

Commande en calage et en couple d'une éolienne à vitesse variable

Boubekeur Boukhezzar* Houria Siguerdidjane**

* *Laboratoire d'Automatique et Robotique de Constantine (LARC)
Département d'électronique, Université Mentouri de Constantine,
Campus Ahmed Hamani, Route de Ain El Bey,
Constantine 25017, Algérie.
b_boukhezzar@hotmail.com*

** *Département Automatique, Supélec,
Plateau du Moulon, 3, rue Joliot-Curie,
91192 Gif-sur-Yvette cedex, France.
houria.siguerdidjane@supelec.fr*

Résumé : Une commande multivariable en couple et en calage d'une éolienne à vitesse variable est proposée. La synthèse de la commande en couple est basée sur un modèle mathématique non linéaire simplifié à deux masses. Une commande non linéaire par poursuite asymptotique de la puissance est alors déduite. La commande en calage est synthétisée à partir du linéarisé tangent autour d'un point de fonctionnement. Une précompensation avec une action proportionnelle et intégrale sont alors utilisées pour le rejet de la composante turbulente du vent et du couple électromagnétique qui sont considérés comme des perturbations. La commande multivariable en couple et en calage est testée sur le modèle mathématique pour différents profils de vents réalistes. Les performances sont évaluées et comparées à des commandes monovariabiles.

Mots-clés: commande non linéaire, éolienne à vitesse variable, commande multivariable

1. INTRODUCTION

Les éoliennes à vitesse variable possèdent de nombreux avantages par rapport aux anciennes éoliennes à vitesse fixe. Leur rendement annuel peut atteindre 28 % de plus par rapport aux anciennes éoliennes en fonction du site éolien et des paramètres de conception de l'éolienne Mutschler et Hoffmann (2002). Cependant, le fonctionnement à vitesse variable nécessite un système de commande plus complexe.

Plusieurs techniques classiques et avancées ont été appliquées à la commande des systèmes éoliens Burton et al. (2011). L'objectif principal de la commande d'une éolienne à vitesse variable est de maximiser le rendement tout en améliorant la qualité de puissance et en minimisant les efforts transitoires subits par la structure de l'éolienne (arbres, pales, rotor).

Le travail présenté dans ce document concerne la commande à vents forts. Une stratégie de commande multivariable est proposée pour atteindre les objectifs mentionnés pour cette zone de fonctionnement. Plusieurs approches ont été proposées dans la littérature pour la commande de l'éolienne dans cette région. Une approche intéressante est la précompensation par anticipation de l'effet de la vitesse du vent Dunne et al. (2011); van der Hooft et van Engelen (2004). Bien que d'autres stratégies soient proposées pour cette zone de fonctionnement, l'originalité de l'approche proposée dans ce travail est de combiner une commande non linéaire et une commande linéaire sur un modèle à deux masses, mais aussi de faire une étude

analytique du modèle linéarisé à travers la matrice des fonctions de transferts afin de tirer des conclusions sur la façon de rajouter un terme de compensation approprié à la commande. Ce terme est déduit de façon analytique. De plus, la majorité des stratégies de commande proposées fixent le couple à sa valeur nominale et agissent uniquement sur le calage. L'approche proposée dans ce travail consiste à imposer une dynamique choisie à l'erreur de poursuite de la puissance électrique en utilisant un couple variable au lieu d'un couple fixe.

Ce document est organisé comme suit : La deuxième section présente brièvement le modèle mathématique à deux masses de l'éolienne. La section 3 rappelle les objectifs de la commande et donne le détail du calcul du correcteur : Tout d'abord, le calcul du point de fonctionnement et du linéarisé tangent sont détaillés. Le correcteur non linéaire pour la poursuite de puissance électrique et de la commande linéaire par compensation sont alors présentés. Par la suite, des résultats de simulation sont effectuées avec le système de commande proposé sur le modèle mathématique à deux masses d'une éolienne expérimentale. Des profils de vent réalistes sont utilisés et les résultats de simulations sont évalués. Le document se termine par une conclusion et une annexe.

2. MODÉLISATION DU SYSTÈME ÉOLIEN

Le modèle utilisé pour la commande décrit le comportement du rotor et du train de puissance.

2.1 Aérodynamique du rotor

La puissance aérodynamique capturée par le rotor est donnée par

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

où R est le rayon du rotor, ρ la densité de l'air. Le coefficient $C_p(\cdot)$ est le coefficient aérodynamique qui caractérise le rendement du rotor en termes de capture d'énergie du vent. C'est une fonction non linéaire des deux variables λ et β . La première $\lambda = \frac{\omega_t R}{v}$ est la vitesse spécifique et la seconde β l'angle de calage des pales du rotor.

