

# Commande des puissances active et réactive dans d'une Chaîne de Conversion basée sur une Machine Asynchrone à Double Alimentation

A. Tamaarat, A. Benakcha, A. Menacer

Laboratoire LGEB,

Département d'Electrotechnique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Université de Biskra, B. P 145 Biskra, Algérie

[a.tamaarat@yahoo.fr](mailto:a.tamaarat@yahoo.fr)

**Résumé** – L'évolution de la technologie éolienne s'est fortement accélérée ces dernières années. L'objectif de ce travail est d'essayer d'ajouter un pas au développement de cette filière de production d'énergie qui présente un avantage environnemental considérable.

Pour notre système, le modèle de la turbine est associé au modèle de la MADA qui est le type de machine choisi pour cette étude. L'objectif de cette étude c'est l'extraction du maximum de puissance à partir d'un vent variable. Il est aussi intéressant de jouer sur la qualité de l'énergie électrique, en contrôlant la puissance réactive échangée avec le réseau. Ceci va permettre de faire une correction locale du facteur de puissance.

**Abstract** – The development of wind turbine technology has greatly accelerated in recent years. The purpose of this work is to try to add a step in the development of this sector of energy production that presents a significant environmental benefit.

For our system, the model of turbine is associated with the model of the DFIG which is the type of machine chosen for this study. The objective of this study is the extraction of the maximum of power starting from a variable wind. It is also interesting to exploit the quality of the electric power, by controlling the reactive power exchanged with the network. This will make it possible to make a local correction of the power factor.

## I. Introduction

L'intégration des systèmes éoliens au sein des systèmes énergétiques nécessite l'augmentation de leur efficacité, la réduction des coûts de maintenance et l'augmentation de la puissance captée du vent.

Le système étudié ici est constitué d'un aérogénérateur tripales, à axe horizontal, connecté au réseau par une (MADA). Les enroulements du stator sont connectés directement au réseau triphasé, alors que les enroulements du rotor sont reliés à des convertisseurs de puissance AC-AC bidirectionnels en courant. Ce type de machines peut présenter quelques avantages par rapport à d'autres types des machines à induction.

Dans le cas, où les éoliennes sont connectées au réseau par des convertisseurs de puissance à travers une seule voie, l'inconvénient principal de ce type de connexion est le surcoût introduit par l'incorporation des convertisseurs. Ce coût dépend de la taille des convertisseurs de fréquence ainsi que de leurs systèmes de refroidissement. L'utilisation des machines asynchrones à rotor bobiné permet de minimiser ces facteurs car la plus grande partie de la puissance est directement distribuée au réseau par le stator et 25% de la puissance totale passe par les convertisseurs de puissance à travers le rotor [1]. Ceci présente un intérêt économique en minimisant les pertes et le coût de production. [2]

Un autre avantage de la MADA est l'optimisation de la conversion de l'énergie éolienne. Pour optimiser donc le captage de l'énergie contenue dans le vent, la commande de l'éolienne doit se faire de sorte que la vitesse de rotation du rotor s'adapte à la vitesse du vent afin que la vitesse spécifique soit optimale. En plus les éoliennes basées sur la MADA permettent de contrôler les échanges de puissance réactive avec le réseau et le

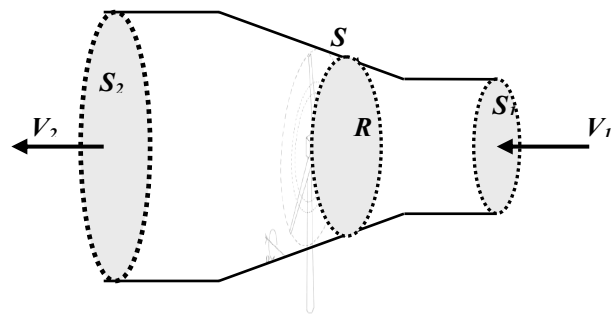
problème de consommation de l'énergie réactive ne se pose pas avec ce type de générateur.

## II. Notions théoriques sur l'éolienne

L'énergie récupérable  $p_v$  du vent à travers la surface  $S$  balayée par les pales d'une éolienne est donnée par cette relation:

$$p_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad (1)$$

$\rho$ ,  $V_v$ : La densité et la vitesse du vent.



**Figure 1:** Tube de courant autour d'une éolienne

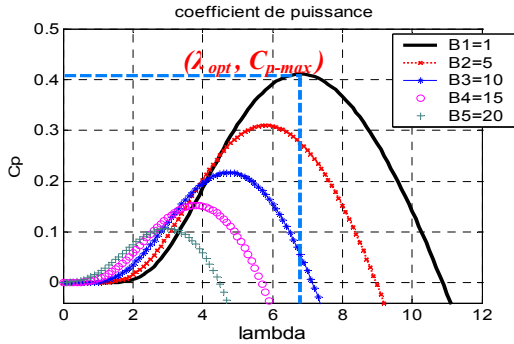
La performance aérodynamique d'une turbine éolienne à axe horizontal s'exprime par le coefficient de puissance  $C_p$ . La valeur maximale théorique possible de ce coefficient, appelé limite de Betz est de 16/27. Il est variable et dépend de la caractéristique de la turbine et de la vitesse du vent. Il est souvent représenté en fonction du ratio de la vitesse  $\lambda$  qui est défini par cette expression:  $\lambda = R\Omega_1 / V_v$ .  $\Omega_1$  est représenté la vitesse de la turbine.

