INFLUENCE DYNAMIQUE DU VENT SUR UNE GENERATRICE EOLIENNE

Aristol TSIMA[1], Charles Bernard ANDRIANIRINA[1], Max ANDRIANANTENAINA[2], Rabe TSIROBAKA[2].
[1] *Institut Supérieur des Sciences et Technologies de Mahajanga, Université de Mahajanga, Bâtiment Ex-LOLO Mahajangabe, Madagascar*
[2] *Département d'Electricité, Ecole Supérieure Polytechnique BP 0, 201 Université d'Antsiranana, Madagascar*
E-mail : art.tsima@yahoo.fr

Résumé :

L'impact néfaste de certaines activités de l'homme sur la nature est aujourd'hui reconnu par de nombreux spécialistes. Des nombreuses recherches sur l'énergie renouvelable sont en court pour minimiser les conséquences nuisibles et la pollution de notre planète. Ainsi, plusieurs pays ont commencé à investir de l'argent pour notamment améliorer la technologie des aérogénérateurs.

Le vent, source de l'énergie électrique produit par les aérogénérateurs, est une grandeur stochastique et inépuisables. Cet élément n'est pas constant, l'inertie transmise par le biais de la turbine entraine des vibrations non négligeables sur le comportement de l'éolienne. D'où la nécessité de son étude, c'est justement l'objet de ce travail, où l'on cherche à modéliser l'impact des perturbations du vent sur les parties électriques dans la production d'électricité d'une éolienne avec machine asynchrone connectée au réseau.

La première étape de ce travail est la modélisation, c'est à dire la mise en équation des systèmes en proposant des hypothèses simplificatrices. La seconde partie est de trouver le comportement électrique de la machine asynchrone lors de l'enclenchement au réseau en se basant avec Modèle de Park, et à l'aide du logiciel Matlab simulink pour la simulation.

Les résultats obtenus sont des courbes en fonction du temps qui présentent la puissance réactive, la puissance active, puissance mécanique, couple électromagnétique, vitesse de rotation, courant statorique de la génératrice asynchrone. Ils sont variés en fonction de changement de la vitesse du vent et lors de passage des pales sur le tour. Les résultats montrent le comportement de la partie mécanique et électrique de l'éolienne lors de son enclenchement au réseau.

Le comportement de la machine lors du passage d'une pale sur le tour est marqué par une vibration périodique lorsque la vitesse est constante

Mots clés : ***Eolienne, Modélisation, turbine, asynchrone, influence***.

Abstract :

The harmful impact of certain human activities on nature is now recognized by many specialists. A lot of research on renewable energy is under way to minimize the harmful consequences and pollution of our planet. For example, several countries have begun to invest money to improve wind turbine technology.

Wind, the source of electrical energy produced by wind turbines, is a stochastic and inexhaustible quantity. This element is not constant, the inertia transmitted through the turbine causes significant vibrations on the behavior of the wind turbine. Hence the necessity of its study, it is precisely the object of this work, where one seeks to model the impact of the disturbances of the wind on the electric parts in the production of electricity of a wind turbine with machine asynchronous connected to the network.

The first step of this work is modeling, ie the equation of systems by proposing simplifying hypotheses. The second part is to find the electrical behavior of the asynchronous machine during the latching to the network based on Park's Model, and using the Matlab simulink software for the simulation.

The results obtained are curves as a function of time that show reactive power, active power, mechanical power, electromagnetic torque, rotational speed, stator current of the asynchronous generator. They are varied according to the change of the wind speed and during the passage of the blades on the lathe. The results show the behavior of the mechanical and electrical part of the wind turbine during its engagement with the network.

The behavior of the machine during the passage of a blade on the lathe is marked by a periodic vibration when the speed is constant.