Le couple aérodynamique agissant sur l'axe reliant le rotor éolien au dispositif d'entraînement est donné par

$$T_a(v, \omega_t, \beta) = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 C_q(\lambda, \beta) v^2 \quad (2)$$

Le coefficient $C_q(\lambda, \beta)$ est le coefficient aérodynamique de couple. Il est donné par la relation

$$C_q(\lambda, \beta) = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \quad (3)$$

2.2 Train de puissance

Afin de réaliser un bon compromis entre la précision et la simplicité du modèle de commande, on utilisera un modèle à deux masses reliées par un arbre flexible. La mise sous forme d'état du modèle mécanique de l'arbre est décrite par l'équation suivante Boukhezzer (2006)

$$\dot{\omega}_t = \frac{1}{J_r} T_a - \frac{K_r}{J_r} \omega_t - \frac{1}{J_r} T_{ls} \quad (4)$$

$$\dot{\omega}_g = \frac{1}{n_g J_g} T_{ls} - \frac{K_g}{J_g} \omega_g - \frac{1}{J_g} T_{em} \quad (5)$$

$$\dot{T}_{ls} = K_{ls}(\dot{\omega}_t - \frac{\dot{\omega}_g}{n_g}) + B_{ls}(\omega_t - \frac{\omega_g}{n_g}) \quad (6)$$

La commande de la génératrice couplée à l'aéroturbine a été considérée dans d'autres travaux Boukhezzer et Siguerdidjane (2009) et il a été montré que la synthèse de la commande de la génératrice peut être découplée de celle de l'aéroturbine.

3. SYNTHÈSE DE LA COMMANDE

La zone de fonctionnement d'une éolienne par rapport à la vitesse du vent est comprise dans l'intervalle $[v_{min}, v_{max}]$. Elle peut être partagée en trois régions Bianchi et al. (2007) (Figure 1)

Le calcul du point de fonctionnement et du linéarisé tangent sont d'abord présentés. Par la suite, la synthèse des deux correcteurs proposés est détaillée.

3.1 Calcul du point de fonctionnement

Le point de fonctionnement est calculé pour une vitesse de vent donnée v_{fct} et une puissance électrique de fonctionnement donnée $P_{e_{fct}}$. Pour assurer un passage doux du régime de fonctionnement en optimisation de rendement au régime de régulation de puissance, la vitesse nominale $\omega_{t_{nom}}$ doit correspondre à la plus petite vitesse pour laquelle on atteint la puissance aérodynamique nominale. Par ailleurs, on montre Boukhezzer (2006) que

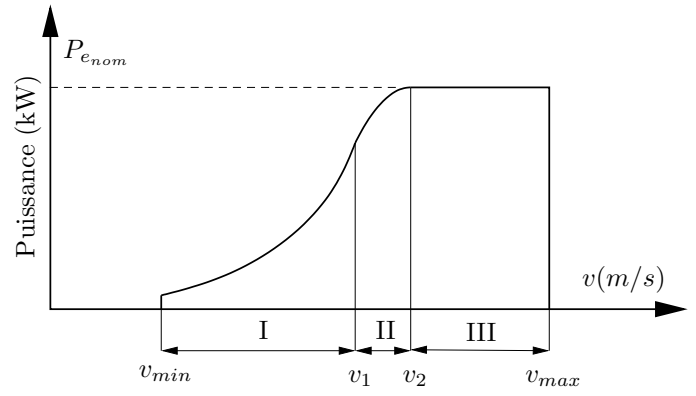


FIGURE 1. Courbe de puissance d'une éolienne à vitesse variable

pour un fonctionnement à rendement optimal, le couple aérodynamique est proportionnel à ω_t^2 via un coefficient K_{opt}

$$T_a = K_{opt} \omega_t^2 \quad (7)$$

soit pour la puissance aérodynamique nominale

$$P_{a_{nom}} = K_{opt} \omega_{t_{nom}}^3 \quad (8)$$

avec

$$K_{opt} = \frac{\rho}{2} \pi R^5 C_{p_{opt}} \frac{1}{\lambda_{opt}^3} \quad (9)$$

Le point $(\lambda_{opt}, C_{p_{opt}})$ correspond au maximum de la courbe $C_p(\lambda) = C_p(\lambda, \beta_{opt})$ où β_{opt} est l'angle de calage permettant d'atteindre le maximum du coefficient de puissance $C_{p_{opt}} = C_p(\lambda_{opt}, \beta_{opt})$.

