

Pilotage d'une éolienne double

Ibrahim GUENOUNE, Franck PLESTAN, Alain GLUMINEAU

Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes
LUNAM Université, Ecole Centrale de Nantes

GDR-EMR, 9 mars 2016.

1 Introduction

- 1 Introduction
- 2 Modélisation de l'éolienne double
 - Modélisation de la partie mécanique
 - Modélisation de la partie électrique

- 1 Introduction
- 2 Modélisation de l'éolienne double
 - Modélisation de la partie mécanique
 - Modélisation de la partie électrique
- 3 Objectifs de la commande

- 1 Introduction
- 2 Modélisation de l'éolienne double
 - Modélisation de la partie mécanique
 - Modélisation de la partie électrique
- 3 Objectifs de la commande
- 4 Commande de l'éolienne double

- 1 Introduction
- 2 Modélisation de l'éolienne double
 - Modélisation de la partie mécanique
 - Modélisation de la partie électrique
- 3 Objectifs de la commande
- 4 Commande de l'éolienne double
- 5 Résultats de simulation

- 1 Introduction
- 2 Modélisation de l'éolienne double
 - Modélisation de la partie mécanique
 - Modélisation de la partie électrique
- 3 Objectifs de la commande
- 4 Commande de l'éolienne double
- 5 Résultats de simulation
- 6 Conclusions et perspectives

Nouvelle structure d'une éolienne double

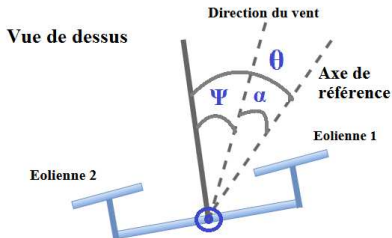


Figure 1: Structure d'une éolienne double [SEREO, Nantes, France]

La dynamique mécanique est décrite par [Munteanu 2008]

$$P_{ai} = \frac{1}{2} C_p(\lambda_i, \beta_i) \rho \pi R^2 (V \cos \theta)^3 \quad (1)$$

$$\Gamma_{ai} = \frac{1}{2} C_t(\lambda_i, \beta_i) \rho \pi R^3 (V \cos \theta)^2 \quad (2)$$

$$F_{di} = \frac{1}{2} C_d(\lambda_i, \beta_i) \rho \pi R^2 (V \cos \theta)^2 \quad (3)$$

$$\lambda_i = \frac{\Omega_i R}{V \cos \theta} \quad (4)$$

avec R rayon de la pale, λ rapport entre la vitesse de rotation et la vitesse du vent, β angle de calage, V vitesse du vent, θ angle entre l'axe de rotation vertical de l'éolienne double et l'axe fixe. C_p , C_t , C_d respectivement coefficients de puissance, de couple et de traînée.

Les coefficients aérodynamiques sont exprimés par

$$C_p(\lambda_i, \beta_i) = c_1 (c_2 a - c_3 \beta_i - c_4) e^{-c_5 a} + c_6 \lambda_i \quad (5)$$

$$C_t = \frac{C_p(\lambda_i, \beta_i)}{\lambda_i} \quad (6)$$

$$C_d(\lambda, \beta) = a_0 + a_1 \lambda + a_2 \lambda^2 + a_3 \lambda^3 + b_0 \beta + b_1 \beta \lambda + b_2 \beta \lambda^2 + b_3 \beta \lambda^3 \quad (7)$$

Le coefficient de puissance et de couple sont représentés par

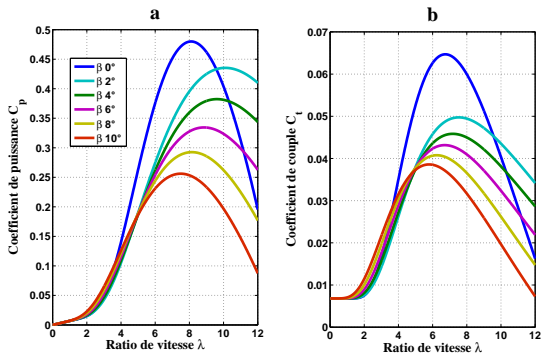


Figure 2: Coefficients aérodynamiques: a- coefficient de puissance, b- coefficient de couple

Le coefficient de traînée est approché par un polynôme comme représenté ci-dessous :

