

## Commande vectorielle par les réseaux de neurones artificiels de l'énergie d'une MADA intégrée à un système éolien

A. Meroufel\*, Y. Djeriri†, A. Massoum et A. Hammoumi

Laboratoire 'Intelligent Control & Electrical Power Systems', 'ICEPS'  
Département Electrotechnique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur,  
Université Djillali Liabès, B.P. 98, Sidi Bel Abbès, Algérie

(reçu le 24 Décembre 2009 – accepté le 25 Décembre 2010)

**Résumé** - *Le présent travail est consacré à une commande vectorielle de l'énergie active et réactive par les réseaux de neurones d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) intégrée à un système éolien. Le transfert de puissance entre le stator et le réseau est réalisé par action sur les signaux rotoriques via un convertisseur bidirectionnel. Pour une étude comparative, le contrôle indépendant de la puissance active et réactive est assuré dans la première étape par des régulateurs classiques (PI) et dans la deuxième étape par des régulateurs neuronaux (RN). Les performances et la robustesse sont analysées et comparées par simulation à base du logiciel Matlab/Simulink.*

**Abstract** - *This work is devoted to active and reactive energy vector control by neural networks of a doubly fed induction machine (DFIM) integrated in wind power system. The power transfer between the stator and the network is achieved by acting on the rotor signals via a bidirectional converter. For a comparative study, the independent control of active and reactive power is ensured in the first step by conventional controllers (PI) and the second step by neural regulators (RN). The performance and robustness are analyzed and compared by simulation based on software Matlab / Simulink.*

**Mots clés:** Eolienne - Machine Asynchrone à Double Alimentation - Commande vectorielle - Réseaux de neurones.

### 1. INTRODUCTION

Vu l'ampleur de l'industrialisation ces dernières décennies, la demande en énergie électrique est devenue très importante, ce qui a pour conséquence la diminution du stock mondial en hydrocarbure. Face à cela et au défi du réchauffement climatique de la terre causé par les émissions des gaz à effet de serre liées à la consommation excessive d'énergie d'origine matières fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel, etc.), il s'avère nécessaire de faire appel à des sources d'énergie nouvelles qui seront sans conséquence pour l'homme et l'environnement.

C'est ainsi que les pays industrialisés dans le cadre du protocole de Kyoto se sont lancés dans le développement et l'utilisation des sources d'énergies renouvelables comme le solaire, la biomasse, la géothermie, la marémotrice, l'hydraulique, ...

Parmi ces sources d'énergie, l'éolienne représente un potentiel assez important non pas pour remplacer les énergies existantes, mais pour palier à l'amortissement de la

---

\* ameroufel@yahoo.fr

† djeriri\_youcef@yahoo.fr

demande de plus en plus galopante. Après des siècles d'évolution et des recherches plus poussées depuis quelques décennies, plusieurs pays se sont, aujourd'hui résolument tournés vers l'énergie éolienne [1].

L'un des axes actuels de recherche est la génération d'énergie électrique à l'aide de machine asynchrone à double alimentation, utilisant comme moyen d'entraînement l'énergie éolienne. Intégrée dans un système éolien, la MADA permet de fonctionner sur une large plage de vitesse de vent, et d'en tirer le maximum de puissance possible pour chaque vitesse de vent. Son circuit statorique est connecté directement au réseau électrique.

Un second circuit placé au rotor est également relié au réseau, mais par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance [2]. Etant donné que la puissance rotorique transitée est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance.

C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette machine pour la production en forte puissance. Une seconde raison est la possibilité de régler la tension au point de connexion de cette machine.

Plusieurs méthodes de commande des MADA sont apparues, parmi elles, la commande vectorielle. Son principe de base est de rendre ces machines semblables du point de vue commande à une machine à courant continu à excitation séparée. Ces dernières années, un grand intérêt est donné à l'utilisation des réseaux de neurones en identification et commande des systèmes non linéaires, ceci est dû principalement à leurs capacités d'apprentissage et de généralisation [3, 7].

Notre travail rentre dans le cadre de cette optique et a pour objectif le contrôle des puissances. Il est organisé de la façon suivante:

La section 2 est réservée à la modélisation de la MADA et l'analyse vectorielle de la puissance active et réactive. La section 3 porte sur le principe de la commande indirecte.

La section 4 traite le principe de fonctionnement du convertisseur coté rotor. La section 5 montre la méthodologie de dimensionnement des correcteurs classiques PI.

La section 6 met en évidence les résultats de simulation.

La section 7 analyse la correction du facteur de puissance.

