

Etude comparative entre la commande vectorielle directe et indirecte de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) dédiée à une application éolienne

Mohamed Allam^{1*}, Boubakeur Dehiba¹, Mohamed Abid¹, Youcef Djeriri²,
et Redouane Adjoudj¹

¹Laboratoire IRECOM (Interaction REseau COnvertisseur Machines)

²Laboratoire ICEPS (Intelligent Control & Electrical Power Systems)

Université de Djillali Liabès de Sidi Bel-Abbès 22000, Algérie

Abstract.—This paper presents a modeling and vector control of a doubly fed induction generator (DFIG) integrated in wind energy system. The objective is to apply this technique for controlling independently the active and reactive power generated by the DFIG, the performance of the system are tested and compared by simulation in terms of reference tracking, and robustness against parameters variations of the DFIG.

Keywords: *DFIG, vector control, PI controller, wind power.*

Résumé. Cet article présente la modélisation et la commande vectorielle d'une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) intégrée dans un système d'énergie éolienne. L'objectif est d'appliquer cette technique de commande pour contrôler indépendamment les puissances active et réactive générées par la GADA. Enfin, les performances du système ont testées et comparées par simulation en termes de suivi de consignes, et la robustesse vis-à-vis aux variations paramétriques de la GADA.

Mots clés: *GADA, commande vectorielle, régulateur PI, énergie éolienne.*

1. Introduction

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables (EnR) ont connu une forte croissance ces dernières années. Parmi ces sources d'énergies, l'éolienne représente un potentiel assez important non pas pour remplacer les énergies existantes, mais pour palier à l'amortissement de la demande de plus en plus galopante [1]. Il existe une nouvelle solution utilisant la machine alternative fonctionnant dans un mode un peu particulier, il s'agit de la machine asynchrone à double alimentation (MADA). Cette génératrice permet une production d'électricité à vitesse variable, ceci permet alors de mieux exploiter les ressources éoliennes pour différentes conditions de vent [2]. Mais la difficulté majeure rencontrée dans la commande de la MADA réside dans le fait que les puissances à commander sont des variables fortement couplées.

Dans cette optique, plusieurs méthodes de commande de la MADA sont apparues, parmi elles, la commande vectorielle, le principe de cette technique a été développé par BLASCHKE au début des années 70. Il consiste à orienter le vecteur flux afin de rendre cette machine semblable du point de vue commande à une machine à courant continu à excitation séparée. Cette commande basée sur les régulateurs classiques (réglage à action proportionnelle, intégrale et dérivée) [3] [4].

Dans cet article, nous nous intéressons à la commande vectorielle (directe et indirecte) des puissances active et réactive statorique de la GADA, appliquée au système éolien de 10KW.

*Corresponding author.

E-mail: allam2010@live.fr (A. Mohamed).

Address: BP 98 Sidi Bel Abbès 22000, Algeria.

2. Modélisation de la turbine éolienne

La puissance cinétique totale disponible sur la turbine d'une éolienne est donnée par :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v_v^3 = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R^2 v_v^3 \quad (1)$$

Avec :

ρ : Masse volumique de l'air (1.25 Kg/m³) ;

S : Est la surface balayée par l'éolienne ;

R : Correspond pratiquement à la longueur de la pale ;

v_v : Est la vitesse du vent en (m/s).

La puissance aérodynamique sur l'arbre est donnée par :

$$P_{turb} = C_p P_v = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R^2 v_v^3 \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad (2)$$

D'après Betz, le coefficient de puissance C_p ne peut être supérieur à 16/27 soit 0.59 [5].

B : Angle d'orientation des pales ;

λ : Est le ratio de vitesse défini comme étant le rapport entre la vitesse linéaire des pales ($\Omega_{turb} \cdot R$) et la vitesse du vent V_v .

$$\lambda = \frac{\Omega_{turb} \cdot R}{v_v} \quad (3)$$

Ω_{turb} : Vitesse de la turbine.

Les caractéristiques de C_p en fonction de λ pour différentes valeurs de l'angle de calage β sont illustrées sur la (fig.1).