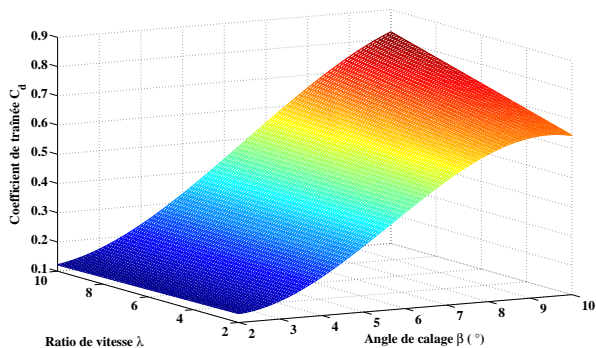


Figure 3: Approximation du coefficient de traînée

Dynamique de l'angle β :

$$\begin{cases} \dot{\beta}_1 = \frac{1}{T_\beta} (\beta_1^* - \beta_1) \\ \dot{\beta}_2 = \frac{1}{T_\beta} (\beta_2^* - \beta_2) \end{cases} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \beta_1^* = \beta_{opt}(\lambda) + \Delta\beta, \\ \beta_2^* = \beta_{opt}(\lambda) - \Delta\beta \end{cases}$$

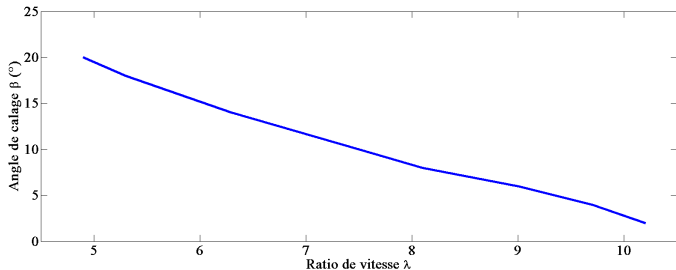


Figure 4: Angle de calage en fonction du ratio de vitesse

Mouvement de rotation de l'ensemble

$$K_r \ddot{\psi} = -D_r \dot{\psi} + (F_{d1} - F_{d2}) L, \quad (8)$$

avec K_r , D_r respectivement l'inertie et le frottement, L la distance entre l'axe de rotation vertical et l'axe des pales.

Le développement de $F_{d1} - F_{d2}$ fait apparaître la commande $\Delta\beta$

$$\begin{aligned} F_{d1} - F_{d2} &= \frac{1}{2} \rho \pi R^2 (V \cos\theta)^2 [C_{d1}(\lambda, \beta_1) - C_{d1}(\lambda, \beta_2)] \\ &= \frac{1}{2} \rho \pi R^2 (V \cos\theta)^2 A \Delta\beta, \end{aligned} \quad (9)$$

avec : $A = \frac{1}{T_\beta s + 1} (0.000236 \lambda^3 - 0.003 \lambda^2 + 0.0126 \lambda - 0.017216)$.

Génératrice synchrone à aimant [A. GLUMINEAU 2015]

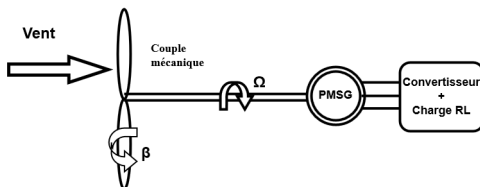


Figure 5: Schéma de couplage Turbine-Génératrice d'une simple éolienne

$$\begin{aligned}
 \dot{i}_{di} &= \frac{-R_s}{L_d} i_{di} + \frac{pL_q}{L_d} \Omega i_{qi} + \frac{1}{L_d} V_{di} \\
 \dot{i}_{qi} &= \frac{-R_s}{L_q} i_{qi} - \frac{pL_d}{L_q} \Omega i_{di} - \frac{p\phi_f}{L_q} \Omega_i + \frac{1}{L_q} V_{qi} \\
 \dot{\Omega}_i &= \frac{1}{J} (\Gamma_{ai} - p(L_d - L_q) i_{di} i_{qi} + p\phi_f i_{qi} - f_v \Omega_i).
 \end{aligned} \tag{10}$$

avec i_{di} , i_{qi} , V_{di} , V_{qi} respectivement les courants et tensions des deux machines, Ω vitesse de rotation, R_s résistance statorique, L_d , L_q inductances statoriques, p nombre de paires de pôles, ϕ_f flux magnétique au rotor, f_v frottement visqueux.

