



EFFET DE LA SENSIBILITE DES PARAMETRES SUR UN AEROGENERATEUR A VITESSE FIXE

M. Imadouchene ^{#1}, A. Nesba ^{*2}, S. Mekhtoub ^{#3}, R. Ibtouen ^{#3}

^{#1}Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou

¹imka_ghi@yahoo.fr

^{#3}Ecole Nationale Polytechnique

³said.mekhtoub@enp.edu.dz

³rachid.ibtiouen@enp.edu.dz

^{*2}Ecole Normale Supérieure Kouba

²nesba_ali@yahoo.com

Abstract— In this paper we present the induction generator used in wind electrical energy production. This type of generator is increasingly used because of its cost and easy maintenance. It is still used particularly for supplying remote locations. However, wind is a stochastic quantity of highly fluctuating nature, therefore, wind generators are considered as variable (and randomly fluctuating wind) power sources, this is an annoying aspect of electrical production. At first we focus on the modeling of the machine in a d-q reference frame. We validate the model by an experimental support and we conclude with a study of the parameters that may affect the generator behavior at transient. In a second step we will complete the work with a study of the performance and limitations associated with the use of auto-excited generator in the linear and saturated modes.

Keywords— Induction Generator, Saturation, Wind energy, Modelling, Self-Excitation.

I. INTRODUCTION

Bien que connue et exploitée depuis longtemps, l'énergie éolienne fut complètement négligée pendant l'ère industrielle au profit des énergies fossiles (le charbon, le pétrole et l'uranium). Aujourd'hui, et surtout après les alertes climatiques et la ratification de la convention de Kyoto en 1997, que de vrais axes de recherche autour des éoliennes ont émergé, visant à baisser les coûts (de fabrication, d'usage et de recyclage) et l'amélioration de la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique exploitable par le réseau. Cette conversion fait appel à de nombreuses disciplines scientifiques (Météorologie, Mécanique Chimie, Mécanique des Fluides, Electrotechnique) [1-4]. Ce papier est consacré à la partie électrotechnique de cette chaîne de conversion.

Afin de maximiser l'efficacité de la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique, de nombreuses solutions ont été examinées par les chercheurs, [5-7] aussi bien au niveau du générateur à utiliser que de l'électronique de contrôle. La plus

part des aérogénérateurs utilisent des machines synchrones, asynchrones ou encore des machines spéciales, couplées directement au rotor de la turbine ou à travers un multiplicateur mécanique de vitesse. Le générateur peut être lié directement ou indirectement au réseau électrique [7]. Le générateur synchrone a fait l'objet de plusieurs études dans le cadre de son utilisation dans des application éolienne à entraînement direct (*Direct drive*) [5], dans le domaine de très basse vitesse et forte puissance, afin de supprimer le multiplicateur de vitesse (*Gearbox*), ceci pour minimiser les opérations de maintenance. Par ailleurs, les applications de forte puissance et de très basse vitesse sont généralement handicapées par le volume ou la masse du générateur utilisé [5] [6] [7][8]. Les machines asynchrones sont largement utilisées dans le domaine de la conversion de l'énergie éolienne. Dans le cas où la production est supérieure à 1MW, on utilise de plus en plus de structures à rotor bobiné en connectant le bobinage rotorique au réseau à travers un redresseur et un onduleur à MLI, il est possible de contrôler le glissement et de faire fonctionner la structure à vitesse variable [13]. Dans le cas de fonctionnements autonomes, l'utilisation des machine asynchrones à cage est plus courante, ces dernières ont plusieurs avantages tels leurs robustesses, un entretien réduit et un coût limité [12].

Dans cet article on s'intéresse au comportement du générateur autonome suite à une connexion de la charge et à sa tension de sortie suite à une variation des paramètres.

