



**HAL**  
open science

## Commande d'une éolienne à base de GADA par modes glissants d'ordre supérieur et observateur grand gain

Brice Beltran, Mohamed Benbouzid, Tarek Ahmed-Ali, Hervé Mangel

### ► To cite this version:

Brice Beltran, Mohamed Benbouzid, Tarek Ahmed-Ali, Hervé Mangel. Commande d'une éolienne à base de GADA par modes glissants d'ordre supérieur et observateur grand gain. *European Journal of Electrical Engineering*, 2012, 15 (6), pp.659-678. hal-00780765

**HAL Id: hal-00780765**

**<https://hal.science/hal-00780765>**

Submitted on 24 Jan 2013

**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 d'une éolienne à base de GADA par modes glissants d'ordre supérieur et observateur grand gain

Brice Beltran\* — Mohamed Benbouzid\* — Tarek Ahmed-Ali\*\* — Hervé Mangel\*

\* Université de Brest, EA 4325 LBMS

IUT de Brest – Rue de Kergoat – CS 93837, 29238 Brest Cedex 03

[brice.beltran@dga.defense.gouv.fr](mailto:brice.beltran@dga.defense.gouv.fr),

[Mohamed.Benbouzid@univ-brest.fr](mailto:Mohamed.Benbouzid@univ-brest.fr),

[Herve.Mangel@univ-brest.fr](mailto:Herve.Mangel@univ-brest.fr)

\*\* 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](mailto: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 de la génératrice asynchrone double alimentation d'une éolienne ; stratégie robuste aux incertitudes de modélisation de la génératrice et de l'aérogénérateur, et qui permet d'optimiser la production énergétique (rendement). Pour ce faire, il est mis en œuvre un observateur à 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.*

*ABSTRACT. This paper deals with the power generation control in variable speed wind turbines. In this context, a control strategy is proposed to ensure power extraction optimization of a DFIG-based wind turbine. The proposed control strategy combines an MPPT (Maximum Power Point Tracking) using a high gain observer and second-order sliding mode for the DFIG control. This strategy presents attractive features such as chattering-free behavior, finite reaching time, and robustness with respect to unmodeled dynamics (generator and turbine). The overall strategy has been validated on a 1.5-MW three-blade wind turbine using the NREL wind turbine simulator FAST.*

*MOTS-CLÉS : Eolienne, génératrice asynchrone double alimentation, commande, modes glissants d'ordre supérieur, observateur à grand gain.*

*KEYWORDS: Wind turbine, doubly-fed induction generator, control, high-order sliding modes, high gain observer.*

---

## Nomenclature

GADA	=	Génératrice Asynchrone Double Alimentation ;
$v$	=	Vitesse du vent (m/sec) ;
$\rho$	=	Densité de l'air ( $\text{kg/m}^3$ ) ;
$R$	=	Rayon du rotor (m) ;
$P_a$	=	Puissance aérodynamique (W) ;
$T_a$	=	Couple aérodynamique (Nm) ;
$\lambda$	=	Vitesse spécifique ;
$C_p(\lambda)$	=	Coefficient de puissance ;
$\omega$	=	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 ( $\text{kg m}^2$ ) ;
$V(I)$	=	Tension (courant) (V, A) ;
$P(Q)$	=	Puissance active (réactive) ;
$\phi$	=	Flux (Wb) ;
$T_{em}$	=	Couple électromagnétique (Nm) ;
$R_s(R_r)$	=	Résistance statorique (rotorique) ( $\Omega$ ) ;
$L_s(L_r)$	=	Inductance statorique (rotorique) (H) ;
$M$	=	Inductance mutuelle (H) ;
$\sigma$	=	Coefficient de dispersion, $\sigma = 1 - M^2/L_sL_r$ ;
$\theta_r$	=	Position rotorique ;
$\omega_r(\omega_s)$	=	Vitesse angulaire (vitesse synchrone) ;
$g$	=	Glissement ;
$p$	=	Nombre de paires de pôles.

