

Contrôle Robuste et Suivi Optimal de la Puissance Active et Reactive du GADA Intégré à L'éolienne Par Utilisé des Différents Régulateurs

Z. Zeghdi¹, L. Barazane², S. Abdelmalek³, K. Miloudi⁴, A. Chems⁵, A. Larabi⁶

^{1,2,4,6} Département d'Electrotechnique, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Algérie, Laboratoire des Systèmes Electriques et Industriels LSEI-USTHB.

³ Département d'Electrotechnique, Université de Hassiba Benbouali Chlef, Algérie.

⁵ Département de Génie Electrique, Faculté de Technologie, Université d'El Oued, Algérie.

¹ zoubirzeghdi@gmail.com, ² lbarazane@yahoo.fr, ³ s.abdelmalek@univ-chlef.dz, ⁴ khaledmiloudi888@gmail.com, ⁵ chemsadoct@yahoo.fr, ⁶ Abdelkaderlarabi@gmail.com

Résumé— Cet article est destiné au fonctionnement d'un système éolien à base d'une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) avec contrôle des puissances active et réactive injectées au réseau électrique. Aussi, et dans ce contexte, la première partie de ce travail sera portée à la synthèse des différentes méthodes de réglage par des correcteurs classiques (PI et IP et RST), alors que la seconde partie sera consacrée à la comparaison des performances de ces méthodes de réglage en termes de suivi de consigne, sensibilité aux perturbations et robustesse vis à vis des variations des paramètres de la machine asynchrone à double alimentation. Enfin, et dans le but de mettre en relief les avantages et/ou inconvénients de chacune des méthodes utilisées, des simulations numériques sous environnement Matlab/Simulink seront effectuées dans les mêmes conditions de fonctionnement.

Keywords-Eolienne, Machine asynchrone à double alimentation (MADA), commande vectorielle, régulateur PI, IP et RST.

NOMENCLATURE

P : Puissance active statorique,
Q : Puissance réactive statorique,
R_s : Résistance statorique,
R_r : Résistance rotorique,
L_s : Inductance cyclique statorique,
L_r : Inductance cyclique rotorique,
L_m : Inductance cyclique mutuelle entre le stator et le rotor,
K_p : Coefficient de l'action proportionnelle du régulateur,
K_i : Coefficient de l'action intégrale du régulateur,
τ_r : Constante de temps du régulateur,
γ : Perturbation du système,

I. INTRODUCTION

La littérature atteste du grand intérêt accordé aujourd'hui à la machine asynchrone à double alimentation (GADA) pour diverses applications, en tant que génératrice pour les énergies éoliennes. Cet intérêt est dû essentiellement aux degrés de liberté qu'elle offre du fait de l'accessibilité de son rotor, et par conséquent de la possibilité de l'alimenter par un convertisseur aussi bien du côté du stator, que du côté du rotor [1].

Dans ce contexte, de nombreux travaux de recherche sur le contrôle et la commande d'éoliennes ont été menés dans différents laboratoires [2]. Grâce à ces travaux, les dernières générations d'éoliennes ont été découvertes, lesquelles fonctionnent avec une vitesse variable et disposent d'une régulation des puissances statoriques active et réactive [2]. D'un autre côté, et afin d'obtenir avec la machine asynchrone à double alimentation des performances semblables à celle de la machine à courant continu à excitation séparée (MCC) et assurer un découplage plus ou moins total entre le contrôle du flux et celui du courant générant le couple électromagnétique, tout comme c'est le cas des machines asynchrones à cage d'écureuil, la commande vectorielle par orientation du flux rotorique s'est avérée être la solution la plus adaptée [3].

Le but de la commande vectorielle est de retrouver la façon dont les moteurs à courant continu à excitation séparée sont commandés, où il y a un découplage naturel entre la grandeur commandant le flux (courant d'excitation), et celle liée au couple (courant d'induit).