Compte tenu des pertes de puissance par frottement visqueux, et en négligeant les frottements visqueux internes de l'arbre, on a la relation

$$P_{a_{nom}} = P_{e_{nom}} + K_r \omega_t^2 + K_g \omega_g^2 \quad (10)$$

en faisant l'approximation $\omega_g \simeq n_g \omega_t$ et en combinant les équations (8) et (10), le calcul de la vitesse nominale se ramène, pour une puissance électrique nominale $P_{e_{nom}}$ à la résolution d'une équation polynomiale du troisième degré.

Connaissant $\omega_{t_{nom}}$ et pour une vitesse de vent donnée v_{fct} , on déduit le point de fonctionnement en λ

$$\lambda_{fct} = \frac{\omega_{t_{nom}} R}{v_{fct}} \quad (11)$$

De même, β_{fct} est déduit en résolvant l'équation algébrique

$$T_{a_{fct}} = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v_{fct}^2 C_q(\lambda_{fct}, \beta) = \frac{P_{a_{nom}}}{\omega_{t_{nom}}} \quad (12)$$

par rapport à β . Pour déduire la valeur des autres variables au point de repos, l'équation d'état (4-6) est ramenée en régime établi à une équation algébrique linéaire en annulant toutes les dérivées. Ceci permet de déduire $\omega_{g_{fct}}$, $T_{em_{fct}}$ et $T_{ls_{fct}}$.

Ainsi, la procédure décrite ci-dessus permet de déduire un point de fonctionnement $(\omega_{t_{fct}}, \omega_{g_{fct}}, T_{ls_{fct}})$ pour des entrées de commande $(T_{em_{fct}}, \beta_{fct})$ et une vitesse de vent v_{fct} .

3.2 Structure de la commande

L'idée de cette structure est de décomposer la régulation de puissance et celle de la vitesse du rotor en synthétisant deux correcteurs :

- (1) Un correcteur non linéaire pour réaliser la régulation et la poursuite de la puissance électrique.
- (2) Un correcteur linéaire pour réaliser la régulation de la vitesse du rotor.

Le schéma de la structure de la commande est donné sur la figure 2.

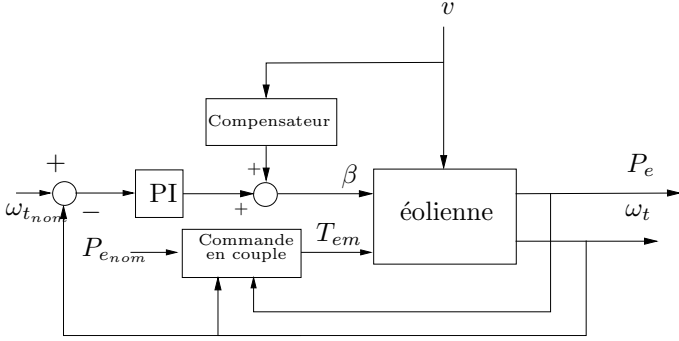


FIGURE 2. Structure de la commande multivariable en couple et en calage

La structure de commande proposée est une structure multivariable qui utilise les deux entrées de commande : Le couple de la génératrice T_{em} et l'angle de calage des pales β pour atteindre les objectifs de la zone de fonctionnement à régulation de puissance, à savoir :

- (1) La régulation de la puissance électrique autour d'une valeur désirée.
- (2) La régulation de la vitesse de l'aéroturbine autour de sa valeur nominale $\omega_{t_{nom}}$.
- (3) La minimisation des efforts de torsion en régime transitoire sur l'arbre du rotor.
- (4) La minimisation des variations de l'angle de calage pour réduire les efforts transitoires sur les pales.

