

Régulation de la puissance d'une éolienne asynchrone à vitesse variable à l'aide d'un compensateur statique d'énergie réactive (SVC)

Taoufik Ouchbel^{*}, Smail Zouggar[†], Mohammed Seddik,
Mohamed Oukili et Mohamed Larbi El Hafyani

Laboratoire de Génie Electrique et Maintenance, LGEM
Ecole Supérieure de Technologie d'Oujda
Université Mohammed 1^{er}, B.P. 473, Oujda, Maroc

(reçu le 13 Septembre 2011 – accepté le 30 Septembre 2012)

Résumé - Dans cet article, nous étudions le contrôle de la puissance à la sortie d'un système éolien composé d'une éolienne asynchrone connectée à un convertisseur AC/DC, un convertisseur statique SVC (Static Var Compensation) et à une charge résistive. Ce dispositif est destiné à une application de conversion d'énergie éolienne dans le cas d'un site isolé. A l'aide d'un compensateur statique d'énergie réactive SVC, nous présentons une loi de commande qui permet de réguler la puissance de sortie du système éolien en dépit d'une variation brusque de la vitesse du vent, de la charge et de la capacité d'excitation. Les résultats de simulation présentés et discutés montrent que la puissance de sortie est asservie à la valeur de référence.

Abstract - In this paper, we are studying the control of the power of a system composed of an asynchronous wind turbine connected to a converter AC / DC, a Static VAR Compensator (SVC) and a resistive load. This device is intended for the application of wind energetic conversion in the case of an isolated site. Using a static VAR compensator (SVC), we present a control law which regulates the power of the wind system despite a sudden change of wind speed and load. The simulation results presented and discussed show that the output power is controlled at the desired value.

Mots clés: Système éolien - Modélisation - Régulation - Compensateur statique d'énergie (SVC).

1. INTRODUCTION

Les éoliennes asynchrones sont largement utilisées pour la production de l'énergie électrique dans des régions isolées. En fonctionnement autonome, elles ne produisent que de l'énergie active. Pour cette raison, qu'il faudra lui fournir cette énergie par des batteries de condensateurs connectés en parallèle aux bornes statoriques de la génératrice asynchrone.

Ce travail est divisé en deux parties:

Dans un premier temps, grâce aux essais expérimentaux, nous avons modélisé, en régime transitoire et simulé, dans l'environnement Matlab / Simulink, un système éolien isolé composé de: turbine, multiplicateur, arbre, machine asynchrone auto-excitée de 1.5 kW, convertisseurs statique AC-DC, filtre LC et la charge [1, 2, 4, 10].

Toutefois, en fonctionnement autonome, la vitesse de rotation et la charge n'étant pas fixes, la puissance de sortie peut varier dans de grandes proportions. Il devient alors

^{*} ced_ouchbel@yahoo.fr

[†] zouggar@est.univ-oujda.ac.ma

nécessaire d'utiliser un système de régulation approprié afin de maintenir cette puissance à une valeur constante [3, 5, 6].

Pour maintenir la puissance de sortie constante dans un environnement dynamique, nous développons dans la deuxième partie une nouvelle loi de commande à base d'un convertisseur statique SVC [11].

Enfin, dans la dernière partie de ce papier, nous présentons des résultats de simulation, utilisant cette stratégie lors de variations de la vitesse du vent et de la charge et la capacité d'excitation de la SEIG.

2. MODELISATION DU SYSTEME EOLIEN ISOLE

Le système global étudié est constitué d'une turbine éolienne comprenant 3 pales de longueur R , entraînant une génératrice asynchrone à travers un multiplicateur de vitesse de gain M .

2.1 Modèle de la turbine

La puissance du vent est définie par:

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

avec, ρ , la densité de l'air, R , la longueur de la pale et V , la vitesse du vent.

