}\| \\ \|f(t)\| \le \delta \end{cases} \text{ avec } \xi = \frac{K}{J}$$

Nous avons donc

$$\dot{V} \le -\theta V + 2\|\bar{x}\|^2\lambda_{\max}(S)\xi + 2\|\bar{x}\|\lambda_{\max}(S)\frac{\delta}{\theta}$$

$$\dot{V} \le -\theta V + c_1V + c_2\frac{\delta}{\theta}\sqrt{V} \text{ avec } \begin{cases} c_1 = 2\dfrac{\lambda_{\max}(S)}{\lambda_{\min}(S)}\xi \\ c_2 = 2\dfrac{\lambda_{\max}(S)}{\sqrt{\lambda_{\min}(S)}} \end{cases}$$

Posons $\begin{cases} \theta_0 = \max\{1, c_1\} \\ \lambda = \sqrt{\dfrac{\lambda_{\max}(S)}{\lambda_{\min}(S)}} \\ \mu_\theta = \dfrac{\theta - c_1}{2} \\ M_\theta = 2\dfrac{\lambda_{\max}(S)}{\lambda_{\min}(S)(\theta - c_1)} \end{cases}$

Pour $\theta > \theta_0$, nous pouvons établir l'inégalité suivant [5]

$$\|e(t)\| \le \theta\lambda\exp(-\mu_\theta t)\|e(0)\| + M_\theta\delta \tag{17}$$

Avec $\hat{T}_a = J\hat{x}_2$, il vient que

$$\tilde{T}_a = \hat{T}_a - T_a \le J\left[\theta\lambda \exp(-\mu_\theta t)\left\|e(0)\right\| + M_\theta \delta\right] \quad (18)$$

M_θ diminue quand θ augmente permettant ainsi d'avoir une estimation pratique du couple aérodynamique.

Posons l'erreur de poursuite suivante :

$$e_T = T_{opt} - T_a \quad (19)$$

où T_a est déduit de l'observateur. Nous obtenons:

$$\dot{e}_T = 2k_{opt}\omega\left(T_a - K_t\omega - T_g\right) - \dot{T}_a \quad (20)$$

Nous définissons les deux fonctions F et G

$$\begin{cases} F = 2k_{opt}\omega \\ G = 2k_{opt}\omega\left(T_a - K_t\omega\right) - \dot{T}_a \end{cases} \quad (21)$$

Ainsi $\ddot{e}_T = -F\dot{T}_g + \dot{G}$ (22)

Considérons maintenant le contrôleur suivant basé sur le l'algorithme dit *super twisting* [6].

$$\begin{cases} T_g = y + B_1\left|e_T\right|^{\frac{1}{2}}\operatorname{sgn}\left(e_T\right) \\ \dot{y} = +B_2\operatorname{sgn}\left(e_T\right) \end{cases} \quad (23)$$

Les constantes B_1 et B_2 satisfont les inégalités suivantes.

$$\begin{cases} B_1 > \dfrac{\Phi_2}{\Gamma_m} \\ B_2^{\,2} \ge \dfrac{4\Phi_2\Gamma_M\left(A_1 + \Phi_1\right)}{\Gamma_m^{\,3}\left(A_1 - \Phi_1\right)} \\ \left|\dot{G}\right| < \Phi_2 \\ 0 < \Gamma_m \le F \le \Gamma_M \end{cases} \quad (24)$$

Ainsi nous pouvons dire qu'il existe un temps fini t_c tel que

$$T_a = T_{opt},\ t > t_c. \quad (25)$$

IV. Modelisation de la Generatrice Asynchrone Double Alimentation

La génératrice asynchrone double alimentation est classiquement modélisée dans le repère de Park *d-q*, donnant lieu au système équations (26) [7].

Pour des raisons évidentes de simplifications, un référentiel *d-q* lié au champ tournant statorique et un flux statorique aligné sur l'axe *d* ont été adoptés. De plus, la résistance statorique peut être négligée étant donné que c'est une hypothèse réaliste pour les génératrices utilisées dans l'éolien [6]. Partant de ces considérations, on obtient le système d'équations (27).