La section 8 étudie la robustesse du système.

La section 9 met en valeur l'efficacité de la commande par réseaux de neurones. On termine par une conclusion sur l'efficacité des réseaux de neurones.

## 2. CONTROLE DE LA PUISSANCE

Pour pouvoir commander facilement la production d'électricité de l'éolienne, nous allons réaliser un contrôle indépendant des puissances actives et réactives par orientation du flux statorique.

Le principe consiste à aligner le flux statorique suivant l'axe  $d$  du référentiel tournant (Fig. 1) [4]. On a donc:  $\phi_{sq} = 0$  et par suite  $\phi_{sd} = \phi_s$ .

Dans l'hypothèse où le flux  $\phi_{sd}$  est maintenu constant (ce qui est assuré par la présence d'un réseau stable connecté au stator), le choix de ce repère rend le couple

électromagnétique produit par la machine et par conséquent la puissance active uniquement dépendante du courant rotorique d'axe q [2].

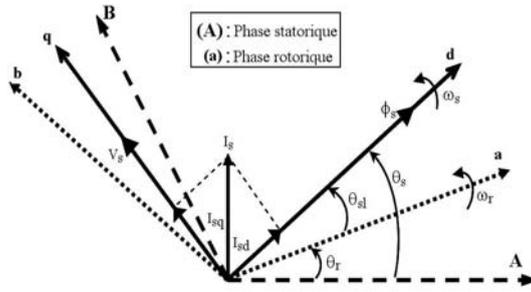


Fig. 1: Orientation du flux statorique sur l'axe d

Le modèle diphasé de la MADA dans le référentiel (d, q) lié au champ tournant est donné par [2, 4]:

**Equations des tensions**

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

**Equations des flux**

$$\begin{cases} \phi_{sdq} = L_s \times I_{sdq} + L_m \times I_{rdq} \\ \phi_{rdq} = L_r \times I_{rdq} + L_m \times I_{sdq} \end{cases} \quad (2)$$

**Equation du couple**

$$C_{mec} = C_e = -\frac{3}{2} p \times \frac{L_m}{L_r} \times (\phi_{sd} \times I_{rq} - \phi_{sq} \times I_{rd}) \quad (3)$$

En appliquant la technique d'orientation du flux statorique sur le modèle de la machine les équations (1), (2) et (3) deviennent:

$$C_e = -\frac{3}{2} p \times \frac{L_m}{L_s} \times (\phi_{sd} \times I_{rq}) \quad (4)$$

Notons que ce couple représente une perturbation pour la turbine éolienne et prend une valeur négative.

De plus, si l'on néglige la résistance des enroulements statoriques, hypothèse réaliste pour les machines de forte puissance utilisées pour la production éolienne [4-6], les équations des tensions statoriques de la machine se réduisent à:

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \times \phi_s \end{cases} \quad (5)$$

Avec  $\omega_s$  la pulsation électrique des grandeurs statoriques.

$$\begin{cases} \phi_s = L_s \times I_{sd} + L_m \times I_{rd} \\ 0 = L_s \times I_{sq} + L_m \times I_{rq} \end{cases} \quad (6)$$

A partir de l'équation (6), nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques:

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{\phi_s}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} \times I_{rd} \\ I_{sq} = -\frac{L_m}{L_s} \times I_{rq} \end{cases} \quad (7)$$

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

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} \times I_{sd} + V_{sq} \times I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} \times I_{sd} - V_{sd} \times I_{sq} \end{cases} \quad (8)$$

L'adaptation de ces équations au système d'axes choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas ( $V_{sd} = 0$ ) donne:

$$\begin{cases} P_s = V_s \times I_{sq} \\ Q_s = V_s \times I_{sd} \end{cases} \quad (9)$$

En remplaçant les courants statoriques par leurs valeurs de l'équation (7) dans l'équation (8), nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances active et réactive:

$$\begin{cases} P_s = -V_s \times \frac{L_m}{L_s} \times I_{rq} \\ Q_s = V_s \times \frac{\phi_s}{L_s} - V_s \times \frac{L_m}{L_s} \times I_{rq} \end{cases} \quad (10)$$

En tirant ( $\phi_s = V_s / \omega_s$ ) de l'équation (5), l'expression de la puissance réactive devient:

$$Q_s = \frac{V_s^2}{L_s \times \omega_s} - \frac{V_s \times L_m}{L_s} \times I_{rd} \quad (11)$$

Compte tenu du repère choisi et des approximations faites et si l'on considère l'inductance magnétisante  $L_m$  comme constante, le système obtenu lie de façon proportionnelle la puissance active au courant rotorique d'axe q et la puissance réactive au courant rotorique d'axe d à la constante  $(V_s^2 / \omega_s \times L_s)$  pré imposée par le réseau.