## 1. Introduction

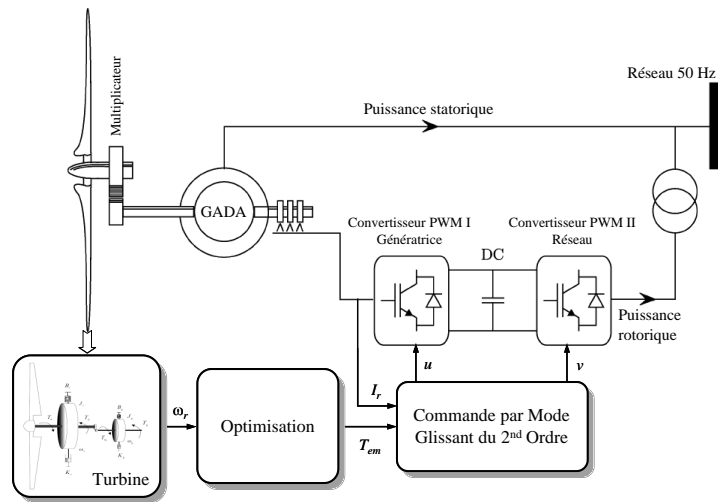
De nombreux travaux de recherche sur la commande d'éoliennes ont été menés. Grâce à eux, les dernières générations d'éoliennes fonctionnent avec une vitesse variable et disposent d'une régulation pitch (Lisserre *et al.*, 2011). Nous pouvons ainsi modifier la vitesse de rotation et l'angle de calage 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 (Courtecuisse *et al.*, 2008).

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.

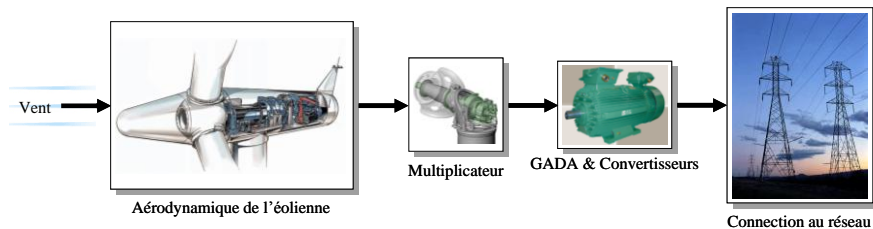
L'aérogénérateur étudié est une éolienne tripale à axe horizontal et régulation pitch utilisant une génératrice asynchrone double alimentation. En effet, le but étant de réduire les coûts, la puissance transitant par les convertisseurs est moindre pour cette configuration en comparaison avec une génératrice 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 2<sup>nd</sup> ordre* qui commande la GADA à travers les convertisseurs.

## 2. Modélisation de la turbine

Le schéma global d'une éolienne connectée au réseau est illustré par la Fig. 2. La modélisation de la turbine est inspirée de (Beltran *et al.*, 2009 ; Song *et al.*, 2000). La puissance disponible du vent traversant une surface  $A_v$  est définie par



**Figure 1.** Principe de la stratégie de commande.



**Figure 2.** Schéma global des éléments de base d'une éolienne connectée au réseau.

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho A_v v^3 \quad [1]$$

La puissance captée par l'éolienne est alors :

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

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

$$C_p = \frac{P_a}{P_{vent}} \quad [3]$$

$C_p$  est fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$  définie par :

$$\lambda = \frac{R\omega}{v} \quad [4]$$

La puissance captée par l'éolienne peut être exprimée par :

$$P_a = \omega T_a \quad [5]$$

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

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

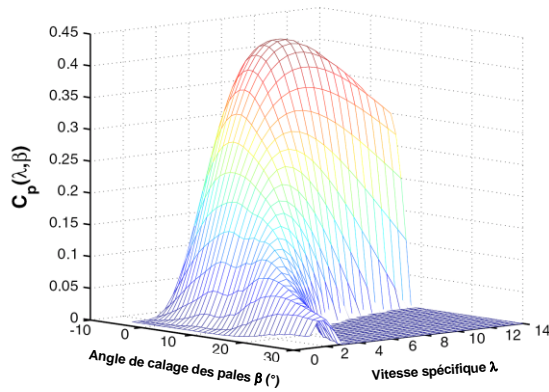
L'expression de la dynamique de la turbine, avec l'inertie total  $J$ , est exprimée par (Beltran *et al.*, 2009) :