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine est donnée par:

$$P_{aer} = C_p(\lambda) \times \frac{\rho \times \pi \times R^2 \times V^3}{2} \quad (2)$$

tel que, C_p représentant le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Le ratio de vitesse λ est le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \times R}{V} \quad (3)$$

avec, $\Omega_{turbine}$, la vitesse de rotation mécanique de la turbine. Pour la turbine utilisée dans cette étude, le coefficient de puissance C_p est approché par la formule suivante [7]:

$$C_p(\lambda) \approx \frac{G \times \lambda \times (\lambda_0 - \lambda)}{a^2 + (\lambda_0 - \lambda)^2} \quad (4)$$

La figure 1 représente l'évolution du coefficient $C_p(\lambda)$ {eq. 4} en fonction de λ .

G	0.19
λ_0	8.08
A	1.56

En utilisant l'équation précédente, nous avons déduit le couple aérodynamique, selon l'équation (5):

$$C = \frac{P_{\text{aer}}}{\Omega_{\text{turbine}}} = C_p(\lambda) \times \frac{\rho \times S \times V^3}{2} \times \frac{1}{\Omega_{\text{turbine}}} \quad (5)$$

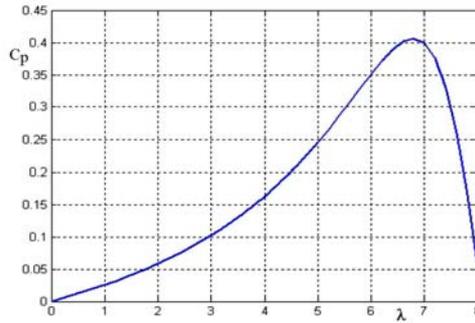


Fig. 1: Evolution de la fonction $C_p(\lambda)$

2.2. Modèle du Multiplicateur

Le couple de la génératrice est donné par l'équation (6) et la vitesse de rotation mécanique apparue sur l'arbre de la génératrice par l'équation (7).

$$G_g = \frac{C_{\text{aer}}}{M} \quad (6)$$

$$\Omega_{\text{turbine}} = \frac{\Omega_{\text{mec}}}{M} \quad (7)$$

avec, M le rapport de multiplication.

2.3 Equation dynamique de l'arbre

L'équation (8) représente l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice

$$J = \frac{J_{\text{turbine}}}{M^2} + J_g \quad (8)$$

$$J \frac{d\Omega_{\text{mec}}}{dt} = C_{\text{mec}} \quad (9)$$

$$C_{\text{mec}} = C_g - C_{\text{em}} - C_{\text{vis}} \quad (10)$$

$$C_{\text{vis}} = f \times \Omega_{\text{mec}} \quad (11)$$

avec, C_{mec} , le couple mécanique, C_{em} , le couple électromagnétique produit par la génératrice et C_{vis} , le couple de frottement visqueux.

Le schéma du modèle de l'équation mécanique est donné par la figure 2.

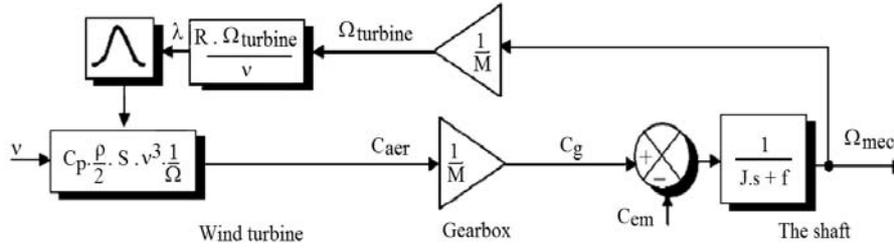


Fig. 2: Schéma bloc du model de la turbine

2.4 Modèle de la génératrice asynchrone auto-excitée (Self-Excited Induction Generator SEIG)

Le modèle classique de la machine asynchrone dans le repère de Park, adopté dans cette étude est le suivant:

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s \times i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \times \phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s \times i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} - \omega_s \times \phi_{ds} \\ v_{dr} = R_r \times i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \times \phi_{qr} \\ v_{qr} = R_r \times i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \times \phi_{dr} \end{cases} \quad (12)$$

tel que, v_{ds} , v_{qs} , v_{dr} , v_{qr} , i_{ds} , i_{qs} , i_{dr} , v_{qr} sont respectivement les tensions et les courants à la sortie de la génératrice dans le modèle de Park.