V. Strategie de Commande par Mode Glissant du Second Ordre

La commande de l'aérogénérateur (la génératrice asynchrone double alimentation) doit être un compromis entre maintenir le rendement optimum à chaque instant et limiter les oscillations du couple qu'engendrent cette maximisation permanente [8].

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \dfrac{d}{dt}\phi_{sd} - \omega_s\phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \dfrac{d}{dt}\phi_{sq} + \omega_s\phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \dfrac{d}{dt}\phi_{rd} - \omega_r\phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \dfrac{d}{dt}\phi_{rq} + \omega_r\phi_{rd} \\ \phi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \phi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \\ T_{em} = pM\left(I_{rd}I_{sq} - I_{rq}I_{sd}\right) \end{cases} \quad (26)$$

$$\begin{cases} \dfrac{dI_{rd}}{dt} = \dfrac{1}{\sigma L_r}\left(\begin{array}{l} v_{rd} - R_r I_{rd} + g\omega_s\sigma L_r I_{rq} \\ -\dfrac{M}{L_s}\dfrac{d\phi_{sd}}{dt} \end{array}\right) \\ \dfrac{dI_{rq}}{dt} = \dfrac{1}{\sigma L_r}\left(\begin{array}{l} v_{rq} - R_r I_{rq} - g\omega_s\sigma L_r I_{rd} \\ -g\omega_s\dfrac{M}{L_s}\phi_{sd} \end{array}\right) \\ T_{em} = -p\dfrac{M}{L_s}\phi_{sd}I_{rq} \end{cases} \quad (27)$$

La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle de façon à garder un facteur de puissance unitaire côté stator.

Dans le repère *d-q*, la puissance réactive s'écrit

$$Q_s = V_{sq}I_{sd} - V_{sd}I_{sq} \quad (28)$$

L'adaptation de cette équation à nos hypothèses simplificatrices donne

$$Q_s = \frac{V_s\phi_s}{L_s} - \frac{V_s M}{L_s}I_{rd} \quad (29)$$

La puissance réactive désirée est $Q_s = 0$. (30)

En utilisant ces équations, nous obtenons la consigne

$$I_{rd_ref} = \frac{V_s}{\omega_s M} \quad (31)$$

La stratégie de commande proposé utilise aussi l'algorithme dit *super twisting*. Dans ce cadre, Nous considérons les erreurs suivantes.

$$\begin{cases} e_{I_{rd}} = I_{rd} - I_{rd_ref} \\ e_{T_{em}} = T_{em} - T_{ref} \end{cases} \quad (32)$$

Nous obtenons alors

$$\begin{cases} \dot{e}_{I_{rd}} = \dfrac{1}{\sigma L_r}\left(V_{rd} - R_r I_{rd} + g\omega_s L_r\sigma I_{rq} - \dfrac{M}{L_s}\dfrac{d\phi_{sd}}{dt}\right) - \dot{I}_{rd_ref} \\ \dot{e}_{T_{em}} = -p\dfrac{M}{\sigma L_s L_r}\phi_s\left(\begin{array}{l} V_{rq} - R_r I_{rq} - g\omega_s L_r\sigma\cdot i_{rd} \\ -g\omega_s\dfrac{M}{L_s}\phi_{sd} \end{array}\right) - \dot{T}_{ref} \end{cases}$$

(33)

En posant G_1 et G_2 telles que

$$\begin{cases} G_1 = \dfrac{1}{\sigma L_r}\left(g\omega_s \sigma L_r I_{rq} - \dfrac{M}{L_s}\dfrac{d\phi_{sd}}{dt} \right) - \dot{I}_{rd_ref} \\ G_2 = -p\dfrac{M}{\sigma L_s L_r}\phi_s \left(-g\omega_s \sigma L_r I_{rd} - g\omega_s \dfrac{M}{L_s}\phi_{sd} \right) - \dot{T}_{ref} \end{cases}$$

alors il vient que

$$\begin{cases} \ddot{e}_{I_{rd}} = \dfrac{1}{\sigma L_r}\dot{V}_{rd} + \dot{G}_1 - \dfrac{1}{\sigma L_r} R_r \dot{I}_{rd} \\ \ddot{e}_{T_{em}} = -p\dfrac{M}{\sigma L_s L_r}\phi_s \dot{V}_{rq} + \dot{G}_2 + p\dfrac{M}{\sigma L_s L_r}\phi_s R_r \dot{I}_{rq} \end{cases} \tag{34}$$