Keywords : *Wind turbine, modeling, turbine, asynchronous, influence.*

Nomenclature

Lettres latines

C_e :	*Couple électromagnétique*
C_p:	*Coefficient de puissance*
Ep:	*Tension interne de la machine Asynchrone*
E_t:	*Tension terminale.*
E'_q:	*Tension proportionnelle à la composante directe*
I:	*Courant*
J:	*Moment d'inertie*
L:	*Inductance*
L_{sr}	*Inductance mutuelle stator rotor*
p:	Nombre de paire de pôle
P_a:	*Puissance active*
P_r:	*Puissance réactive*
P_m:	*Puissance mécanique*
R:	*Rayon de Pales*

Lettres grecques

θ	*Angle entre phase stator, rotor*
ψ_{dr}:	*flux rotorique directe*
ψ_{ds}:	*flux statorique directe*
ψ_{qr}:	*flux rotorique quadratique*
ψ_{qs}:	*flux statorique quadratique*

Indices/Exposants

a:	*Phase a*
b:	*Phase b*
c:	*Phase c*
em:	*Electromagnétique*
O:	*homopolaires*
d:	*Directe*
q:	*Quadrature*
r:	*Rotor*
S:	*Stator*

R_r: *Resistance rotorique*
R_s: *Resistance statorique*
S: *Surface balayée par les Pales*
t: *temps*
T_{em}: *Couple électromagnétique*
T_{ei}: *Couple électrique*
T_{mi}: *Couple mécanique*
T'_{oi}: *Constante de temps*
T_r: Couple résistant
T'_{d0}: *Constante de temps transitoire du circuit*
U: *Tension*
VL: *Valeur efficace de la tension au borne de la charge*
V_{ref}: *Tension de référence*
V_v: *Vitesse du vent*
Wr: *Vitesse de rotation de la machine Asynchrone*
X_{ri}: *Réactance rotorique*
X_{si}: *Réactance statorique*
X_{mi}: *Réactance magnétisante*
X_d: *Composante directe de la réactance statorique en pu*
X_q: *Composante quadrature de la réactance statorique en p.u*

I. INTRODUCTION

L'impact né faste de certaines activités de l'homme sur la nature est aujourd'hui reconnu par de nombreux spécialistes. Des nombreuses recherches sur l'énergie renouvelable sont en court pour minimiser les conséquences nuisibles et la pollution de notre planète. Ainsi, plusieurs pays ont commencé à investir de l'argent pour notamment améliorer la technologie des aérogénérateurs.

Le vent, source de l'énergie électrique produit par les aérogénérateurs, est une grandeur stochastique et inépuisable. Cet élément n'est pas constant, l'inertie transmise par le biais de la turbine entraine des vibrations non négligeables sur le comportement de l'éolienne. D'où la nécessité de son étude, c'est justement l'objet de ce travail, où l'on cherche à modéliser l'impact des perturbations du vent sur les parties électriques dans la production d'électricité d'une éolienne avec machine asynchrone connectée au réseau

II. MODELE DE LA MACHINE ASYNCHRONE

La première étape de ce travail est la modélisation, c'est à dire la mise en équation des systèmes en proposant des hypothèses simplificatrices [2] :

- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau ou refoulement de courant.

- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables,
- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encochage est négligé.
- La force magnétomotrice créée par chacune des phases des armatures est à répartition sinusoïdale
- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encochage est négligé
- La force magnétomotrice créée par chacune des phases des armatures est à répartition sinusoïdale

La seconde partie est de trouver le comportement électrique et mécanique de la génératrice asynchrone lors de l'enclenchement au réseau en se basant avec modèle de Park. Le passage dit dans le repère " dq " d'un système triphasé xa, xb et xc s'écrit [8] :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} = [A] * \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}$$ Avec

$$[A] = \frac{2}{3}\begin{pmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \quad (1)$$

A est la matrice de Park, l'inverse de la matrice existe et est donnée par

$$[A]^{-1} = \begin{pmatrix} cos\theta & -sin\theta & 1 \\ cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

II.1 Equations des tensions de la machine

L'intérêt de la transformation de Park réside au fait que les coefficients des équations de la machine initialement variables deviennent constants après son utilisation.