R_r , R_s , L_r et L_s sont respectivement les résistances et les inductances statorique et rotorique et L_m l'inductance magnétisante.

$$\omega = p \times \Omega_{mec} \quad \text{où } p \text{ est le nombre de paire de pôles.}$$

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s \times i_{ds} + L_m \times i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s \times i_{qs} + L_m \times i_{qr} \\ \phi_{dr} = L_r \times i_{dr} + L_m \times i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r \times i_{qr} + L_m \times i_{qs} \end{cases} \quad (13)$$

Le couple électromagnétique est donné selon la formule suivante:

$$C_{em} = p \times (\phi_{ds} \times i_{qs} - \phi_{qs} \times i_{ds}) \quad (14)$$

2.4.1 En régime permanent

La génératrice 'SEIG' est modélisée en régime permanent à l'aide du schéma équivalent par phase suivant, (Fig. 3).

Le modèle linéaire de la 'SEIG' considère que l'inductance magnétisante est constante, ce qui n'est pas tout à fait vrai, parce que le matériau magnétique utilisé par

la machine n'est pas parfaitement linéaire. Il est très indispensable de tenir compte de l'effet de la saturation du circuit magnétique, c'est-à-dire l'effet de la variation de l'inductance magnétisante sur le fonctionnement de la 'SEIG'.

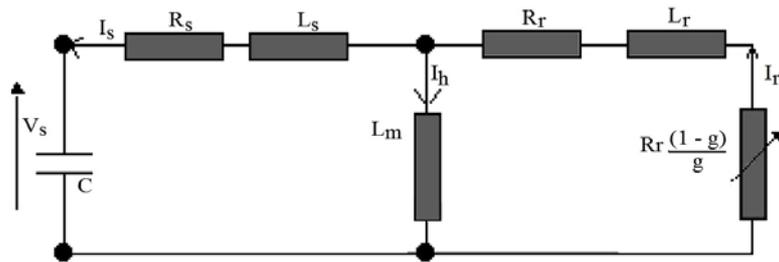


Fig. 3: Schéma équivalent monphasé de la SEIG

Afin d'approcher l'inductance magnétique caractérisant la machine asynchrone (l'ensemble des points expérimentaux de L_m , Fig. 4) par une fonction mathématique, nous avons utilisé une méthode d'approximation.

La courbe expérimentale de l'inductance magnétique est divisée en trois parties:

$$L_m = \begin{cases} L_m = Cte = 0.25 \times H & \text{for } 0 \leq I_h \leq 0.9 \\ L_m = 0.13 + 0.126 \times \exp(-0.08 \times (I_h - 1)^2) & \text{for } 0.9 \leq I_h \leq 4.034 \\ L_m = -\frac{2}{I_h^2} + \frac{1.27}{I_h} + 4.03 \times 10^{-3} & \text{for } I_h > 4.034 \end{cases} \quad (15)$$

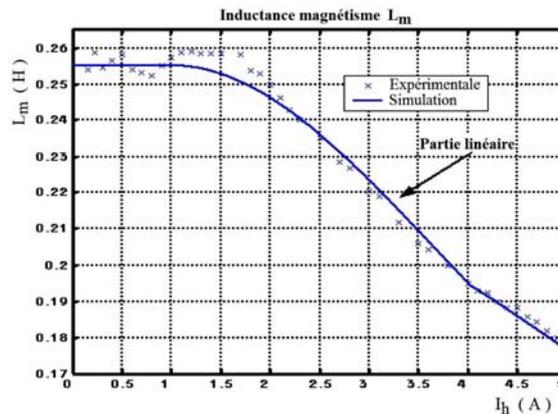


Fig. 4: Inductance magnétique en fonction du courant magnétisant

2.4.2 En régime transitoire

Le régime transitoire de la 'SEIG' est représenté par la figure 5 suivante.

