

# Comportement Electrique et Mécanique d'un Système Eolien à base de Machine Asynchrone à Double Alimentation Connecté au Réseau Electrique

S. BELLARBI<sup>1</sup>, N.KASBADJI.MERZOUK<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>Centre de Développement des Energies Renouvelable

Route de l'observatoire, BP 62 Bouzareah, Alger

<sup>2</sup>Unité de Développement des Equipements Solaires, UDES, Bou-Ismaïl.

Email : [s.bellarbi@cder.dz](mailto:s.bellarbi@cder.dz) [nkmerzouk@cder.dz](mailto:nkmerzouk@cder.dz)

**Résumé** : cet article présente une étude de système de conversion éolien à base de la MADA simulé a l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK. Le système est composé d'une turbine éolienne horizontale couplée à une machine asynchrone à double alimentation (MADA) connectée au réseau électrique par l'intermédiaire d'une chaîne de conversion (AC/DC) puis (DC/AC) pour contrôler les paramètres électriques et mécanique fournie par chaque élément de ce système. Dans un premier temps, une modélisation de la vitesse du vent, de la turbine éolienne et du multiplicateur de vitesse sont présentés. Par la suite, un modèle de la génératrice asynchrone à double alimentation MADA pour deux scénarios : à vide et en appliquant un couple résistant de 9550N.m. sont présentés.

## Mots clés :

Vitesse du vent, Turbine éolienne, MADA, Simulation, Réseau électrique.

## 1. Introduction :

L'énergie éolienne utilise la turbine pour convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique [1], cette dernière est couplée avec une génératrice électrique pour convertir l'énergie mécanique produite par la turbine en énergie électrique, ce couplage mécanique peut être soit direct si la turbine et la génératrice ont des vitesses du même ordre de grandeur, soit réalisé par l'intermédiaire d'un multiplicateur dans le cas contraire, Plusieurs machines sont disponibles sur le marché éolien à savoir : les génératrices à courant alternatif (synchrones et asynchrones), et les génératrices à courant continu [2] [3], la chaîne de conversion reliée avec la génératrice peut être composée de plusieurs convertisseurs électriques dont les redresseurs, les onduleurs, les hacheurs et les transformateurs. Ainsi, dans cet article, nous présentons la modélisation des différentes composantes du système éolien. Nous commençons par une modélisation de la vitesse du vent qui sera suivie par celle de la turbine éolienne, ensuite, par celle du multiplicateur de vitesse. Par la suite nous présentons un modèle de la génératrice asynchrone à double alimentation MADA dans le repère  $dq$ , Nous terminerons par présenter les résultats de simulation de la MADA moyennant le logiciel Matlab/Simulink et leur interprétations pour deux scénarios : à vide et en appliquant un couple résistant de 9550N.m.

## 2. Modélisation de système complet :

Le modèle global du système éolien à base de machine asynchrone à double alimentation pour la fourniture de puissance au réseau électrique comprend : la turbine éolienne, la génératrice asynchrone double alimentée et deux convertisseurs de puissances qui permettent de relier le rotor au réseau électrique (Figure 1).

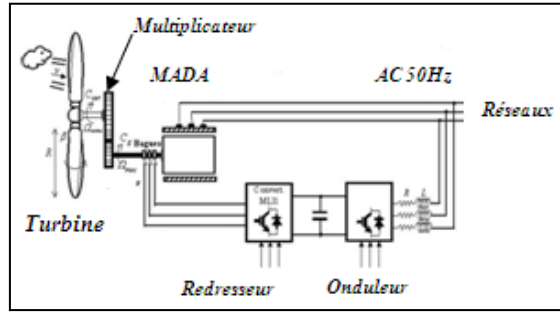


Figure1 : Structure générale étudiée.

**2.1 Modélisation de vent :** La vitesse du vent peut être modélisée sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques [4] :

$$V_v(t) = A + \sum_{n=1}^i (a_n \cdot \sin(b_n \cdot \omega_v \cdot t)) \quad (1)$$

Avec :

$A$  : est constante,  $a_n$ , et  $b_n \cdot \omega_v$  : représentent respectivement : l'amplitude et la pulsation de l'échantillon du vent

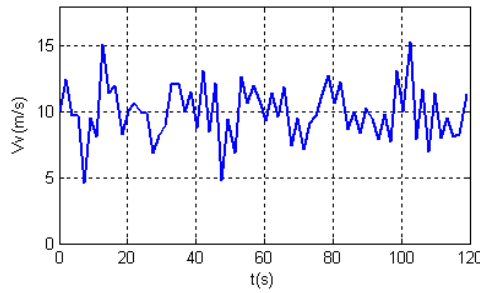


Figure2 : Profil de la vitesse du vent.