II.1.1 Equations de tension en grandeurs de phase

La loi de Faraday permet d'écrire :

$$v = Ri + \frac{d\psi}{dt}. \quad (3)$$

Pour les 3 phases statoriques on résume cette écriture par l'écriture matricielle condensée :

$$[v_{abc}]_s = R_s[i_{abc}]_s + \frac{d}{dt}[\psi_{abc}]_s. \quad (4)$$

Cette notation est l'écriture condensée de :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}_s = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}_s + \frac{d}{dt}\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix}_s. \quad (5)$$

La résistance statorique étant la même pour les 3 phases, il n'y pas lieu d'écrire une matrice de résistances.

De même pour le rotor

$$[v_{ABC}]_r = R_r[i_{ABC}]_r + \frac{d}{dt}[\psi_{ABC}]_r = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Le rotor étant en court-circuit, ses tensions sont nulles.

II.1.2 Equations des tensions dans un référentiel lié au stator

Dans un référentiel lié au stator, les équations des tensions s'écrivent comme :

- **Stator**

$$\begin{cases} u_{ds} = R_s i_{ds} + \dfrac{d\psi_{ds}}{dt} \\ u_{qs} = R_s i_{qs} + \dfrac{d\psi_{qs}}{dt} \\ u_{0s} = R_s i_{0s} + \dfrac{d\psi_{0s}}{dt} \end{cases} \quad (7)$$

- **Rotor**

$$\begin{cases} u_{dr} = R_r i_{dr} + w_m \psi_{qr} + \dfrac{d\psi_{dr}}{dt} \\ u_{qr} = R_r i_{qr} - w_m \psi_{dr} + \dfrac{d\psi_{qr}}{dt} \\ u_{0r} = R_r i_{0r} + \dfrac{d\psi_{0r}}{dt} \end{cases} \quad (8)$$

Ce référentiel peut être utilisé pour l'étude sur les variations importantes de la vitesse de rotation, associées ou non avec des variations de la fréquence de rotation. Ici, nous allons supposer nulles les composantes homopolaires.

Equations de tension statorique et rotorique :

$$u_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} \; ; \quad (9)$$

$$u_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} \; . \quad (10)$$

Pour le rotor, il est en court-circuit, donc :

$$0 = R_r i_{dr} + w_m \psi_{qr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} \; ; \quad (11)$$

$$0 = R_r i_{qr} - w_m \psi_{dr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} \; ; \quad (12)$$

II.2 Equation de flux

Les équations de flux statorique et rotorique:

$$\psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_{sr} i_{dr} \; ; \quad (13)$$

$$\psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_{sr} i_{qr} \; ; \quad (14)$$

$$\psi_{dr} = L_r i_{dr} + L_{sr} i_{ds} \; ; \quad (15)$$

$$\psi_{qr} = L_s i_{qr} + L_{sr} i_{qs} . \quad (16)$$

II.3 Equation du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique développé par le champ tournant est donné par :

$$T_{em} = \frac{dW_s}{\Omega_s dt} \; ; \quad (17)$$

$$T_{em} = \frac{3}{2}\frac{w_s}{\Omega_s}\left[\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}\right] \text{ or } p = \frac{w_s}{\Omega_s} \; ; \quad (18)$$

donc $T_{em} = \frac{3}{2} p\left[\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}\right]$; (19)

$$\left[\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}\right] = L_{sr}(i_{dr} i_{qs} - i_{qr} i_{ds}) \; ; \quad (20)$$

on a alors :

$$T_{em} = \frac{3}{2} p L_{sr}\left[i_{dr} i_{qs} - i_{qr} i_{ds}\right]. \quad (21)$$

p : Nombre de pair de pôle de la machine.