II. MODELISATION DU GENERATEUR ASYNCHRONE AUTONOME

Le Modèle du générateur asynchrone dans le repère de Park est obtenu après transformation des grandeurs réelles, exprimées dans le repère naturel, en grandeurs fictives dans le repère diphasé en utilisant la matrice de Park [12][13]. On aura ainsi:



$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s \varphi_{qs} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \\ V'_{dr} = R'_r i'_{dr} - \omega_r \varphi'_{qr} + \frac{d\varphi'_{dr}}{dt} \\ V'_{qr} = R'_r i'_{qr} + \omega_r \varphi'_{dr} + \frac{d\varphi'_{qr}}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

Avec

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = l_s i_{ds} + Lm i_{md} \\ \varphi_{qs} = l_s i_{qs} + Lm i_{mq} \\ \varphi'_{dr} = l'_r i'_{dr} + Lm i_{md} \\ \varphi'_{qr} = l'_r i'_{qr} + Lm i_{mq} \end{cases} \quad (2)$$

Notons que ces grandeurs sont ramenées au stator (comme pour le transformateur)

En utilisant les nombres complexes, le système (1) peut s'écrire sous forme :

$$\begin{cases} \bar{V}_s = R_s \bar{I}_s + l_s \frac{d}{dt} \bar{I}_s + \frac{d}{dt} \bar{\varphi}_m + j\omega_s \bar{\varphi}_s \\ \bar{V}'_r = R'_r \bar{I}'_r + l'_r \frac{d}{dt} \bar{I}'_r + \frac{d}{dt} \bar{\varphi}_m + j\omega_r \bar{\varphi}'_r \end{cases} \quad (3)$$

Ce qui donne le schéma monophasé dynamique équivalent de la machine asynchrone en fonctionnement générateur (Fig. 2). En régime permanent le système (3) devient :

$$\begin{cases} \bar{V}_s = R_s \bar{I}_s + j\omega_s \bar{\varphi}_s = R_s \bar{I}_s + j\omega_s l_s \bar{I}_s + j\omega_s Lm \bar{I}_m \\ \frac{\bar{V}'_r}{g} = 0 = \frac{R'_r}{g} \bar{I}'_r + j\omega_s \bar{\varphi}'_r = \frac{R'_r}{g} \bar{I}'_r + j\omega_s l'_r \bar{I}'_r + j\omega_s Lm \bar{I}_m \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{avec : } \frac{R'_r}{g} = R'_r + R'_r \frac{1-g}{g}$$

$$g = g_2 \cong -\frac{R'_r}{R_s} > -1,$$

$$g = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \Rightarrow \omega = (1-g)\omega_s \rightarrow \omega > 2\omega_s.$$

Ce qui donne le schéma équivalent suivant :

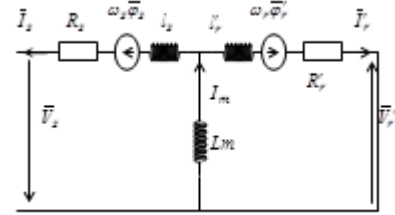


Fig.1 Schéma monophasé équivalent ramené au stator

L'auto amorçage du générateur ne se produit qu'en présence du condensateur, ce dernier forme avec le générateur un système oscillant dont les équations dérivent du schéma de la figure 2.

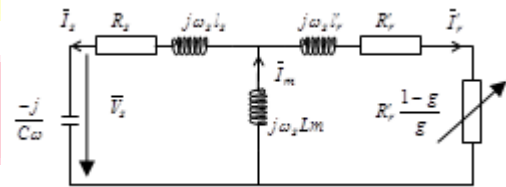


Fig.2 Schéma monophasé équivalent ramené au stator avec décomposition de la résistance rotorique

A. Valeurs limites des condensateurs d'auto-amorçage

Les valeurs limites des condensateurs d'autoamorçage sont calculées après analyse du schéma de la figure 2, :

$C_1 \cong \frac{1}{L_s \omega^2}$ Cette capacité correspond à la résonance avec

l'inductance cyclique propre L_s du stator calculée lorsque la machine tourne pratiquement à sa vitesse de synchronisme ,

$C_2 \cong \frac{1}{\sigma L_s \omega^2}$ correspond à la résonance avec l'inductance de

court-circuit de la machine $L_s \sigma$, cette solution est à rejeter car pour générer la fréquence nominale, la machine doit tourner pratiquement au double de sa vitesse de synchronisme.

Les tensions aux bornes des condensateurs dans le repère diphasé sont données par :



$$\begin{cases} \frac{d}{dt} V_{ds} = -\frac{1}{C} i_{ds} - \omega_s V_{qs} \\ \frac{d}{dt} V_{qs} = -\frac{1}{C} i_{qs} + \omega_s V_{ds} \end{cases} \quad (5)$$

Les figures ci-dessous représentent les tensions induites selon la valeur de la capacité devant celle de la réactance inductive $L_s \omega^2$.