## 2.2 Modélisation de la turbine éolienne :

La puissance cinétique du vent à travers un disque éolien de rayon  $R$ , est donnée par la relation suivante [1].

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

La puissance de la masse d'air qui traverse la surface équivalente à la surface active  $S$  de l'éolienne est donnée par la relation suivante :

$$P_{eol} = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad (3)$$

$C_p(\lambda, \beta)$  : Le coefficient de puissance de la turbine éolienne, et sa valeur ne peut pas dépasser (16/27), limite de Betz [1].

$\beta$  : Angle de calage ;

$\lambda$  : Le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine et de la vitesse de vent :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{V_v} \quad (4)$$

La puissance maximale pouvant être recueillie par une éolienne est égale à la limite de Betz:

$$P_{MAX} = \frac{16}{27} P_{eol}$$

Le couple éolien est défini comme le rapport entre la puissance éolien et la vitesse angulaire de la turbine :

$$C_{eol} = \frac{P_{eol}}{\Omega} \quad (5)$$

Le couple sur l'arbre de la machine est donné par :

$$C_{arbre} = \frac{C_{eol}}{G} \quad (6)$$

Avec :  $G$  : rapport de multiplicateur

L'évolution de la vitesse mécanique est déterminée à partir du couple mécanique total  $C_{mec}$  appliqué au rotor :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (7)$$

$$\text{Avec : } C_{mec} = C_{arbre} - C_{em} - C_{visq} \quad (8)$$

Le couple résistant du aux frottements  $C_{visq}$  est modélisé par un coefficient de frottements visqueux  $f$  :

$$C_{visq} = f\Omega_{mec} \quad (9)$$

L'expression de la puissance mécanique optimale  $P_{mec.opt}$  est obtenue comme suit :

$$P_{mec.opt} = -\frac{1}{2} \frac{C_{Pmax} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5}{G^3 \cdot \lambda_{Cpmax}^3} \cdot \Omega_{mec}^3 \quad (10)$$

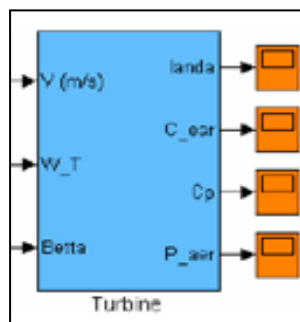


Figure3 : Schéma Bloc de la turbine développé sous Simulink [1].

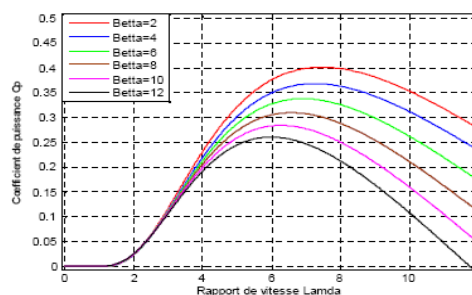


Figure4 : Coefficient de puissance en fonction de  $\lambda$  et  $\beta$

**2.3 Modélisation du Multiplicateur :** Pour la modélisation du multiplicateur nous avons supposé que l'élasticité et le frottement du multiplicateur ont été négligés ainsi que les pertes énergétiques [3]. Ce qui nous permis d'obtenir la relation suivante :

$$C_{mec} = \frac{1}{G} C_{eol} \quad G = \frac{\Omega_{mec}}{\Omega_T}$$

Avec :  $G$  : rapport de multiplicateur

**2.4 Modélisation de la MADA :** Le modèle de la MADA est donné par le système matriciel suivant [5] [6] [7] :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + P.L_s & -L_s.\omega_s & P.M & -\omega_r.M \\ \omega_s.L_s & R_s + P.L_s & \omega_s.M & P.M \\ P.M & -\omega_r.M & R_r + P.L_r & \omega_r.L_r \\ M.L_r & P.M & \omega_r.L_r & R_r + P.L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Ou :  $V_{ds}, V_{qs}, V_{dr}, V_{qr}, I_{ds}, I_{qs}, I_{dr}, I_{qr}, R_s, R_r, L_s, L_r$  : représentent les tensions et les courant directe et en quadrature, les résistances et les inductance cyclique, respectivement statorique et rotorique. Les flux sont donnés par les relations :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s.I_{ds} + M.I_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s.I_{qs} + M.I_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r.I_{dr} + M.I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r.I_{qr} + M.I_{qs} \end{cases} \quad (12)$$