Il est possible de définir le coefficient  $C_p$  par une approximation mathématique:

$$C_p = \left[0,73 \cdot \left(\frac{151}{\lambda'}\right) - 0,002\beta - 0,58\beta - 13,2\right] \exp\left(\frac{-18,4}{\lambda'}\right) \quad (2)$$

Avec :  $\lambda' = 1 / \left(\frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\lambda^3 + 1}\right)$

Sur la (Fig. 2) est représenté ce coefficient en fonction de  $\lambda$  et pour différentes valeurs d'angle de calage des pales  $\beta$ .



**Figure 2:** Représentation de  $C_p$  en fonction  $\lambda$  pour des différentes valeurs de  $\beta$

### II.1 Différentes phases (zones) de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable

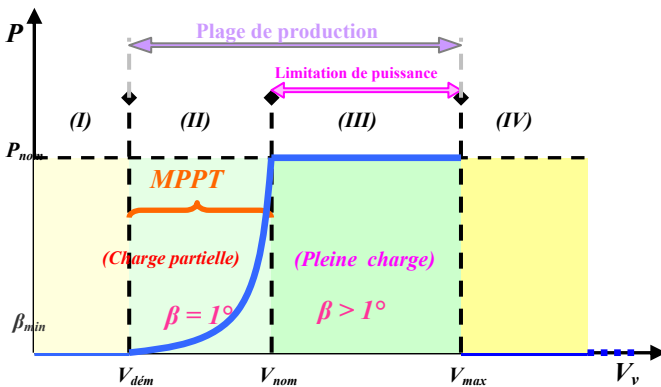
Il y a quatre zones de fonctionnement d'une éolienne intégrant une MADA, d'après [3], dont deux sont à la plage de production de l'éolienne (Fig. 3).

**ZONE (I),** ( $N < N_{dém}$ ,  $P = 0$ ) : l'énergie contenue dans le vent n'est pas suffisante pour entraîner la turbine et la puissance captée est nulle.

**ZONE (II),** ( $\lambda_{opt}$ ,  $C_{pmax}$ ,  $\beta = 1^\circ$ ) : dans cette zone que l'on nomme charge partielle, on cherche à extraire le maximum de puissance du vent. Le contrôle vise à faire varier la vitesse de rotation de l'éolienne de manière à rester aux alentours de  $\lambda_{opt}$

**ZONE (III),** ( $N_{max}$ ,  $P = P_{nom}$ ) : Le contrôle à pleine charge vise à conserver la puissance produite constante à cette valeur nominale en modifiant l'angle de calage des pales.

**ZONE (IV),** ( $N=0$ ,  $P = 0$ ) : pour des vitesses du vent supérieures à la vitesse extrême d'opération  $V_{max}$ , la turbine éolienne s'arrête, la puissance fournie s'annule.



**Figure 3 :** Les zones de fonctionnement avec contrôle de l'angle de calage (pitch control)

-La zone II présente donc le maximum de rendement aérodynamique.

### II.3 Modélisation diphasée de la MADA

Les relations électriques et magnétiques régissant le fonctionnement de la MADA d'après [4] sont :

$$\begin{aligned} v_{sd} &= R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \phi_{sq} \\ v_{sq} &= R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_s \cdot \phi_{sd} \\ v_{rd} &= R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \omega_r \cdot \phi_{rq} \\ v_{rq} &= R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + \omega_r \cdot \phi_{rd} \\ \phi_{sd} &= L_s \cdot i_{sd} + M \cdot i_{rd} \\ \phi_{sq} &= L_s \cdot i_{sq} + M \cdot i_{rq} \\ \phi_{rd} &= L_r \cdot i_{rd} + M \cdot i_{sd} \\ \phi_{rq} &= L_r \cdot i_{rq} + M \cdot i_{sq} \end{aligned} \quad (3)$$

$[v_{sdq}]$ ,  $[v_{rdq}]$ ,  $[i_{sdq}]$ ,  $[i_{rdq}]$ ,  $[v_{sdqo}]$ ,  $[v_{rdqo}]$  : Vecteurs tensions et courants statorique et rotorique dans le repère de Park.

$[\phi_{sdq}]$ ,  $[\phi_{rdq}]$  : Vecteurs flux statoriques et rotoriques dans le repère de Park.

$R_s, R_r$  : Résistance des enroulements statoriques et rotorique.