- (b) Tension induite pour $C < \frac{1}{L_s \omega^2} = 103 \mu\text{F}$, $N=1500$
tr/mn

La résolution numérique du système d'équation (5),(8) donne pour la tension d'auto-amorçage à vide les résultats suivants. Le modèle linéaire du générateur asynchrone n'est donc pas réel et le fonctionnement correct de la générateur ne peut se faire qu'en présence de la saturation du circuit magnétique

B. Modélisation du générateur asynchrone avec prise en compte de la saturation

La saturation magnétique est introduite dans le modèle de Park par réajustement de la valeur de l'inductance de magnétisation en fonction de la valeur prise par le courant magnétisant[12][13][14]. Le problème revient donc à décrire le comportement du flux magnétisant pour pouvoir évaluer la

quantité magnétique $\frac{d}{dt} \bar{\varphi}_m$ dans le système (3). Le module et la phase de $\bar{\varphi}_m$ et \bar{I}_m sont donné par [13]

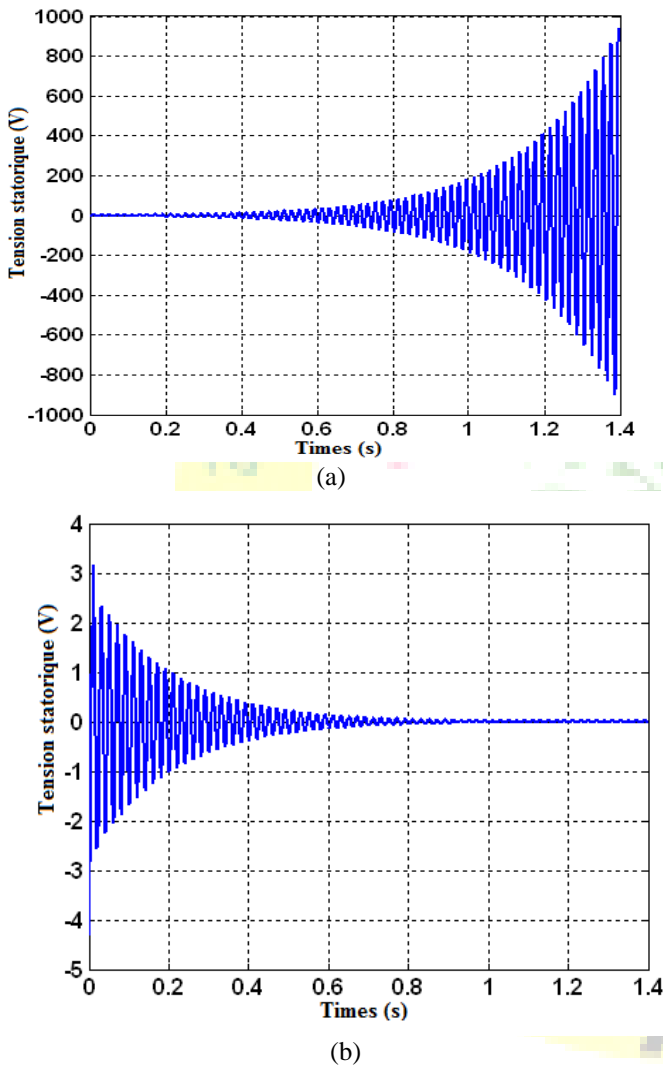
$$\begin{cases} \bar{\varphi}_m = \varphi_m e^{j\alpha} \\ \bar{I}_m = I_m e^{j\alpha} \end{cases}, \begin{cases} \varphi_m = |\bar{\varphi}_m| = \sqrt{\varphi_{md}^2 + \varphi_{mq}^2} \\ I_m = |\bar{I}_m| = \sqrt{i_{md}^2 + i_{mq}^2} \end{cases}$$

Nous obtenons après calcul :

$$\frac{d \bar{\varphi}_m}{dt} = L_{md} \frac{d i_{md}}{dt} + L_{dq} \frac{d i_{mq}}{dt} + j \left(L_{mq} \frac{d i_{mq}}{dt} + L_{dq} \frac{d i_{md}}{dt} \right) \quad (6)$$

$$\begin{cases} L_{dq} = (Lm_{dy} - Lm_{st}) \frac{i_{md} i_{mq}}{I_m^2} \\ L_{md} = Lm_{st} + L_{dq} \frac{i_{md}}{i_{mq}} \\ L_{mq} = Lm_{st} + L_{dq} \frac{i_{mq}}{i_{md}} \end{cases} \quad (7)$$

