



# Approche de Contrôle de puissance de l'Aérogénérateur connecté au réseau permettant l'augmentation de la plage de variation de vitesse

S.Taraft, D.Rekioua, D.Aouzellg, H.Bekka  
Département Génie Electrique, **Laboratoire LTII**  
Université de Bejaia  
[taraft1@hotmail.com](mailto:taraft1@hotmail.com)

**Résumé** — Plusieurs travaux sont développés sur les éoliennes, basés sur la machine à double alimentation (MADA) fonctionnant en hyposynchrone et/ou hypersynchrone mais limitée à  $\pm 30\%$  de la vitesse du synchronisme. Le présent travail consiste à élargir la plage de variation de vitesse des éoliennes en exploitant les performances de la MADA. Afin d'améliorer les performances du système générateur, une commande non linéaire est utilisée (commande par mode de glissement). Nous présentons des résultats de simulations du comportement dynamique d'une éolienne de 3MW sur une plage de variation de vitesse allant jusqu'à deux fois celle nominale.

Mots clés — MADA, convertisseur statique, hypersynchrone, hyposynchrone, éolienne.

## I. INTRODUCTION

La turbine éolienne est entraînée en mouvement de rotation, par la grandeur stochastique de la vitesse du vent; par conséquent la vitesse du système éolien est aussi aléatoire, en outre la machine utilisée doit fonctionner sur une large gamme de variation de vitesse. Beaucoup de travaux réalisés sur les éoliens basés sur la machine asynchrone doublement alimentée sur une gamme de variation de vitesse de  $\pm 30\%$  de la vitesse nominale de la machine [1...5][11] le rotor de cette dernière est connecté au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance conçu à véhiculer jusqu'à 30% de la puissance nominale. Le présent travail consiste à la simulation du comportement dynamique de l'aérogénérateur sur une large plage de variation de vitesse de la machine jusqu'à deux fois sa vitesse nominale. Toute en utilisant la commande entièrement électrique. La puissance optimale recherchée est localisée par un programme d'optimisation (perturbation et observation) avec contraintes. Pour ce faire nous avons procédé comme suit:

- Pour des vitesses de vent, dont la puissance statorique générée est inférieure à celle nominale, dans ce cas les valeurs de références optimales de la puissance à injecter au réseau et de la vitesse de rotation de la turbine sur l'arbre rapide seront déterminées par le programme d'optimisation ; et les valeurs de la puissance sont proportionnelles au cube de celles des vitesses de rotation de la turbine.
- Pour des vitesses de rotations de la turbine éolienne dont la puissance statorique tend à dépasser sa valeur nominale, la puissance statorique sera fixée aussitôt à sa

valeur nominale, par conséquent le couple de la turbine est fixé; toute en laissant la machine à augmenter en vitesse de rotation en fonction de celle du vent jusqu'à ce que sa vitesse nominale soit doublée. Les valeurs du coefficient de puissance, de la vitesse spécifique, les références de la puissance à injecter au réseau et de la vitesse de rotation cote machine seront calculées par le même programme d'optimisation. Dans ce cas les valeurs de références optimales de cette puissance et celle du rotor sont linéairement proportionnelles à cette vitesse. Tant que les valeurs de la puissance statorique sont égales à celle nominale, les valeurs du coefficient de puissance et celles de la vitesse spécifique évoluent suivant les fonctions décroissante et croissante non linéaire en fonction celles du vent respectivement.

Dans cette application la machine doit être conçue à fonctionner à des vitesses élevées. La structure étudiée dans cet article est composée de la turbine tripale de puissance nominale 3 MW entraînant en mouvement de rotation la MADA de puissance nominale 1.5 MW dont son stator débite directement sur le réseau de 690V, tandis que son rotor est couplé à ce dernier par le biais d'un convertisseur direct de fréquence appelé convertisseur matriciel, de plus le système étudié est à structure variable non linéaire et sensible aux perturbations extérieures. Afin d'améliorer les performances du système étudié, une commande à structure variable (CSV) est appliquée dans ce travail, qui est une commande non linéaire, connue par sa robustesse [6..8] dite par mode de glissement qui est considérée l'une des techniques les plus simple pour la commande des systèmes non linéaire ayant un modèle imprécis [03,04]. Le contrôle de transit de puissances entre l'aérogénérateur et le réseau est réalisé par le réglage des grandeurs rotoriques régit par une commande à flux statorique orienté. Le schéma du système qui a fait l'objet de cette investigation est représenté sur la figure 1