$L_s, L_r$  : Inductance cyclique d'une phase statorique et rotorique.

$M$  : Inductance mutuelle cyclique entre les enroulements statorique et rotorique.

### II.4 Principe de commande de la MADA

En choisissant un référentiel diphasé ( $d, q$ ) lié au champ tournant statorique et en alignant le vecteur flux statorique  $\phi_s$  avec l'axe  $d$ , nous pouvons écrire [7] :

$$\phi_{sd} = \phi_s \text{ et } \phi_{sq} = 0 \quad (5)$$

Dans un repère diphasé quelconque, les puissances active et réactive statoriques d'une MADA s'écrivent :

$$\begin{aligned} P_s &= v_{sd} i_{sd} + v_{sq} i_{sq} \\ Q_s &= v_{sq} i_{sd} - v_{sd} i_{sq} \end{aligned} \quad (6)$$

Si l'on néglige la résistance du bobinage statorique  $R_s$ , on obtient :

$$\begin{aligned} v_{sd} &= 0 \\ v_{sq} &= v_s = \omega_s \phi_{sd} \end{aligned} \quad (7)$$

Avec  $\omega_s$  : Pulsation du réseau (pulsation statorique).

Après la compensation de certains termes de couplage apparaissant dans les expressions de la tension rotorique, on obtient :

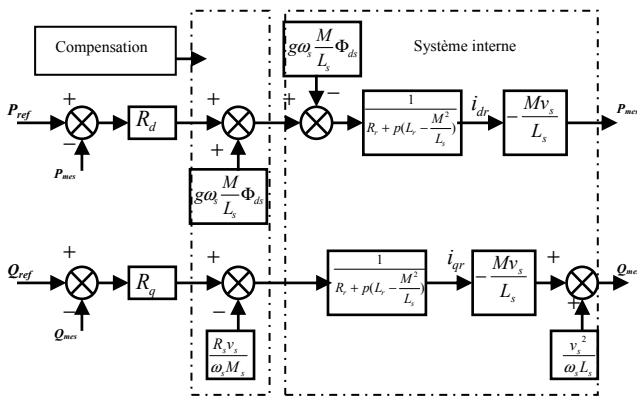


Figure 4 : Commande vectorielle avec un seul régulateur

Cette commande permet de découpler les expressions de la puissance active et réactive du générateur. La composante quadratique de tension du rotor  $v_{qr}$  contrôle la puissance active (le couple électromagnétique) et la composante directe  $v_{dr}$  contrôle la puissance réactive échangée entre le stator et le réseau. On retrouve ainsi le découplage si avantageux des moteurs à courant continu.

### III. Résultats de simulation

#### III.1 Optimisation de la conversion énergétique dans la deuxième partie des zones de fonctionnement

L'objectif de la commande dans cette zone est de suivre la courbe de puissance maximale entre la vitesse de rotation au démarrage et la vitesse du vent nominale 11,7 m/s, avec laquelle la vitesse de rotation est maximale et la puissance extraite est nominale.

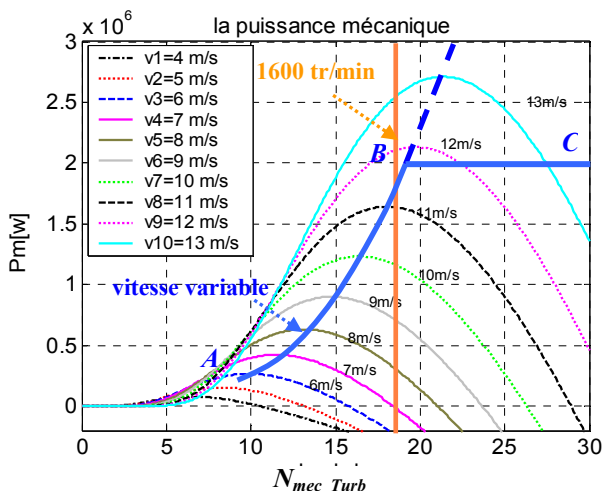


Figure 5 : Puissance de l'éolienne en fonction de la vitesse de la turbine du vent

Dans la zone II, on cherche donc à maintenir la valeur du coefficient de vitesse spécifique à son optimum. Une boucle de régulation de la vitesse de rotation est alors mise en œuvre et sa valeur de référence est  $\Omega_{ref}$ . Si le couple des frottements visqueux est négligeable, la

vitesse de rotation est régie par l'action de deux couples: le couple de la turbine ramener sur l'arbre de la machine  $C_g$  et le couple électromagnétique  $C_{em}$ .

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_g - C_{em} \quad (8)$$

$J$  représente l'inertie totale constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice.

On agit donc sur  $C_{em}$  pour contrôler cette vitesse.