On pourrait exprimer les tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques, en remplaçant dans l'équation (2), les valeurs des courants statoriques de l'équation (7) et en remplaçant le résultat ainsi obtenu dans l'équation (1). Ainsi, nous obtenons:

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r \times I_{rd} + \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) \times \frac{dI_{rd}}{dt} - g \times \omega_s \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) \times I_{rq} \\ V_{rq} = R_r \times I_{rq} + \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) \times \frac{dI_{rq}}{dt} - g \times \omega_s \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) \times I_{rd} + g_s \times \frac{L_m \times V_s}{L_s} \end{cases} \quad (12)$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent, nous pouvons donc écrire [2, 4]:

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r \times I_{rd} - g \times \omega_s \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) \times I_{rq} \\ V_{rq} = R_r \times I_{rq} + g \times \omega_s \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) \times I_{rd} + g_s \times \frac{L_m \times V_s}{L_s} \end{cases} \quad (13)$$

Où g correspond au glissement de la machine asynchrone.

$V_{rd}$  et  $V_{rq}$  sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus. L'influence des termes de couplage entre les deux axes en  $((L_r(L_m^2/L_s))$  est minime. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser.

En revanche le terme  $((g L_m V_s)/L_s)$  représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. Son influence n'est pas négligeable, car elle entraîne une erreur de traînage. Le contrôle du système devra donc prendre en compte cette erreur [2]. Les équations (9), (10) et (12) nous permettent d'établir le schéma bloc du système électrique de la MADA à réguler, (Fig. 2).

Les termes de couplage sont désignés par  $v_2$ ,  $v_3$  et les f.e.m's par  $v_1$  et  $v_4$ . Dans ce schéma, nous avons fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances actives et réactives statoriques.

Ce qui nous permet de mettre en place une commande vectorielle, étant donné qu'à l'influence du couplage près, chaque axe peut être commandé indépendamment avec chacun son propre régulateur. Les grandeurs de références pour ces régulateurs seront: la puissance active pour l'axe «q» rotorique et la puissance réactive pour l'axe «d» rotorique.

La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le

réseau. La consigne de puissance active permet de garder le coefficient de puissance de l'éolienne optimal.

De plus, la commande indirecte avec deux boucles en cascades permet d'accroître la robustesse du système [2, 4, 7].