La turbine entraîne en mouvement de rotation la génératrice, qui est une machine rapide d'où la nécessité d'intercaler entre elles un multiplicateur de vitesse de gain G. Par conséquent le couple mécanique issu du multiplicateur est appliqué sur l'arbre de la génératrice est lié au couple aérodynamique par l'expression suivante :

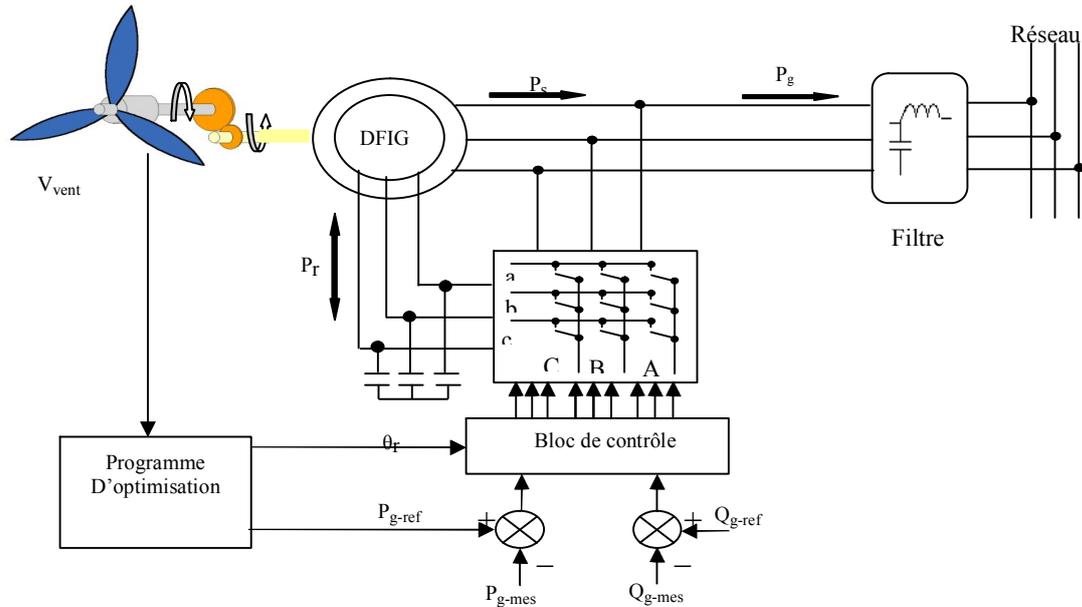


Fig. 1. Schéma du système étudié

$$T_g = \frac{T_{aero}}{G} \quad (1)$$

Afin d'exploiter au mieux la puissance récupérée un programme d'optimisation est conçu pour les différentes contraintes liées au zones de fonctionnements. La puissance optimale de référence est déterminée comme suit:

**Zone I** Dans cette zone de fonctionnement, la puissance active statorique est inférieure à celle nominale  $p_s \leq p_n$

$$P_{g\_ref} = -\eta P_{mec\_opt} \quad (2)$$

$$\Omega_{mec\_ref} = \Omega_{opt} \quad (3)$$

Où :  $\eta$  : Rendement de la machine doublement alimentée.

La machine utilisé dans cette application est de forte puissance dont les pertes mécaniques sont négligées, par conséquent son rendement est élevé est estimé à 95% et les pertes dans le convertisseur statique sont négligées.

### Zone II

Dans cette zone de fonctionnement la puissance statorique tend à dépasser sa valeur nominale par conséquent fonctionnement avec contrainte électrique qui est nuisible pour la machine. Pour remédié à cette contrainte de fonctionnement, une commande entièrement électrique est appliqué qui consiste a fixé le couple de la turbine à sa valeur nominale ( $T_n$ ) par conséquent la puissance statorique est maintenue à sa valeur nominale et le système fonctionne avec un coefficient de puissance dégradé et à vitesse spécifique

supérieure à celle optimale. L'expression de la puissance optimale de référence évolue linéairement et celle de la vitesse de rotation de la machine est régie par les relations données dans le système d'équations (4) :

$$\begin{cases} \Omega_{mec\_ref} = \Omega_s(1-g) \\ P_{mec\_ref} = T_n \Omega_{mec\_ref} \\ P_{g\_ref} = -\eta P_{mec\_ref} \end{cases} \quad (4)$$

La relation fondamentale de la dynamique exprime l'évolution de la vitesse mécanique en fonction du couple mécanique résultant  $T_{mec}$  appliqué sur l'arbre de la machine doublement alimentée, l'expression est la suivante:

