

Commande prédictive par modèle du STATCOM et de SSSC pour le contrôle de la tension dans un réseau électrique autonome

**Gervais A. HOUNKPE HOUENOU^{1*}, K. Théophile HOUNGAN¹, Antoine VIANOU¹,
et Adolphe MOUKENGUE IMANO²**

¹ *Laboratoire d'Electrotechnique, de Télécommunication et d'Informatique Appliquée (EPAC / U.A.C),
01 BP 2009 Cotonou, Bénin*

² *Laboratoire d'Electronique, d'Electrotechnique, d'Automatique et Télécommunications, Equipe de Recherche
en Système d'Energie Electronique, Université de Douala, BP 8698 Douala, Cameroun*

* Correspondance, courriel : geramavie@gmail.com

Résumé

Ce papier présente une étude comparative des performances de deux FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems) appliquer au contrôle de la tension d'une génératrice asynchrone triphasée auto excitée dans un réseau électrique isolé. La commande prédictive par modèle MPC est le moyen de contrôle utilisé. Les indicateurs de comparaison utilisés sont les capacités de ces systèmes à stabiliser la tension aux bornes de la charge et à compenser la puissance réactive du réseau. Il s'ensuit que les performances du STATCOM (Static Compensator) sont meilleures par rapport à celles du SSSC (Static Synchronous Series Compensator) en ce qui concerne la stabilité de la tension aux bornes de la charge.

Mots-clés : *STATCOM, SSSC, génératrice asynchrone triphasée, MPC.*

Abstract

Model predictive command of the statcom and sssc for control of the voltage in an isolated grid

This paper presents a comparative study of the performance of two FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems) applied to the control voltage three-phase asynchronous generator self excited in an isolated grid. The Model Predictive Control MPC is the control method used. Comparisons indicators used are the capacities of these systems to stabilize the voltage terminal the load and to compensate reactive power of the network. It follows that performances of STATCOM (Static Compensator) are better compared to SSSC (Static Synchronous Series Compensator) with regard to the stability of the voltage terminal the load.

Keywords : *STATCOM, SSSC, self-excited induction generator, MPC.*

1. Introduction

Les génératrices asynchrones sont largement répondues pour la production de l'énergie électrique d'origine éolienne, particulièrement dans des régions isolées. La génératrice asynchrone en fonctionnement autonome n'engendre pas sa propre énergie d'excitation. Pour cette raison, il faudra lui apporter cette

énergie par une batterie de condensateurs connectés en parallèle au bobinage statorique [1 - 3]. Dans cette étude, la commande prédictive par modèle est le moyen de régulation utilisé compte tenu des performances avérées par rapport à plusieurs d'autres types de commande par exemple les commande PID, la logique floue [4]. Pour parvenir aux objectifs de cette étude, la modélisation et la simulation des deux systèmes ont été réalisées dans l'environnement MATLAB/SIMULINK et les résultats sont présentés par les courbes obtenues par ces simulations.

2. Méthodologie

2-1. Présentation des systèmes étudiés

Le système est composé d'une génératrice asynchrone triphasée auto excitée, la charge et du compensateur parallèle STATCOM *Figure 1a* d'une part et d'un SSSC d'autre part *Figure 1b*. Le compensateur STATCOM est connecté sur le réseau à travers un transformateur monté en parallèle aux bornes de la génératrice et la charge alors que celui SSSC est connecté sur le réseau à travers un transformateur en série avec l'ensemble.