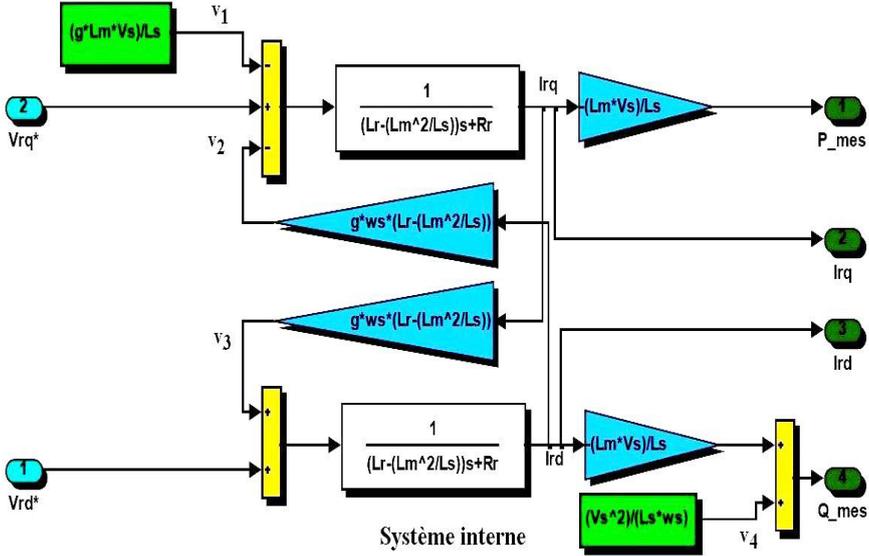


Fig. 2: Schéma bloc du système à réguler

### 3. COMMANDE INDIRECTE EN PUISSANCE DE LA MADA

En se basant sur les équations régissant le fonctionnement de la machine définie précédemment sous les hypothèses simplificatrices et en combinant les différentes équations, on peut écrire:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{rd} = g \cdot \omega_s \cdot \left( \frac{L_r - \frac{L_m^2}{L_s}}{V_s \cdot L_m} \right) \cdot P_s - \left( \frac{R_r + \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right)}{V_s \cdot L_m} \right) p \times Q_s + \left( \frac{R_r \cdot V_s}{\omega_s \cdot L_s} + \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) \frac{V_s}{\omega_s \cdot L_m} p \right) \end{array} \right. \quad (14)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{rq} = -g \cdot \omega_s \cdot \left( \frac{L_r - \frac{L_m^2}{L_s}}{V_s \cdot L_m} \right) \cdot Q_s - \left( \frac{R_r + \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right)}{V_s \cdot L_m} \right) p \times P_s + g \cdot \omega_s \cdot \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) \cdot \frac{V_s}{\omega_s \cdot L_m} \end{array} \right. \quad (15)$$

Pour améliorer les performances, nous utilisons une régulation en cascade. Donc, deux boucles de régulation sont présentées pour chaque axe, l'une interne contrôlant le courant et l'autre externe contrôlant la puissance.

### 4. ASSOCIATION CONVERTISSEUR - MADA

La machine est alimentée par un convertisseur au rotor, alors que le stator est lié au réseau (fonctionnement en générateur pour une application du type éolien), (Fig. 3).

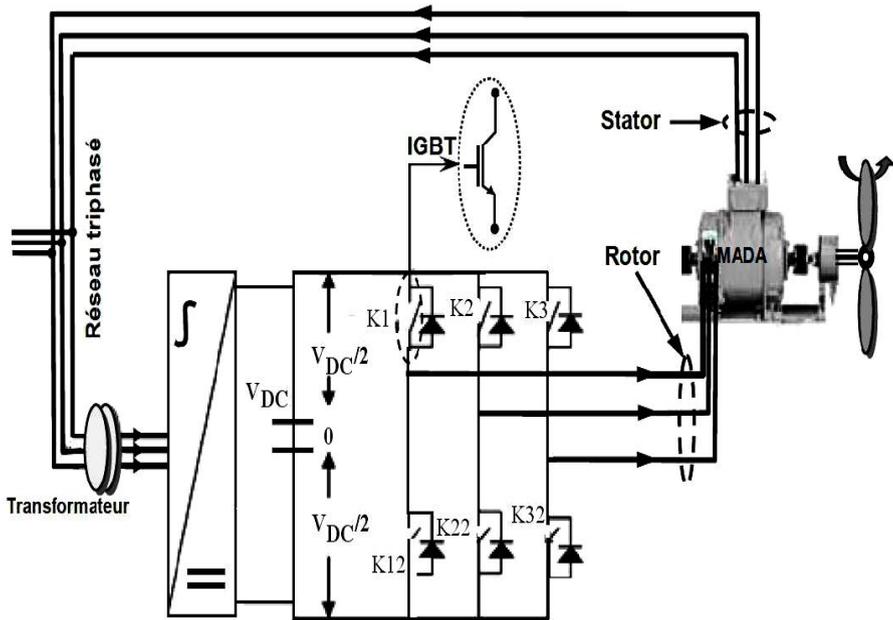


Fig. 3: Schéma de principe d'un onduleur triphasé alimentant le rotor d'une MADA

Les couples d'interrupteurs (K11 et K12), (K21 et K22), (K31 et K32) doivent être commandés de manière complémentaire pour assurer la continuité des courants alternatifs dans la charge d'une part et d'éviter le court-circuit de la source d'autre part.

Les diodes ( $D_i$  ( $i = a, b, c$ )) sont des diodes à roue libre assurant la protection des IGBT's. L'état des interrupteurs, supposés parfaits peut être défini par trois grandeurs booléennes de commande ( $S_i$  ( $i = a, b, c$ )):

$S_i = 1$ , cas où l'interrupteur de haut est fermé et celui d'en bas ouvert.

$S_i = 0$ , cas où l'interrupteur de haut est ouvert et celui d'en bas fermé.

Les équations instantanées des tensions simples à la sortie de l'onduleur en fonction des grandeurs de commande sont données par:

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{DC}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \tag{16}$$

Avec  $V_{DC}$  la tension continue à l'entrée de l'onduleur.

La technique MLI triangulo-sinusoidal sera utilisée dans ce travail.

## 5. SYNTHÈSE DU REGULATEUR

Rappelons que la synthèse des régulateurs sera effectuée sur la base du modèle simplifié (c'est-à-dire celui établi en négligeant la résistance d'une phase statorique) et non pas sur le modèle réel de la machine [7].