II.4 Equation de flux

La relation fondamentale de la dynamique donne l'équation du mouvement de la machine :

$$T_{em} - T_r = J\frac{d\Omega_r}{dt} \; ; \quad (22)$$

Avec $\Omega_r = \frac{w_r}{p}$, on a : (23)

$$T_{em} - T_r = \frac{J}{p}\frac{dw_r}{dt} \; ; \quad (24)$$

II.5 Schéma bloc de la machine

En utilisant la notation de Laplace, les blocs utilisés sont pris dans une bibliothèque standard de matlab/simulink, on obtient schéma blocs suivants:

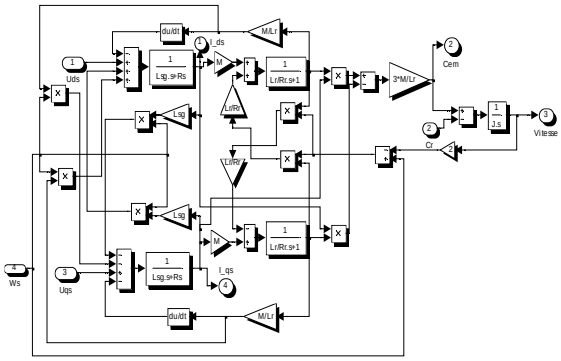


Figure1 : *Schéma bloc de machine asynchrone*

III. MODELE DU VENT

Le vent est la raison d'être des aérogénérateurs. C'est l'entrée du système qu'on étudie. L'énergie cinétique contenue dans le vent est récupérée en partie, et transformée en énergie mécanique par le biais de la turbine, puis en énergie électrique grâce au générateur.

Le vent est une grandeur stochastique même si certaines de ses caractéristiques sont déterministes. On ne peut pas le représenter par des expressions exclusivement déterministes. La vitesse du vent peut être modélisée comme une fonction scalaire qui évolue dans le temps [4]:

$$V_v = f(t) \qquad (25)$$

La vitesse du vent sera modélisée sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques sous la forme :

$$V_v(t) = A + \sum_{n=1}^{i} (a_n.\sin(b_n.w_v.t)) \qquad (26)$$

IV. MODELE DE LA TURBINE

Le modèle de la turbine doit, lorsqu'elle est soumise à un vent $_v$, créer un couple qui aura pour conséquence de faire tourner l'arbre mécanique sur lequel elle est fixée.

Il existe des modèles de turbine relativement complexes, prenant en compte l'effet de mât, de la pesanteur sur la rotation des pales [6], de leur élasticité ou encore de la variation de la vitesse du vent selon l'altitude. Les modèles utilisés dans le présent travail sont simplifiés.

La puissance mécanique de la turbine est obtenue par [7] :

$P_t = \frac{1}{2}\rho S V_v^{\,3} C_p$; avec $S = \pi R^2$: Surface balayée par les pales de la turbine

$$\Rightarrow P_m = \frac{1}{2}\rho \pi R^2 V_v^{\,3} C_p . \qquad (27)$$

Le couple mécanique est trouvé à partir de rapport entre la puissance mécanique et la vitesse de rotation de la turbine d'où :

$$T_m = \frac{P_m}{\Omega} \;;$$

$$T_m = \frac{1}{2\Omega}\rho \pi R^2 V_v^{\,3} C_p \;; \text{ or } \lambda = \frac{R\Omega}{V_v} \qquad (28)$$

Donc, en fonction de rapport de la vitesse, le couple mécanique s'écrit :

$$T_m = \frac{1}{2\lambda}\rho \pi R^3 V_v^{\,2} C_p . \qquad (29)$$

V. RESULTATS

Le comportement de la machine asynchrone lors des fonctionnements est traduit par des allures des courbes de couple électromagnétique, courant, la vitesse et les puissances (Puissance réactive et puissance active).