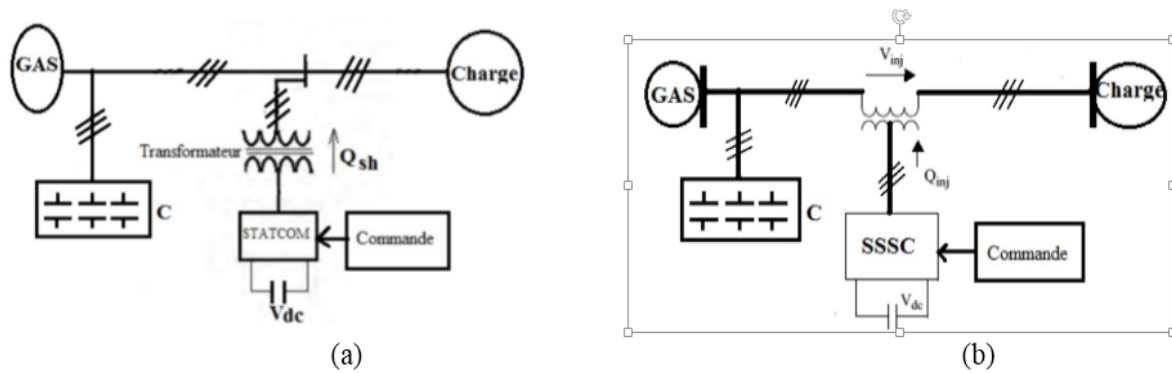


Figure1 : Présentation du système étudié

2-2. Modèle mathématique de l'ensemble du système

Les modèles mathématiques des différents systèmes dans le référentiel d - q sont présentés dans les *Equations (1) et (2)* pour la génératrice [1 - 3], *(3)* pour le STATCOM [4 - 7] et *(4)* pour le SSSC [8] :

$$\begin{cases} \frac{d\phi_{sd}}{dt} = -R_s \frac{l_r + l_m}{l_r l_m + l_s(l_r + l_m)} \phi_{sd} + \omega_s \phi_{sq} + R_s \frac{l_m}{l_r l_m + l_s(l_r + l_m)} \phi_{rd} + V_{sd} \\ \frac{d\phi_{sq}}{dt} = -\omega_s \phi_{sd} - R_s \frac{l_r + l_m}{l_r l_m + l_s(l_r + l_m)} \phi_{sq} + R_s \frac{l_m}{l_r l_m + l_s(l_r + l_m)} \phi_{rq} + V_{sq} \\ \frac{d\phi_{rd}}{dt} = R_r \frac{l_m}{l_r l_m + l_s(l_r + l_m)} \phi_{sd} - R_r C \phi_{rd} + \omega_r \phi_{rq} \\ \frac{d\phi_{rq}}{dt} = R_r \frac{l_m}{l_r l_m + l_s(l_r + l_m)} \phi_{sq} - \omega_r \phi_{rd} - R_r C \phi_{rq} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{l_r + l_m}{l_r l_m + l_s(l_r + l_m)} \Phi_{sd} - \frac{l_m}{l_r l_m + l_s(l_r + l_m)} \Phi_{rd} \\ i_{sq} = \frac{l_r + l_m}{l_r l_m + l_s(l_r + l_m)} \Phi_{sq} - \frac{l_m}{l_r l_m + l_s(l_r + l_m)} \Phi_{rq} \\ i_{rd} = \frac{l_s + l_m}{l_r l_m + l_s(l_r + l_m)} \Phi_{rd} - \frac{l_m}{l_r l_m + l_s(l_r + l_m)} \Phi_{sd} \\ i_{rq} = \frac{l_s + l_m}{l_r l_m + l_s(l_r + l_m)} \Phi_{rq} - \frac{l_m}{l_r l_m + l_s(l_r + l_m)} \Phi_{sq} \\ i_{md} = i_{sd} + i_{rd} \\ i_{mq} = i_{sq} + i_{rq} \end{cases} \quad (2)$$

où $\Phi_{sd}, \Phi_{sq}, \Phi_{rd}$ et Φ_{rq} représentent les flux statoriques et rotoriques de la génératrice asynchrone dans le référentiel dq ; $i_{sd}, i_{sq}, i_{rd}, i_{rq}, i_{md}$ et i_{mq} constituent les courants statoriques, rotoriques et de magnétisation de la génératrice ; R_s, R_r, l_s, l_r et l_m représentent les résistances et inductances du stator et rotor et l'inductance de magnétisation de la génératrice ; ω_s et ω_r sont les pulsations statorique et rotorique.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} & \omega & \frac{-m}{L_{sh}} \cos \theta_0 \\ -\omega & \frac{-R}{L_{sh}} & \frac{-m}{L_{sh}} \sin \theta_0 \\ \frac{3m}{2C} \cos \theta_0 & \frac{3m}{2C} \sin \theta_0 & \frac{-1}{R_c C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{sh}} & 0 & \frac{m}{L_{sh}} U_{DC0} \sin \theta_0 \\ 0 & \frac{1}{L_{sh}} & \frac{m}{L_{sh}} U_{DC0} \cos \theta_0 \\ 0 & 0 & \frac{3R_c m}{2} (I_{shd0} \sin \theta_0 + I_{shq0} \cos \theta_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ \theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sed} \\ I_{seq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_{se}}{L_{se}} & \omega & \frac{-m}{L_{se}} \cos \varphi_0 \\ -\omega & \frac{-R_{se}}{L_{se}} & \frac{-m}{L_{se}} \sin \varphi_0 \\ \frac{3m}{2C} \cos \varphi_0 & \frac{3m}{2C} \sin \varphi_0 & \frac{-1}{R_c C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sed} \\ I_{seq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{se}} & 0 & \frac{m}{L_{se}} U_{d0} \sin \varphi_0 \\ 0 & \frac{1}{L_{se}} & \frac{m}{L_{se}} U_{d0} \cos \varphi_0 \\ 0 & 0 & \frac{3R_c m}{2} (I_{sed} \sin \varphi_0 + I_{seq} \cos \varphi_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ \varphi \end{bmatrix} \quad (4)$$