$$J\dot{\omega} = T_a - K\omega - T_{em} \quad [7]$$

### 3. Optimisation de la puissance générée

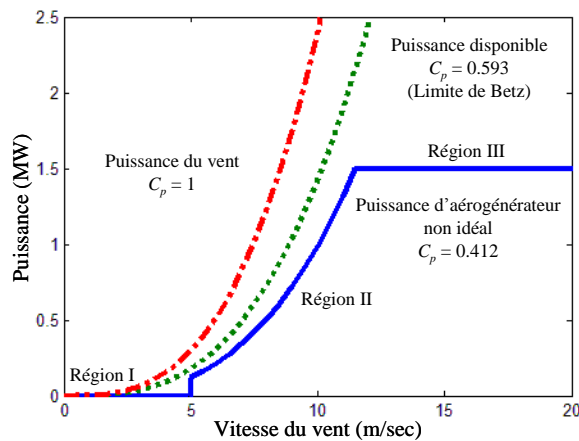
#### 3.1. Formulation du problème

Le couple de référence issu du bloc optimisation doit répondre à deux problématiques : la maximisation de la puissance et la gestion des zones de fonctionnement de l'éolienne (Beltran *et al.*, 2009). 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 3 illustre un exemple de courbes de puissance d'une éolienne.



**Figure 3.** 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. 4). 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. 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.



**Figure 4.** Courbe typique de la puissance extraite par une éolienne en fonction de la vitesse du vent.

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

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

Où  $\lambda_{opt}$  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  $T_g = T_{opt}$  (Beltran *et al.*, 2009). Cette simplification revient à négliger l'effet de la transmission mécanique induisant une perte de rendement.

### 3.2. Observateur grand gain

Nous allons utiliser un observateur à grand gain pour estimer le couple aérodynamique. En comparaison à un observateur par mode glissant (Belhadi *et al.*, 2006), il nous permet de réduire le phénomène de broutement en pratique (Islam *et al.*, 2011).

Nous avons :

$$\dot{\omega} = \frac{T_a}{J} - \frac{K\omega}{J} - \frac{T_{em}}{J} \quad [9]$$

En posant les variables suivantes :

$$\begin{cases} x_1 = \omega \\ x_2 = \frac{T_a}{J} \end{cases} \quad [10]$$

nous obtenons le système suivant :

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

Nous pouvons réécrire le système sous forme matricielle.

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

$$\text{avec } A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, C = [1 \ 0], \varphi(x, u) = \begin{bmatrix} -Kx_1 - u \\ 0 \end{bmatrix} \text{ et } \varepsilon(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ f(t) \end{bmatrix}$$

Considérons l'observateur à grand gain suivant (Farza *et al.*, 2004) :

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + \varphi(\hat{x}, u) - \theta \Delta_0^{-1} S^{-1} C^T C (\hat{x} - x) \quad [12]$$

$$\text{avec } \Delta_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\theta} \end{bmatrix} \text{ et } S = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix}$$

$S$  étant la solution de l'équation suivante :

$$S + A^T S + SA - C^T C = 0 \quad [13]$$

$$\text{Posons } \bar{x} = \Delta_0 (\hat{x} - x)$$

En dérivant, nous avons :

$$\dot{\bar{x}} = \theta(A - S^{-1} C^T C) \bar{x} + \Delta_0 (\varphi(\hat{x}) - \varphi(x)) - \Delta_0 \varepsilon(t) \quad [14]$$

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

$$V = \bar{x}^T S \bar{x} \quad [15]$$

En dérivant, nous obtenons :

$$\dot{V} = -\theta V - \bar{x}^T C^T C \bar{x} + 2\bar{x}^T S \Delta_0 (\varphi(\hat{x}) - \varphi(x)) - 2\bar{x}^T S \Delta_0 \varepsilon(t)$$

et par conséquent

$$\dot{V} \leq -\theta V + 2\|\bar{x}\| \lambda_{\max}(S) (\|\Delta_0 (\varphi(\hat{x}) - \varphi(x))\| + \|\Delta_0 \varepsilon(t)\|) \quad [16]$$