L'hypothèse proposée pour machines de forte puissance utilisée pour la production éolienne considère que le flux du stator  $\varphi_{ds}$  est constant et la résistance  $R_s$  est négligeable, Cependant, les expressions des tensions et de puissance auxquelles nous aboutissons sont données comme suite :

$$\begin{cases} V_{ds} = \frac{d\varphi_{ds}}{dt} = \frac{d\varphi_s}{dt} = 0 \\ V_{qs} = \frac{d\varphi_{qs}}{dt} = \omega_s.\varphi_s = V_s \end{cases} \quad (13)$$

et

$$\begin{cases} P = V_s \cdot \frac{M}{L_s} \cdot I_{qr} \\ Q = V_s \cdot \frac{M}{L_s} \cdot I_{dr} + \frac{V_s^2}{L_s \cdot \omega_s} \end{cases} \quad (14)$$

et

$$\begin{cases} P = V_s \cdot \frac{M}{L_s} \left[ V_{qr} + g.\omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} - g.\omega_s \cdot \frac{M.V_s}{\omega_s.L_s} \right] \left[ \frac{1}{R_r + P \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \right] \\ Q = V_s \cdot \frac{M}{L_s} \left[ V_{dr} + g.\omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \right] \left[ \frac{1}{R_r + P \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \right] + \frac{V_s^2}{L_s \cdot \omega_s} \end{cases} \quad (15)$$

Le système d'équations précédent montre que nous pouvons établir sans difficulté un contrôle indépendant des puissances active et réactive, en faisant reproduire en sens inverse les équations décrivant le modèle à flux orienté de cette machine (système d'équations (15)) [7]. Donc le modèle résultant permet d'exprimer les tensions rotoriques en fonction des puissances de consignes.

Par ailleurs, afin de contrôler les puissances et les courants rotoriques des deux axes, le modèle doit comporter quatre régulateurs : deux pour le contrôle des puissances engendrées par la machine (active et réactive), et les deux autres pour le contrôle des courants rotorique ( $I_{dr}$ ,  $I_{qr}$ ).

### 2.5 Simulation de la MADA à vide et avec application d'un couple résistant de 9550 N.m [8] :

A partir du modèle global de la figure 1 présenté ci-dessus nous avons simulé dans l'environnement Matlab/Simulink la machine asynchrone à double alimentation (MADA) alimentée par le réseau avec une application d'un couple résistant de 9550 N.m. Les paramètres de la MADA sont donnés en annexe et les résultats sont représentés sur les figures suivantes :

Nous remarquons que toutes les grandeurs de la machine en régime transitoire sont oscillatoires pendant une courte durée de 0.2 s ce qui correspond au régime transitoire.

Nous remarquons aussi que la vitesse de rotation à vide atteint une valeur proche de 150 rad/s, et lors d'application d'un couple résistant de 9550 N.m, la vitesse diminue et le couple électromagnétique augmente ce qui correspond au fonctionnement hyposynchrone pour un couple électromagnétique positif.

Les résultats montre aussi que les flux statoriques  $\varphi_{ds}$ ,  $\varphi_{qs}$  augmentent légèrement à l'instant de l'application de la charge.

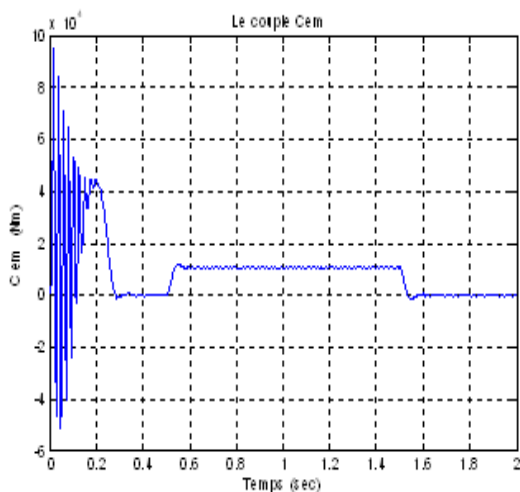


Figure 5 : le couple Cem.