Pour les axes  $d$  et  $q$ , la fonction de transfert en boucle ouverte intégrant la présence des régulateurs est:

$$FTBO = \frac{p + \frac{k_i}{k_p}}{\frac{p}{k_p}} \times \frac{\frac{L_m V_s}{L_s \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right)}}{p + \frac{L_s R_r}{L_s \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right)}} \quad (17)$$

Afin d'éliminer le zéro présent sur la fonction de transfert, nous choisissons la méthode de compensation des pôles pour la synthèse du régulateur, ce qui se traduit par l'égalité suivante:

$$\frac{k_i}{k_p} = \frac{L_s R_r}{L_s \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right)} \quad (18)$$

Si les pôles sont parfaitement compensés, la fonction de transfert en boucle ouverte devient:

$$FTBO = \frac{k_p \times \frac{L_m V_s}{L_s \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right)}}{p} \quad (19)$$

La fonction de transfert en boucle fermée s'exprime par:

$$FTBO = \frac{1}{1 + p\tau_r} \quad \text{où} \quad \tau_r = \frac{1}{k_p} \times \frac{L_s \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right)}{L_m \cdot V_s} \quad (20)$$

Pour un temps de réponse  $t_r(5\%) = 1\text{ms}$ , on obtient:

$$k_p = \frac{1}{10^{-3}} \frac{L_s \cdot L_r - L_m^2}{L_m \cdot V_s} \quad (21)$$

$$k_i = \frac{1}{10^{-3}} \frac{L_m \cdot R_r}{L_m \cdot V_s} \quad (22)$$

### 6. SIMULATION DE LA COMMANDE DE LA MADA

La simulation de la commande vectorielle indirecte de la MADA associée au système éolien a été faite avec le logiciel Matlab/Simulink, (Fig. 4).

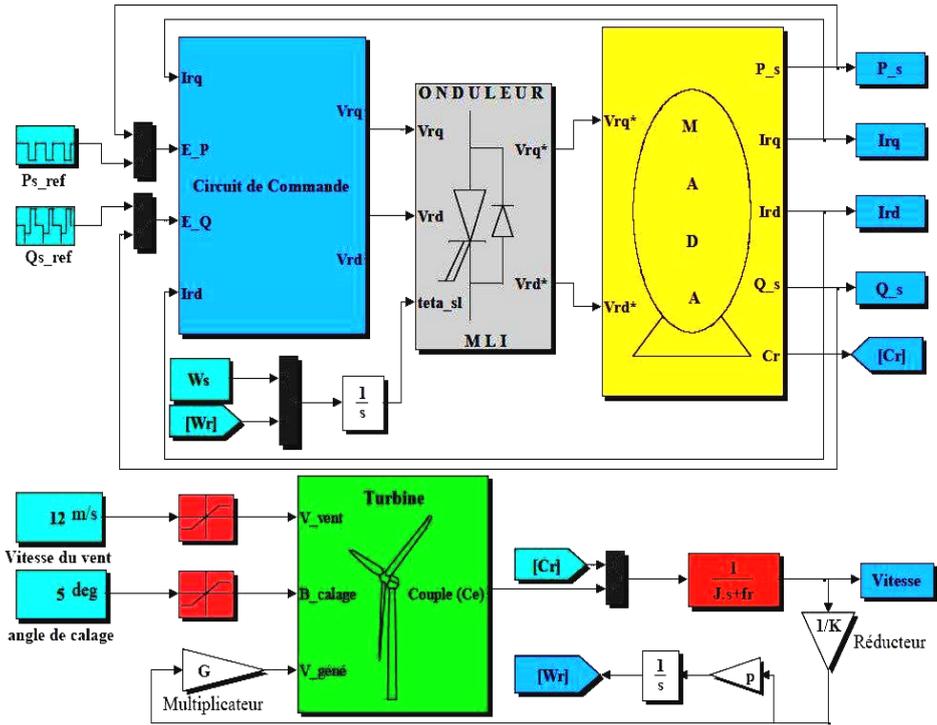


Fig. 4: Schéma bloc de la commande indirecte de la MADA avec PI

La figure 5 présente les résultats de simulation de la commande indirecte de la génératrice asynchrone à double alimentation en présence de l'onduleur rotorique.