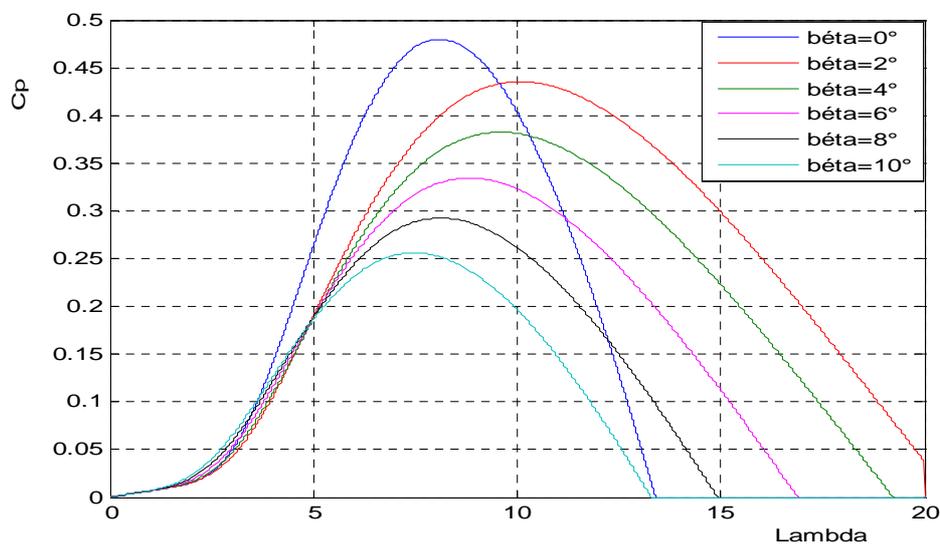


Fig. 1: Coefficient de puissance C_p en fonction de λ et β .

Le multiplicateur adapte la vitesse lente de la turbine à la vitesse de la génératrice. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes [6]:

$$\begin{cases} \Gamma_m = \frac{\Gamma_{turb}}{G} \\ \Omega_{turb} = \frac{\Omega_m}{G} \\ J_T = \frac{J_{turb}}{G^2} + J_g \end{cases} \quad (4)$$

$$\Gamma_{turb} = P_{turb} / \Omega_{turb} \quad (5)$$

Avec :

Ω_{turb} et Ω_m : Vitesse de rotation de l'éolienne respectivement avant et après le multiplicateur ;

Γ_{turb} : Couple aérodynamique ;

Γ_m : Couple après multiplicateur ;

G : Le gain du multiplicateur ;

J_g : L'inertie de la génératrice ;

J_T : L'inertie totale;

J_{turb} : L'inertie de la turbine.

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total, Γ_{mec} appliqué au rotor :

$$J_T \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \Gamma_{mec} = \Gamma_m - \Gamma_{em} - C_f \Omega_{mec} \quad (6)$$

Avec :

Γ_{em} : Est le couple électromagnétique ;

C_f : Est le Coefficient de frottement visqueux.

3. Modélisation de la MADA

La modélisation de la MADA est décrite dans le référentiel de Park. Le système d'équations suivant décrit la modélisation globale de la machine [2,7]:

3.1. Equations électriques

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_s + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (7)$$

3.2. Equations magnétiques

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (8)$$

3.3. Equation du couple

Le couple électromagnétique s'exprime quant à lui en fonction des courants et des flux par :

$$\Gamma_{em} = p \frac{M}{L_s} (I_{qr} \varphi_{ds} - I_{dr} \varphi_{qs}) \quad (9)$$

Avec respectivement :

V_{ds}, V_{qs}, V_{dr} et V_{qr} : Les tensions statorique et rotorique directes et en quadratures du système diphasé ;
 I_{ds}, I_{qs}, I_{dr} et I_{qr} : Les courants statoriques et rotorique directs et en quadratures du système diphasé ;
 $\varphi_{ds}, \varphi_{qs}, \varphi_{dr}$ et φ_{qr} : Les flux statorique et rotorique direct et en quadrature du système diphasé ;
 ω_s, ω_r : La pulsation électrique statorique et rotorique ; p : Le nombre de paires de pôles de la MADA.

4. Technique d'orientation du flux

La commande par orientation du flux, consiste à aligner le flux statorique suivant l'axe d du référentiel tournant, (Fig.2), [3,8-9]. On a donc: $\varphi_{sd} = \varphi_s$ et par suite $\varphi_{sq} = 0$

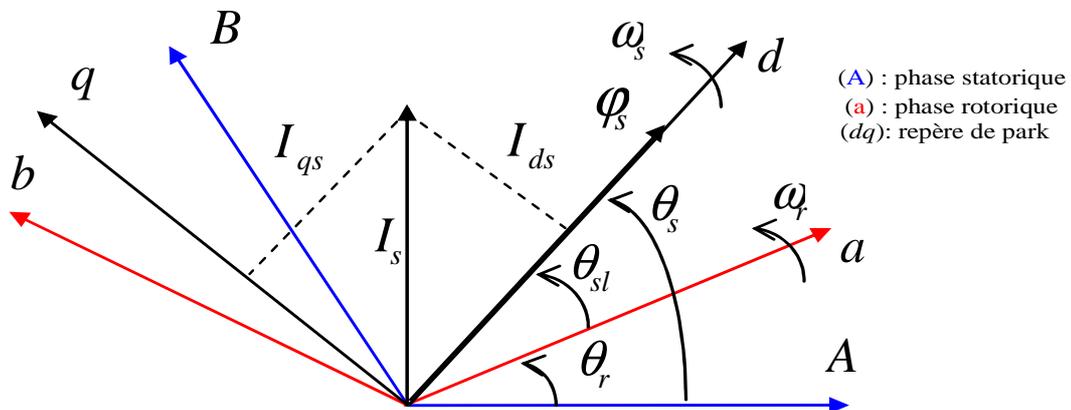


Fig.2: Orientation de l'axe d sur le flux statorique.