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = T_{mec} \quad (5)$$

Avec  $J$  : Moment d'inertie des parties mécaniques tournantes ramenés sur l'arbre rapide ;

### II-2 Modélisation de la machine à double alimentation

Le système d'équations des courants rotoriques de la MADA dans le repère de Park est donné par [9,11].

$$\begin{cases} \frac{di_{dr}}{dt} = \frac{1}{L_r} (v_{dr} - R_s i_{dr} - M \frac{di_{ds}}{dt} + (\omega_s - \omega) L_r i_{qr} + (\omega_s - \omega) M i_{qs}) \\ \frac{di_{qr}}{dt} = \frac{1}{L_r} (v_{qr} - R_s i_{qr} - M \frac{di_{qs}}{dt} - (\omega_s - \omega) L_r i_{dr} - (\omega_s - \omega) M i_{ds}) \end{cases} \quad (6)$$

Les puissances active et réactive issu de l'aérogénérateur sont exprimées par :



$$\begin{cases} P_g = P_r + P_s \\ Q_g = Q_{rg} + Q_s \end{cases} \quad (7)$$

Avec  $Q_{rg}$  : Puissance réactive issu du convertisseur côté réseau;  $Q_g$  : Puissance réactive injectée au réseau;  $Q_s$  : Puissance réactive du stator.

### II-Commande de l'écoulement de puissance de l'aérogénérateur vers le réseau

En choisissant un référentiel diphasé 'd-q' lie au champ tournant, et en alignant le vecteur flux statorique  $\Phi_s$  avec l'axe 'd', nous pouvons écrire

$$\begin{cases} \phi_{ds} = \Phi_s \\ \phi_{qs} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

Quand  $\phi_{ds}$  est estimé à  $\Phi_s$ , le couple électromagnétique dépend uniquement de la composante  $i_{qr}$

$$T_{em} = -P \frac{L_m}{L_s} i_{qr} \Phi_s \quad (9)$$

Les éoliens de forte et moyenne puissance, la résistance statorique peut être négligé, et dans l'approche (flux statorique constant), nous pouvons exprimés les tensions et les flux statoriques comme suit :

$$\begin{cases} v_{ds} = 0 & ; v_{qs} = V_s = \omega_s \Phi_s \\ \phi_{ds} = \Phi_s = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} & ; \phi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \\ \phi_{qs} = 0 = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} & ; \phi_{qr} = L_s i_{qr} + L_m i_{qs} \end{cases} \quad (10)$$

Les tensions, à imposer au rotor pour obtenir des courants voulus et par conséquent des puissances désirées sont exprimées dans le système d'équations (11)

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} + \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) \frac{di_{dr}}{dt} - s \omega_s \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) i_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) \frac{di_{qr}}{dt} + s \omega_s \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) i_{dr} + s \frac{L_m \cdot V_s}{L_s} \end{cases} \quad (11)$$

Le schéma bloc de contrôle de puissances est montré sur la figure 2.