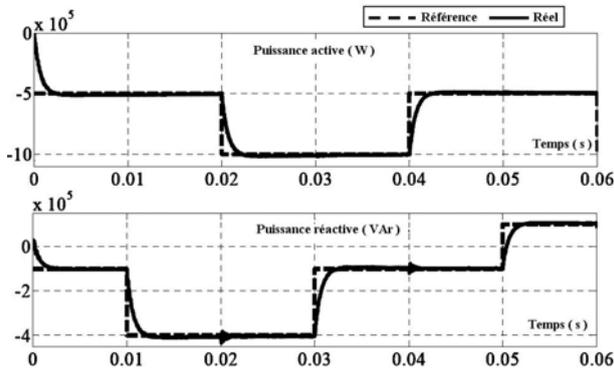


Fig. 5: Résultats de simulation

On voit bien que les puissances active et réactive du système suivent parfaitement les échelons de référence. Le signe négatif de la puissance réactive montre que la génératrice fonctionne en mode capacitif. Dans le cas où elle fonctionne en mode inductif, la puissance devient automatiquement positive.

## 7. CONTROLE DU FACTEUR DE PUISSANCE

La consigne de la puissance réactive statorique sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire, côté stator, de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau.

La figure 6 montre l'efficacité de cette méthode pour la correction du facteur de puissance.

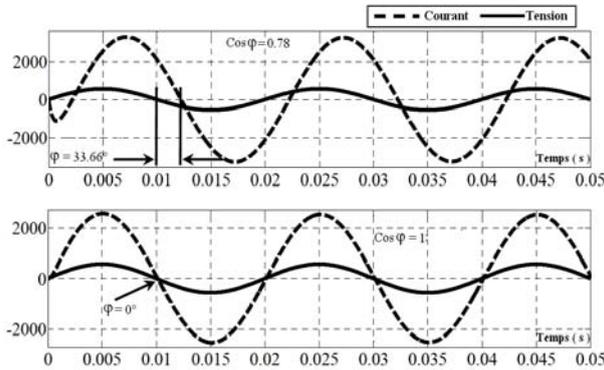


Fig. 6: Contrôle du facteur de puissance, coté réseau

Sur la figure du haut:  $Q_{ref} = -0,8\text{MVAR}$  et  $P_{ref} = -1\text{MW}$ , alors que  $\cos \varphi$  est égal à 0,78, c'est-à-dire un déphasage  $\varphi = 38,66^\circ$ .

Sur la figure du bas:  $Q_{ref} = 0\text{MVAR}$  et  $P_{ref} = -1\text{MW}$ , alors que  $\cos \varphi$  est unitaire, c'est-à-dire un déphasage  $\varphi = 0^\circ$ . On peut ainsi compenser la consommation de la puissance réactive de la machine asynchrone et fournir au réseau de la puissance réactive en fonction de la demande.

## 8. ROBUSTESSE DE LA COMMANDE

L'essai de robustesse consiste à faire varier les paramètres du modèle de la MADA utilisée. En effet les calculs des régulateurs sont basés sur des fonctions de transfert dont les paramètres sont supposés fixes. Toutefois, dans un système réel, ces paramètres sont soumis à des variations entraînées par différents phénomènes physiques (saturation des inductances, échauffement des résistances...).

L'influence des variations paramétriques de la machine sur la commande indirecte est présentée à la figure 7.

De haut en bas: Influence de la variation de la résistance rotorique  $R_r$  de + 50 % de sa valeur nominale; Influences des variations des inductances respectivement statoriques ( $L_s$ ), rotoriques ( $L_r$ ) et mutuelles ( $L_m$ ) de 10 % de leur valeur nominale.