En tenant compte des conditions initiales pour le processus d'auto-excitation et à l'aide de la transformation de Park. Le régime transitoire de la SEIG est représenté par la matrice ci-après.

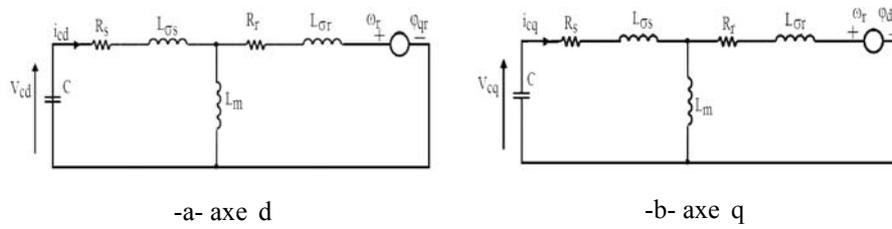


Fig. 5: d – q mode of the SEIG at no-load

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + sL_s + \frac{1}{sC} & 0 & sL_m & 0 \\ 0 & R_s + sL_s + \frac{1}{sC} & 0 & sL_m \\ sL_m & -\omega_r L_m & R_r + sL_r & -\omega_r L_r \\ \omega_r L_r & sL_m & \omega_r L_r & R_r + sL_r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{rs} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{coq} \\ V_{cod} \\ K_q \\ K_d \end{bmatrix} \quad (16)$$

K_q et K_d sont des constantes qui représentent respectivement la tension induite initiale le long des axes (d, q).

V_{coq} et V_{cod} sont les tensions initiales aux bornes du condensateur sur les deux axes (d, q).

A partir de cette matrice, nous pouvons établir un modèle mathématique de la génératrice asynchrone que nous utilisons dans la simulation du système éolienne.

3. MODELISATION DE COMPENSATEUR (SVC)

3.1 Généralité

Le 'SVC' injecte de la puissance réactive dans la barre où il est branché de manière à satisfaire la demande de puissance réactive de la machine asynchrone et de la charge.

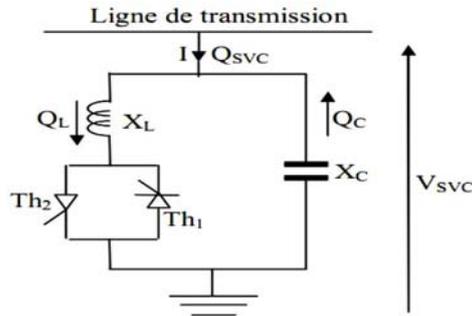


Fig. 6: Représentation schématique monophasée d'un compensateur Statique

L'inductance équivalente X_V de la 'SVC' est donnée par:

$$X_V = X_L \times \frac{\pi}{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha} \quad (17)$$

avec α , l'angle d'amorçage des interrupteurs électroniques de la 'SVC'.

L'impédance équivalente totale de la commande peut être représentée comme suit

$$X_e = X_c \times \frac{\pi/\Gamma_x}{\sin 2\alpha - 2\alpha + \pi(2 - 1/\Gamma_x)} \quad (18)$$

Avec, $r_x = X_c / X_L$ (19)

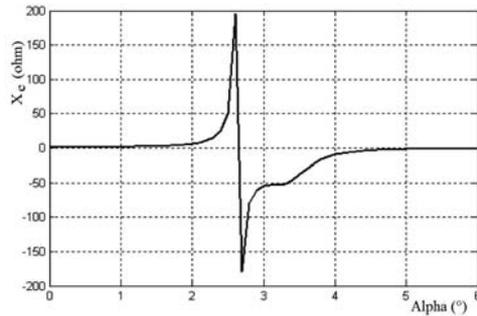


Fig. 7: Evolution de l'impédance équivalent de la 'SCV' en fonction de la variation de l'angle d'amorçage α pour $C = 60 \mu\text{F}$, $L = 8,43 \text{ mH}$

