

## Etude comparative des performances d'un Statcom et d'un SVC sur la stabilité d'un parc éolien connecté au réseau électrique

Ali Mekkaoui <sup>1\*</sup>, Mohammed Laouer <sup>1</sup> et Mohammed Younes <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Faculté de Technologie, LMMC

Université Dr Moulay Tahar, B.P. 138, 20000 Saïda, Algérie

<sup>2</sup> Faculté de Technologie, Université Djillali Liabes, 22000 Sidi Bel Abbes, Algérie

(reçu le 12 Janvier 2014 – accepté le 29 Mars 2014)

**Abstract** – *Maintaining stability and voltage control to an acceptable level still remains a serious problem and requires daily monitoring by managers of electrical networks. To remedy this, the FACTS devices provide an efficient and reliable solution to deal with this situation. The purpose of this article will focus on the study of the impact of two FACTS devices such shunts on an electric network; he will be the SVC and STATCOM. Simulation of individual cases of normal and abnormal functions will be studied in this present article. We try to support our choice by simulating faults in wind turbines and make statements characteristics for each FACTS and make the comparison to decide which of the two is more appropriate. The comparative study will be made by means of simulation in Matlab to support the final choice of FACT retained.*

**Résumé** – *Le maintien de la stabilité et le réglage de la tension à un niveau admissible restent toujours un problème préoccupant et nécessite un suivi quotidien de la part des gestionnaires des réseaux électriques. Pour y remédier, les dispositifs FACTS apportent une solution efficace et fiable pour faire face à cette situation. L'objectif de cet article sera focalisé sur l'étude de l'impact de deux dispositifs FACTS de type shunts sur un réseau électrique; il s'agira du SVC et du STATCOM. La simulation des différents cas de fonctionnements normal et anormal sera étudiée dans ce présent article. Nous essayerons d'appuyer notre choix par la simulation des défauts au niveau des éoliennes et de faire des relevés de caractéristiques pour chacun des FACTS et de faire la comparaison afin de décider lequel des deux est plus adapté. L'étude comparative sera faite par le moyen de simulation sous Matlab pour appuyer le choix final du FACT retenu.*

**Keywords:** SVC – STATCOM – Stability – Turbine - Compensation – Simulink.

### 1. INTRODUCTION

Ces dernières années, la production des énergies renouvelables, particulièrement celles produites par des éoliennes, prennent une place de plus en plus importante dans le réseau électrique [1].

Les déconnexions, suite aux déclenchements d'équipements de protection des parcs éoliens, ne sont pas tolérées selon les critères de connexion. Pour maintenir les éoliennes connectées au réseau sous certaines conditions de perturbations, les constructeurs sont obligés de créer de nouveaux systèmes de commande permettant de garder les éoliennes en production sur le réseau électrique.

Le parc éolien est généralement le siège de multitudes perturbations d'ordre électriques ou/et mécaniques. On peut citer les accidents mécaniques qui peuvent mettre hors service une ou plusieurs éoliennes.

---

\* [mekkaouialisaida@yahoo.fr](mailto:mekkaouialisaida@yahoo.fr) ; [laouer@yahoo.fr](mailto:laouer@yahoo.fr) ; [younesmi@yahoo.fr](mailto:younesmi@yahoo.fr)

On peut aussi envisager un fonctionnement anormal dû aux surcharges des consommateurs ou à des défauts. De ces derniers, résultent des creux de tension ou des surtensions. Les dispositifs FACTS seront utilisés pour faire face à ce problème et apportent une solution efficace et fiable [2].

## 2. MODELISATION DE LA CHAINE EOLIENNE

### 2.1 Modélisation du vent [8]

L'évolution de la vitesse du vent est représentée de façon déterministe, par une somme de plusieurs harmoniques, conformément à l'équation suivante et l'allure de variation est donnée par la figure 1.

$$V(t) = 10 + 0.2\sin(0.1047t) + 2\sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2\sin(3.6645t) \quad (1)$$