3.3 Commande de la puissance électrique

Ce correcteur calcule le couple électromagnétique de la génératrice T_{em} . Son principe est de réaliser une poursuite asymptotique de la puissance électrique en imposant une dynamique choisie stable à l'erreur de poursuite e_p

$$e_p = P_e^* - P_e \quad (13)$$

La puissance fournie à la génératrice est

$$P_e = \omega_g \cdot T_{em} \quad (14)$$

En imposant une dynamique du premier ordre à e_p ,

$$\dot{e}_p + c_0 e_p = 0, \quad c_0 > 0. \quad (15)$$

il vient en remplaçant dans (13) et en dérivant par rapport au temps

$$\dot{P}_e^* - \dot{\omega}_g T_{em} - \omega_g \dot{T}_{em} + c_0 e_p = 0. \quad (16)$$

Comme le profil de puissance de référence est constant, alors $\dot{P}_e^* = 0$. Ceci permet de déduire l'expression suivante de \dot{T}_{em}

$$\dot{T}_{em} = \frac{1}{\omega_g} \cdot [-\dot{\omega}_g T_{em} + c_0 e_p] \quad (17)$$

à partir de l'équation d'état (5), on tire l'expression de ω_g qu'on remplace dans (17) pour aboutir à l'expression suivante

$$\dot{T}_{em} = \frac{1}{\omega_g} \cdot \left[-\frac{1}{n_g J_g} T_{ls} T_{em} + \left(\frac{K_g}{J_g} - c_0 \right) \omega_g T_{em} + \frac{1}{J_g} T_{em}^2 + c_0 P_{e_{nom}} \right]. \quad (18)$$

La dynamique du premier ordre imposée à la puissance est assez lente car les consignes en puissances varient dans un ordre de grandeur assez long également (de l'ordre des minutes). Le manque de rapidité est compensé par l'entrée de commande supplémentaire en calage.

3.4 Commande de la vitesse du rotor

Le calcul de la commande en calage est fait à partir du linéarisé tangent du modèle à deux masses. Le modèle non linéaire du dispositif d'entraînement est linéarisé autour du point de fonctionnement décrit à la section 3.1. Ceci est effectué en linéarisant l'expression du couple aérodynamique $T_a(v, \omega_t, \beta)$ pour ce même point de fonctionnement. Un développement au premier ordre de T_a donne l'expression suivante

$$T_a = T_{a_{fct}} + \alpha_v \Delta v + \alpha_{\omega_t} \Delta \omega_t + \alpha_\beta \Delta \beta \quad (19)$$

les coefficients $\alpha_v, \alpha_{\omega_t}$ et α_β sont calculés analytiquement Boukhezzar (2006).

En substituant l'expression linéarisé de T_a dans le modèle non linéaire de la section (2.2) on aboutit au modèle linéarisé suivant

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A_{lin} x + B_{lin} u \\ y &= C_{lin} x \end{aligned} \quad (20)$$

avec

$$x = [\Delta \omega_t \quad \Delta \omega_g \quad \Delta T_{ls}]^T \quad (21)$$

$$u = [\Delta T_{em} \quad \Delta \beta \quad \Delta v]^T \quad (22)$$

$$y = \Delta \omega_t \quad (23)$$

$$A_{lin} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & a_{13} \\ 0 & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (24)$$

avec

$$a_{11} = \frac{\alpha_{\omega_t} - K_r}{J_r} \quad ; \quad a_{13} = -\frac{1}{J_r}$$

$$a_{22} = -\frac{K_g}{J_g} \quad ; \quad a_{23} = \frac{1}{n_g J_g}$$

$$a_{31} = \left(B_{ls} - \frac{K_{ls} K_r}{J_r} \right) + \frac{\alpha_{\omega_t} K_{ls}}{J_r}$$

$$a_{32} = \frac{1}{n_g} \left(\frac{K_{ls} K_g}{J_g} - B_{ls} \right)$$

$$a_{33} = -K_{ls} \left(\frac{J_r + n_g^2 J_g}{n_g^2 J_g J_r} \right)$$

$$B_{lin} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\alpha_\beta}{J_r} & \frac{\alpha_v}{J_r} \\ -\frac{1}{J_g} & 0 & 0 \\ \frac{K_{ls}}{n_g J_g} & \frac{\alpha_\beta K_{ls}}{J_r} & \frac{\alpha_v K_{ls}}{J_r} \end{bmatrix} \quad (25)$$

et

$$C_{lin} = [1 \ 0 \ 0] \quad (26)$$

On peut alors déduire la matrice de transfert $G(s)$

$$\begin{aligned} G(s) &= C_{lin}(sI - A_{lin})^{-1}B_{lin} \\ &= [G_{T_{em} \rightarrow \omega_t}(s) \quad G_{\beta \rightarrow \omega_t}(s) \quad G_{v \rightarrow \omega_t}(s)] \end{aligned} \quad (27)$$

Le schéma de commande du système linéarisé est donné sur la figure 3.