Objectifs de la commande

1- Maximisation de la puissance : la structure est face au vent

- Application de l'algorithme **MPPT**, $C_p \rightarrow C_{pmax}$
- Asservissement de vitesse des deux éoliennes,

$$\Omega_i \rightarrow \Omega_i^* = \frac{\lambda_{opt} V \cos \theta}{R} \quad (11)$$

2- Contrôle de l'orientation de l'éolienne double

- Aligner l'axe de l'éolienne double avec la direction du vent

$$\psi \rightarrow \psi^* = 0 \implies \theta = \alpha$$

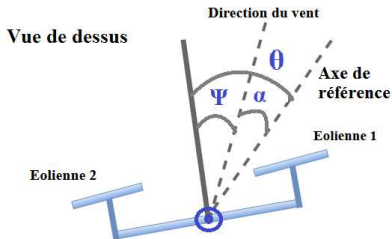


Figure 6: Rotation de l'éolienne double (vue de dessus)

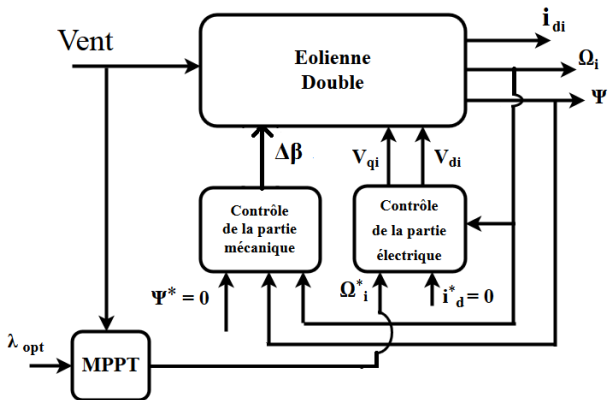


Figure 7: Schéma de commande proposé d'une éolienne double

Calcul d'une loi de commande de type Mode Glissant

Soit $y = [\psi \quad \Omega_1 \quad i_{d1} \quad \Omega_2 \quad i_{d2}]^T$, le vecteur de sortie. Afin d'assurer la convergence en temps finis du vecteur y vers une référence y^* , une variable de commutation S (**Surface de Glissement**) est choisit sous la forme suivante

$$S_k(t, x) = \sum_{i=0}^{r-1} \alpha_i \left(y^*(t) - y(x) \right)^{(i)}, \text{ (problème de poursuite de trajectoire)}$$

avec k est le nombre de sortie à contrôler (objectifs), r représente le degré relatif, et α_i des constantes positives.

$$S_k = \left[S_{\psi}^{(2)} \quad S_{\Omega_1}^{(2)} \quad S_{d1}^{(1)} \quad S_{\Omega_2}^{(2)} \quad S_{d2}^{(1)} \right]^T$$

La dérivée de S peut s'écrire sous la forme suivante: $\dot{S} = S_1 + S_2 u$,

$$S_1 = \begin{bmatrix} \ddot{\psi}^* + \alpha_1 \dot{\psi}^* + \left(\frac{D_r}{K_r} - \lambda_{\psi} \right) \dot{\psi} \\ \ddot{\Omega}_1^* + \alpha_2 \dot{\Omega}_1^* + f_1 \dot{\Omega}_1 - \frac{1}{J} \dot{\Gamma}_{m1} - f_2 [\alpha_1 i_{d1} + \phi_f] [R_s i_{q1} + f_3 \Omega_1 i_{d1} + f_4 \Omega_1] \\ \frac{R_s}{L_d} i_{d1} - \frac{P L_q}{L_d} \Omega_1 i_{q1} \\ \ddot{\Omega}_2^* + \alpha_3 \dot{\Omega}_2^* + f_1 \dot{\Omega}_2 - \frac{1}{J} \dot{\Gamma}_{m2} - f_2 [\alpha_1 i_{d2} + \phi_f] [R_s i_{q2} + f_3 \Omega_2 i_{d2} + f_4 \Omega_2] \\ \frac{R_s}{L_d} i_{d2} - \frac{P L_q}{L_d} \Omega_2 i_{q2} \end{bmatrix},$$

Calcul de la loi de commande de type Mode Glissant

$$S_2 = \begin{bmatrix} A f_5 (V_0 \cos\theta)^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_2 [f_6 i_{d1} + \phi_f] & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & f_2 [f_6 i_{d2} + \phi_f] & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{L_d} \end{bmatrix},$$

avec : $f_1 = \frac{f_y}{J} - \alpha_2$, $f_2 = \frac{P}{JL_q}$, $f_3 = P L_d$, $f_4 = P \phi_f$, $f_5 = \frac{1}{2K_r} \rho \pi R^2 L$, $f_6 = L_d - L_q$.