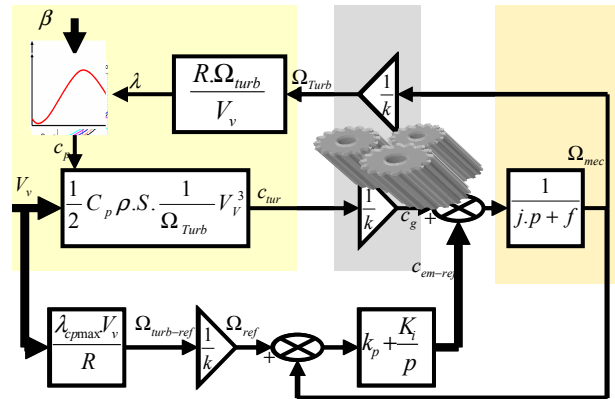
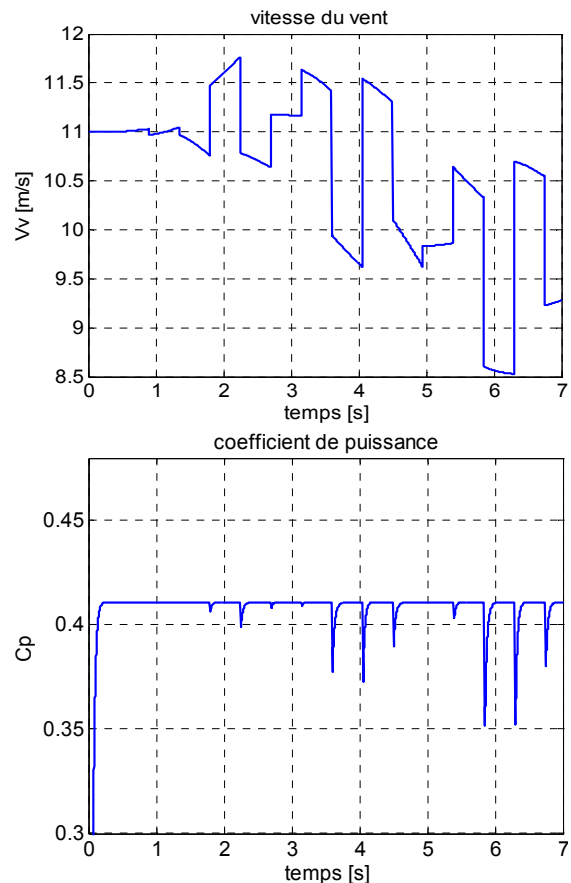
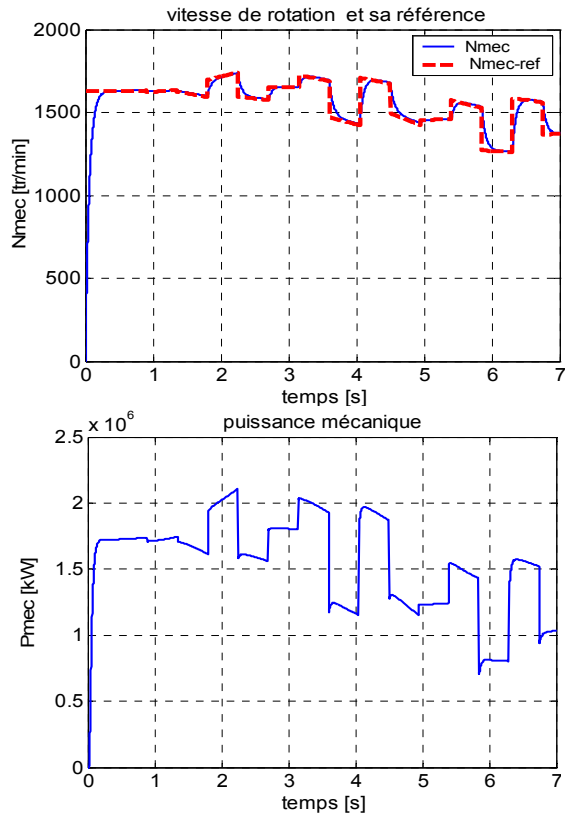


Figure 6 : Schéma fonctionnel de la commande

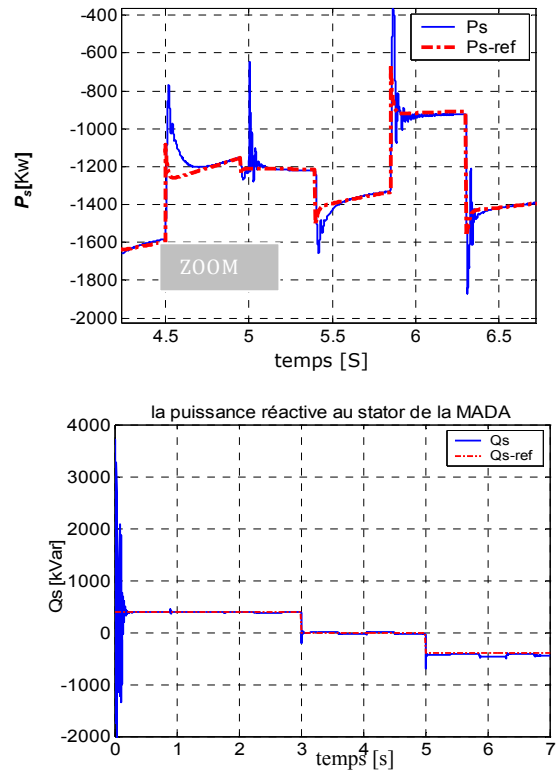
#### ❖ Premier essai : vitesse du vent variable avec introduction de l'algorithme MPPT