Le couple électromagnétique de l'équation (9) s'écrit alors :

$$\Gamma_{em} = p \frac{M}{L_s} I_{qr} \varphi_{ds} \quad (10)$$

Et l'équation (8) des flux devient :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \quad (11)$$

Si l'on néglige la résistance des enroulements statoriques, hypothèse réaliste pour les machines de forte puissance utilisées pour la production éolienne, les équations des tensions statoriques de la machine se réduisent à :

$$\begin{cases} V_{ds} = \frac{d\varphi_s}{dt} \\ V_{qs} = \omega_s \varphi_s \end{cases} \quad (12)$$

Avec l'hypothèse du flux statorique constant, on obtient :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s \end{cases} \quad (13)$$

A l'aide de l'équation (11), on peut établir le lien entre les courants statoriques et rotoriques :

$$\begin{cases} I_{ds} = -\frac{M}{L_s} I_{dr} + \frac{\varphi_s}{L_s} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (14)$$

Les puissances actives et réactives statoriques s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (15)$$

Ou bien encore, d'après l'équation (13) par :

$$\begin{cases} P_s = V_s I_{qs} \\ Q_s = V_s I_{ds} \end{cases} \quad (16)$$

Pour obtenir l'expression des puissances en fonction des courants rotoriques, on remplace dans l'équation précédente les courants par l'équation (14):

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{dr} + V_s \frac{\varphi_s}{L_s} \end{cases} \quad (17)$$

A partir des équations (12) et (13), nous obtenons, pour le flux statorique, l'expression suivante :

$$\varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \quad (18)$$

L'expression des puissances peut donc se simplifier de la manière suivante :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{dr} + \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} \end{cases} \quad (19)$$

En remplaçant dans l'équation (8) des flux, les courants statoriques par l'expression (14) on obtient :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \left(L_s - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + \frac{M V_s}{L_s \omega_s} \\ \varphi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \end{cases} \quad (20)$$

Pour le contrôle de la génératrice, des expressions sont établies montrant la relation entre les courants et les tensions rotoriques qui lui seront appliquées.

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{dr}}{dt} - g \omega_s \left(L_s - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{qr}}{dt} + g \omega_s \left(L_s - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (21)$$

Les équations précédentes permettent d'établir un schéma bloc du système électrique à réguler donné par la (Fig.3).

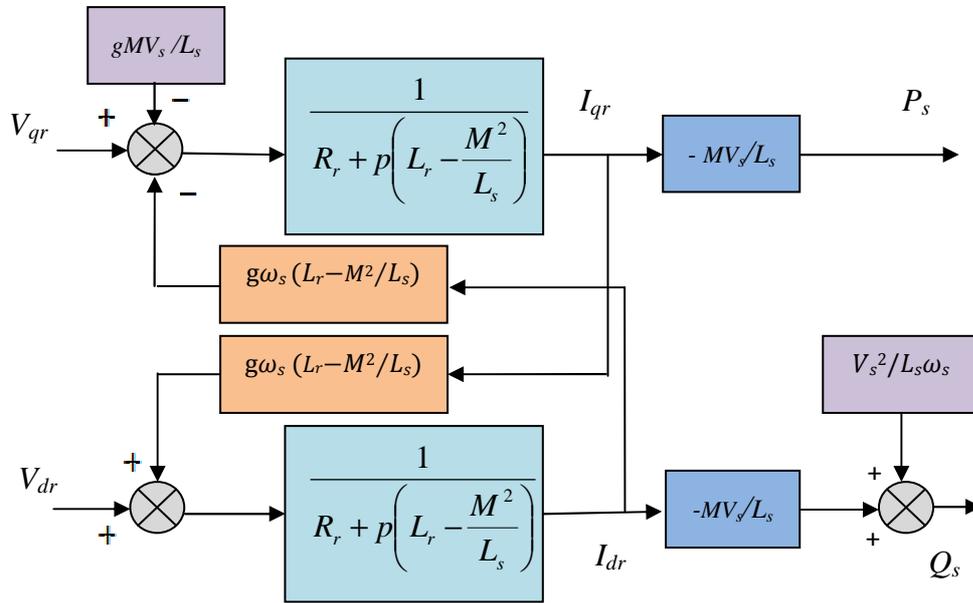


Fig.3: Schéma bloc du système à réguler.