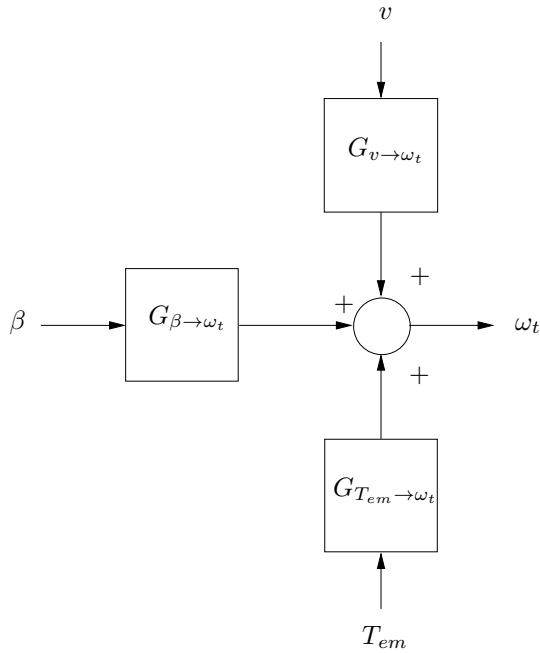


FIGURE 3. Schéma bloc du linéarisé tangent du modèle de l'éolienne

Afin d'effectuer une régulation de l'écart vitesse $\Delta\omega_t$ les deux autres entrées Δv et ΔT_{em} sont vues comme des perturbations agissant à travers les fonctions de transfert $G_{v \rightarrow \omega_t}(s)$ et $G_{T_{em} \rightarrow \omega_t}(s)$. Ces deux perturbations peuvent être rejetées en inversant les modèles à travers lequel elles agissent si cela est physiquement réalisable.

Afin de compenser par anticipation l'effet de la vitesse du vent, on soustrait cet effet sur la commande. De plus, comme le terme en ΔT_{em} agit avec une dynamique suffisamment lente, il peut être considéré comme constant et son effet rejeté par une action intégrale. Le correcteur utilisé est alors un PI plus une action par anticipation

$$\Delta\beta = -\left(k_p + \frac{1}{T_i s}\right) \Delta\omega_t - \frac{G_{v \rightarrow \omega_t}}{G_{\beta \rightarrow \omega_t}} \Delta v \quad (28)$$

Le calcul montre que le rapport $\frac{G_{v \rightarrow \omega_t}}{G_{\beta \rightarrow \omega_t}}$ est égale à une constante

$$\frac{G_{v \rightarrow \omega_t}}{G_{\beta \rightarrow \omega_t}} = \frac{\alpha_\beta}{\alpha_v} \quad (29)$$

Le correcteur PI est alors conçu par les méthodes classiques Ogata (2009). Aux écarts Δv , $\Delta\omega_t$ et à la commande $\Delta\beta$ sont rajoutées les valeurs du point de fonctionnement pour obtenir la valeur de la commande β .

4. RÉSULTATS DE SIMULATIONS

La commande multivariable développée dans ce travail est testée sur le modèle mathématique à deux masses de l'éolienne avec des profils de vitesse de vent au dessus de la vitesse nominale. Les paramètres utilisés sont ceux de l'éolienne expérimentale CART, située dans le Colorado (États-Unis) dans le laboratoire NREL (National Renewable Energy Laboratory). C'est une éolienne bipale de puissance moyenne 600 kW. Elle est équipée d'une génératrice asynchrone commandée par un dispositif d'électronique de puissance qui assure une commande découplée du flux et du couple électromagnétique avec des constantes de temps relativement courtes par rapport aux constantes de temps de l'aéroturbine. Son dispositif de calage est équipé d'actionneurs électriques ce qui permet d'avoir un temps de réponse suffisamment court par rapport aux autres dynamiques pour considérer que la valeur de T_{em} quasiment identique à sa consigne et considérer directement l'angle de calage β comme entrée de commande. Les valeurs nominales de cette éolienne ainsi que les caractéristiques principales sont données en annexe A. Les profils de vent utilisés sont générés par le logiciel TurbSim développé par NREL Jonkman (2009).

Pour des vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale, l'éolienne fonctionne dans la zone de régulation de puissance. L'objectif est de maintenir la puissance électrique P_e à une valeur constante qui est généralement la puissance nominale. De même, pour la vitesse du rotor ω_t de l'éolienne et la vitesse de la génératrice électrique ω_g qui doivent aussi être gardées autour de leurs valeurs nominales.