IV.1 Fonctionnement à la vitesse supérieure à la vitesse de synchronisme

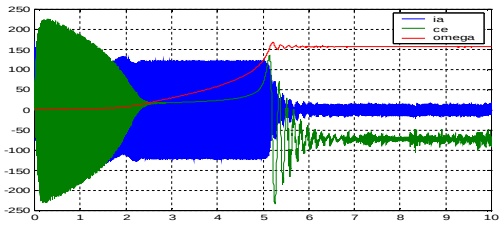


Figure2: *Fonctionnement en générateur de la machine asynchrone*

La courbe dans la figure 2 présente le comportement de couple électromagnétique et la vitesse de rotation de la partie de l'axe rapide de l'éolienne ainsi que le courant statorique. La vitesse constante du vent (glissement faible et négatif sur la machine) provoque l'allure présentant des vibrations faibles des courbes. Le courant statorique diminue à l'instant t=5[s] et le couple électromagnétique change de signe, cela veut dire qu'à partir de ce moment, la machine change le fonctionnement en génératrice

IV.2 Comportement de la génératrice sur la vitesse variable

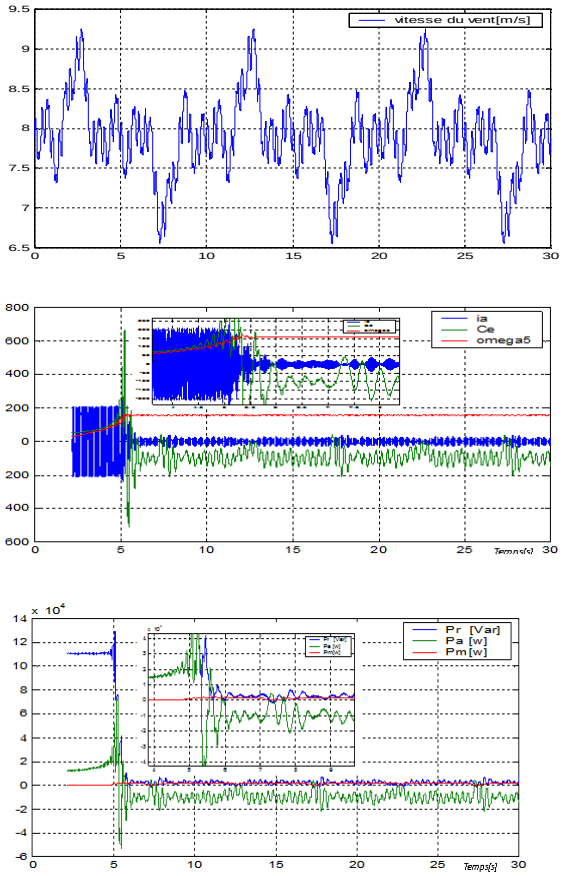


Figure3: *Comportement de génératrice lors de la vitesse variable du vent*

La figure 3 montre le comportement du fonctionnement de la génératrice asynchrone. Dans ces schémas, nous pouvons voir que toutes les grandeurs caractérisant le fonctionnement de notre objet d'études changent de façon proportionnellement en fonction de la vitesse du vent applique à la turbine. Les puissances et le couple mécaniques changent en même temps et leurs amplitudes sont différentes. Ceci est logique car il y a de liaison entre les deux grandeurs.