On remarque que les puissances et les tensions sont liées par une fonction de transfert du premier ordre. De plus, du fait de la faible valeur du glissement g , il sera possible d'établir sans difficulté une commande vectorielle car les influences des couplages resteront faibles et les axes d et q , pourront donc être commandés séparément avec leurs propres régulateurs.

Ainsi, il ya deux méthodes pour effectuer la commande en puissance de cette machine, la Méthode qui consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances active et réactive. Cette méthode sera appelée méthode directe car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine (Fig. 4).

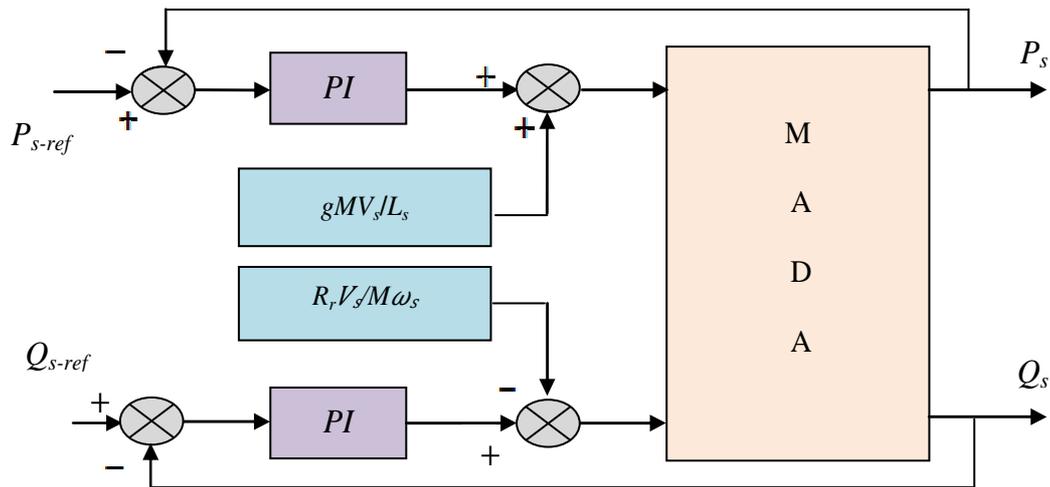


Fig. 4 : Schéma bloc de la commande directe.

La deuxième méthode consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques. Cette méthode appelée méthode indirecte découle directement des équations (19) et (21). (Fig. 5)

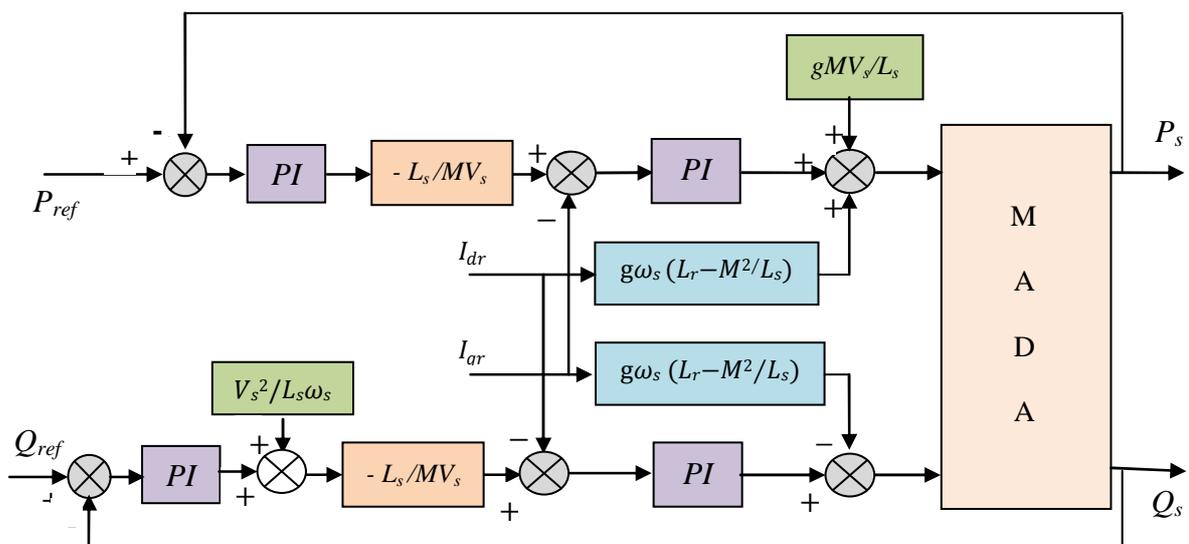


Fig. 5 : Schéma bloc de la commande indirecte.