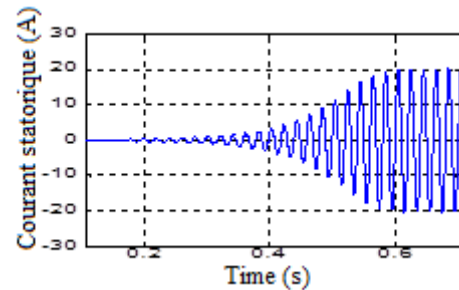
Fig. 3 - (a) Tension induite pour $C > \frac{1}{L_s \omega^2} = 103 \mu\text{F}$, $N=1500$
tr/mn





On obtient le nouveau système d'équation (8) représentant le modèle du générateur asynchrone, qui tient compte de la saturation du circuit magnétique.

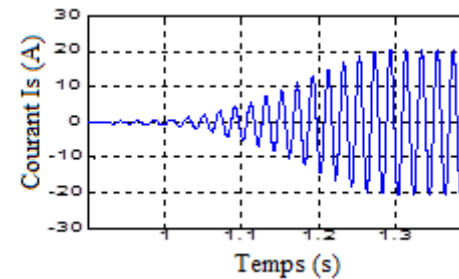
$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + l_s \frac{di_{ds}}{dt} + L_{md} \frac{di_{md}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{mq}}{dt} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + l_s \frac{di_{qs}}{dt} + L_{mq} \frac{di_{mq}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{md}}{dt} \\ V'_{dr} = R'_r i'_{dr} + l'_r \frac{di'_{dr}}{dt} + L_{md} \frac{di_{md}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{mq}}{dt} + \omega(l'_r i'_{qr} + Lm_{st} i'_{mq}) \\ V'_{qr} = R'_r i'_{qr} + l'_r \frac{di'_{qr}}{dt} + L_{mq} \frac{di_{mq}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{md}}{dt} - \omega(l'_r i'_{dr} + Lm_{st} i'_{md}) \end{cases} \quad (8)$$



(c)

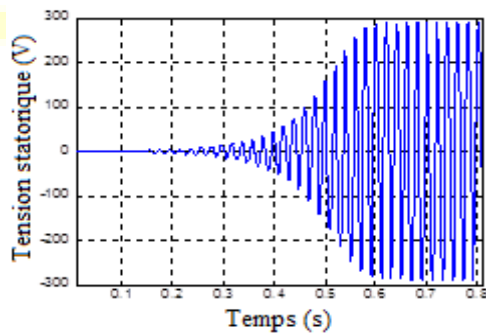
III. SIMULATION DE L'AUTO-AMORÇAGE A L'AIDE DU MODELE SATURE

La simulation du système (8) et (5) simultanément donne les résultats qui sont présentés sur les figures 4 suivantes :
Au début de l'amorçage la tension croit d'une façon linéaire, puis elle s'incurve pour converger vers une valeur finale fixe qui est en réalité limité par la saturation.

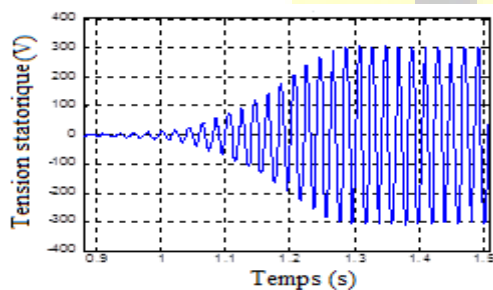


(d)

Fig.4-Tension statorique simulée (a) et expérimentale (b) fonctionnement à vide
Courant statorique simulé (c) et expérimental (d) Fonctionnement à vide

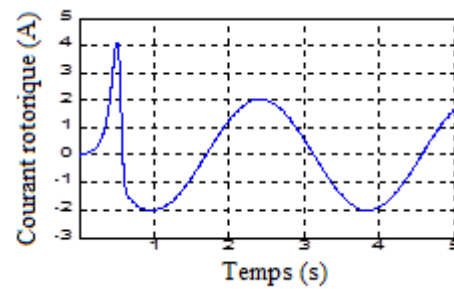


(a)



(b)

Sur les figures suivantes nous présentons les courants rotoriques simulés et expérimentaux