IV.3 Allures des courbes lors de changement de vitesse du vent

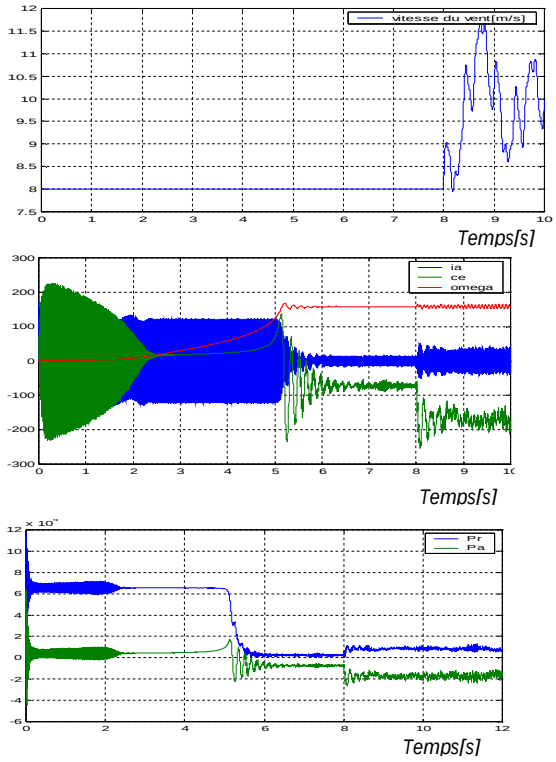
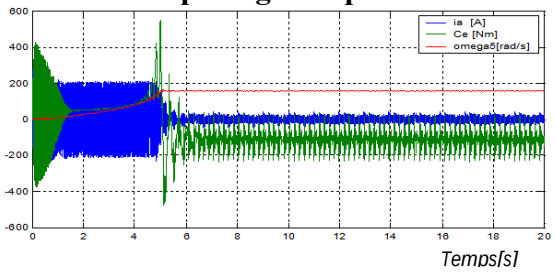


Figure4 : *Fonctionnement en générateur avec variation vitesse à t=8[s]*

Le changement brusque de la vitesse du vent (t=8[s], figure4) provoque la diminution du couple électromagnétique qui change de signe, par contre le courant augmente. Lorsque la vitesse du vent n'est pas constante, c'est-à-dire quand il y a des vibrations, les deux paramètres (couple électromagnétique, courant statorique) suivent les variations de la vitesse.

IV.4 Effet de passage des pales sur le mat



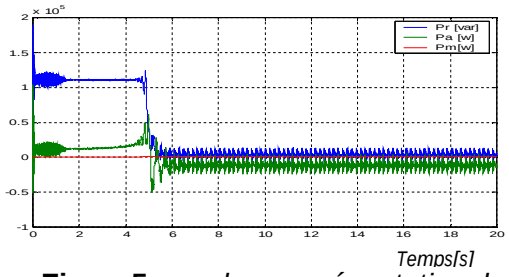


Figure5: *courbes représentative de passage de pale sur le tour*

Le comportement de la machine lors du passage d'une pale sur le tour est marqué par une vibration périodique lorsque la vitesse est constante ([4] et [29]). La turbine comporte deux pales donc une tour $(2\pi\,[\,rad\,])$ de la turbine, provoque deux passages de pale sur le tour, ce passage provoquant une diminution de la vitesse de la turbine (sur toutes les éoliennes en aval) et cette dernière est la source des vibrations sur les éléments qui définissent le fonctionnement de l'éolienne.