$$u = [\Delta\beta \quad V_{q1} \quad V_{d1} \quad V_{q2} \quad V_{d2}]^T.$$

S_2 est réversible, donc la loi de commande u se calcule par :

$$u = S_2^{-1}(-S_1 + \vartheta) \quad (12)$$

$$\vartheta = \begin{bmatrix} -K_\psi \text{Sign}(S_\psi) \\ -K_{\Omega 1} \text{Sign}(S_{\Omega 1}) \\ -K_{d1} \text{Sign}(S_{d1}) \\ -K_{\Omega 2} \text{Sign}(S_{\Omega 2}) \\ -K_{d2} \text{Sign}(S_{d2}) \end{bmatrix},$$

les gains du vecteur ϑ sont de signe positif (\implies stabilité en boucle fermée).

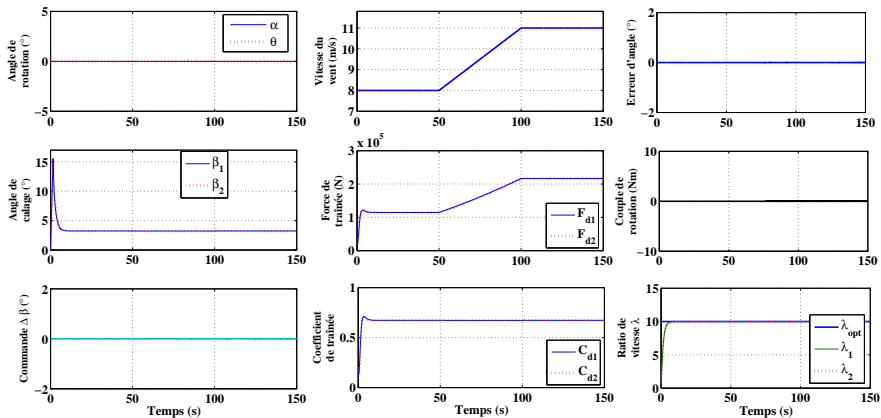
A- Simulation avec Vent constant par morceau, $\alpha = 0^\circ$ 