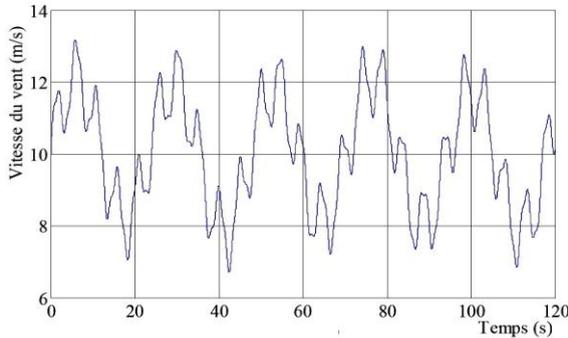


Fig. 1: Vitesse du vent en fonction du temps

### 2.2 Modélisation de la turbine [4]

A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passant par la section de la surface active  $S$  de la voilure, la puissance de l'éolienne est donnée par l'équation suivante:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \times S \times V^3 \quad (2)$$

Avec,  $\rho$ , la densité de l'air, ( $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ );  $V$ , la vitesse du vent, (m/s);  $S$ , l'aire balayée par la turbine, ( $\text{m}^2$ ).

$$S = \pi \times R^2 \quad (3)$$

Où  $R$  est le rayon de la voilure, (m).

Pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne, on utilise la vitesse réduite (spécifique)  $\lambda$ , qui est le rapport de la vitesse linéaire en bout des pâles de la turbine ramenée à la vitesse de vent, soit:

$$\lambda = \Omega \times R / V \quad (4)$$

Avec,  $\Omega$ , la vitesse de rotation, (rad/s).

### 2.3 Modélisation du multiplicateur

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain et l'expression de la vitesse de la turbine s'exprime par:

$$\Omega_{\text{turbine}} = \Omega_{\text{génératrice}} / G \quad (5)$$

Où, G représente le gain du multiplicateur.

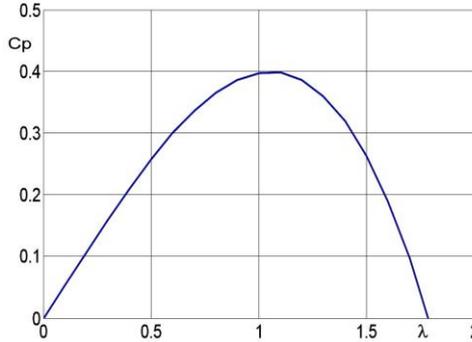


Fig. 2: Coefficient aérodynamique de puissance

### 2.4 Modélisation de l'arbre de la machine [4]

L'équation différentielle qui caractérise le comportement mécanique de l'ensemble turbine et génératrice est donnée par l'équation suivante:

$$(J_t + J_m) \times d\Omega / dt = C_{eol} - C_{em} - (f_m - f_t) \times \Omega \quad (6)$$

Avec,  $J_t$ , Inertie de la turbine;  $J_m$ , Inertie de la machine;  $f_m$ , Coefficient de frottement de la machine;  $f_t$ : Coefficient de frottement des pâles et  $C_{eol}$ , le couple statique fournie par l'éolienne.

### 2.5 Modélisation de la machine asynchrone

Le modèle classique de la machine asynchrone à cage dans le repère de Park, est le suivant:

Stator

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s \times i_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega_s \times \phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s \times i_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \omega_s \times \phi_{ds} \end{cases} \quad (7)$$

Rotor

$$\begin{cases} v_{dr} = 0 = R_r \times i_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - \omega_r \times \phi_{qr} \\ v_{qr} = 0 = R_r \times i_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + \omega_r \times \phi_{dr} \end{cases} \quad (8)$$

Avec:  $[\phi_{sd}, \phi_{sq}]$ ;  $[V_{sd}, V_{sq}]$ ;  $[i_{sd}, i_{sq}]$  qui représentent respectivement les composantes du flux, de la tension et du courant statoriques dans le repère de Park, et  $[\phi_{rd}, \phi_{rq}]$ ;  $[i_{rd}, i_{rq}]$  qui représentent respectivement les composantes du flux et du courant rotoriques dans le repère de Park.