Considérons maintenant la commande suivante.

$$\begin{cases} V_{rq} = y_1 + B_1 \left| e_{T_{em}} \right|^{\frac{1}{2}} Sgn(e_{T_{em}}) + \dfrac{1}{\sigma L_r} R_r I_{rd} \\ \dot{y}_1 = +B_2 Sgn(e_{T_{em}}) \\ V_{rd} = y_2 - B_3 \left| e_{I_{rd}} \right|^{\frac{1}{2}} Sgn(e_{I_{rd}}) - p\dfrac{M}{\sigma L_s L_r}\phi_s R_r I_{rq} \\ \dot{y}_2 = -B_4 Sgn(e_{I_{rd}}) \end{cases} \tag{35}$$

Avec les constantes positives B_1, B_2, B_3, B_4, Φ_1, et Φ_2 qui satisfont les inégalités suivantes.

$$\begin{cases} \left| \dot{G}_1 \right| < \Phi_1 \\ B_1 > p\dfrac{M}{\sigma L_s L_r}\phi_s \Phi_1 \\ B_2^{\,2} \geq \dfrac{4\Phi_1 (B_1 + \Phi_1)}{\sigma^2 L_r^{\,2} (B_1 - \Phi_1)} \\ \left| \dot{G}_2 \right| < \Phi_2 \\ B_3 > \dfrac{\Phi_2}{\sigma L_r} \\ B_4^{\,2} \geq \dfrac{4\Phi_2 (B_3 + \Phi_2)}{\sigma^2 L_r^{\,2} (B_3 - \Phi_2)} \end{cases} \tag{36}$$

Ainsi nous garantissons la convergence de e_{Ird} et e_{Tem} vers 0, respectivement, en un temps fini t_{Ird} et t_{Tem}, respectivement. Par conséquent, nous aurons :

$$\begin{cases} I_{rd_ref} = I_{rd}, & \forall t > t_{I_{rd}} \\ T_{ref} = T_{em}, & \forall t > t_{T_{em}} \end{cases}$$

La stratégie de commande par mode glissant du 2ème ordre élaborée répond aux objectifs décrits dans l'introduction c'est-à-dire qu'elle est robuste. Elle augmente donc la fiabilité, elle améliore le rendement énergétique et avec le peu de broutement qu'elle engendre, elle limite le stress mécanique sur l'ensemble de la transmission de l'éolienne.

VI. Validation avec le Simulateur FAST

La stratégie de commande proposée dans cet article a été validée en utilisant le simulateur FAST du NREL (National Renewable Energy Laboratory) [9-11]. Le code FAST est un simulateur d'éolienne à deux ou trois pales. Ce simulateur a été choisi pour la validation car il a été évalué et certifié. FAST a été développé en Fortran mais peut être interfacé avec Simulink comme ce fut cas dans notre étude (Fig. 4).

La stratégie de commande a été appliquée à la turbine WP 1.5-MW du NREL dont les caractéristiques sont données dans le Tableau 1. La génératrice asynchrone double alimentation équipant cette éolienne est caractérisée par les paramètres donnés dans le Tableau 2.

La modélisation de la GADA a été faite sous Simulink. Ce modèle a alors été couplé au bloc FAST (turbine) afin de tester la stratégie de commande proposée. Comme nous pouvons le constater sur la Fig. 5, nous arrivons à estimer le couple aérodynamique de manière précise ce qui nous permet de le commander.

En ce qui concerne la commande de la GADA, les performances obtenues sont très satisfaisantes comme le montre la poursuite de trajectoire du couple électromagnétique désirée (Fig. 6) et la convergence très rapide vers le courant rotorique de référence (Fig. 7).

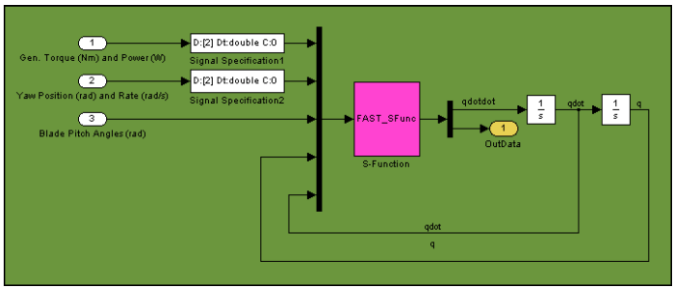

Fig. 4. Block de la turbine FAST.