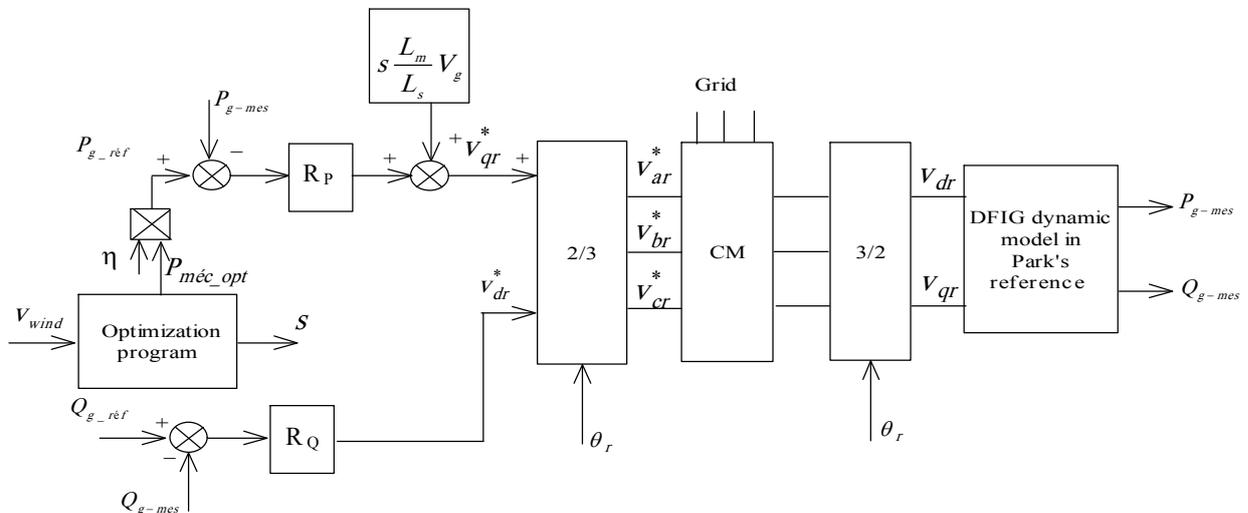


Fig.2. Schéma bloc de contrôle de puissances

### III-Résultats de simulation et interprétation

Les résultats de simulation numérique qu'on montre sont obtenus avec une puissance de référence active calculée par le programme d'optimisation et par une puissance réactive du réseau nulle. La vitesse de rotation de la MADA est représentée par la figure 3, et comme la fréquence des grandeurs statoriques de la MADA est imposée par le réseau (fixée dans notre cas à 50 Hz) on trouve le glissement illustré par la figure 4 et qui varie sur une plage de -1 à 0.48 en passant par des valeurs nulles.