**Figures 7:** Evolution des grandeurs mécaniques de la chaîne de conversion

Les figures 7 nous montrent qu'une petite variation de vent peut induire une grande variation de la puissance extraite (puissance mécanique), à cause de la proportionnalité de cette dernière à la valeur moyenne de la vitesse cubique du vent.

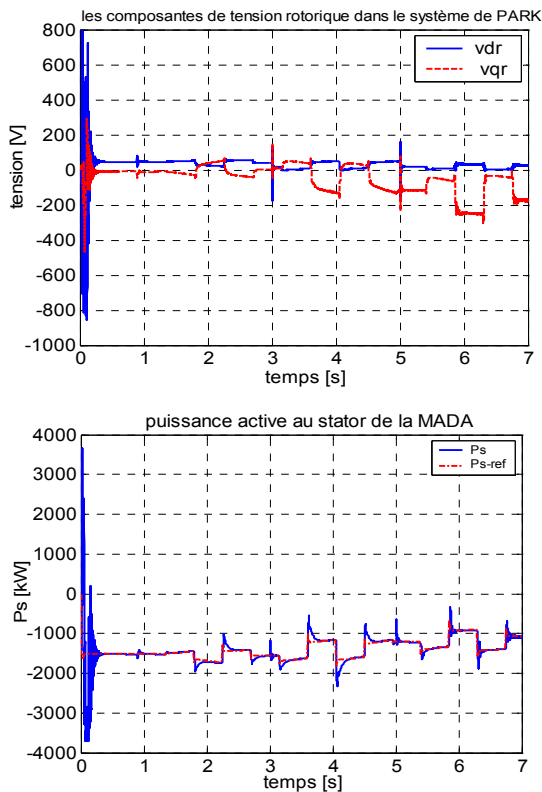


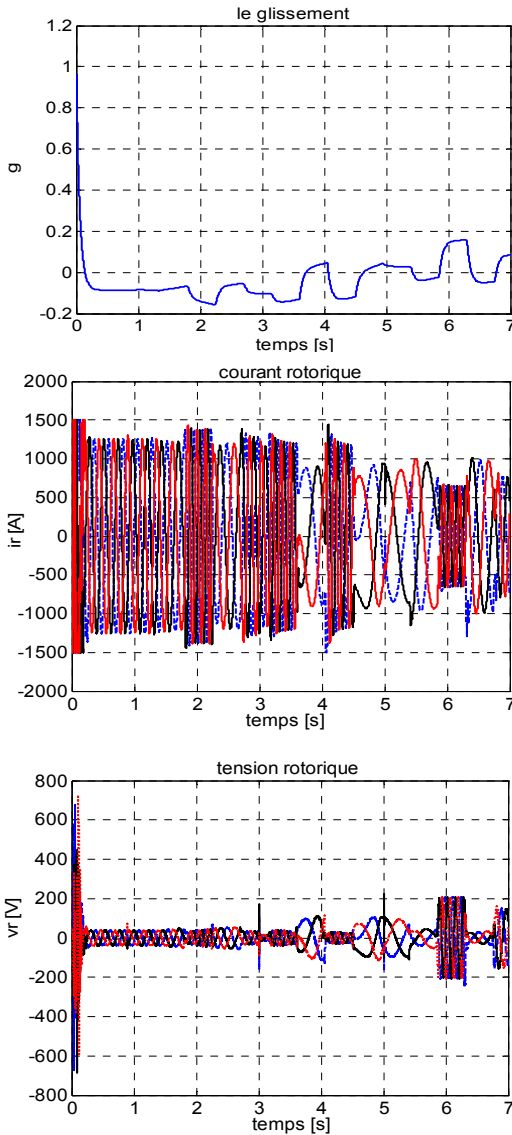
**Figure 8:** Evolution suivant ( $v_d, v_q$ ) des puissances active et réactive au stator de la MADA

D'après les figures 8, on peut remarquer que la puissance active statorique suit d'une façon acceptable sa référence pendant la durée de cette simulation.