(a)

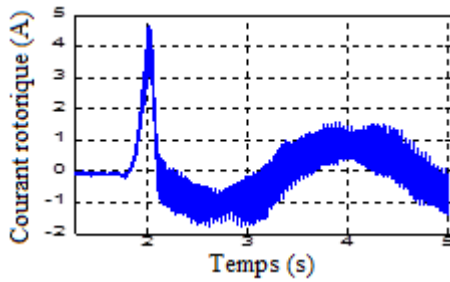
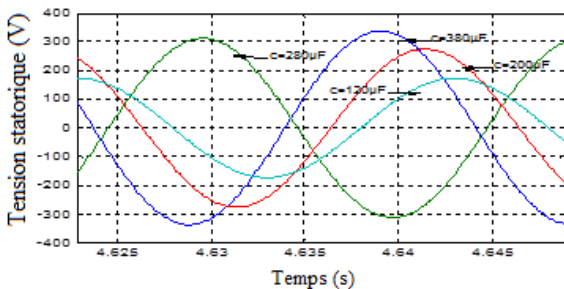


Fig.5 Courants rotoriques simulé (a) et expérimental (b) pour un fonctionnement à vide à 1500tr/min

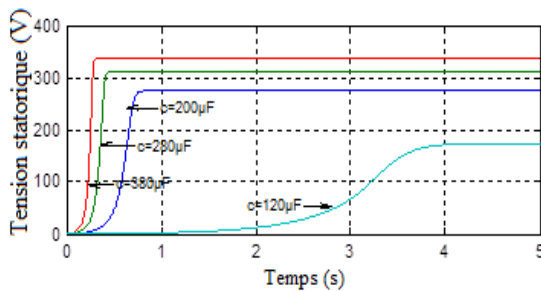
Les résultats des figures 4 et 5 montrent la validité du modèle non linéaire développé.

IV. INFLUENCE DES PARAMETRES SUR LA TENSION DE SORTIE DU GENERATEUR

L'augmentation de la valeur du condensateur influence le transitoire de la tension et aussi sa valeur finale. Il existe une valeur de C au-delà de laquelle la tension n'augmente plus en raison de la très forte saturation du circuit magnétique. La figure 7 a et b ci-dessous montre l'effet de la capacité sur la tension à vide pour un fonctionnement en générateur



(a)



(b)

Fig.6 Influence de la capacité C sur la tension à vide
(a) - Tension du générateur
(b) - Enveloppe de la tension du générateur
(c)

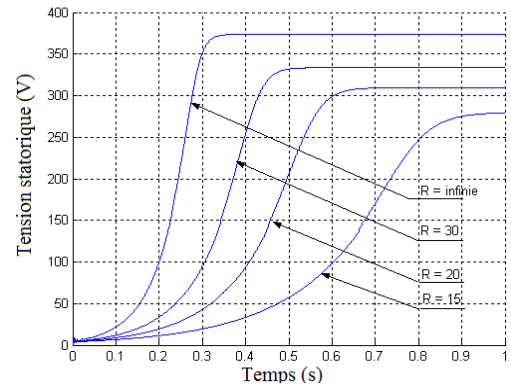


Fig. 7 Variation de la tension du générateur en fonction du temps pour différentes charges résistives en simulation
(d)

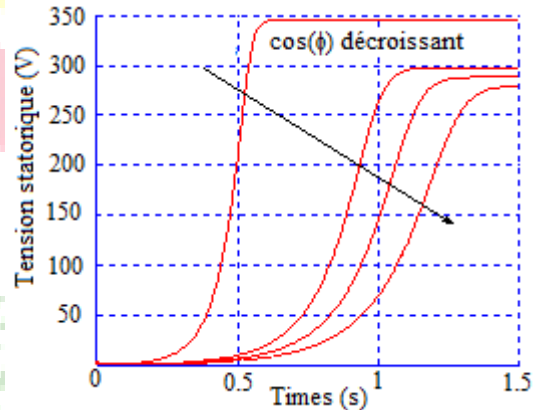
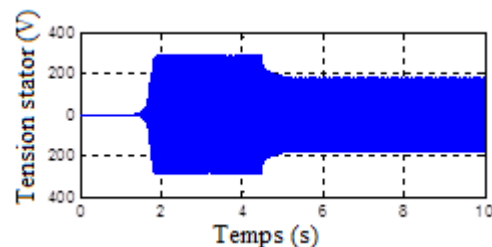