### 3. DESCRIPTION DES DISPOSITIFS FACTS

#### 3.1 Static Synchronous Compensator, 'STATCOM' [5]

Le STATCOM (Static Synchronous Compensator) est un convertisseur de tension à base de GTO ou des IGBT alimentés par des batteries de condensateurs. L'ensemble est connecté parallèlement au réseau à travers un transformateur de couplage (Fig. 3):

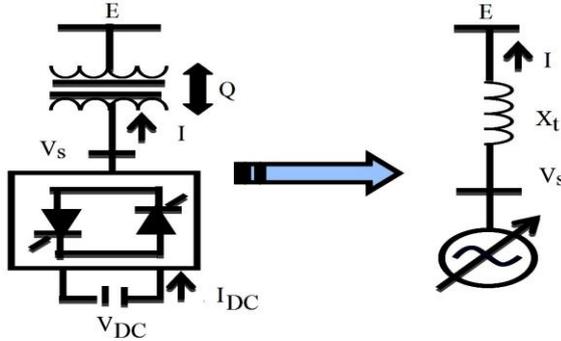


Fig. 3: Modèle équivalent d'un STATCOM

Le STATCOM est capable de délivrer une puissance réactive même si la tension au niveau des jeux de barres, est très faible. D'après sa caractéristique, on constate que le courant maximal du STATCOM est indépendant de la tension du nœud [3].

L'équation (9) de la puissance réactive, décrit le transfert de cette dernière avec le réseau électrique [7].

$$Q_{sh} = \frac{|V_k|^2}{X_{sh}} - \frac{|V_k||V_{sh}|}{X_{sh}} \times \cos(\theta_k - \theta_{sh}) = \frac{|V_k|^2 - |V_k||V_{sh}|}{X_{sh}} \quad (9)$$

Si  $|V_k| > |V_{sh}|$  alors  $Q_{sh}$  devient positive et le STATCOM absorbe de la puissance réactive.

Si  $|V_k| < |V_{sh}|$  alors  $Q_{sh}$  devient négative et le STATCOM fournit de la puissance réactive.

#### 3.2 Static Var Compensator, 'SVC'

Le SVC (Static Var Compensator) est un dispositif qui sert à maintenir la tension en régime permanent et en régime transitoire à l'intérieur des limites désirées. Il injecte de la puissance réactive dans la barre où il est branché de manière à satisfaire la demande de puissance réactive de la charge [6].

La figure 4 représente le modèle équivalent d'un SVC. Il est composé d'un condensateur de réactance ' $X_C$ ' dont la puissance réactive fournie, peut être complètement enclenchée ou complètement déclenchée et d'une bobine d'induction de réactance inductive ' $X_L$ ', dont la puissance réactive absorbée est commandée entre zéro et sa valeur maximale.

Les thyristors sont montés en tête-bêche pour assurer des inversions très rapides du courant [5].

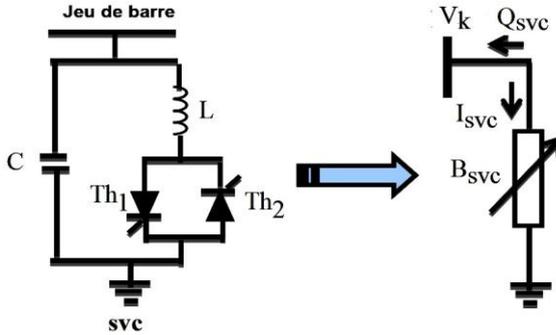


Fig. 4: Modèle équivalent d'un SVC

La puissance réactive ' $Q_{SVC}$ ' est positive lorsqu'elle est absorbée par le compensateur (comportement inductif), le courant d'entrée  $I$  est un courant réactif, il est supposé positif lorsqu'il est retardé de  $90^\circ$  par rapport à la tension  $V_{SVC}$ . Si par contre, le compensateur fournit de la puissance réactive (comportement capacitif), cette dernière est considérée comme étant négative, ainsi que le courant  $I$  [3]. La puissance réactive ' $Q_{SVC}$ ' varie entre une valeur inductive ' $Q_{ind}$ ' et une valeur capacitive ' $Q_{cap}$ ' [7].

Avec,

$$Q_{cap} = V_{SVC}^2 / X_C \quad (10)$$

On obtient alors la réactance capacitive  $X_C$  nécessaire pour le condensateur. De la relation suivante, on peut déterminer la réactance  $X_L$  de la bobine d'inductance.

$$Q_{ind} = (V_{SVC}^2 / X_L) - (V_{SVC}^2 / X_C) \quad (11)$$

## 4. SIMULATION DU SYSTEME

### 4.1 Fonctionnement normal

Dans un premier temps, nous allons présenter le fonctionnement normal du parc éolien illustré par les figures 5 et 6 et voir l'effet des deux types de FACTS sur le maintien de la tension.