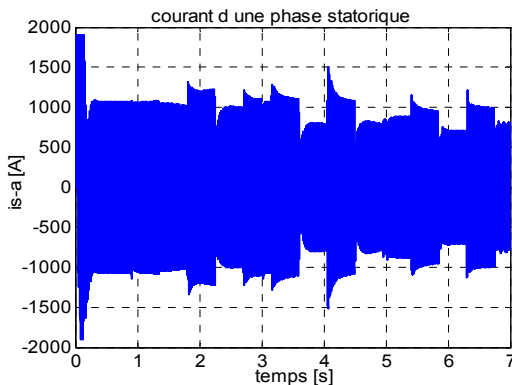
On observe ainsi, l'effet de couplage sur les composantes de la tension rotorique suivant les deux axes de commande ( $d, q$ ), car un échelon sur l'un de ces deux axes ou une variation sur le second peut induire des oscillations sur l'autre. Ces oscillations apparaissent clairement sur la puissance active statorique si le changement touche la puissance réactive.

La puissance active statorique suit donc sa référence pour permettre à l'éolienne de fonctionner dans des conditions optimales. Cette manière de fonctionner est justifiée par la valeur maximale du coefficient de puissance ( $C_p \approx 0,41$ ), voir les figures 7.





**Figure 9:** Evolution des courants et des tensions rotoriques suivant le glissement de la machine

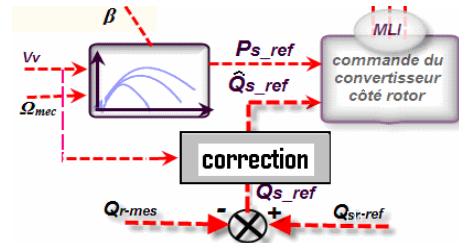


**Figure 10:** Evolution du courant statorique

D'une façon globale, nous constatons que la plupart des variables ont suivi l'évolution du vent.

❖ **Deuxième essai:** correction de facteur de puissance

Afin d'améliorer la commande précédente, nous allons incorporer une boucle de régulation sur laquelle nous agissons pour contrôler la puissance réactive pour le système éolien au niveau du réseau « stator – rotor ».

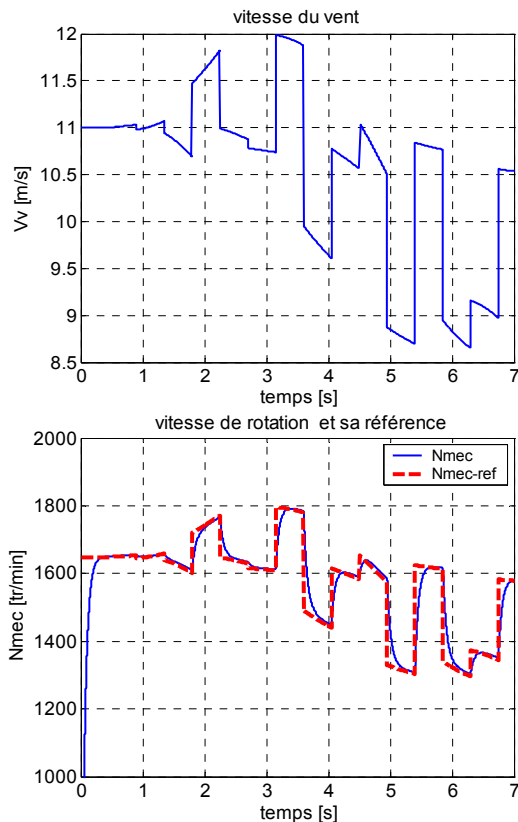


**Figure 11:** Commande de la chaîne de conversion avec la commande de la puissance réactive globale

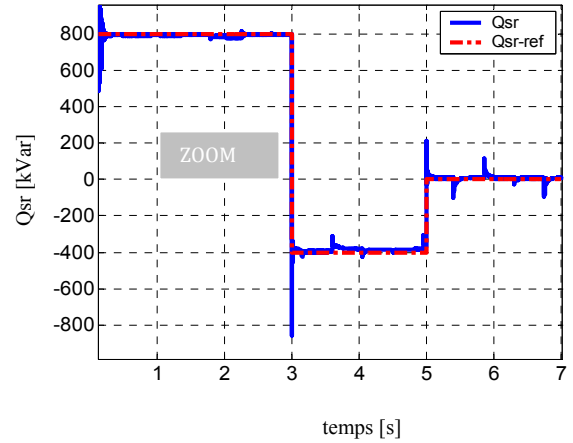
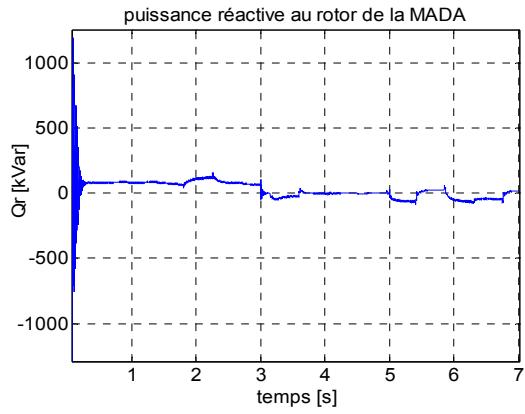
Pour tester les performances de la commande PI, nous allons utiliser deux différents profils du vent. Car le vent est un variable principale dans la chaîne de conversion éolienne.