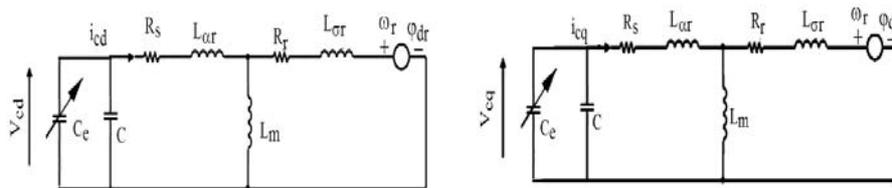
3.2 Modèle de la SVC

Les équations qui représentent la 'SVC' en parallèle avec la capacité d'excitation sont données sous forme matricielle:

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{s(C_e + C)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{s(C_e + C)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ \phi_{rd} \\ \phi_{rq} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Le filtre 'SVC' joue le rôle d'un condensateur variable.

Le modèle de la 'SEIG' et le filtre 'SVC' est donné par la figure 8. Le filtre 'SVC' dans ce cas, joue le rôle d'une capacité variable selon la valeur de α .



-a- axe d

-b- axe q

Fig. 8: Schéma équivalent de la SEIG avec le SVC

4. SIMULATION DY SYSTEME EOLIENNE AVEC LE (SVC)

4.1 Schéma synoptique du système éolien

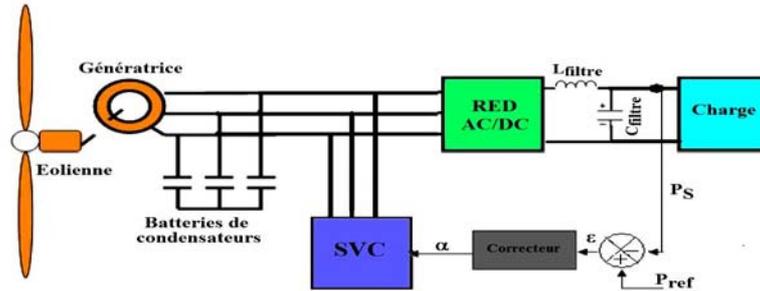


Fig. 9: Schéma synoptique d'un système éolien avec un SVC et sa commande

La capacité d'excitation globale utilisée dans ce système est divisée en deux parties:

- Capacité fixe pour assurer un minimum d'amorçage de la génératrice asynchrone.
- Capacité variable réalisée à l'aide du SVC.

4.2 Paramètres de simulation

Les éléments caractéristiques de tout le système sont donnés dans les **Tableaux** suivants:

Génératrice	
$R_S = 5.51 \Omega$	$R_r = 2.24 \Omega$
$l_s = 0.022 \text{ H}$	$l_r = 0.022 \text{ H}$
$L_m = 0.123 \text{ H}$	$p = 2$
Turbine	
$J_{\text{turbine}} = 0.436 \text{ kgm}^2$	$J_g = 0.0063 \text{ kgm}^2$
$M = 3.9$	$\rho = 1.225$
$f = 0.0063 \text{ Nms}^{-1}$	$R = 1.8 \text{ m (pale)}$
SVC	
$C_s = 60 \mu\text{F}$	$L_s = 8.43 \text{ mH}$
Filtre LC	
$C_{\text{filtre}} = 2200 \mu\text{F}$	$L_{\text{filtre}} = 9 \text{ mH}$

4.3 Structure et fonctionnement de la commande

Pour déterminer la loi de commande, nous traçons la puissance de sortie du système éolien en boucle ouverte en fonction de l'angle d'amorçage des interrupteurs du SVC.

La figure 10 illustre l'évolution de la puissance de sortie en fonction de l'angle α pour une vitesse, capacité d'excitation et une charge données.

L'objectif de la commande proposée est de maintenir la puissance constante aux bornes du système éolien (SEIG, AC/DC, SVC et la charge).

Cela ne peut se faire que si nous faisons varier la valeur de la capacité C_e (capacité variable réalisé par le compensateur SVC) pour chaque variation de la vitesse V du vent, la capacité d'excitation et de la charge RL . Cette capacité fictive peut augmenter ou diminuer en jouant sur l'angle α d'amorçage des interrupteurs de SVC.