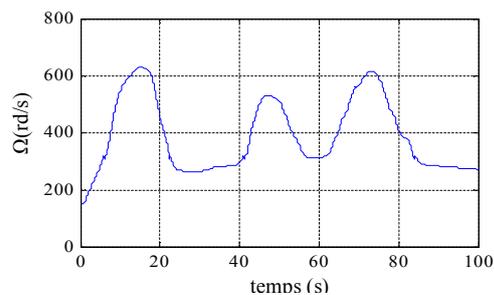


Fig.3 Vitesse mécanique de la MADA

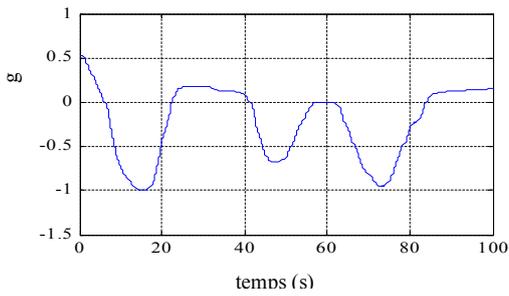


Fig.4 Glissement de la MADA

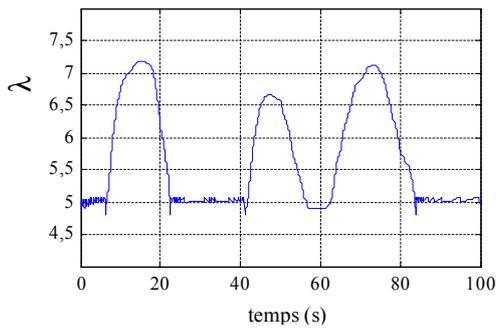


Fig.5 Vitesse spécifique

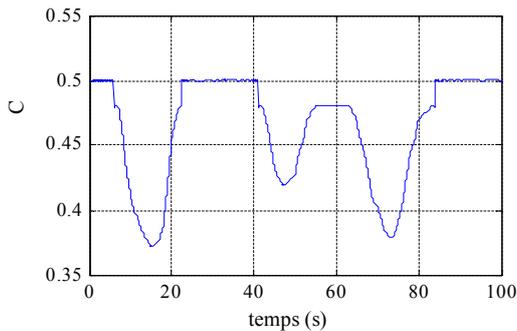


Fig.6 Coefficient de puissance

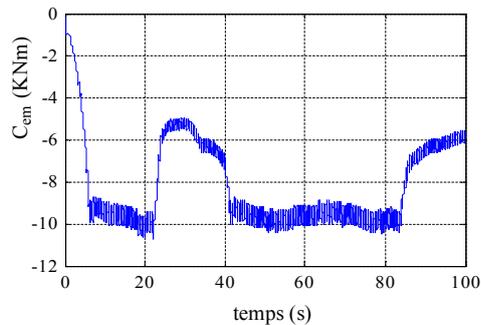


Fig.7 Couple électromagnétique

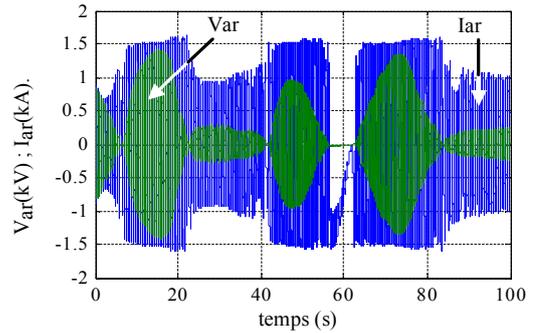


Fig.8.a Tension et Courant d'une phase rotorique

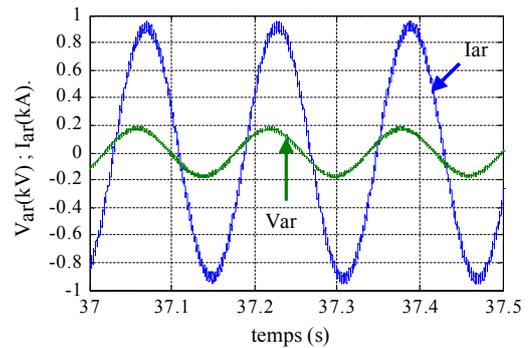


Fig.8.b Tension et Courant d'une phase rotorique  $g > 0$

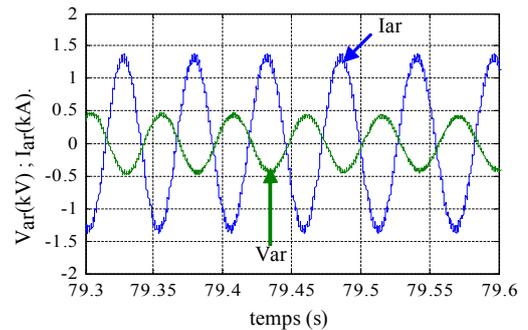


Fig.8.c Tension et Courant d'une phase rotorique  $g < 0$

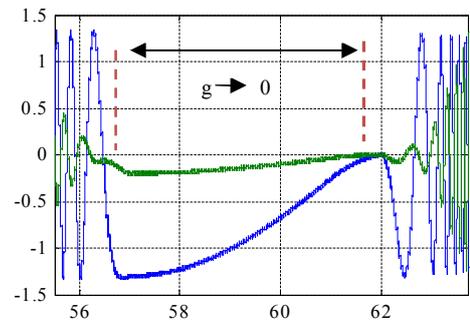


Fig.8.d Tension et Courant d'une phase rotorique  $g \rightarrow 0$

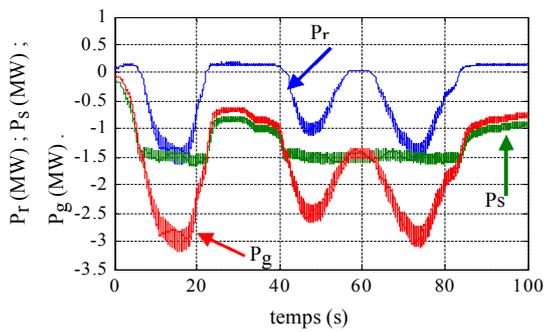


Fig.9 Puissances actives rotorique, statorique et réseau.

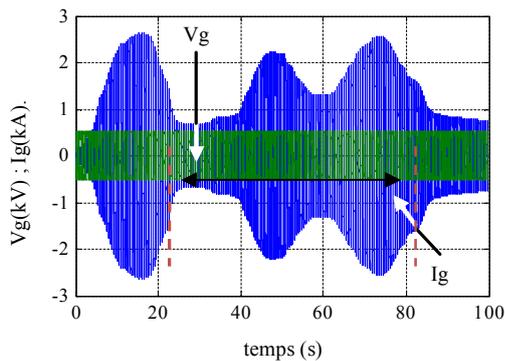


Fig.10.a Tension et Courant du réseau

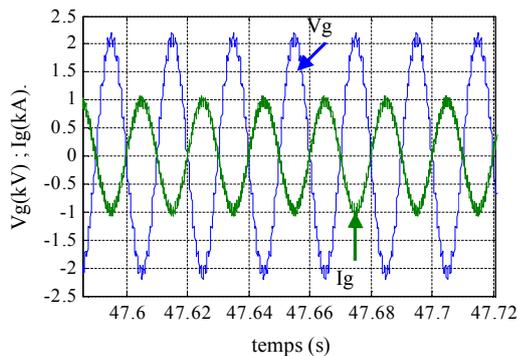


Fig.10.b Tension et Courant du réseau sur une période

Sur les figures 5 et 6 sont montrées respectivement les allures de la vitesse spécifique et le coefficient de puissance de la turbine, et  $\lambda$  égal à 5 et  $C_p$  égal à 0.5 dans la zone de fonctionnement sans contrainte et dans la zone de fonctionnement avec contrainte  $\lambda$  est supérieur à 5 et  $C_p$  dégradé. L'allure du couple électromagnétique est représentée sur la figure 7 qui est variable dans la zone de fonctionnement sans contrainte et fixé à sa valeur nominale dans la zone de fonctionnement avec contrainte électrique.