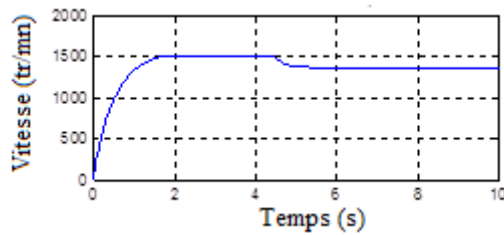
Fig..8 Variation de la tension pour différentes valeurs de cos(phi)

Les figures 6 (a) et (b) représentent l'évolution de la tension statorique suite à une variation de la capacité, on voit que lorsque la capacité passe de 120µF à 200µF la tension statorique a presque doublé de valeur. Mais l'augmentation de cette tension est toujours limitée par la saturation.

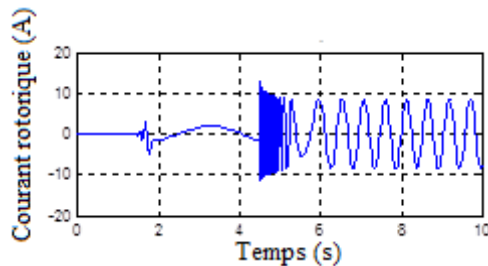
Nous avons appliqué une résistance de charge de valeur égale à R=25Ω. Les figures ci-dessous montrent les résultats obtenus en simulation pour les courants, la tension, la vitesse et le couple.



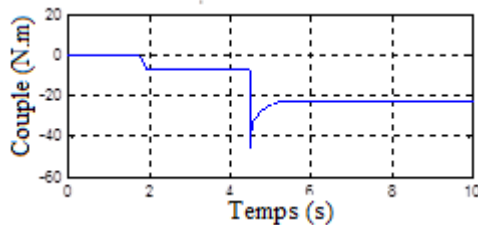
(a) Tension statorique



(b) Vitesse en tr/mn



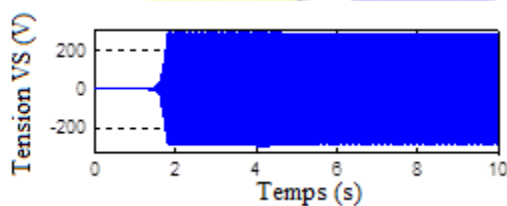
(c) Courant rotorique



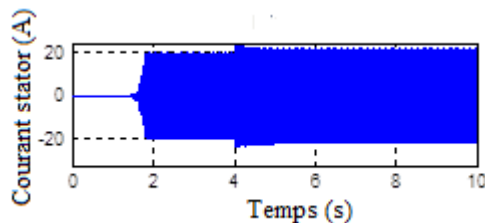
(d) Couple électromagnétique

Fig.9 Influence de l'insertion brusque d'une résistance de charge $R=25 \Omega$, sur les grandeurs du générateur asynchrone (a),(b),(c),(d).

L'insertion de la charge résistive brusque diminue la tension de sortie du générateur fig.9(a) ainsi que la vitesse fig.9 (b) par contre le couple et le courant rotorique augmentent, ce qui est conforme. Le couple reprend sa valeur après un transitoire très court.



(a)



(b)

Fig.10 Influence de l'insertion d'un condensateur série $C=40 \mu F$ avec la charge $R=25 \Omega$ Sur les grandeurs du générateur asynchrone

On voit que sur les figures 10 (a) et 10 (b) qui représentent respectivement la tension et le courant que celles-ci augmentent avec l'insertion de la capacité. En effet celle apporte une énergie réactive donc elle diminue la chute de tension inductive.

Symboles utilisés

$V_{ds}, V_{qs}, V_{dr}, V_{qr}$: Tensions statoriques et rotoriques diphasées
 $i_{ds}, i_{qs}, i_{dr}, i_{qr}, i_{md}, i_{mq}$: Courants statoriques, rotoriques et de magnétisation, diphasés

$\Phi_{md}, \Phi_{mq}, \Phi_{ds}, \Phi_{qs}, \Phi_{dr}, \Phi_{qr}$: Flux magnétisant, flux statoriques et rotoriques diphasés

R_s, R_r : Résistance d'une phase statorique et rotorique

L_m : Inductance magnétisante

L_r, L_r : Inductances cycliques statorique et rotorique

l_s, l_r : Inductances de fuites statorique et rotorique

L_{md}, L_{mq}, L_{dq} : Les inductances de saturation selon d,q et l'inductance d'inter- saturation

$L_{mst}, L_{m dy}$: Les inductances statiques (et dynamique

p : Nombre de paires de pôles

Γ_m : Couple d'entraînement de la machine,

J : Moment d'inertie du système.