A partir de la commande développée dans ce travail, trois configurations de commande ont été testées :

- (1) Une commande monovariante linéaire en calage.
- (2) Une commande monovariante non linéaire en couple.
- (3) Une commande multivariable en couple et en calage.

Les trois configurations sont validées avec un profil de vent réaliste d'une vitesse moyenne de 19 m/s.

4.1 Commande non linéaire en couple

Bien qu'on peut prévoir des performances plus faibles pour les commandes monovariantes, elles sont présentées à titre illustratif pour être comparées à la commande multivariable. Pour cette configuration, la loi de commande non linéaire en couple (18) est utilisée alors que l'angle de calage β est fixé à $\beta_{fct} = 14^\circ$. Cette valeur est calculée en utilisant la méthode présentée dans la section 3.1. L'action en couple T_{em} est filtrée par un filtre linéaire du premier ordre de fréquence de coupure 0.1 Hz afin d'éliminer les fréquences hautes qui peuvent engendrer des oscillations dans l'arbre du rotor provoquant ainsi des efforts transitoires importants. La réponse de l'éolienne au profil de vent est donnée sur les figures 4 et 5.

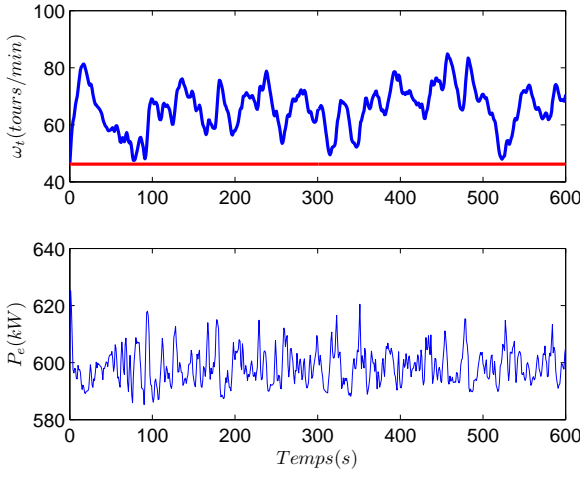


FIGURE 4. Vitesse du rotor et puissance électrique avec la commande en couple

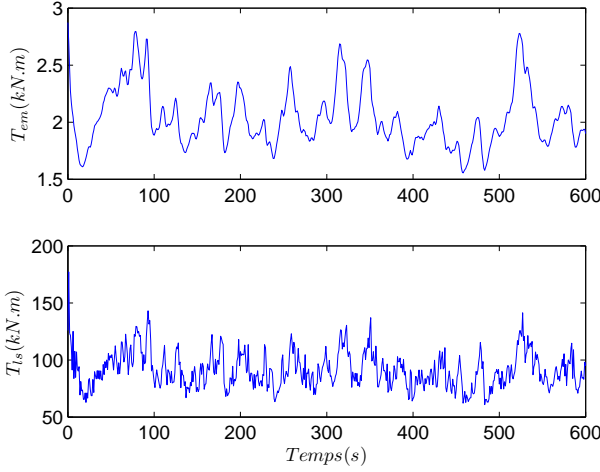


FIGURE 5. Couple électromagnétique et couple de l'arbre du rotor avec la commande en couple

La puissance électrique reste plus ou moins au voisinage de la puissance nominale $P_{e_{nom}} = 600 \text{ kW}$ alors que la vitesse du rotor ω_t connaît de larges excursions de sa valeur nominale pour dépasser les 80 tours/min. L'action du couple est assez ondulée et son amplitude varie entre 1.6 kN.m et 2.9 kN.m. De même, les efforts subits par l'arbre lent représentés par le couple T_{ls} présentent une amplitude assez importante d'environ 18 kN.m et une forme assez turbulente. La forme des efforts de commande en couple et le couple de l'arbre lent peut être interprétée par le fait que la commande en couple agit seule sans l'aide de l'angle de calage. En effet, l'angle de calage agit directement sur le couple aérodynamique $T_a(\lambda, \beta)$ réduisant, si sa commande est convenablement choisie, à la base les efforts subit par l'arbre du rotor.