L'indice de modulation $m = V_{DC}/V_m$ où V_{DC} est la tension côté continu et V_m l'amplitude maximale de la tension de sortie du STATCOM et du SSSC ; $U_{CD0}, \theta_0, I_{x0}$ et I_{x0} désignent la valeur des grandeurs au point de fonctionnement ; R_{se}, L_{se}, R_{sh} et L_{sh} sont les résistances et inductances de couplage des systèmes SSSC et STATCOM au réseau.

2-3. Stratégie de commande du système

2-3-1. Schémas de contrôle des systèmes

Les compensateurs série SSSC et parallèle STATCOM sont réalisés par la commande prédictive par modèle. De par sa rapidité par la prédiction, elle permet d'obtenir des réponses à temps de réponse très courte. Ce qui permet de réagir convenablement. La **Figure 2** montre le schéma de contrôle utilisé pour la commande des compensateurs concernés.

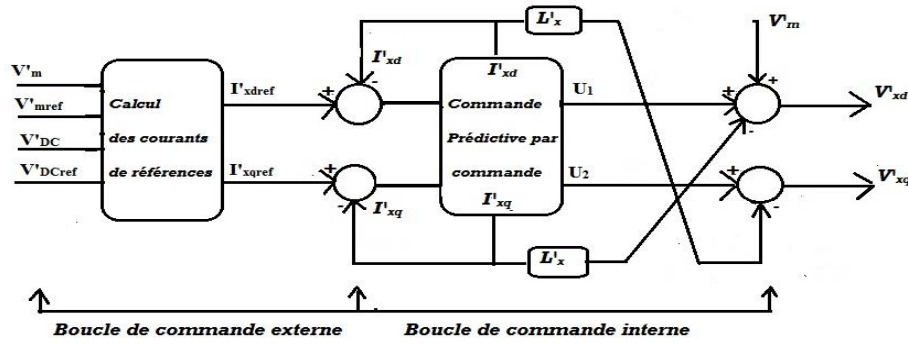


Figure 2 : Schéma de contrôle du STATCOM et de SSSC
x prend les valeurs "se" ou "sh" respectivement pour série et shunt

Les boucles externes permettent de calculer les courants de référence (I'_{xdref} , I'_{xqref}) à atteindre par la commande MPC. La MPC élabore les commandes u_1 et u_2 nécessaires pour atteindre ses valeurs de références. Les boucles internes permettent donc de calculer les tensions (V'_{xd} et V'_{xq}) à la sortie du STATCOM et du SSSC à partir de la commande élaborée par la MPC. De ce schéma de contrôle, les tensions V'_{xd} sont utilisées pour la régulation du bus continu de chaque compensateur alors que les tensions V'_{xq} assurent la régulation de la tension aux bornes de la charge alimentée par la génératrice.