Paramètres de la machine utilisée

Machine asynchrone à rotor bobiné

$V = 220/380 \text{ V}$, $I = 14/9 \text{ A}$, $P = 3.5 \text{ kW}$, $N = 1410 \text{ tr/mn}$,

$\cos \varphi = 0.8$, $f = 50 \text{ Hz}$.

V. CONCLUSION

L'étude a permis de conclure que le modèle linéaire du générateur asynchrone n'est pas réel, une série des essais et de simulation ont été effectués pour valider le modèle du générateur asynchrone qui tient compte de la saturation. L'influence de la capacité a montré que la tension de sortie du générateur augmente pendant que le transitoire de celle-ci diminue. Nous avons aussi monté l'évolution de la tension lorsqu'on branche brusquement une charge résistive. Cette tension diminue brusquement. Par contre l'insertion d'une capacité en série avec la charge augmente l'énergie réactive et de fait augmente la tension de sortie du générateur.



**Le 3^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et
Renouvelables**
**The 3rd International Seminar on New and Renewable
Energies**

**Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algérie 13 et 14 Octobre 2014**



REFERENCES

- [1] <http://www.thewindpower.net/>
- [2] <http://www.sonegaz.dz/>
- [3] L.Moreau « Modélisation, Conception et commande de générateur à réluctance variable basse vitesse » Thèse de doctorat de l'université de Nantes 2005.
- [4] B.Multon,J.Bonal «les entraînements électromécaniques directs: diversité, contraintes et solutions» CEMD'99 4 février 1999-ENS Cachan-SEE.
- [5] L.Drouen, F.Scuiller, « Modèle analytique de pré-dimensionnement de machines lents à aimants de grand diamètre et à grand nombre de pôles » conférence EF 2007 ENSEEIHT, Toulouse, sep/2007
- [6] Yicheng Chen; Pragasen Pillay; Khan, A, « PM Wind Generator Comparison of Different Topologies» Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2004 IEEE. Volume 3,3-7 Oct. 2004 Page(s):1405 - 1412 vol.3 / 10.1109/IAS.2004.1348606
- [7] C. Abbey , B. Khodabakhchian , F. Zhou, «Transient Modeling and Comparison of Wind Generator Topologies» Presented at the International Conference on Power Systems Transients (IPST'05) in Montreal, Canada on June 19-23, 2005 Paper No. IPST05 – 131
- [8] Cistelecan, M.V.; Popescu, M.; « Study of the Number of Slots/Pole Combinations for Low Speed Permanent Magnet Synchronous Generators»
- [9] Electric Machines & Drives Conference, 2007. IEMDC '07. IEEE International Volume 2, 3-5 May 2007 Page(s):1616 - 1620 / 10.1109/IEMDC.2007.383671
- [10] Abdenour ABDELLI « Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive» Thèse de doctorat de l'université de L'institut National Polytechnique Toulouse 2007.
- [11] Gregory Peset «Nouvelle approche pour la prédétermination des caractéristiques externes des génératrices asynchrones fonctionnant dans le cadre de l'ilotage» mémoire présenté à l'université du Québec à Rimouski comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie. Mars 2003.
- [12] F.Poitiers « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne » Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes. décembre 2003
- [13] S. Mekhtoub, R.Ibtiouen, O.Touhami et S.Bacha « Analysis of transient current of the self-excited induction generator following disturbance on the system supply » Electrical machines and power electronics, 2007.ACEMP'07 International Aegean Conference on 10-12 Sept 2007 Page 696- 700.
- [14] M.Orabi, T.Ninomiya « Operating Performance of induction generator connected to utility grid during grid separation » Industrial Electronics, 2004 IEEE International Symposium on Volume 2, 4-7 May 2004 Page(s):1315 - 1320 vol. 10.1109/ISIE.2004.1572003
- [15] kWSeyoum, D.; Rahman, M.F.; Grantham, C.; «Terminal voltage control of a wind turbine driven isolated induction generator using stator oriented field control» Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2003.