Les courbes de la figure 7 décrivent le comportement des différents éléments du parc éolien en fonctionnement normal.

Pour notre système muni de STATCOM, on remarque que la puissance active générée commence à augmenter en douceur (avec la vitesse du vent) pour atteindre sa valeur nominale qui est de 6 MW au bout de 12 s. La puissance réactive absorbée par le jeu de barre est de l'ordre de 1 Mvar pour une vitesse du vent de 11 m/s.

La tension au nœud de connexion atteint sa valeur nominale de 1 pu, donc le STATCOM a une meilleure réponse dans les régimes transitoires (il est plus rapide).

Concernant notre système muni de SVC, on remarque que la puissance active générée atteint sa valeur nominale qui est de 6 MW au bout de 12 s, mais pendant la phase de démarrage elle atteint un pic 7.8 MW. La puissance réactive absorbée par le nœud de connexion est de l'ordre de 0.5 M avec un pic au démarrage de l'ordre de 11

Mvar, La tension au nœud de connexion atteint sa valeur nominale de 1 pu au bout de 1 seconde.

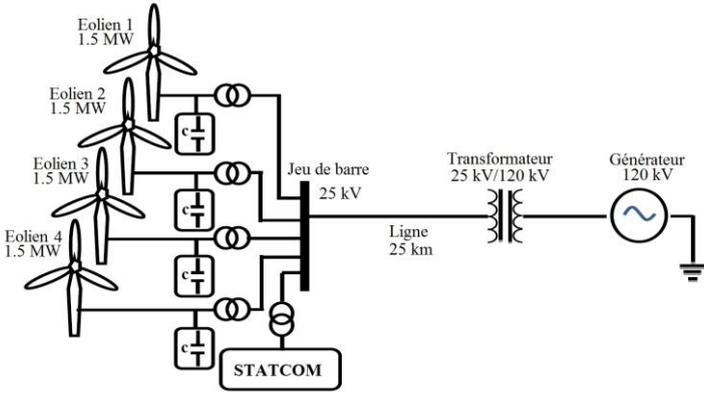


Fig. 5: Représentation d'un système muni d'un STATCOM

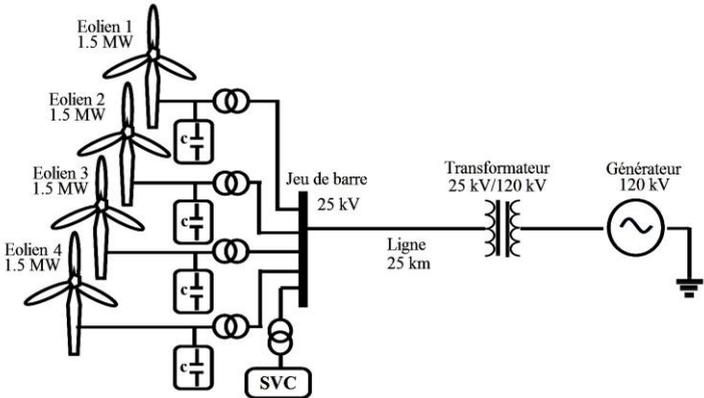
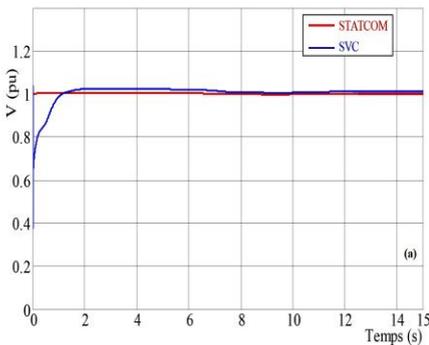
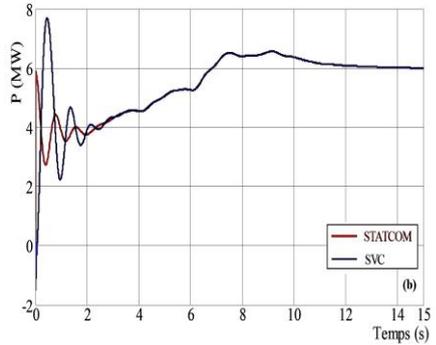