Maintenant nous pouvons supposer ( $\varphi$  est considérée lipchitzienne) que :

$$\begin{cases} \|\Delta_0 (\varphi(\hat{x}) - \varphi(x))\| \leq \xi \|\bar{x}\| \\ \|f(t)\| \leq \delta \end{cases} \text{ avec } \xi = \frac{K}{J}$$

Nous avons donc

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

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



$$\text{Posons } \begin{cases} \theta_0 = \max \{1, c_1\} \\ \lambda = \sqrt{\frac{\lambda_{\max}(S)}{\lambda_{\min}(S)}} \\ \mu_0 = \frac{\theta - c_1}{2} \\ M_0 = 2 \frac{\lambda_{\max}(S)}{\lambda_{\min}(S)(\theta - c_1)} \end{cases}$$

Pour  $\theta > \theta_0 > 0$ , nous pouvons établir l'inégalité suivante (Farza *et al.*, 2004 ; Khalil, 1992) :

$$\|e(t)\| \leq \theta \lambda \exp(-\mu_0 t) \|e(0)\| + M_0 \delta \quad [17]$$

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

$$\tilde{T}_a = \hat{T}_a - T_a \leq J [\theta \lambda \exp(-\mu_0 t) \|e(0)\| + M_0 \delta] \quad [18]$$

$M_0$  diminue quand  $\theta$  augmente permettant ainsi d'avoir une estimation pratique du couple aérodynamique.

En termes de poursuite de trajectoire, nous posons l'erreur suivante :

$$e_T = T_{opt} - T_a \quad [19]$$

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

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

Nous définissons les deux fonctions  $F$  et  $G$

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

$$\text{Ainsi } \ddot{e}_T = -F\dot{T}_g + \dot{G} \quad [22]$$

Considérons maintenant le contrôleur suivant basé sur le l'algorithme dit *supertwisting* (Levant *et al.*, 2007).

$$\begin{cases} \dot{T}_g = y + B_1 |e_T|^{\frac{1}{2}} \text{sgn}(e_T) \\ \dot{y} = +B_2 \text{sgn}(e_T) \end{cases} \quad [23]$$

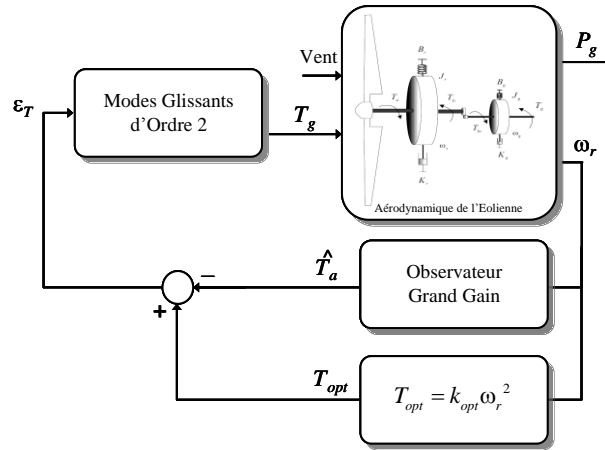
Les constantes  $B_1$  et  $B_2$  satisfont les inégalités suivantes :

$$\begin{cases} B_1 > \frac{\Phi_2}{\Gamma_m} \\ B_2^2 \geq \frac{4\Phi_2\Gamma_M(A_1 + \Phi_1)}{\Gamma_m^3(A_1 - \Phi_1)} \\ |\dot{G}| < \Phi_2 \\ 0 < \Gamma_m \leq F \leq \Gamma_M \end{cases} \quad [24]$$

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

$$T_a = T_{opt}, t > t_c. \quad [25]$$

Le principe de l'observateur à grand gain proposé ci-dessus est illustré par la Fig. 5 (Beltran *et al.*, 2010).