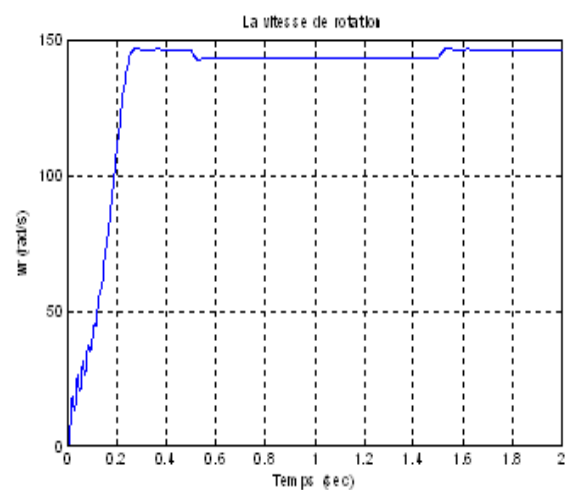


Figure 8 : Vitesse de rotation.

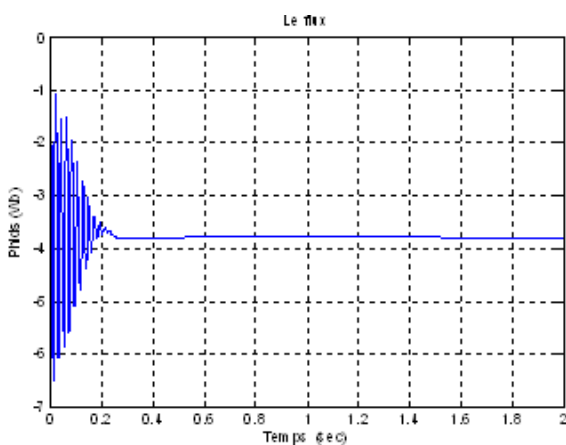


Figure 6: le Flux magnétique sur l'axe d.

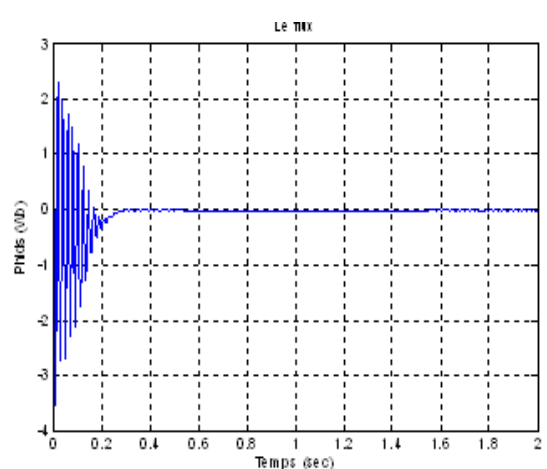


Figure 9 : le Flux magnétique sur l'axe q.

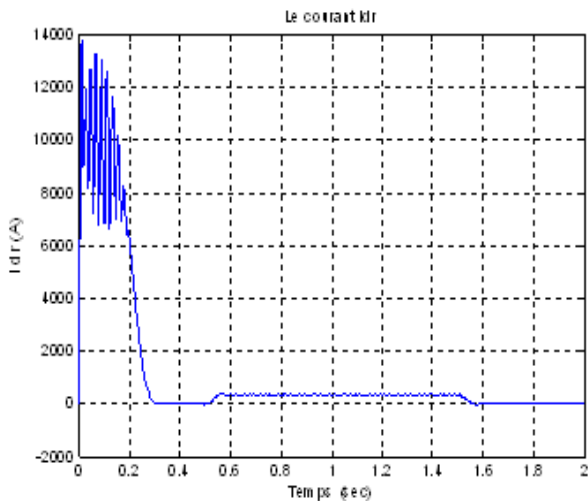


Figure 7 : le courant rotorique sur l'axe d

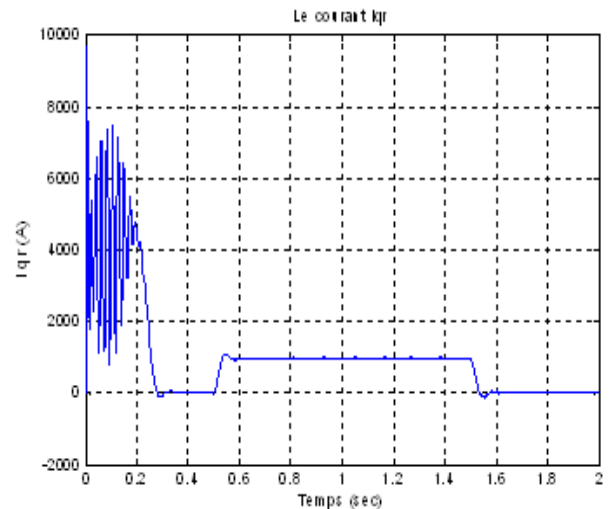


Figure 10 : le courant rotorique sur l'axe q.