- le premier est caractérisé par une vitesse du vent qui varie brutalement mais cette variation est lente.
- le deuxième est caractérisé par la variation rapide sur la vitesse du vent mais d'une manière progressive.

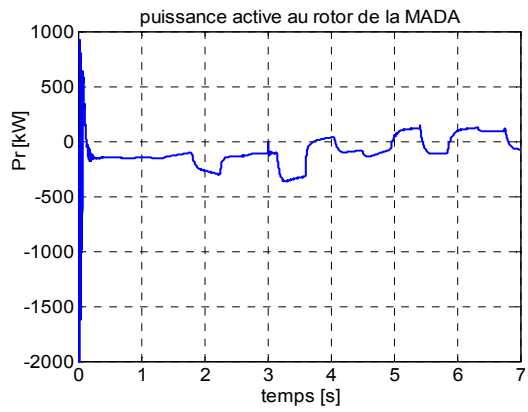
**a) Pour le premier profil du vent**



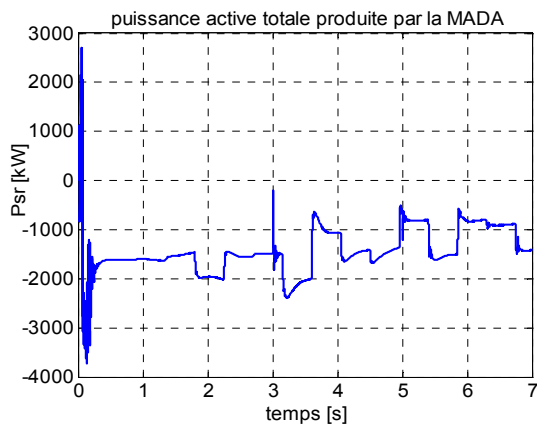
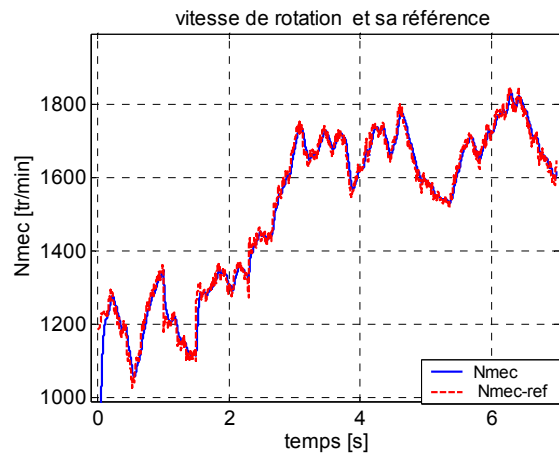
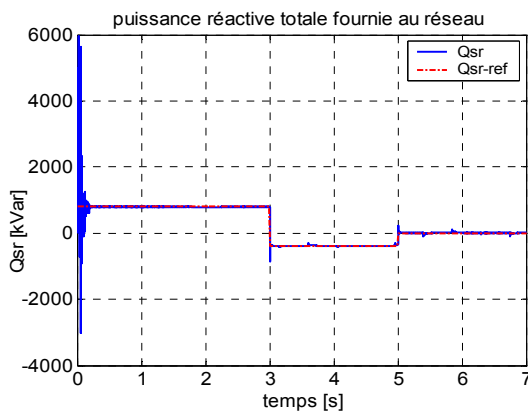
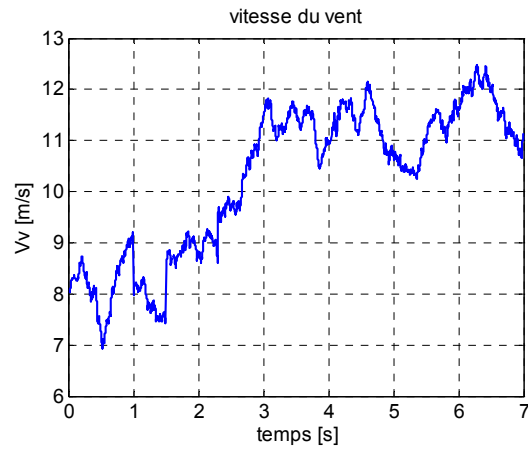
**Figure 12 :** Evolution de la vitesse mécanique suivant la vitesse du vent