**Figure 5.** Schéma global des éléments de base d'une éolienne connectée au réseau.

#### 4. Modélisation de la GADA

La génératrice asynchrone double alimentation est classiquement modélisée dans le repère de Park  $d-q$ , donnant lieu au système équations suivant (Tazil *et al.*, 2010 ; Benelghali *et al.*, 2010) :

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

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 (Tazil *et al.*, 2010). Partant de ces considérations, on obtient le système d'équations suivant :

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

## 5. Stratégie de commande par modes glissants 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'engendre cette maximisation permanente (de Battista *et al.*, 2000). 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 :

$$Q_s = \frac{V_s\phi_s}{L_s} - \frac{V_sM}{L_s}I_{rd} \quad [29]$$

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 proposée utilise aussi l'algorithme dit *supertwisting*. 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 :

$$\begin{cases} \dot{e}_{I_{rd}} = \frac{1}{\sigma L_r} \left( V_{rd} - R_r I_{rd} + g\omega_s L_r \sigma I_{rq} - \frac{M}{L_s} \frac{d\phi_{sd}}{dt} \right) - \dot{I}_{rd\_ref} \\ \dot{e}_{T_{em}} = -p \frac{M}{\sigma L_s L_r} \phi_s \begin{pmatrix} V_{rq} - R_r I_{rq} - g\omega_s L_r \sigma \cdot i_{rd} \\ -g\omega_s \frac{M}{L_s} \phi_{sd} \end{pmatrix} - \dot{T}_{ref} \end{cases} \quad [33]$$

En posant  $G_1$  et  $G_2$  telles que :

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

il vient alors que :

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

Considérons maintenant la commande suivante :

$$\begin{cases} V_{rq} = y_1 + B_1 |e_{Tem}|^{\frac{1}{2}} \text{Sgn}(e_{Tem}) + \frac{1}{\sigma L_r} R_r I_{rd} \\ \dot{y}_1 = +B_2 \text{Sgn}(e_{Tem}) \\ V_{rd} = y_2 - B_3 |e_{Ird}|^{\frac{1}{2}} \text{Sgn}(e_{Ird}) - p \frac{M}{\sigma L_s L_r} \phi_s R_r I_{rq} \\ \dot{y}_2 = -B_4 \text{Sgn}(e_{Ird}) \end{cases} \quad [35]$$

avec les constantes positives  $B_1, B_2, B_3, B_4, \Phi_1,$  et  $\Phi_2$  qui satisfont les inégalités suivantes :

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

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 :

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

La stratégie de commande par modes glissants du 2<sup>ème</sup> ordre élaborée répond aux objectifs décrits dans l'introduction c'est-à-dire qu'elle est robuste (aux incertitudes de modélisation de la génératrice et de l'aérogénérateur). 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.

## 6. Validation avec le simulateur FAST

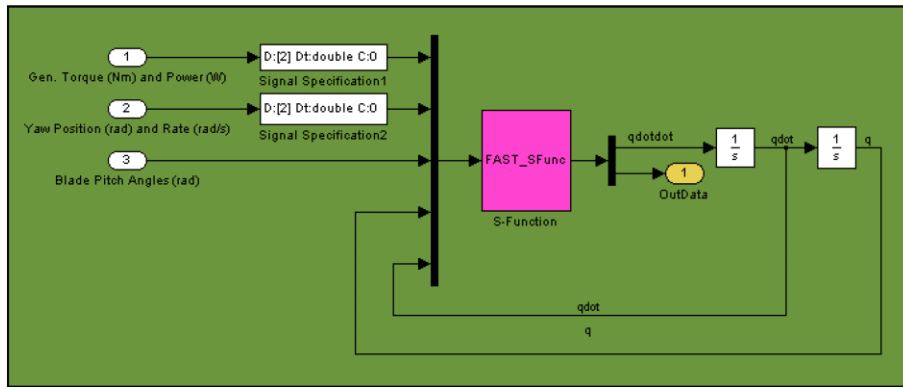
### 6.1. Contexte des simulations

La stratégie de commande proposée dans cet article a été validée en utilisant le simulateur FAST du NREL (NREL, 2011 ; Hand *et al.*, 2005 ; Beltran *et al.*, 2009). 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