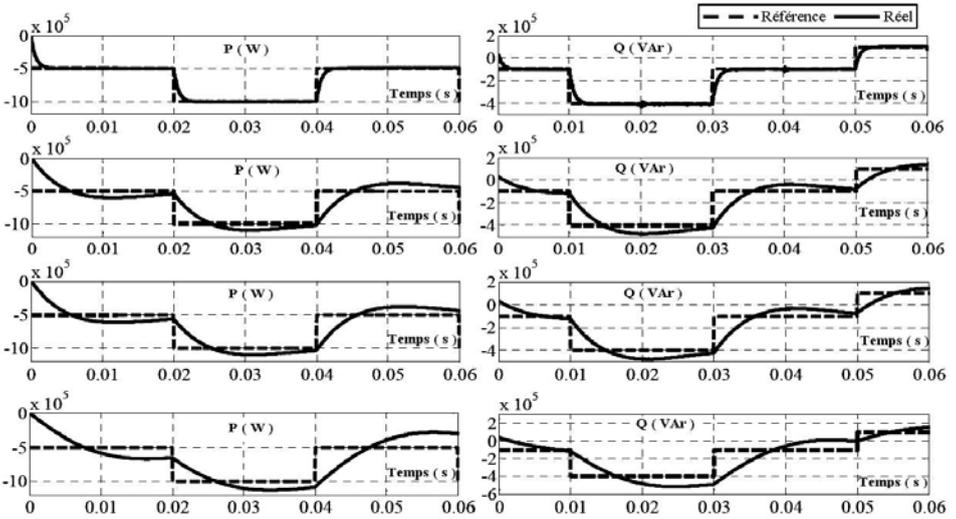


Fig. 7: Influence des variations paramétriques sur la commande indirecte

La commande perd ses performances en temps de réponse particulièrement aux variations des inductances, car le calcul des gains  $k_p$  et  $k_i$  du régulateur PI repose essentiellement sur ces paramètres.

Par ailleurs, si plusieurs paramètres de la machine varient en même temps avec de grandes proportions, les régulateurs PI n'arriveront plus à maintenir les performances du système et il faudrait alors faire appel à d'autres types de régulateurs plus robustes.

### 9. COMMANDE PAR RESEAUX DE NEURONES DE LA MADA

L'idée consiste à remplacer les quatre régulateurs PI de la commande indirecte par des régulateurs neuronaux (RN) simples. Pour l'apprentissage, nous utilisons l'algorithme de rétropropagation de Levenberg-Marquardt (LM) [7, 8].

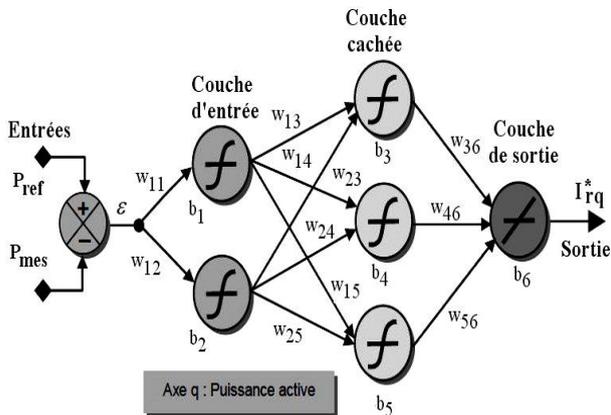


Fig. 8: Perceptron multicouche: structure (2-3-1)

Chaque réseau de neurones remplit une fonction bien définie dépendant de l'architecture choisie (nombre de couches cachées et le nombre de neurones dans chaque couche cachée). Le problème est de trouver une structure qui donne de meilleurs résultats.

Pour cela, nous avons fait plusieurs essais pour déterminer l'architecture optimale du réseau. Le choix le plus judicieux était de prendre une structure de réseau de neurones à une seule couche cachée contenant trois neurones utilisant la fonction d'activation sigmoïde, (Fig. 8).

Les résultats de simulation de la commande indirecte de la puissance active et réactive avec des régulateurs neuronaux sont donnés à la figure 9.

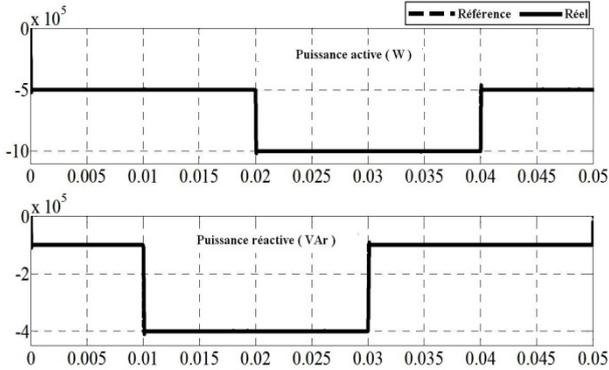


Fig. 9: Résultats de simulation de la commande par RNA

Les résultats de simulation obtenus montrent de bonnes performances en termes de temps de réponse (**Tableau 1**) et suivi de consigne pour la puissance active et la puissance réactive (**Tableau 2**).

**Tableau 1:** Comparaison entre les temps de réponse de PI et RN

	$t_r$ (puissance active)	$t_r$ (puissance réactive)
PI	1.97 ms	2.38 ms
RN	0.073 ms	0.056 ms

**Tableau 2:** Comparaison entre les erreurs statiques de PI et du RN

	$\Delta P$	$\Delta Q$
PI	10 kW (2 %)	7 kVAr (1.75 %)
RN	250 W (0.05 %)	50 Var (0.0125 %)

Les résultats de simulation obtenus à la figure 10 montrent la robustesse des régulateurs PI et RN face aux variations de plusieurs paramètres:

- Variation de la résistance rotorique  $R_r$  de +100 % de sa valeur nominale;
- Variations des inductances statoriques ( $L_s$ ), rotoriques ( $L_r$ ) et mutuelles ( $L_m$ ) de 20 % de leur valeur nominale.