IV.5 Couplage de génératrice sur le réseau avec vitesse variable de l'éolienne

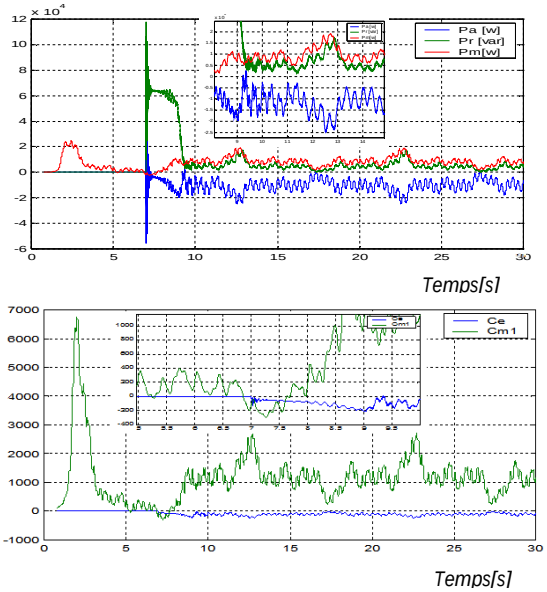


Figure6 : *Comportement lors de couplage au réseau à t=7[s]*

On laisse la turbine tourner jusqu'à la vitesse supérieure à la vitesse de synchronisme [205rad/s] qui correspond au temps t=7[s], puis on couple la machine au réseau. Avant le couplage, le courant statorique, le couple électromagnétique, les puissances active et réactive sont nulles. Mais par contre, la puissance mécanique, le couple mécanique et la vitesse de rotation de l'arbre de la génératrice ne sont pas nuls à cause des efforts transmis par le vent sur la turbine. La vitesse augmente exponentiellement jusqu'à une certaine valeur. La puissance mécanique et le couple suivent l'augmentation de la vitesse de rotation. Tant que la vitesse garde une valeur supérieure à la vitesse de synchronisme, on couple la génératrice au réseau (Ici omega5 égale 205[rad/s]). Après couplage (t=7[s]), on voit que la vitesse diminue, la machine prend sa vitesse de fonctionnement, en suite les allures de la puissance active, réactive, le courant statorique et le couple électromagnétique, en partant de leurs valeurs maximales, diminuent brusquement ; et puis ils suivent l'allure de la vitesse du vent.

VI. CONCLUSION

En bref, la production d'énergie électrique à l'aide d'éoliennes fait appel à des compétences poussées dans domaines multiples et variés : aérodynamique, mécanique, résistance des matériaux, génie électrique, réglementation, …

Dans ce travail, on a montré le comportement d'une partie mécanique et électrique de l'éolienne lors de son enclenchement au réseau et de changement de vitesse du vent. Ce comportement est obtenu en se basant à la modélisation et à la simulation sur le logiciel Matlab/Simulink.

On constante que la variation de la vitesse (augmentation par rapport à la vitesse de synchronisme) donne des variations des grandeurs caractérisant les fonctionnements de la turbine et la génératrice. Le couple électromagnétique change de signe et devient négatif. Plus la vitesse d'enclenchement est plus proche de la vitesse de synchronisme, plus le couple électromagnétique tend à sa valeur positive. La vibration due à la vitesse du vent non constante provoque des oscillations néfastes sur le fonctionnement de l'éolienne.

La suite de ce travail peut être un sujet de thèse : " **Etude et élimination des perturbations créer par la vitesse variable du vent et le passage des pales dans le mat d'une éolienne à machine asynchrone avec vitesse variable "**.

Reference:

[1]: Yu Zou, Malik E. Senior Member, IEEE, JUNE 2013, *Simulation Comparisons and Implementation of Induction Generator Wind Power Systems*.

[2] : Esmat ABU-TABAK, *19 Novembre 2008, Stabilité dynamique des systèmes électriques multi machines.*

[3]: Dr. Federico Milano, 26 June, 2008 *Power System Dynamics and Stability*

[4] : Adam MERECKI, *5 avril 2005, Etude comparative de chaines de conversion d'énergie dédiées à une éolienne. Polytechnique de Toulouse.*

[5] : Emanuel Florin MOGOS**,** 20 juillet 2005, Production décentralisée dans les réseaux de distribution. Etude pluridisciplinaire de la modélisation pour le contrôle des sources

[6] : Fréderic POITIERS, 19 décembre 2003, Etude et commande de génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne. *Ecole de polytechnique de l'Université de Nantes.*

[7] : Vincent ROGEZ, 17 décembre2004, Modélisation simplifiée de sources de production décentralisée pour des études de dynamique des réseaux. Application à l'intégration d'une production éolienne dans un réseau de distribution insulaire.

[8] : Mamadou Lamine Doumbia, Abdoulaye Traoré, Modélisation et simulation d'une machine asynchrone à cage à l'aide du logiciel Matlab/Simulink. Science de l'ingénieur (Génie électrique)

[9]: Johannes Gerlos SLOOTWEG, 9 December 2003, Modelling and impact on Power System Dynamics, Universiteit Delft.