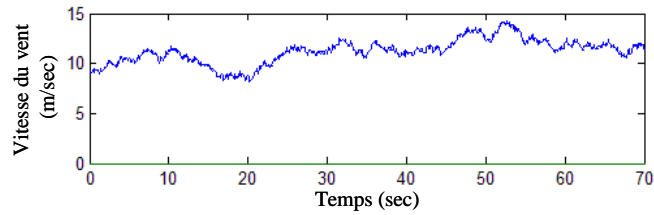
Fortran mais peut être interfacé avec Simulink comme ce fut cas dans notre étude (Fig. 6).

La stratégie de commande a été appliquée à la turbine WP 1.5-MW du NREL avec un vent turbulent du simulateur FAST (Figs. 7 et 8). Les caractéristiques et les paramètres de l'éolienne et de la GADA sont donnés dans les Tableaux 1 et 2, respectivement.

La modélisation de la GADA a été faite sous Simulink (Fig. 9). Ce modèle a alors été couplé au bloc FAST (turbine) afin de tester la stratégie de commande proposée.



**Figure 6.** Bloc de la turbine FAST.



**Figure 7.** Profil de la vitesse du vent.



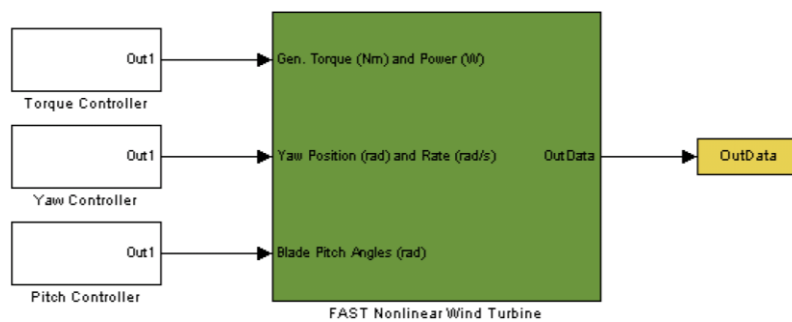
**Figure 8.** Illustration d'une éolienne 1.5 MW.

**Tableau 1.** L'éolienne 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	$4.4532 \times 10^5 \text{ kg m}^2$

**Tableau 2.** La génératrice asynchrone double alimentation

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

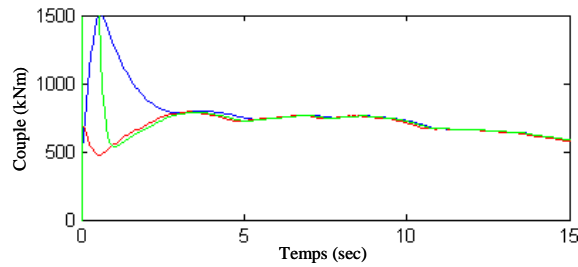


**Figure 9.** Modèle Simulink de la turbine.

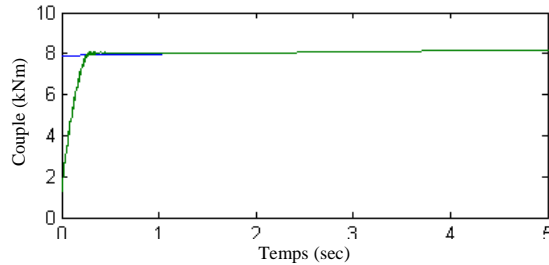
## 6.2. Résultats de simulation

Comme nous pouvons le constater sur la Fig. 10, nous arrivons à estimer le couple aérodynamique de manière précise ce qui nous permet de le commander.