Figure 8: Angle de calage, forces et coefficients de traînée

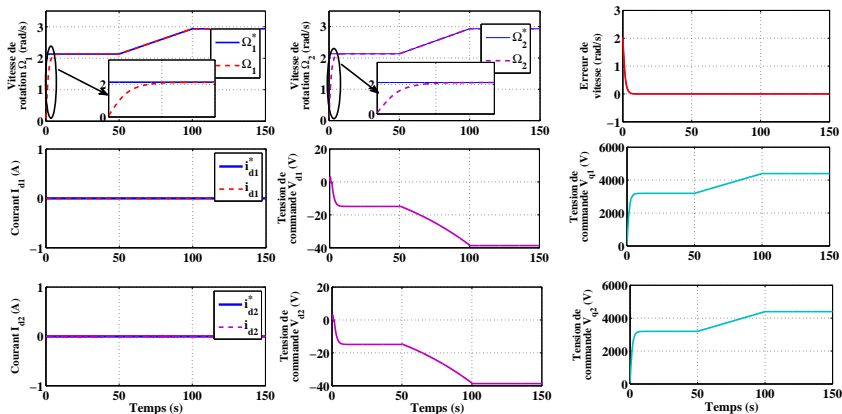


Figure 9: Vitesses, courant et tensions des deux machines

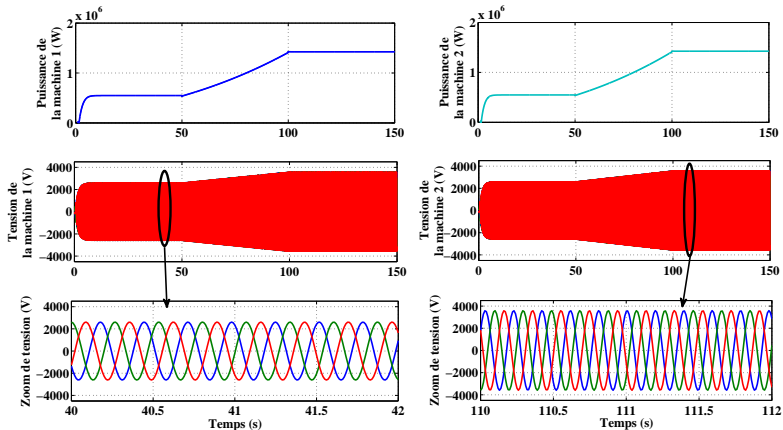


Figure 10: Puissances et tensions triphasées des deux générateurs

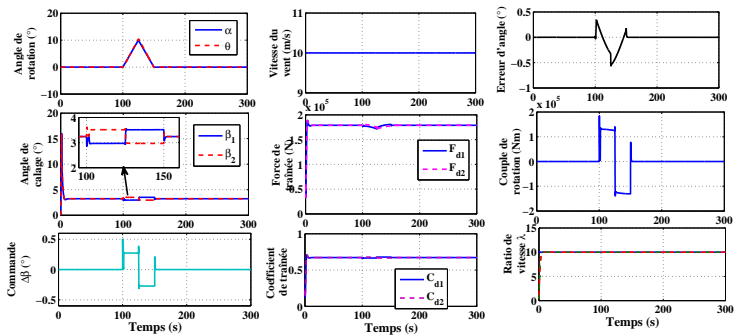
B- Simulation avec Vent constant 10m/s, $\alpha = 0 \rightarrow 10^\circ \rightarrow 0^\circ$


Figure 11: Angles de pitch, couple de rotation, forces et coefficients de traînée

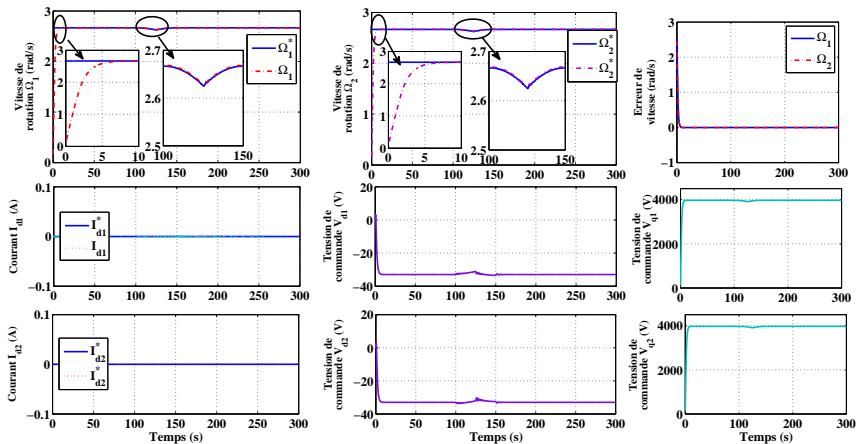


Figure 12: Vitesses, courants et tensions des deux alternateurs

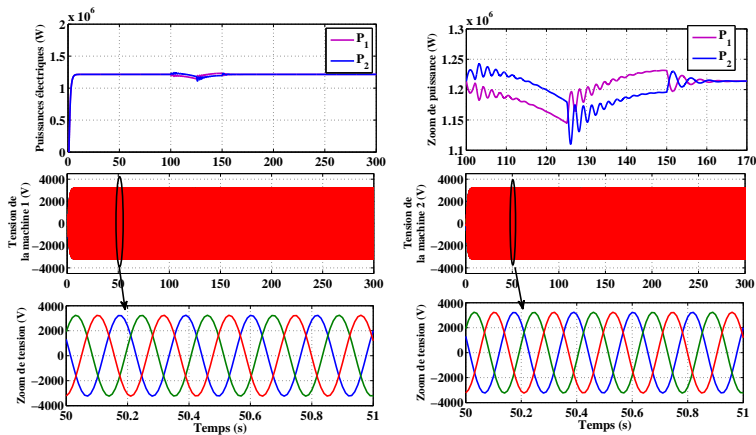


Figure 13: Puissance et tension des deux génératrices

A- Conclusions

- Modélisation des parties mécanique et électrique d'une nouvelle structure d'éolienne et application de l'algorithme **MPPT**
- Commande non linéaire (mode glissant)
 - Commande de l'angle de rotation de l'éolienne par différentiel de pitch
 - Commande des deux génératrices électriques

B- Perspectives

- Contrôle de la rotation de la structure par la différence de puissance produite par les générateurs
- Nouveau modèle d'une éolienne double flottante [SEREO, France]