4.2 Commande en calage

De même que pour la commande en couple, c'est le couple du générateur qui est fixé à sa valeur nominale $T_{em_{ct}} = 2.87 \text{ kN.m}$ alors que la commande en calage est

calculée par la structure composée du précompensateur et du correcteur PI. La réponse de l'éolienne commandée en calage est donnée sur les figures 6 et 7. Dans ce cas,

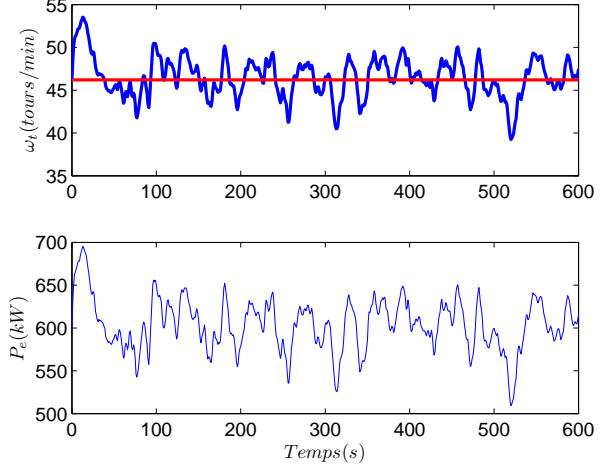


FIGURE 6. Vitesse du rotor et puissance électrique avec la commande en calage

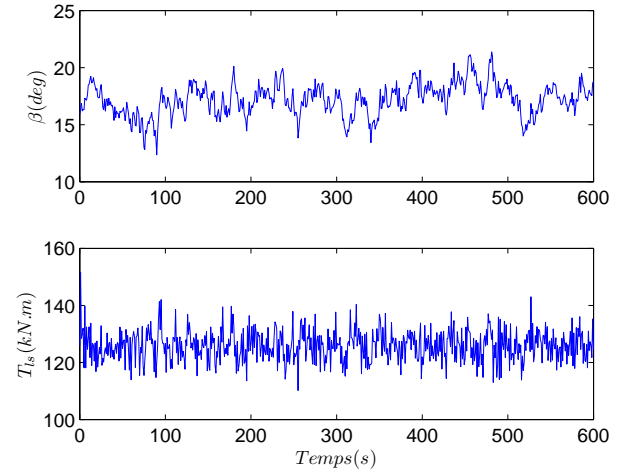


FIGURE 7. Angle de calage et couple de l'arbre du rotor avec la commande en calage

c'est la vitesse du rotor qui est mieux régulée autour de sa valeur nominale (Figure 6) alors que la puissance électrique atteint environ 700 kW. Cette commande a donc réussi plus ou moins à réguler la vitesse sans pouvoir garder la puissance produite autour de sa valeur nominale. L'effort de calage présente une forme acceptable alors que l'arbre lent subit un couple assez turbulent bien que le couple électromagnétique soit gardé constant. Ceci s'explique par la variation du couple aérodynamique T_a qui n'est pas compensée par une action du couple électromagnétique.

4.3 Commande multivariable en couple et en calage

Les résultats de simulation avec la commande multivariable montrent que cette dernière permet de joindre les avantages des deux techniques présentés précédemment.

La figure 9 montre qu'aussi bien la vitesse du rotor que la puissance électrique sont gardées assez proches de leurs valeurs nominales. Cette commande permet de mieux réguler la vitesse du rotor que la commande en calage seule et de mieux réguler la puissance que la commande en couple seule. De plus, les efforts de commande en calage et en couple ainsi que le couple subi par l'arbre du rotor sont moins turbulents que dans le cas des commandes monovariante. Le commande multivariable a permis d'atteindre un bon compromis par rapport aux objectifs fixés pour la commande dans cette zone de fonctionnement.

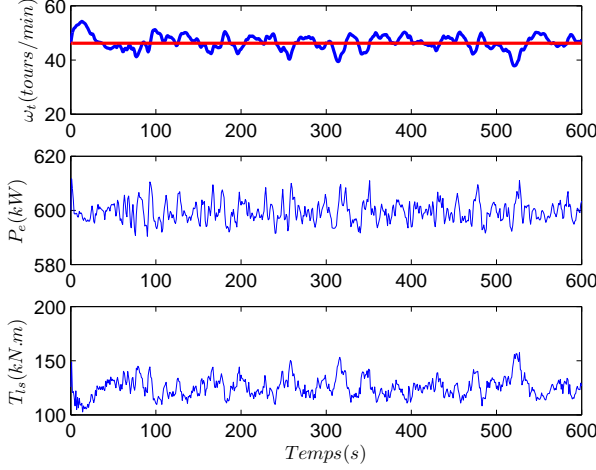


FIGURE 8. Vitesse du rotor, puissance et couple de l'arbre du rotor avec la commande multivariable