Tableau 1.
L'eolienne WP 1.5 MW

Nombre de pales	3
Diamètre du rotor	70 m
Hauteur	84.3 m
Puissance désirée	1.5 MW
Inertie de la turbine	4.4532×10^5 kg m^2

Tableau 2.
La Generatrice Asynchrone Double Alimentation

Nombre de paires de pôles	2
Résistance statorique	0.005 Ω
Inductance statorique	0.40744 mH
Résistance rotorique	0.0089 Ω
Inductance rotorique	0.29921 mH
Mutuelle inductance	0.0016 mH

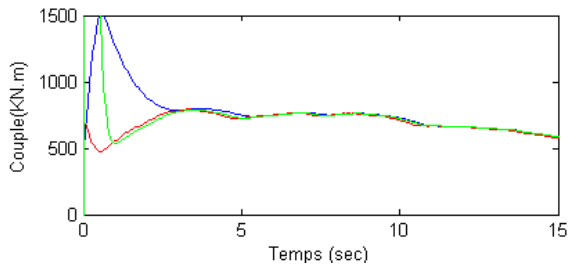

Fig. 5. T_{opt} /bleu), T_a réelle (rouge), T_a estimée (vert).

De plus, la Fig. 6 montre bien que le couple sur l'arbre ne subit pas de phénomène de broutement limitant ainsi le stress mécanique sur l'ensemble de la transmission de l'éolienne.

Afin de démontrer l'intérêt de la stratégie proposé, ses performances ont été comparées à ceux d'autres techniques [12-13]. De nombreuses commandes utilisent comme référence la puissance active [12]. Cela suppose vraisemblablement que la puissance active soit égale à la puissance électromagnétique.

$$P_s = P_{ref} \Rightarrow I_{rq_ref} = -\frac{L_s}{V_s M} P_{ref} \tag{37}$$

Cette approximation entraîne des problèmes de convergence vers le couple désiré (Fig. 8).

Une deuxième méthode consiste à utiliser l'équation suivante [13] :

$$I_{rq_ref} = -\frac{L_s}{pM\,\phi_s} T_{ref} \tag{38}$$

Les nombreuses simplifications effectuées pour obtenir l'expression du couple électromagnétique de (38) et aussi le fait que le flux statorique soit considéré constant ne permettent pas de suivre précisément le couple désiré (Fig. 9).

En comparaison à ces deux commandes, la stratégie proposée permet une très bonne poursuite de la consigne. Cela permet sans aucun doute d'améliorer le rendement.

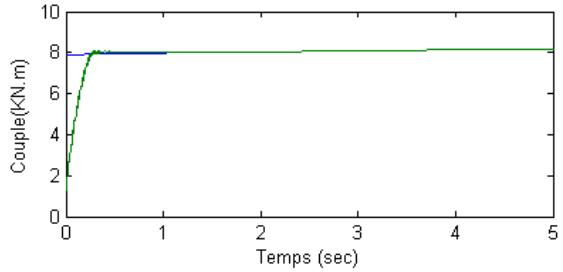

Fig. 6. Couple de référence (haut/bleu) et réel (bas/vert).

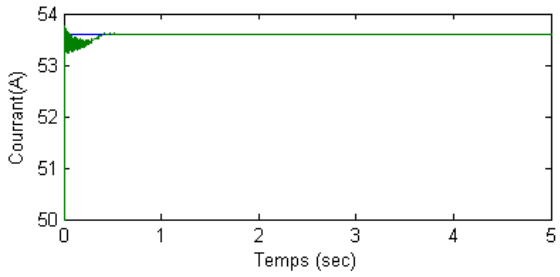

Fig. 7. Courant rotorique I_{rd} de référence (bleu) et réel (vert).