Sur la figure 9 sont illustrées les allures des puissances actives rotorique, statorique et celle du réseau cette dernière atteint deux fois la puissance nominale quand la vitesse de la (MADA) est doublée. La figure 8.a illustre la tension et le courant rotorique, la figure 8.b montre que le courant est en retard de la tension d'un angle  $0 < \varphi < \frac{\pi}{2}$  et ceci sur une

période correspondant à un glissement positif; et sur la période où le glissement est négatif l'angle de déphasage

entre la tension et le courant est de  $\frac{\pi}{2} < \varphi < \pi$  ceci est

montré sur la figure 8.c. sur la figure 8.d est montré pour les valeurs de glissement proche de zéro, ces grandeurs rotoriques varient très lentement presque continues, ceci est un apport de taille du convertisseur matriciel, on retrouve le cas d'une machine synchrone. La figure 10.a montre que la tension est imposée par le réseau et l'amplitude du courant injecté au réseau est imposé par la commande; on a montré sur deux périodes que la tension du réseau et le courant de ce dernier sont en opposition de phase pour tous les modes de fonctionnement ceci justifie que l'écoulement de puissance est toujours de l'aérogénérateur vers le réseau (voir figure 10.b).

#### IV-Conclusion

L'objectif de cet article est le contrôle électrique de puissances de l'aérogénérateur à base de la machine doublement alimentée (MADA) connectée au réseau sur les zones de fonctionnement avec et sans contrainte par l'application d'un programme d'optimisation basé sur la méthode (P&O). Les résultats de simulations montrent, la possibilité de fonctionner la (MADA) dans les deux quadrants couple-vitesse. Pour  $g > 0$  la MADA fonctionne en mode génératrice hyposynchrone, pour  $g < 0$  la (MADA) fonctionne en mode génératrice hypersynchrone. En effet la (MADA) offre l'avantage de s'adapter aux variations de vitesse de vent. Outre nous sommes arrivés à récupérer le double de la puissance nominale en fonctionnant en hypersynchrone et ce pour un glissement  $g = -1$ , à partir de la MADA de puissance nominale  $P_n$ , en effet les résultats de simulation montrent le bon fonctionnement avec et sans contrainte. Cela justifie la fiabilité du modèle proposé et de la commande élaborée.

#### REFERENCES

- [1] A.BOYETTE « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne » Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy I 2006.
- [2] N. PATIN, and al « Modeling and Control of a Cascaded Doubly Fed Induction Generator Dedicated to Isolated Grids », IEEE transactions on Industrial Electronics, VOL. 56, NO. 10, OCTOBER 2009 PP 4207-4219.



## Le 2<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

### The 2<sup>nd</sup> International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,  
Ghardaïa – Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2012



- [3] R.PENA, and al «A Topology for Multiple Generation System With Doubly Fed Induction Machines and Indirect Matrix Converter », IEEE transactions on Industrial Electronics, VOL. 56, NO. 10, OCTOBER 2009 PP 4181-4193
- [4] F. Poitiers, and al «Advanced control of a doubly-fed induction generator for wind energy conversion », Electric Power Systems Research 79 (2009) 1085–1096
- [5] A.DAVIGNY« Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie», Thèse de doctorat de l'Université des Sciences et Technologies de Lille 2007.
- [6] C. MIRA : "Système asservis nonlinéaires" Hermès, Paris, 1990
- [7] V. I. UTKIN: "Discontinuous control system: State of art in theory and application", Institute of Control Sciences, Ed. MIR, Moscou, 1978.
- [8] V. I. UTKIN: "Sliding modes and their application in variable structure systems", Edition MIR, Moscou, 1978.
- [9] Poitiers, F. « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne » Thèse de doctorat de l'université de Nantes, 2003.
- [10] K. Ghedamsi, D. Aouzellag, E.M. Berkouk, « Control of wind generator associated to a flywheel energy storage system», Renewable Energy Journal 33 (2008) 2145
- [11] N.LAVERDURE «Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires», Thèse doctorat, de l'université France, 2005