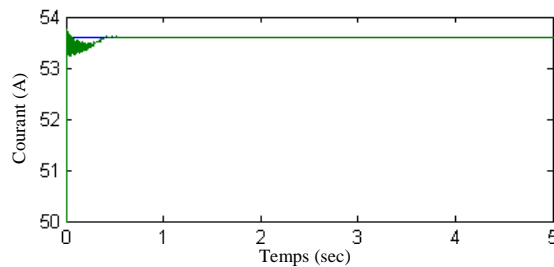
En ce qui concerne la commande de la GADA, les performances obtenues sont très satisfaisantes comme le montre la poursuite de trajectoire du couple électromagnétique désirée (Fig. 11) et la convergence très rapide vers le courant rotorique de référence (Fig. 12). De plus, la Fig. 11 montre bien que le 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.



**Figure 10.** Couples de l'éolienne :  $T_{opt}$  (bleu),  $T_a$  réel (rouge),  $T_a$  estimé (vert).



**Figure 11.** Couple de référence (haut/bleu) et réel (bas/vert).



**Figure 12.** Courant rotorique  $I_{rd}$  de référence (bleu) et réel (vert).



Afin de démontrer l'intérêt de la stratégie proposée, ses performances ont été comparées à celles d'autres techniques (Poitiers *et al.*, 2009 ; Cardenas *et al.*, 2004). De nombreuses commandes utilisent comme référence la puissance active (Poitiers *et al.*, 2009). Cela suppose vraisemblablement que la puissance active soit égale à la puissance électromagnétique.

$$P_s = P_{ref} \Rightarrow I_{rq\_ref} = -\frac{L_s}{V_s M} P_{ref} \quad [37]$$

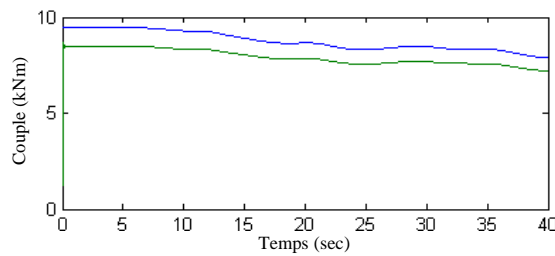
Cette approximation entraîne des problèmes de convergence vers le couple désiré (Fig. 13).

Une deuxième méthode consiste à utiliser l'équation suivante (Cardenas *et al.*, 2004) :

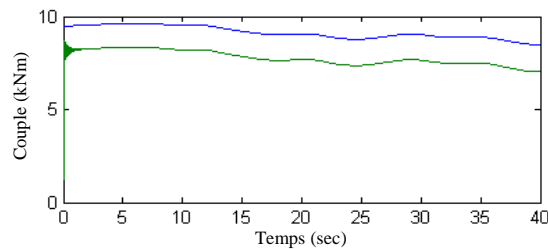
$$I_{rq\_ref} = -\frac{L_s}{pM\phi_s} T_{ref} \quad [38]$$

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.

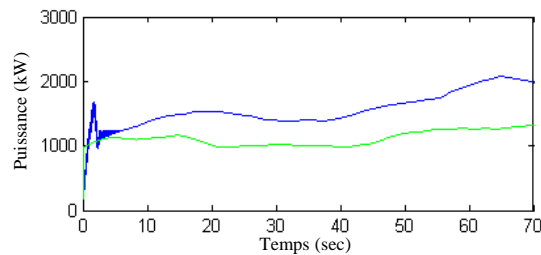


**Figure 13.** Couple de référence (haut/bleu) et réel (bas/vert) pour la commande [37].



**Figure 14.** Couple de référence (haut/bleu) et réel (bas/vert) pour la commande [38].

En terme d'extraction de puissance, la Fig. 15 illustre parfaitement la supériorité de l'approche proposée en comparaison à [38]. Ceci est principalement dû à la difficulté d'estimer exactement  $k_{opt}$  nécessaire au calcul du couple de référence  $T_{ref}$ . En effet, il n'y a pas de méthode ou technique d'estimation précise de  $k$  ; d'autant plus que l'aérodynamique des pales peut changer de façon significative au cours du temps. Ceci est à notre avis une justification supplémentaire de la technique de commande proposée (Beltran *et al.*, 2012).