4.1. Synthèse du régulateur PI

Le régulateur Proportionnel Intégral PI, utilisé pour commander la MADA en génératrice, est simple et rapide à mettre en œuvre tout en offrant des performances acceptables[3]. C'est pour cela qu'il a retenu notre attention pour une étude globale du système.

La (Fig. 6) montre une partie du système bouclé et corrigé par un régulateur PI dont la fonction de transfert est de la forme $K_p + \frac{K_i}{p}$ correspondant aux régulateurs utilisés dans la (Fig. 4) et (Fig. 5).

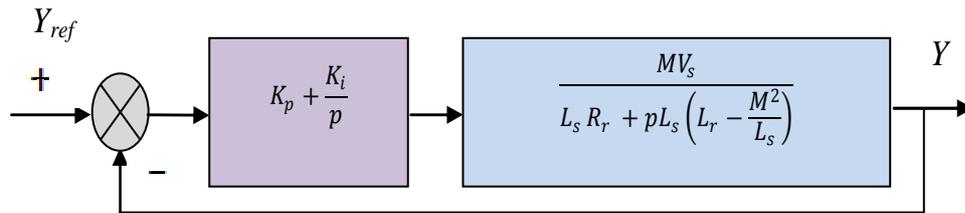


Fig.6 : Système régulé par un PI

La Fonction de Transfert en Boucle Ouverte (FTBO) avec les régulateurs s'écrit de la manière suivante :

$$FTBO = \frac{p + \frac{k_i}{k_p} \cdot \frac{MV_s}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{\frac{p}{k_p} \cdot \frac{L_s R_r}{p + \frac{L_s R_r}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}} \quad (22)$$

Nous choisissons la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert. Ceci nous conduit à l'égalité suivante :

$$\frac{k_i}{k_p} = \frac{L_s R_r}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \quad (23)$$

Si l'on effectue la compensation, on obtient la FTBO suivante :

$$FTBO = \frac{k_p \frac{MV_s}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{p} \quad (24)$$

Ce qui nous donne en boucle fermée :

$$FTBF = \frac{1}{1 + p \tau_r} \quad \text{avec} \quad \tau_r = \frac{1}{k_p} \frac{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{MV_s} \quad (25)$$

Pour un temps de réponse τ_r (5%) = 1ms, on obtient:

$$K_p = \frac{1}{\tau_r} \frac{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{MV_s}; K_i = \frac{1}{\tau_r} \frac{R_r L_s}{MV_s} \quad (26)$$

5. Simulation et interprétation des résultats

La simulation est réalisée à l'aide du logiciel Matlab/Simulink. Nous avons donc soumis ce système à des échelons de puissance active et réactive afin d'observer le comportement de sa régulation.

Les figures (Fig.7) et (Fig.8) représentent respectivement les résultats de simulation de la commande vectorielle directe et indirecte de la génératrice asynchrone à double alimentation.

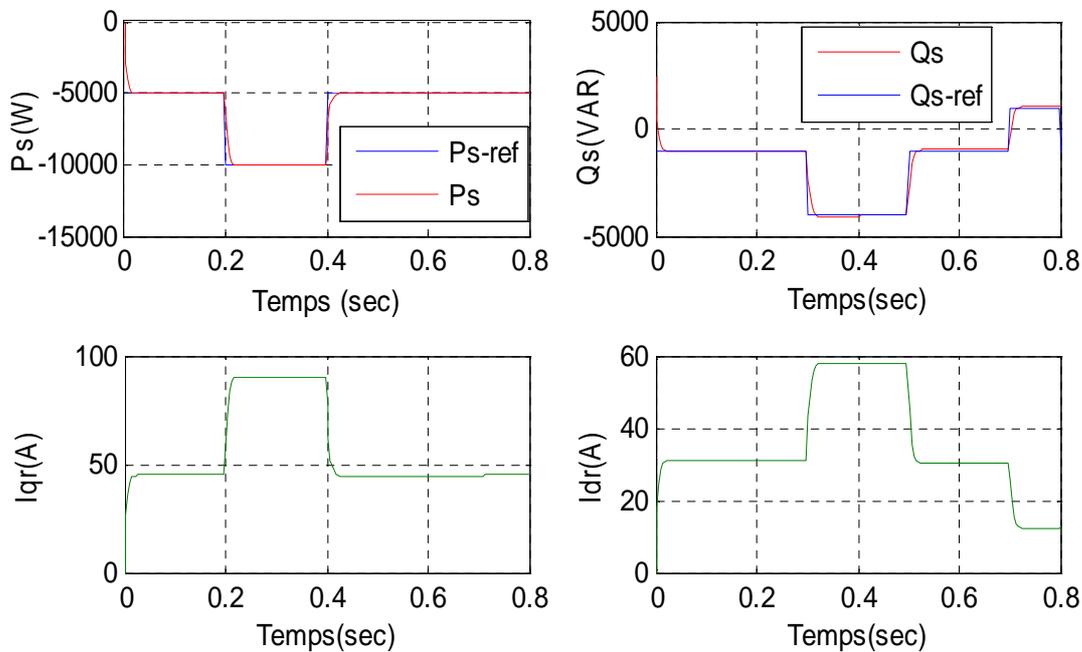


Fig.7 : Résultats de simulation de la commande vectorielle directe.