2-3-2.-Aperçu de la commande prédictive par modèle

Il s'agit d'une technique basée sur la prédiction du comportement futur du processus à commander. Cette prédiction est effectuée grâce à un modèle numérique, afin de déterminer la commande optimale à appliquer pour adopter le profil de fonctionnement souhaité [9]. Considérons un modèle discret multi-variable linéaire invariant dans le temps sous forme d'état de dimension n_1 , avec m entrées et p sorties :

$$\begin{cases} x_m(k+1) = A_m x_m(k) + B_m u(k) \\ y(k) = C_m x_m(k) \end{cases} \quad (5)$$

Dans de nombreux cas, il n'est pas utile de manipuler le signal $u(k)$, mais son incrément défini par :

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$$

Le modèle incrémenté du système est définis par :

$$\begin{bmatrix} \overbrace{\Delta x_m(k+1)}^{x(k+1)} \\ y(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overbrace{A_m}^A & 0_m^T \\ C_m A_m & I_{p \times p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overbrace{\Delta x_m(k)}^{x(k)} \\ y(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \overbrace{B_m}^B \\ C_m B_m \end{bmatrix} \Delta u(k) \quad (6)$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} 0_m & I_{p \times p} \end{bmatrix}^c \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Les variables de sorties prédites sont :

$$Y = Fx(k_i) + \Phi \Delta U \quad (8)$$

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ CA^3 \\ \vdots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix}, \Phi = \begin{bmatrix} CB & 0 & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & 0 & \dots & 0 \\ CA^2B & CAB & CB & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{N_p-1}B & CA^{N_p-2}B & CA^{N_p-3}B & \dots & CA^{N_p-N_c}B \end{bmatrix}$$

$$\text{et } \Delta U = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T (\bar{R}_s r(k_i) - Fx(k_i))$$

Avec N_c horizon de commande et N_p horizon de prédiction.

3. Résultats et discussion

3-1. Simulation

La vitesse d'entraînement de la génératrice asynchrone triphasée à cage d'écureuil est de 1570 tr/mn. Les charges R-L équilibrées ont été connectées à $t = 2$ s et à $t = 5$ s. Les **Figures 3.a** et **3.b** désignent respectivement les tensions aux bornes de la génératrice à charge et le courant de magnétisation sans les compensateurs.

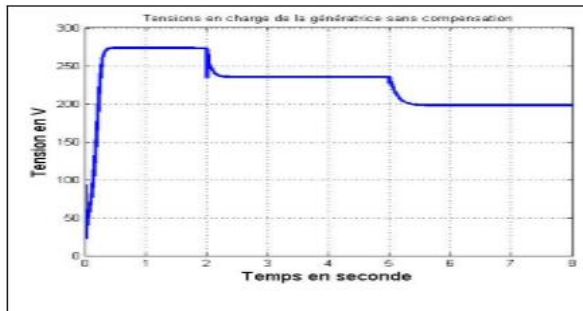


Figure 3.a : Amplitude maximale de la tension GAS

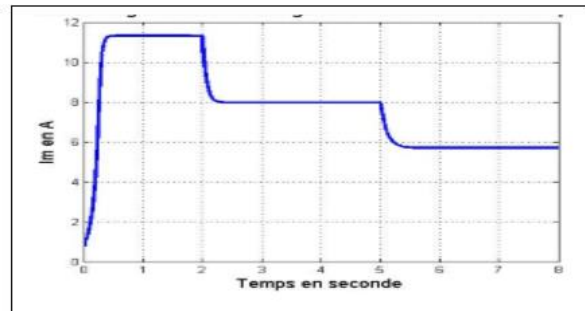


Figure 3.b : Courant de magnétisation de la génératrice

Les **Figures 4.a**, **4.b**, **4.c** et **4.d** désignent les tensions de la génératrice à charge et les courants de magnétisation avec les compensateurs STATCOM et le SSSC.