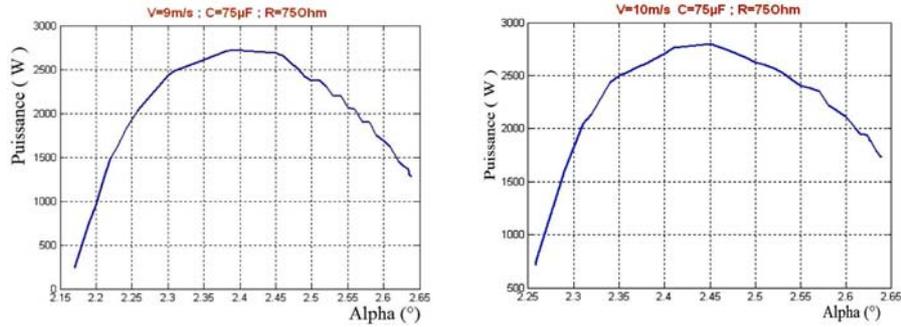


Fig. 10: Evolution de la puissance de sortie en fonction de l'angle d'amorçage α des interrupteurs électronique de la SVC

La figure 11, représente le schéma synoptique du modèle de la commande. Cette commande est caractérisée par sa simplicité.

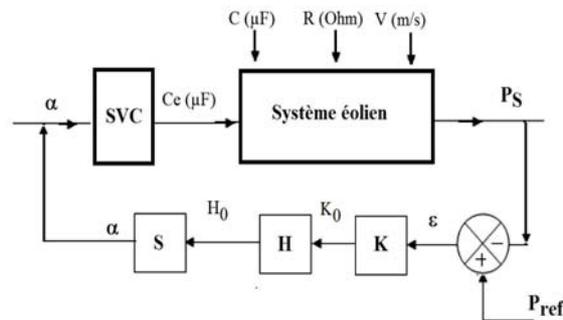


Fig. 11: Schéma de l'adaptateur de puissance

Les fonctions de transferts des différents éléments du correcteur de la figure 11 sont:

K : Correcteur Proportionnel Intégrateur PI

$$K(P) = \frac{K_0(P)}{\varepsilon(P)} = \frac{A_0}{1 + \tau \times p} \quad (21)$$

H : Correcteur Intégrateur

$$H(P) = \frac{H_0(P)}{K_0(P)} = \frac{1}{\tau_1 \times p} \quad (22)$$

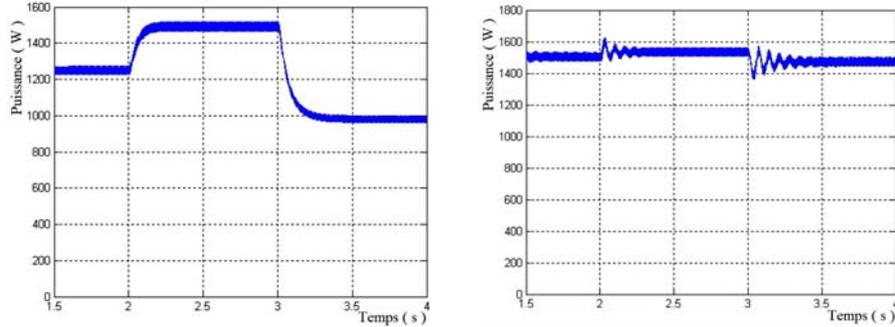
S : Comparateur

$$S(P) = \frac{\alpha(P)}{H_0(P)} \quad (23)$$

4.4 Résultats de simulation du fonctionnement du système éolien

Les courbes de la figure 12 illustrent les résultats de simulation, dans Matlab/Simulink de la puissance à la sortie aux bornes de la charge du système éolien sans et avec correcteur, lorsque la vitesse du vent varie.

Les courbes de la figure 13 représentent les résultats de simulation de la puissance à la sortie, lorsque la capacité C d'excitation de la génératrice asynchrone varie brusquement.