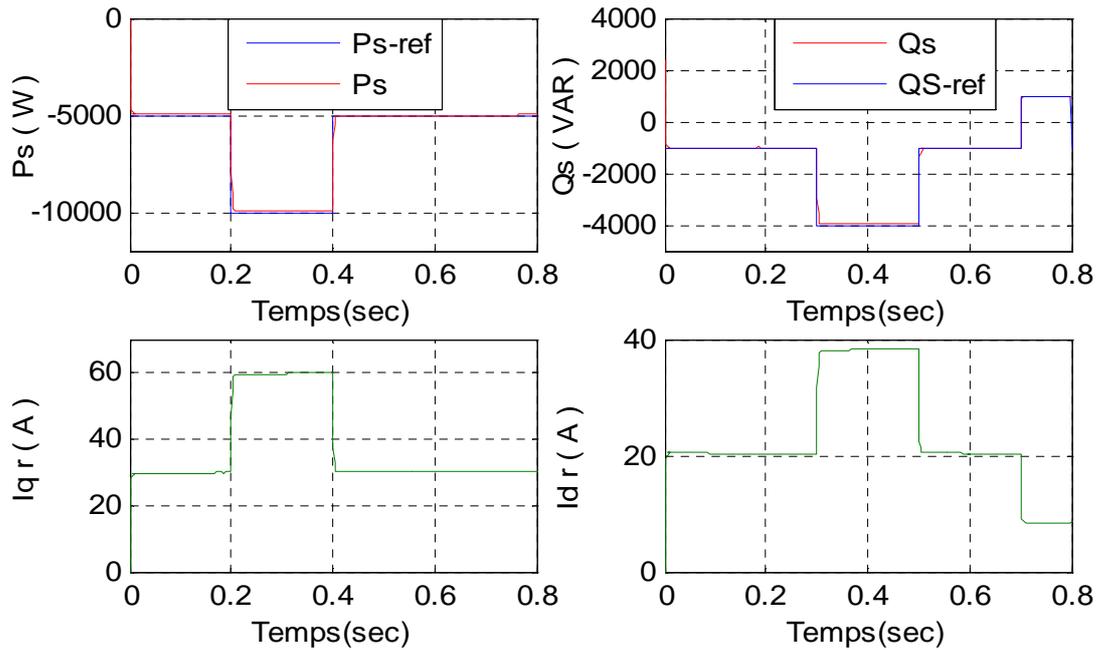


Fig.8 : Résultats de simulation de la commande vectorielle indirecte.

Pour la (fig.7), On peut remarquer que les échelons de puissance sont bien suivis par la génératrice aussi bien pour la puissance active que pour la puissance réactive. On voit bien aussi que la puissance active statorique P_s dépend du courant rotorique en quadrature I_{qr} et que la puissance réactive statorique Q_s dépend du courant rotorique direct I_{dr} et là également on observe l'effet du couplage entre les deux axes de commande d et q.

La puissance active du côté statorique est réactive est réglable selon les besoins du réseau. négative ce qui signifie que le réseau dans ce cas est un récepteur de l'énergie fournie par la MADA, La puissance

La (fig. 8) montre que notre système présente une dynamique satisfaisante et une erreur statique presque nulle, que ce soit pour la puissance active ou réactive, on observe une dynamique qui réagit rapidement et sans dépassement. Le couplage entre les deux puissances est très faible est peu perceptible.

5.1. Tests de robustesse

La robustesse des commandes est un point important, surtout pour les systèmes comportant plusieurs entités en interaction ou les systèmes à fortes variations de paramètres.

La (Fig. 9) représente une comparaison entre la robustesse de la commande vectorielle directe et indirecte avec variations paramétriques (l'inductance mutuelle ' M ' de 10% à sa valeur nominale) de la MADA.