## Conclusion

Cet article a été consacré à la modélisation et à la simulation d'une éolienne fonctionnant à vitesse variable. Ainsi, en premier lieu, nous avons présenté les résultats de simulation de la turbine en montrant par les courbes du coefficient de puissance en fonction de  $\lambda$  et de  $\beta$  que le coefficient de puissance maximum de 0.4 est obtenu pour un ratio de vitesse ( $\lambda_{opt}$ ) qui vaut 7 et que en fixant  $\lambda$  et  $\beta$  respectivement à leurs valeurs optimales, le système éolien fournira une puissance électrique optimale. En second lieu, nous avons présenté les résultats de simulation relatifs à la machine asynchrone à double alimentation (MADA) en fonctionnement hyposynchrone. Pour laquelle nous avons montré l'influence de la variation de la vitesse de la turbine sur les courant rotorique de la machine.

Les résultats de simulation montrent que le système éolien ainsi proposé est faisable et à de nombreux avantages.

## Bibliographie

- [1] K. FERKOUS « Modélisation et simulation d'un chaîne de conversion d'énergie éolienne à l'aide de logiciel MATLAB/ SIMILINK », *1<sup>er</sup> Séminaire Méditerranéen sur l'Energie Eolienne, SMEE'2010*, Alger, Algérie, 11 et 12 Avril 2010.
- [2] H. BEKKA « Intégration des aérogénérateurs au réseau, Maximisation de la puissance extraite », *1<sup>er</sup> Séminaire Méditerranéen sur l'Energie Eolienne, SMEE'2010*, Alger, Algérie, 11 et 12 Avril 2010.
- [3] S.TARAFT « Etude des Performances de la MADA dans une Eolienne à Vitesse Variable Connectée au Réseau », *Conférence internationale sur les énergies renouvelables ICRE'07*.
- [4] N.K. MERZOUK « Evaluation du gisement énergétique éolien contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie » *Thèse de doctorat en physique énergétique*, Tlemcen, Algérie, Mai 2006.
- [5] L. MESBAH « Modélisation et Asservissement d'une Chaîne de Conversion Eolienne », *1<sup>er</sup> Séminaire Méditerranéen sur l'Energie Eolienne, SMEE'2010*, Alger, Algérie, 11 et 12 Avril 2010.
- [6] A. BOYETTE « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne » *Thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré*, Nancy I, décembre 2007.
- [7] S. EL-Aimani « Modélisation de Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension », *Thèse de Doctorat d'Etat en Electronique et Génie Electrique*. Ecole Centrale de Lille (ECL), 2005.

[8] <http://www.aweo.org/windmodels.html>, fiche technique de la turbine éolien 1.5 MW fabriqué par Général Electric.

### Annexe

Les paramètres de la MADA sont :  $P_n = 1,5\text{MW}$ ,  
 $p = 2$ ,  $f = 50\text{Hz}$ ,  
Résistance statorique :  $R_s = 0,012\Omega$  ;  
Résistance rotorique :  $R_r = 0,021\Omega$  ;  
La Mutuelle :  $M = 0,0135\text{H}$  ;  
Inductance statorique :  $L_s = 0,0137\text{H}$  ;  
Inductance rotorique :  $L_r = 0,0136\text{H}$  ;  
La tension du réseau utilisé :  $V = 690\text{V}$  avec une fréquence de  $50\text{Hz}$ .

Les paramètres de la turbine éolienne utilisée : Nombre de pale = 3, Diamètre de pale :  $R = 70.5\text{m}$ , Gain du multiplicateur :  $G = 5.4$ , L'inertie de la turbine  $J = 0.042\text{Kg.m}^2$ , Coefficient de viscosité :  $f = 0.017\text{N.m.s}^{-1}$