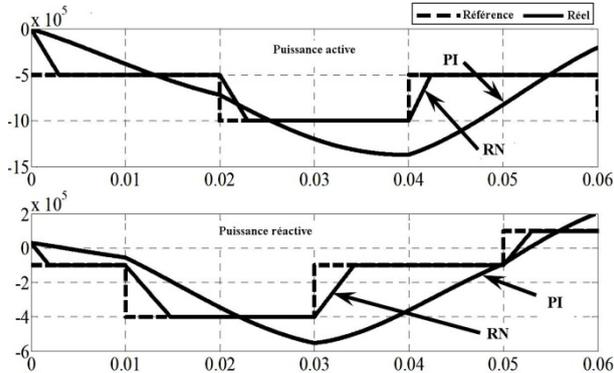


Fig. 10: Comparaison entre la robustesse de la commande vectorielle indirecte par PI et par RN

La comparaison entre les deux correcteurs montre que le régulateur neuronal présente de bonnes performances. Par contre, pour le régulateur PI, ses performances sont totalement détériorées.

### 10. CONCLUSION

Le travail effectué est une étude comparative des performances et robustesse des correcteurs: PI et Neuronal. La commande vectorielle indirecte de la génératrice asynchrone à double alimentation permet d'avoir un découplage et un contrôle indépendant de la puissance active et réactive.

Premièrement, la régulation est faite avec des régulateurs PI. Deuxièmement, la commande est à base de réseaux de neurones.

L'architecture du correcteur neuronal retenue est 2-3-1. Elle nous a permis d'une part, d'améliorer les performances dynamiques et statiques de la MADA et d'autre part, d'assurer une robustesse vis-à-vis des variations paramétriques de la machine.

### Paramètres du système éolien

Désignation des paramètres et symbole	Valeur
Puissance nominale, P	1.5 MW
Rayon de l'éolienne, R	35.25 m
Gain du multiplicateur de vitesse, G	90
Tension nominale statorique, $V_s$	398/690 V
Fréquence nominale statorique, f	50 Hz
Tension nominale rotorique, $V_r$	225/389 V
Fréquence nominale rotorique, $f_2$	14 Hz
Résistance statorique, $R_s$	0.012 $\Omega$

Résistance rotorique, $R_r$	0.021 $\Omega$
Inductance statorique, $L_s$	0.0137 H
Inductance rotorique, $L_r$	0.0136 H
Inductance mutuelle, $L_m$	0.0135 H
Inertie de l'arbre, J J	1000 kg.m <sup>2</sup>

## REFERENCES

- [1] Rapport, '*Le Baromètre Eolien; Systèmes Solaires, Journal des Energies Renouvelables*', N°183, Union Européen, Février 2008.
- [2] F. Poitiers, '*Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'Utilisation de l'Energie Eolienne*', Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, Décembre 2003.
- [3] G. Dreyfus, J. Martinez, M. Samuelides, M.B. Gordon, F. Badran et S. Thiria, '*Réseaux de Neurones: Méthodologie et Applications*', Editions Eyrolles, 2002.
- [4] A. Boyette, '*Contrôle-Commande d'un Générateur Asynchrone à Double Alimentation avec Système de Stockage pour la Production Eolienne*', Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy I, Décembre 2006.
- [5] G. Tapia, A. Tapia and J.X. Ostolaza, '*Proportional-Integral Regulator-Based Approach to Wind Farm Reactive Power Management for Secondary Voltage Control*', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 22, N°2, pp. 488 - 498, June 2007.
- [6] A. Tapia, G. Tapia, J.X. Ostolaza and J.R. Saenz, '*Modeling and Control of a Wind Turbine Driven Doubly Fed Induction Generator*', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 18, N°2, pp. 194 - 204, June 2003.
- [7] Y. Djeriri, '*Commande Vectorielle d'une MADA Intégrée à un Système Eolien*', Mémoire de Magister, Université de Sidi Bel-Abbes, Décembre 2009.
- [8] D. Yathley, '*Back Propagation Neural Networks for Non-Linear Self Tuning Adaptive Control*', IEEE, Control Systems Magazine, Vol. 10, N°3, pp 44 - 48, January 1990.