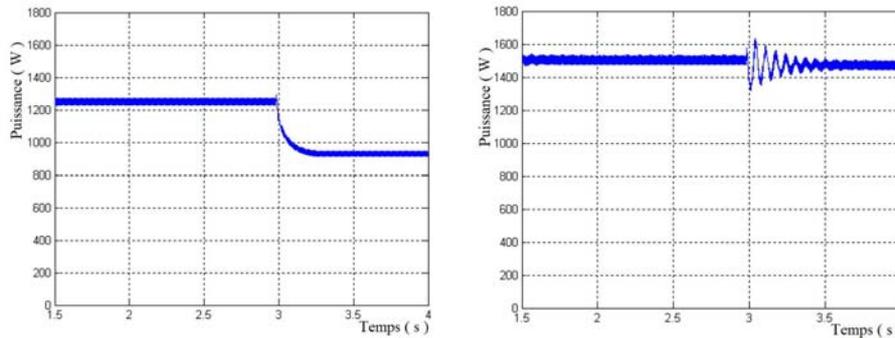


a- Evolution de la puissance de sortie sans adaptation en fonction de la variation de la vitesse du vent

b- Evolution de la puissance de sortie avec adaptation en fonction de la variation de la vitesse du vent.

Fig. 12: Evolution de la puissance de sortie sans et avec adaptation de l'énergie réactive d'excitation avec une augmentation et diminution brutale de la vitesse du vent

$$A_0 = 2.7 \times 10^{-3}, \quad \tau = 12.69, \quad \tau_1 = 0.0423, \quad S = 1.3 \times 10^{-3}$$



a- Evolution de la puissance de sortie avec une diminution brutale de la capacité d'excitation à partir de 75 μF sans adaptation

b- Evolution de la puissance de sortie avec adaptation et avec une diminution brutale de la capacité d'excitation à partir de 75 μF

Fig. 13: Evolution de la puissance de sortie sans et avec adaptation de l'énergie réactive d'excitation avec une diminution brutale de la capacité d'excitation

$$A_0 = 2.7 \times 10^{-3}, \quad \tau = 12.69, \quad \tau_1 = 0.0423, \quad S = 1.3 \times 10^{-3}$$

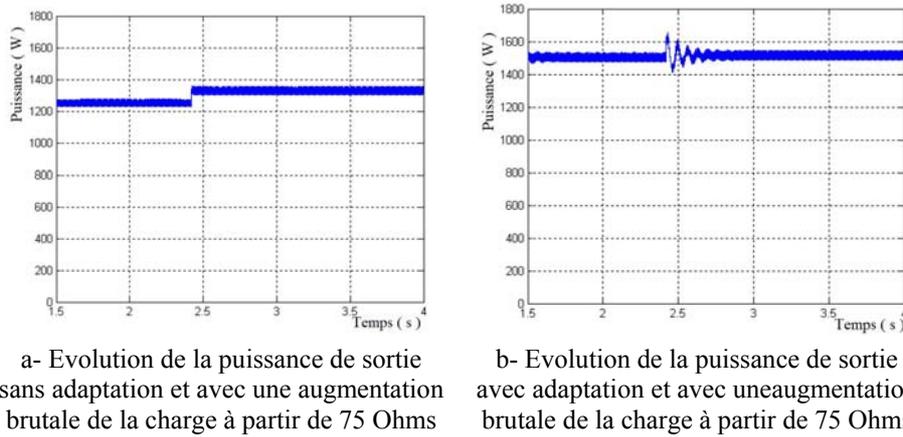


Fig. 14: Evolution de la puissance de sortie sans et avec adaptation de l'énergie réactive d'excitation avec une augmentation brutale de la charge

$$A_0 = 2.7 \times 10^{-3}, \quad \tau = 12.69, \quad \tau_1 = 0.0423, \quad S = 1.3 \times 10^{-3}$$

La figure 14 illustre les résultats de simulation, de la puissance à la sortie aux bornes de la charge du système éolien contrôlé par la commande adaptative lorsque la charge varie.