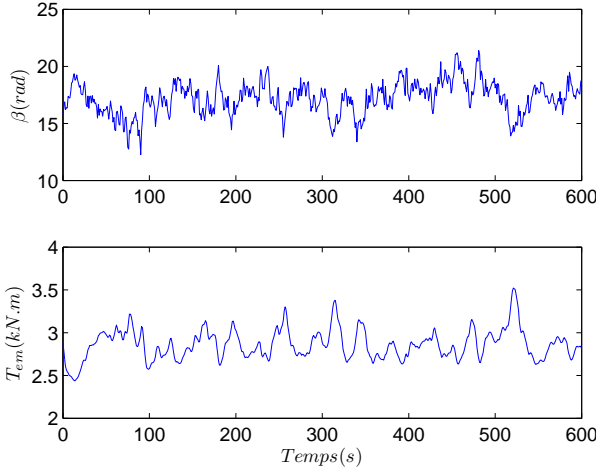


FIGURE 9. Couple électromagnétique et angle de calage avec la commande multivariable

5. CONCLUSION

Des commandes monovariante en couple et en calage ont été proposées pour la régulation de puissance et de la vitesse du rotor d'une éolienne à vitesse variable. La commande en couple est synthétisée à partir du modèle non linéaire à deux masses alors que la commande en calage est déduite de l'analyse du modèle linéarisé tangent.

Chacune de ces deux commandes permet d'atteindre partiellement les objectifs de la commande dans cette région de fonctionnement à vents forts. La combinaison des deux commandes a permis de garder les avantages de chacune et de créer une synergie qui a donnée de meilleures performances que dans le cas où chacune agissait seule. En perspective, il serait intéressant d'améliorer la robustesse de cette commande en tenant compte des variations paramétriques et de la nature non linéaire du modèle pour la synthèse de la commande en calage. Il est également envisagé de tester ces lois de commande avec un simulateur aéroélastique qui tienne compte de plus de modes souple de l'aéroturbine.

Annexe A. PARAMÈTRES DE L'ÉOLIENNE CART

TABLE A.1. Valeurs numériques des paramètres de l'éolienne CART

Paramètre	Valeur
Rayon du rotor	$R = 21.65 \text{ m}$
Densité de l'air	$\rho = 1.29 \text{ kg/m}^3$
Inertie du rotor	$J_r = 3.25 \cdot 10^5 \text{ kg.m}^2$
Inertie du générateur	$J_g = 34.4 \text{ kg.m}^2$
Coefficient de frottements de l'arbre	$K_{ls} = 9500 \text{ N.m/rad/s}$
Coefficient de torsion de l'arbre	$B_{ls} = 2.691 \cdot 10^5 \text{ N.m/rad}$
Coefficient de frottements du rotor	$K_r = 27.36 \text{ N.m/rad/s}$
Coefficient de frottements du générateur	$K_g = 0.2 \text{ N.m/rad/s}$
Rapport du multiplicateur	$n_g = 43.165$

RÉFÉRENCES

- Bianchi, F.D., Battista, H.D., et Mantz, R.J. (2007). *Wind Turbine Control Systems : Principles, Modelling and Gain Scheduling Design*. Springer.
- Boukhezzar, B. (2006). *Sur les Stratégies de Commande pour l'Optimisation et la Régulation de Puissance des Eoliennes à Vitesse Variable*. Thèse de doctorat, Université de Paris-Sud-Ecole Supérieure d'Electricité.
- Boukhezzar, B. et Siguerdidjane, H. (2009). Nonlinear control with wind estimation of a DFIG variable speed wind turbine for power capture optimization. *Energy Conversion and Management*, 50(4), 885 – 892.
- Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., et Bossanyi, E. (2011). *Wind Energy Handbook*. John Wiley & Sons.
- Dunne, F., Pao, L.Y., Wright, A.D., Jonkman, B., et Kelley, N. (2011). Adding feedforward blade pitch control to standard feedback controllers for load mitigation in wind turbines. *Mechatronics*, 21(4), 682 – 690.
- Jonkman, B. (2009). *TurbSim User's Guide : Version 1.50*. NREL.
- Mutschler, P. et Hoffmann, R. (2002). Comparison of wind turbines regarding their energy generation. *IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*.
- Ogata, K. (2009). *Modern Control Engineering*. Prentice Hall.
- van der Hooft, E.L. et van Engelen, T.G. (2004). Estimated wind speed feed forward control for wind turbine operation optimisation. *EWEC 2004*.