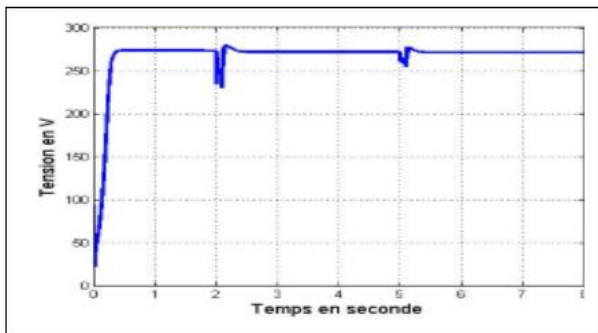


Figure 4.a : Amplitude de la tension au stator de la GAS avec le STATCOM

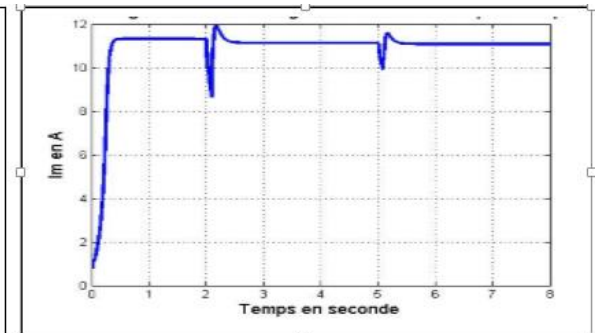


Figure 4.b : Courant de magnétisation de la génératrice avec le STATCOM

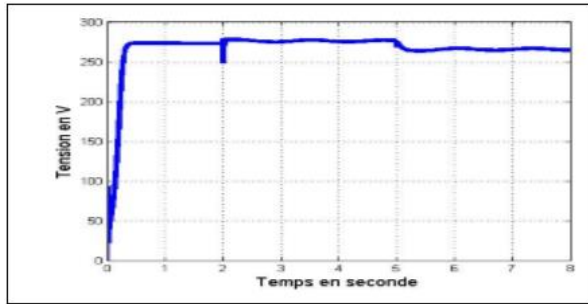


Figure 4.c : Amplitude de la tension au stator de la GAS avec le SSSC

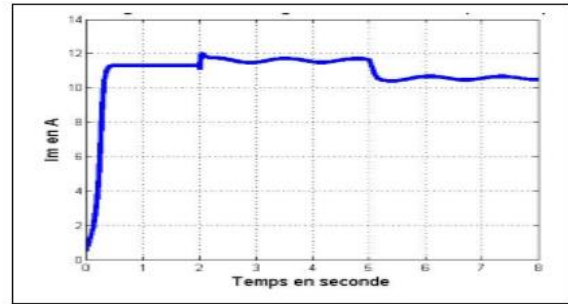


Figure 4.d : Courant de magnétisation de la génératrice avec le SSSC

Les **Figures 5.a, 5.b, 5.c** et **5.d** désignent les puissances actives et réactives au niveau du STATCOM et SSSC.