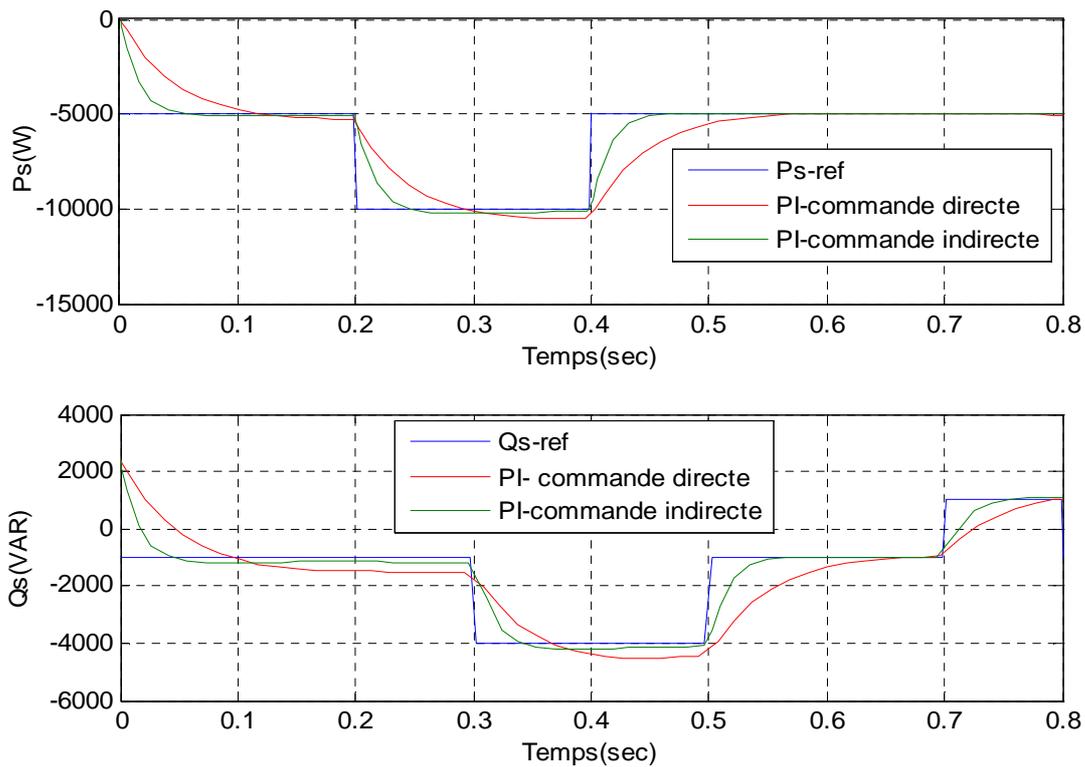


Fig. 9: Influence des variations paramétriques sur la commande vectorielle directe et indirecte.

D’après les résultats obtenus, on constate que le régulateur PI perd sa robustesse particulièrement face aux variations paramétriques.

Le tableau 1 suivant représente une étude comparative entre la commande vectorielle directe et indirecte en termes : temps de réponse et suivi de consigne de la puissance active.

Tableau. I: Comparaison entre la commande vectorielle directe et indirecte.

	Commande Directe	Commande Indirecte
Temps de réponse t_r (ms)	51.0	27.6
Erreur statique ΔP_s (%)	0.8	0.2

5.1. Contrôle de facteur de puissance

Dans cette partie la consigne de 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 consigne de puissance active devra permettre de garder le coefficient de puissance de l’éolienne optimal (Fig. 10).