**Figure 15.** Puissance générée : Modes glissants et grand gain (bleu) et approche [38] (vert).

Les simulations ont été effectuées avec les gains suivants:  $\theta = 30$ ,  $A_1 = 5 \times 10^3$ ,  $A_2 = 1 \times 10^5$ ,  $B_1 = 1.5$ ,  $B_2 = 50$ ,  $B_3 = 200$ ,  $B_3 = 1000$ ,  $k_{opt} = 1.6124 \times 10^5$ .

## 7. 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. D'où, le recours à une stratégie de commande non linéaire et robuste.

La stratégie élaborée et présentée dans cet article ; à savoir dans un premier temps de définir le couple de référence par un observateur à 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 et améliore le rendement énergétique. Avec le peu de broutement qu'elle engendre, elle limite le stress mécanique sur l'arbre de transmission.

## 8. Bibliographie

- Liserre M., Cardenas R., Molinas M. and Rodriguez J., "Overview of multi-MW wind turbines and wind parks," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 58, n°4, pp. 1081-1095, April 2011.
- Courtecuisse V., El Mokadem M., Robyns B., François B., "Supervision par logique floue d'un système éolien à vitesse variable en vue de contribuer au réglage primaire de fréquence," *Revue Internationale de Génie Electrique*, vol. 11, n°4-5, pp. 423-454, 2008.
- Beltran B., Ahmed-Ali T. and Benbouzid M.E.H., "High-order sliding mode control of variable speed wind turbines," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 56, n°9, pp. 3314-3321, September 2009.
- Song Y.D., Dhinakaran B., and Bao X.Y., "Variable speed control of wind turbines using nonlinear and adaptive algorithms," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 85, no. 3, pp. 293-308, April 2000.
- Belhadi J., Sellami A., Ben Mabrouk W., "Les observateurs à mode glissant pour le contrôle direct en couple d'une machine asynchrone. Intérêt et amélioration de la structure," *Revue Internationale de Génie Electrique*, vol. 9, n°2-3, pp. 209-234, 2006.
- Islam, S. and Liu, X.P., "Robust sliding mode control for robot manipulators," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 58, n°6, pp. 2444-2453, June 2011.
- Farza M., M'Saad M. and Rossignol L., "Observer design for a class of MIMO nonlinear systems," *Automatica*, vol. 40, n°1, pp. 135-143, September 2004.
- Khalil H.K., *Nonlinear Systems*. New York: MacMillan, 1992.
- Beltran B., Benbouzid M.E.H. and Ahmed-Ali T., "A combined high gain observer and high-order sliding mode controller for a DFIG-based wind turbine," in *Proceedings of the IEEE ENERGYCON'10*, Manama (Bahrain), pp. 322-327, December 2010.
- Levant A. and Alelishvili L., "Integral high-order sliding modes," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 52, n°7, pp. 1278-1282, July 2007.
- Tazil M., Kumar V., Bansal R.C., Kong S., Dong Z.Y., Freitas W. and Mathur H.D., "Three-phase doubly fed induction generators: an overview," *IET Power Applications*, vol. 4, n°2, pp. 75-89, February 2010.
- Benelghali S., Benbouzid M.E.H., Charpentier J.F., "Modélisation et commande d'une hydrolienne équipée d'une génératrice asynchrone double alimentation," *European Journal of Electrical Engineering*, vol. 13, n°2, pp. 161-178, 2010.
- De Battista H., Puleston P.F., Mantz R.J. and Christiansen C.F., "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.
- <http://wind.nrel.gov/designcodes/simulators/fast/>.
- Hand M.M., Johnson K.E., Fingersh L.J. and Wright A.D., "Advanced control design and field testing for wind turbines at the National Renewable Energy Laboratory," *NREL/CP-500-36118*, May 2004.

- Poitiers F., Bouaouiche T. and Machmoum M., "Advanced control of a doubly-fed induction generator for wind energy conversion," *Electric Power Systems Research*, vol. 79, n°7, pp. 1085-1096, July 2009.
- Cardenas R. and Pena R., "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.
- Beltran B., Benbouzid M.E.H. and Ahmed-Ali T., "Second-order sliding mode control of a doubly-fed induction generator driven wind turbine," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, DOI: 10.1109/TEC.2011.2181515, 2012.