Les résultats de simulation montrent que:

- La puissance de sortie du système se stabilise à une valeur constante pour, quelle que soit la valeur de la vitesse du vent, la charge ou la capacité d'excitation de la SEIG.
- La commande adaptative est efficace et performante. Elle permet une convergence du système au bout d'un temps convenable.

5. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons présenté les résultats d'étude d'un système éolien constitué d'une turbine et d'une génératrice asynchrone liée à un convertisseur AC/DC, d'un filtre de compensation statique SVC qui représente une capacité variable et un filtre LC pour alimenter une charge résistive.

Une commande d'adaptation de l'énergie réactive d'excitation est proposée afin de maintenir la puissance aux bornes de la charge à une valeur fixe en dépit de la variation de la vitesse du vent, de la charge ou de la capacité d'excitation de la SEIG.

En perspective, nous essayons d'intégrer la commande proposée dans une carte DSP 1104 relié à un bon d'essai afin de valider ces résultats en temps réel.

REFERENCES

- [1] Y. Zidani and M. Naciri, 'A Steady State Analysis of the Self Excited Induction Generator Controlled by an Electronic Load Governor', 4th IEEE, PEDS Power Electronics and Drive Systems, pp. 903 - 907, Bali, Indonesia, October 22 - 25, 2001.

- [2] M.L. El Hafyani, S. Zouggar, Y. Zidani et M. Benkaddour, '*Comportement Permanent et Transitoire d'une Génératrice Asynchrone Auto-Excitée en Régime Equilibré*', PREMME'2005, Université My Ismail, FST, Errachidia, Maroc, 15 - 16 Septembre 2005.
- [3] Y. Zidani, S. Zouggar et M. Ghammouri, '*Utilisation d'un Filtre Actif pour la Régulation de la Tension dans une Génératrice Asynchrone Auto-Excitée*', Colloque International sur les Energies Renouvelables, CER'07, E11, Oujda, Maroc, 4-5 Mai 2007.
- [4] M.L. El Hafyani, S. Zouggar, Y. Zidani and M. Benkaddour, '*Permanent and Dynamic Behaviours of Selfexcited Induction Generator in Balanced Mode*', M. J. Condensed Mater, Vol. 7, N°1, pp. 49 - 53, 2006.
- [5] M.L. El Hafyani, S. Zouggar, A. Aziz et M. Benkaddour, '*Conception et Modélisation d'un Système Eolien Contrôlé par un Régulateur de Tension*', Renewable Energy, Vol. 33, pp. 2145 – 2156, 2008.
- [6] Y. Zidani and M. Naciri, '*A Numerical Analytical Approach for the optimal Capacitor used for the Self Excited Induction Generator*', 32nd IEEE PESC Power Electronics Specialists Conference, pp. 216 - 220, Vancouver, Canada, June 17-22, 2001.
- [7] M. Lopez, P. Dessante, D. Morales, J.C. Vannier and D. Sadarnac, '*Optimisation of a Small Non Controlled Wind Energy Conversion System for Stand-Alone Applications*', International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Seville, Spain, 2007.
- [8] K. Idjdarene, D. Rekioua, T. Rekioua and A. Tounzi, '*Vector Control of Autonomous Induction Generator Taking Saturation Effect Into Account*', Energy Conversion and Management, Vol. 49, N°10, pp. 2609 – 2617, 2008.
- [9] E. Mujadi, B. Gregory and D. Bord, '*Self Excited Induction Generators for Variable-Speed Wind Turbine Generation*', IEEE Industry Application Conference 34 IAS Annual Meeting, pp. 343 - 352, Arizona USA, 3-7 October 1999.
- [10] A. Kishore, R.C. Prasad and B.M. Karan, '*Matlab Simulink Based DQ Modelling and Dynamic Characteristics of Three Phase Self Excited Induction Generator*', Progress in Electromagnetics Research Symposium, Cambridge, USA, pp. 312 – 316, March 26-29, 2006.
- [11] C.A. Canizares and Z.T. Faur, '*Analysis of SVC and TCSC Controllers in Voltage Collapse*', IEEE Transactions of Power Systems, Vol. 14, N°1, pp. 158 – 165, 1999.