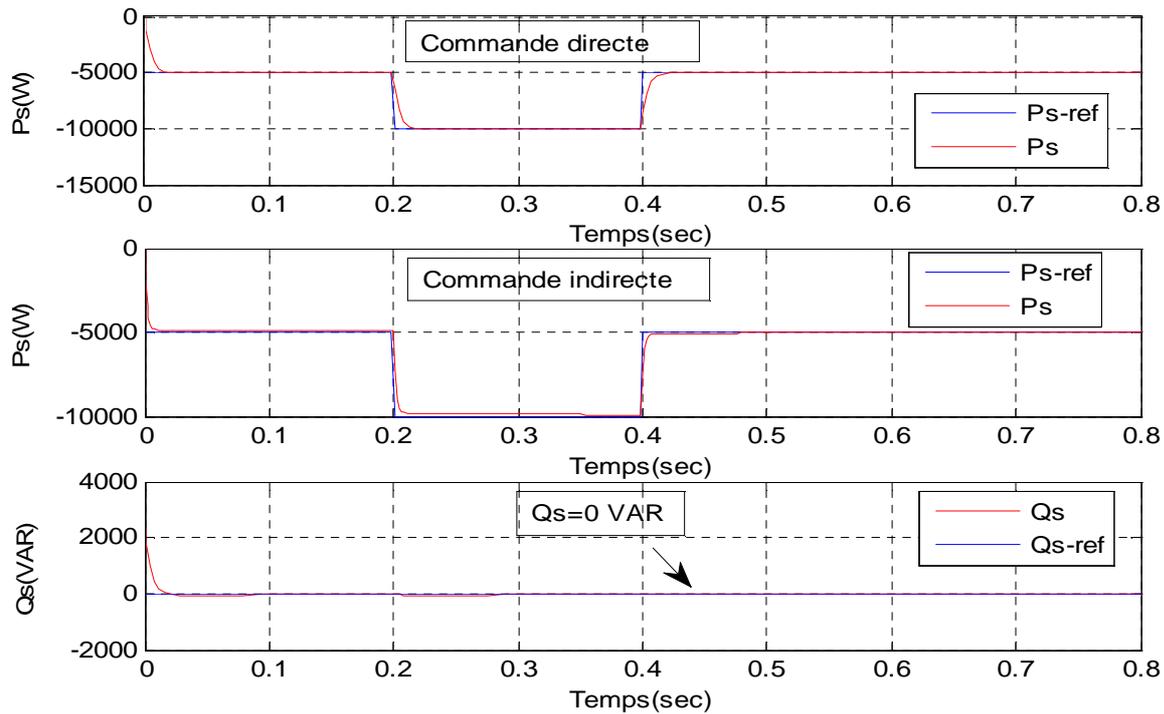


Fig. 10 : Commande vectorielle à facteur de puissance unitaire.

On peut dire que le contrôle de la puissance active pour la génératrice éolienne est parfaitement réalisé à un facteur de puissance unitaire ($\cos \varphi = 1$).

6. Conclusion

Cet article présente une étude comparative entre la commande vectorielle directe et indirecte de la GADA intégrée à un système éolien. Tout d'abord, la modélisation de la turbine éolienne et la génératrice est réalisé afin d'appliquer la technique d'orientation du flux (FOC). Ensuite, la synthèse d'un régulateur Proportionnel-Intégral (PI) est réalisée. Ce type de régulateur reste le plus communément utilisé pour la commande, ainsi que dans de nombreux systèmes de régulation industriels.

Effectivement nous avons pu voir que la commande directe est la plus simple à mettre en œuvre, mais pas la plus performante. En revanche, la méthode indirecte nous permet, avec le bouclage en cascade, d'avoir un système un peu performant. Elle est certes plus complexe à mettre en œuvre par rapport à la commande directe, mais permettra d'avoir un fonctionnement optimal du système de génération électrique en minimisant les éventuels soucis liés aux variations paramétriques de la GADA.

Références

- [1] Rapport, Le Baromètre Eolien; Systèmes Solaires, Journal des Energies Renouvelables, n°183, Union Européenne, Février 2008.
- [2] M. Adjoud j: Commande de la MADA pour la Production D'énergie Eolienne, Thèse de Doctorat, Université de Sidi Bel-Abbes, Alger, 2011.
- [3] Y. Djeriri : Commande Vectorielle d'une MADA Intégrée à un Système Eolien, Mémoire de Magister, Université de Sidi Bel-Abbes, Alger, 2009.

- [4] A. Chaiba : Commande de la Machine Asynchrone à Double Alimentation par des Techniques de l'intelligence artificielle, Thèse de Doctorat, Université de Batna, Alger, 2010.
- [5] F. Poitier : Etude et commande de la génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne, Thèse de doctorat, Université de Nantes, France, 2003.
- [6] A. Djoudi : Exploitation robuste d'une éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation, vol. 15 n°4:20-29, Juil/Déc. 2012.
- [7] S. Müller : Doubly fed induction generator systems, IEEE Ind. Appl. Mag., vol. 8, n°3:26-33, May/June 2002.
- [8] P.E. Vidal : Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation, Thèse de doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2004.
- [9] A. Boyette : Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne, Thèse de doctorat en génie électrique, Université Henri Poincaré, Nancy I, France, 2006.

Paramètres de la MADA

Tableau. II : Paramètres de la Machine Asynchrone à Double Alimentation

Désignation des paramètres et symbole	Valeur
<i>Puissance nominale, P</i>	10KW
<i>Tension nominale, V_s</i>	230/400V
<i>Courant nominale, I_s</i>	20/30A
<i>Vitesse nominale</i>	1420 tr/min
<i>Fréquence nominale, f</i>	50Hz
<i>Résistance statorique, R_s</i>	0.455 Ω
<i>Résistance rotorique, R_r</i>	0.19 Ω
<i>Inductance statorique, L_s</i>	0.07H
<i>Inductance rotorique, L_r</i>	0.0213H
<i>Inductance mutuelle, M</i>	0.034H
<i>Moment d'inertie, J_g</i>	0.031 Kg.m ²
<i>Coefficient de frottement, C_f</i>	0.00114 Kg.m ² /s
<i>Nombre de paires de pôles, p</i>	2