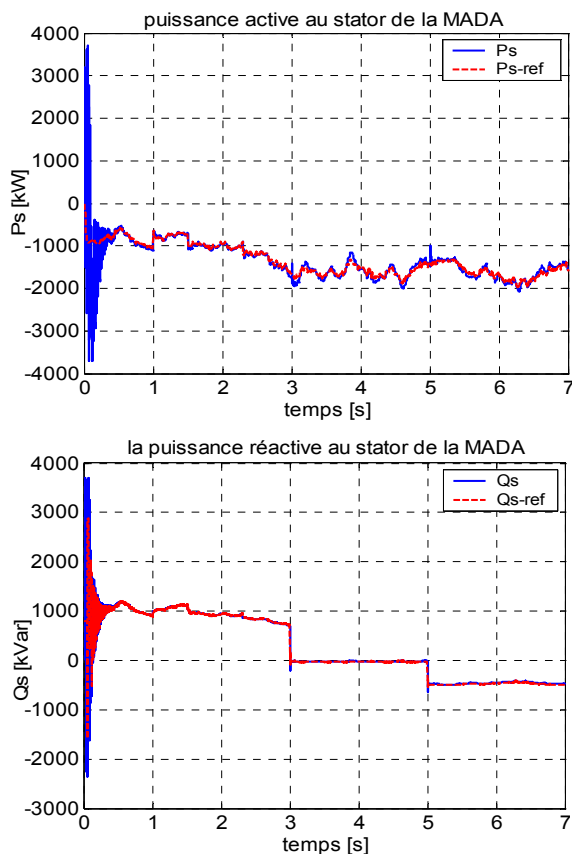
**Figure 13:** Evolution suivant ( $v_d, v_q$ ) des puissances active et réactive dans la chaîne de conversion



*b) Pour le deuxième profil du vent*



**Figure 14:** Résultats de la simulation pour le deuxième profil du vent



**Figure 15:** Résultats de la simulation pour le deuxième profil du vent

Comme illustré sur les figures 13, 14, malgré l'influence des fluctuations du vent sur les puissances active et réactive pour le premier profil. On peut dire que les allures des courbes montrent une poursuite acceptable de la puissance réactive statorique. Même remarque pour la puissance active au niveau du stator ainsi que la puissance réactive totale fournie au réseau pour les deux profils du vent. Cette méthode de commande présente donc des performances remarquables au niveau du réglage de la puissance réactive dans le réseau à travers le système éolien. Ce réglage nous permet donc d'avoir une puissance réactive négative (comportement capacitif) ou positive (comportement inductif) et même nulle (facteur de puissance unitaire).

On note que la puissance réactive pouvant être générée ou absorbée est limitée par le niveau des courants rotoriques, ces courants sont imposés aussi par les interrupteurs de l'électronique de puissance IGBT.

#### IV. Conclusion

Dans ce travail nous avons simulé tous les éléments qui interviennent dans le système de conversion. Ce système est soumis à un vent variable dans le temps comme un entrée perturbatrice (source de puissance mécanique) et soumis aussi à des lois de commande dans le but de contrôler les variables de sorties qui sont les puissances active et réactive de la MADA.

De manière générale cette commande présente des performances remarquable pour le contrôle des puissances active et réactive de la chaîne de conversion éolienne. A partir des résultats que nous avons trouvés, on peut conclure que les échelons de références imposées par le système de commande sont suivis d'une manière acceptable par ces puissances a la sortie de la MADA avec un dépassement et des oscillations apparaît clairement dans les différents régime transitoires de fonctionnement a cause de: changement de l'allure de la puissance réactive, variation brusquement de la vitesse de vent et pendant le démarrage de l'éolienne. Le régime transitoire apparaît aussi sur les allures des variables électriques surtout au démarrage de l'éolienne, ce qui provoque des problèmes de connexion de l'éolienne au réseau.

Afin d'obtenir de meilleures performances, on joue d'une part sur la qualité de la puissance réactive et d'autre part sur le rendement de la chaîne de conversion. Nous avons vu qu'il était possible de régler la puissance réactive au point de connexion de l'éolienne avec le réseau, ce qui donne un avantage par apport au réglage de cette puissance à travers le stator de la machine toute seule. En plus, on a constaté que la vitesse de la génératrice est effectivement réglable dans le but d'extraire le maximum de puissance active.

#### V. Bibliographie

- [1] F. IOV, « Contributions to Modelling, Analysis and Simulation of AC Drive Systems. Application to Large Wind Turbines », Faculty of Electrical Engineering, Dunarea de Jos, University – Galati, 2003.
- [2] E. S. Abdin, W. Xu, « Control design and Dynamic Performance Analysis of a Wind Turbine-Induction Generator Unit" IEEE Trans. on Energy conversion. Vol.15, No.1, March 2000.
- [3] B. MULTON, conférence de rentrée de l'Ecole Doctorale STIM, Saint Nazaire, 24 octobre 2002.
- [4] Aktarujjaman, M. and Kashem, M.A. and Negnevitsky, M. and Ledwich, Gerard, « Smoothing Output Power of a Doubly Fed Wind Turbine with an Energy Storage System » In Proceedings Australian Universities Power Engineering. Conference 2006, Melbourne, Victoria, Australia.
- [7] F. Poitiers, M. Machmoum, R. Le Doeuff and M.E. Zaim, « Control of a doubly – fed induction generator wind energy conversion systems », GE44-LARGE, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, Saint Nazaire, France.