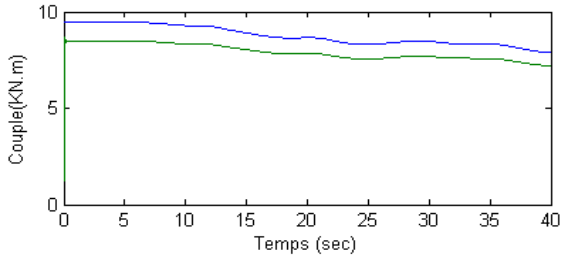

Fig. 8. Couple de référence (haut/bleu) et réel (bas/vert).

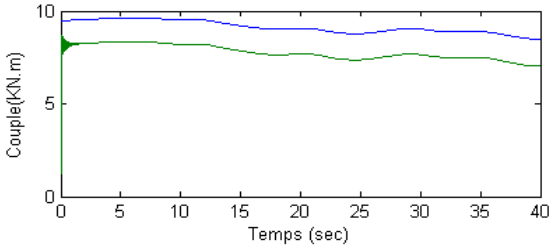

Fig. 9. Couple de référence (haut/bleu) et réel (bas/vert).

Les simulations ont été effectuées avec les gains suivants: $\theta = 30$, $A_1 = 5\times10^3$, $A_2 = 1\times10^5$, $B_1 = 1.5$, $B_2 = 50$, $B_3 = 200$, $B_3 = 1000$, $k_{opt} = 1.6124\times10^5$.

VII. Conclusions

Une pratique commune d'aborder le problème de la commande de génératrices d'éoliennes est d'utiliser une approche par linéarisation. Toutefois, dû à des conditions de fonctionnement stochastiques, et à d'inévitables incertitudes inhérentes au système, de telles stratégies de commande se payent au prix d'un système aux performances appauvries et à une fiabilité diminuée. D'où, le recours à une stratégie de commande non linéaire et robuste pour la prise en compte de ces problèmes.

La stratégie élaborée et présentée dans cet article ; à savoir dans un premier temps de définir le couple de référence par un observateur grand gain combiné à une commande par mode glissant puis dans un deuxième temps de commander la génératrice asynchrone double alimentation par un mode glissant d'ordre 2, répond aux objectifs assignés. En effet, elle est robuste augmentant ainsi la fiabilité, elle améliore le rendement énergétique, et avec le peu de broutement qu'elle engendre, elle limite le stress mécanique sur l'arbre de transmission.

References

[1] Benbouzid M.E.H. et *al.* The state of the art of generators for wind energy conversion systems. *in Proceedings of the ICEM'06*, Chania (Greece), September 2006.

[2] Beltran B. *et al.* Sliding mode power control of variable speed wind energy conversion systems. *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 23, n°2, pp. 551-558, June 2008.

[3] Boukhezzar B. et *al.* Multivariable control strategy for variable speed variable pitch wind turbine. *Renewable Energy*, vol. 32, pp. 1273-1287, 2007.

[4] Khalili H.K. High-gain observers in nonlinear feedback control. *in Proceedings of the ICCAS'08*, Seoul (Korea), October 2008.

[5] Farza M. et *al.* Observer design for a class of MIMO nonlinear systems. *Automatica*, vol. 40, n°1, pp. 135-143, September 2004.

[6] Levant A. et *al.* Integral high-order sliding modes. *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 52, n°7, pp. 1278-1282, July 2007.

[7] Müller S. et *al.* Doubly fed induction generator systems. *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 8, n°3, pp. 26-33, May-June 2002.

[8] De Battista H. et *al.* Sliding mode control of wind energy systems with DOIG-power efficiency and torsional dynamics optimization. *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 15, n°2, pp. 728-734, May 2000.

[9] http://wind.nrel.gov/designcodes/simulators/fast/ (Dernier accès en septembre 2009).

[10] J.M. Jonkman et *al.*, "FAST user's guide," NREL/EL-500-29798, 2005.

[11] Beltran B. *et al.* High-order sliding mode control of variable speed wind turbines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, n°9, pp. 3314-3321, September 2009.

[12] Poitiers F. et *al.* Advanced control of a doubly-fed induction generator for wind energy conversion. *Electric Power Systems Research*, doi:10.1016/j.epsr.2009.01.007, 2009.

[13] Cardenas R. et *al.* Sensorless vector control of induction machines for variable-speed wind energy applications. *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 19, n°1, pp. 196-205, March 2004.