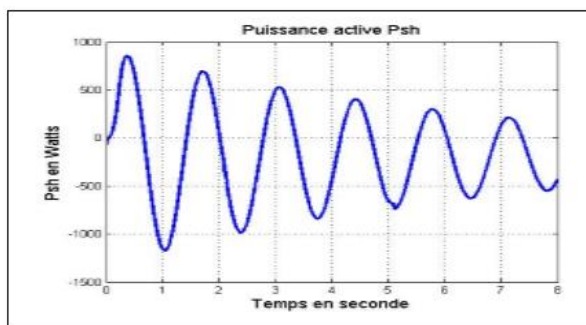


Figure 5.a : Puissance active du STATCOM

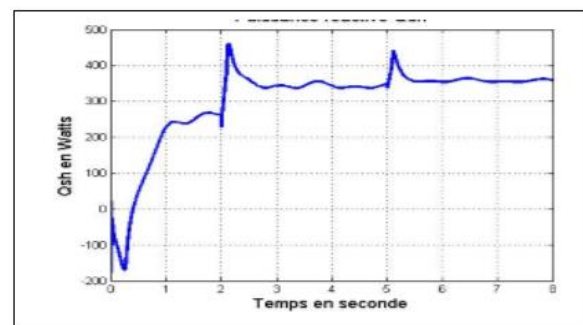


Figure 5.b : Puissance réactive du STATCOM

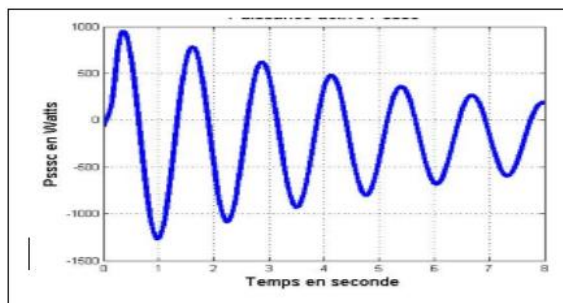


Figure 5.c : Puissance active du SSSC

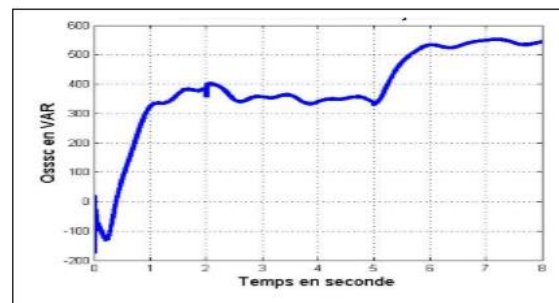


Figure 5.d : Puissance réactive du SSSC

3-2. Analyse et comparaison

Pour la simulation, les mêmes caractéristiques ont été utilisées pour le STATCOM et pour le SSSC. Lorsque la première charge a été connectée à $t = 2$ s, on remarque que le STATCOM compense la génératrice pour élever la tension aux bornes de la charge autour de sa valeur de référence (la tension à vide) alors que pour le SSSC il faut noter un dépassement. A $t = 5$ s où nous connectons la deuxième charge, le SSSC ne parvient pas à compenser l'écart de tension constaté entre la tension à vide et celle charge alors qu'au niveau du STATCOM cet écart n'est pas très perceptible. Quant aux puissances actives et réactives au niveau des deux systèmes, il est à noter que même si les puissances actives diminuent progressivement avec le temps, les puissances réactives augmentent à chaque connexion de charge ; ce qui permet de magnétiser davantage la

génératrice pour la production de l'énergie dont a besoin la charge. Dans les deux cas, le courant de magnétisation est le reflet de la tension de sortie aux bornes de la génératrice. Cela signifie donc que la connexion de la charge démagnétise la génératrice et il faut alors trouver un apport de courant pour permettre à celle-ci de pouvoir fournir une tension de niveau plus ou moins constant.

4. Conclusion et perspectives

Dans ce papier, il a été présenté les performances comparées de deux FACTS pour le contrôle de la tension dans un réseau isolé alimenté par une génératrice asynchrone auto excitée et régulé par la commande prédictive par modèle. Il en ressort alors un comportement assez acceptable du compensateur parallèle par rapport à celui en série compte tenu du fait que la tension est mieux régulée par le STATCOM. Notons que la simulation a été faite avec un système équilibré et nous devons évaluer les performances aussi dans un système déséquilibré selon la nature du déséquilibre.

Références

- [1] - F. POITIERS, *Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'utilisation de l'Energie Eolienne, Machine asynchrone à cage autonome ; Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau*, Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, (2003).
- [2] - K. IDJDARENE, D. REKIOUA, T. REKIOUA ET A. TOUNZI, *Contrôle d'une éolienne en fonctionnement autonome basée sur une génératrice asynchrone*, Revue des Energies Renouvelables CER'07 Oujda, (2007) 51 - 54.
- [3] - K. H. YOUSSEF, M. A. WAHBA, HASAN A. YOUSEF AND O. A. SEBAKHY, *A New Method for Voltage and Frequency Control of Stand-Alone Self-Excited Induction Generator Using PWM Converter with Variable DC link Voltage*, American Control Conference, (2008) 2486 - 2491.
- [4] - P. S. PONMURUGAVEL, S. M. GHOUSE, *Design and Modelling of Fuzzy and Model Predictive Controllers for STATCOM to enhance Transient Stability of Power System*, International Journal of Engineering and Technology (IJET), Vol.5, N°3 (2013) 2609 - 2619.
- [5] - A. MEKKAOU, M. LAOUER et M. YOUNES, *Etude comparative des performances d'un Statcom et d'un SVC sur la stabilité d'un parc éolien connecté au réseau électrique*, Revue des Energies Renouvelables, Vol.17, N°1 (2014) 149 - 157.
- [6] - K. R. PADIAR, *Facts Controllers in Power Transmission and Distribution*, New Age International Publishers, New Delhi, (2007).
- [7] - A. CHOUBEY, D. CHOUDHARY, *Voltage stability with the help of STATCOM*, International Journal of Scientific Research Engineering & Technology (IJSRET), (Juin 2013) p 145 - 150.
- [8] - S. RAMAMOORTHY, *Neural-Based Predictive Control Applied to FACTS Devices*, Middle-East Journal of Scientific Research, 20 (4) (2014) pp502 - 512.
- [9] - A. A. HASSAN, A. M. KASSEM, *Model Predictive Control of a Wind Driven Induction Generator Connected to the Utility Grid*, International Journal of Electrical and Power Engineering, 4 (1) (2010) 8 - 14.