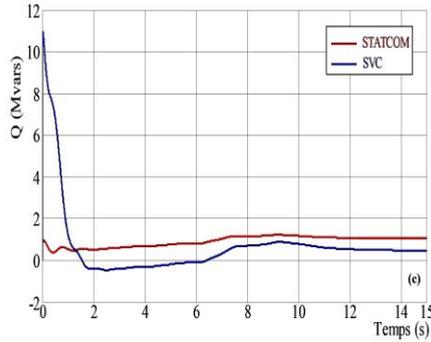
Fig. 6: Représentation d'un système muni d'un SVC



7.a- Tension au nœud de connexion



7.b- Puissance active



7.c- Puissance réactive

Fig. 7: Résultats de simulation- cas (a)

#### 4.2 Fonctionnement en présence de défaut

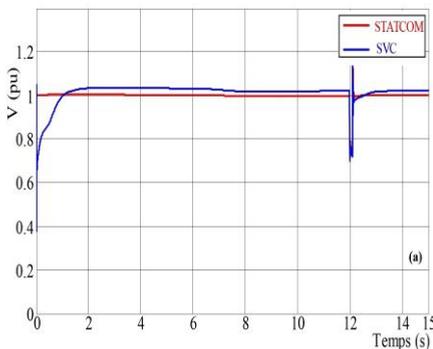
Dans un second temps, nous allons simuler un défaut (court-circuit biphasé) au niveau des éoliennes 3 et 4. Les courbes obtenues dans la figure 8 donnent les résultats de simulation respectivement du SVC et du STATCOM.

A  $t=12\text{ s}$ , un défaut entre phases est appliqué à la sortie des éoliennes 3 et 4. A  $t=12.11\text{ s}$ , le système de protection des éoliennes 3 et 4 est activé et se déconnecte du système. Les éoliennes 1 et 2 continuent à produire de l'énergie 1.5 MW chacune.

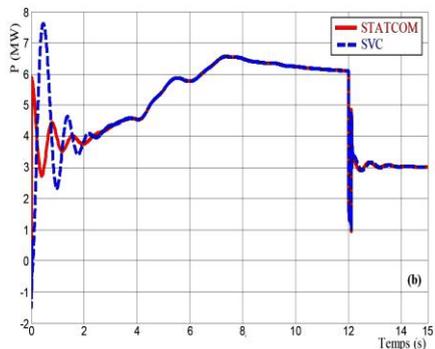
On remarque que la tension au nœud de connexion reste aux alentours de 1 pu avec une meilleure réponse en régime dynamique pour le STATCOM et que la puissance active chute de 6 MW à 3 MW, la puissance réactive est aux alentours de 0.73 Mvar pour le STATCOM et de l'ordre de 0.1 Mvar pour le SVC.

La simulation nous montre clairement que le STATCOM a une performance meilleure que le SVC dans les réseaux de distribution d'énergie.

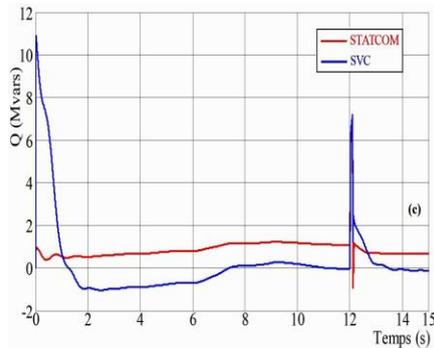
Le STATCOM avec son apport en énergie réactive permet de stabiliser la tension à une valeur relativement constante, malgré l'existence du défaut dans le parc éolien.



8.a- Tension au nœud de connexion



8.b- Puissance active



8.c- Puissance réactive

Fig. 8: Résultats de simulation- cas (b)

Pour conclure, un **Tableau** comparatif des performances des deux dispositifs de systèmes de transmission flexible en courant alternatif, 'FACTS', le SVC et le STATCOM est établi comme suit:

**Tableau 1:** Comparatif entre SVC et STATCOM

SVC	STATCOM
Génère plus d'harmoniques	Génère moins d'harmoniques
Réponse lente au cours des régimes transitoires	Meilleure réponse, lors des régimes transitoires
Capacité de compensation du SVC diminue à raison que la tension du service diminue	Le STATCOM est capable de fournir son courant nominal, même lorsque la tension est presque nulle.
Le SVC est une admittance 'inductive ou capacitive' shunte contrôlée.	Le STATCOM est une source de tension synchronisée en shunt avec le réseau électrique.

## 5. CONCLUSION

Le rôle des dispositifs FACTS comme le SVC et le STATCOM dans l'amélioration de la performance du système est bien spécifié. L'amélioration de la stabilité, l'amortissement des oscillations de puissance, la régulation de la tension, l'augmentation de la puissance de transmission en fournissant une énergie réactive afin de stabiliser la tension après l'apparition d'un défaut, sont considérés comme des facteurs d'amélioration d'importance capitale.

Les résultats de simulations montrent clairement que le parc éolien est beaucoup plus performant en qualité de stabilité de tension, lorsqu'il est muni d'un STATCOM avant, pendant et après le défaut.

Avant le défaut, le comportement des deux systèmes de transmission, 'FACTS' présente une différence au niveau du régime transitoire (une meilleure réponse du STATCOM par rapport au SVC).

Pendant le défaut (cas d'un court-circuit), le STATCOM réagit en faveur du maintien de la stabilité du réseau électrique entier contrairement au SVC qui fait apparaître plus qu'un inconvénient et surtout pendant la durée du défaut.

Enfin, nous pouvons dire que la présence du STATCOM dans un parc éolien, lorsque ce dernier est connecté au réseau électrique, est plus qu'indispensable pour assurer et garantir d'une part la stabilité du système entier et d'autre part une continuité de service même en présence de fortes perturbations.

En perspective, il faut prévoir une étude technico-économique sur d'autres dispositifs, comme des systèmes de transmission flexible en courant alternatif, 'FACTS' pour arriver au choix pertinent de l'équipement correspondant.

## REFERENCES

- [1] B. Robyns, A. Davigny, C. Saudemont, A. Ansel, V. Courtecuisse, B. François, S. Plumel et J. Deuse, '*Impact de l'Eolien sur le Réseau de Transport et la Qualité de l'Energie*', Journée de la Section Electrotechnique du Club EEA, Journal sur l'enseignement des Sciences et Technologies de l'Information et des Systèmes, J3eA, Vol 5, Hors Série1, Juin 2006.
- [2] L. Qi, J. Langston and M. Steurer, '*Applying a STATCOM for Stability Improvement to an Existing Wind Farm with Fixed-Speed Induction Generators*', IEEE Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21<sup>st</sup> Century, 2008 IEEE, pp. 1 - 6, 20-24 July 2008.
- [3] Roohollah Fadaeinedjad and Gerry Moschopoulos, '*Using STATCOM to Mitigate Voltage Fluctuations Due to Aerodynamic Aspects of Wind Turbines*', IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC 2008, pp. 3648 -3654, 15-19 June 2008.
- [4] O. Stanescu, D. Bolborgci and S. Oprea, '*Modeling of Wind Power Plants Generators in Transient Stability Analysis*', Journal of Sustainable Energy, Vol. 3, N°4, December, 2012.
- [5] Y.A. Mobarak, '*SVC, STATCOM, and Transmission Line Rating Enhancements on Induction Generator Driven by Wind Turbine*', International Journal of Electrical Engineering & Technology, 'IJEET', Vol. 3, N°1, pp. 326 – 343, 2012.
- [6] C.A. Canizares, '*Power Flow and Transient Stability Models of FACTS controllers for Voltage and Angle Stability Studies*', IEEE/PES WM Panel on Modeling, Simulation and Applications of Flexible AC Transmission Systems 'FACTS' Controllers in Angle and Voltage Stability Studies, Singapore, 2000.
- [7] J. Dixon and J. Rodriguez, '*Reactive Power Compensation Technologies: State-of the-Art Review*', Proceedings of the IEEE, Vol. 93, N°12, pp. 2144 - 2164, 2005.
- [8] V. Akhmatov, H. Knudsen, A.H. Nielsen, J.K. Pedersen and N.K. Poulsen, '*A Dynamic Stability Limit of Grid Connected Induction Generators*'. Proceedings International IASTED Conference on Power and Energy Systems, Marbella, Spain, 2000.