Afin d'y arriver, les techniques de commande vectorielle ; directe et indirecte, ont tiré leur idée de base du modèle du moteur asynchrone dans le repère synchrone d-q. En effet, l'orientation du flux dans la machine selon l'axe d, et le maintien de ce flux orienté constant via la composante

directe du courant statorique lequel permet de régler le couple via la composante en quadrature du même courant, réalisant ainsi le découplage entre le flux et le couple dans le moteur asynchrone considéré (Ba-razzouk, 1998), (Barazane, 2003), (Boussak et Jarray, 2006). D'autre part, et comme il est connu, ces deux méthodes de commande vectorielle existantes, directe et indirecte, comme il est connu diffèrent entre elles dans la manière de déterminer l'angle de Park θ_s , (grandeur essentielle dans la commande) représentant la phase du flux orientée dans le repère lié au stator [4]. En effet, dans la commande indirecte, cet angle est calculé à partir de la pulsation statorique ω_s qui est reconstituée à l'aide de la relation d'autopilotage qui additionne la vitesse électrique ω et la pulsation de glissement ω_g , tandis que dans le cas de la commande directe, cet angle est calculé directement à partir des grandeurs mesurées ou estimées

Dans cette optique, nous allons procéder à la synthèse des régulateurs nécessaires au bon fonctionnement des commandes précédentes régissant la GADA, suivie de simulations numériques sous environnement Matlab/Simulink des différentes combinaisons liant les modes de contrôle et les régulateurs étudiés sera effectuée. Ainsi il sera aisé de les comparer en termes de poursuite de trajectoire, de sensibilité aux perturbations et de robustesse.

Plusieurs travaux ont abordé le problème d'optimisation de la production d'énergie éolienne à basé de GADA, en utilisant différents régulateurs [2][3][4][5].

II. DÉFINITION D'UN SYSTÈME ÉOLIEN

Un aérogénérateur, plus communément est appelé éolien. Une éolienne est un système de conversion d'énergie qui a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ce système est connu sous l'appellation anglaise [11]: Wind Energy Conversion Systems (WECS) (Figure. 1).

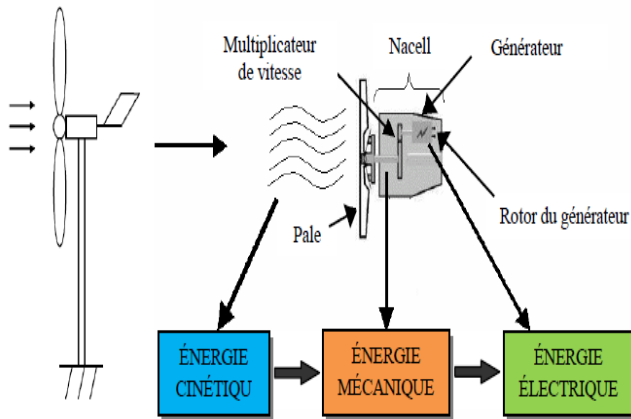


Fig. 1: Principe de la conversion d'énergie éolienne.

Notons que les différents éléments qui constituent un tel système sont conçus afin de maximiser cette conversion

énergétique et d'une manière générale, assurer une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique. Aussi, pour parvenir à cet objectif, une éolienne doit comporter [16][17]:

- Un système qui permet de la contrôler mécaniquement (orientation des pales de l'éolienne, orientation de la nacelle).
- Un système qui permet de la contrôler électriquement (Machine électrique associée à l'électronique de commande).

III. SYNTHÈSE DES RÉGULATEURS

La synthèse des régulateurs est la même pour chaque type de structures (directe et indirecte). De plus, et pour éviter toute répétition, une même procédure sera appliquée. Cette dernière est censée être valable pour chaque commande utilisée dans cet article. Dans ce sens, trois types de régulateurs (PI, IP, RST) seront conçus et implémenter et cela représentera la base théorique de la simulation du comportement dynamique de notre processus et dont les résultats seront exposés dans une section ultérieure.

Dans le cas de la boucle externe de la commande indirecte, celle-ci est réalisée grâce à un régulateur PI et sa synthèse est élaborée en appliquant la même démarche que celle de la boucle interne.

III.1. Régulateurs PI

Dans cette section et dans un premier temps, une commande à base de régulateurs PI sera conçue et adoptée vu qu'elle simple à mettre en œuvre et procure l'avantage d'assurer des performances acceptables.

Aussi, et comme il a été illustré dans les paragraphes précédents, chaque axe comprend un régulateur de type PI dont la fonction de transfert est de la forme $K_p + \frac{K_i}{p}$.

Nous avons ainsi un système bouclé et corrigé par le régulateur précédemment cité Figure. 2.

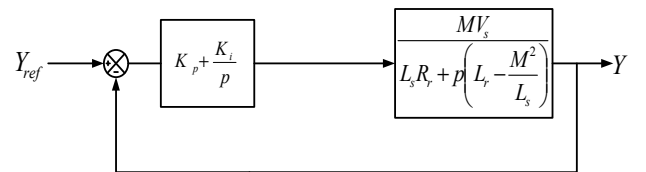


Fig. 2– Système régulé par un régulateur PI.

La Fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) avec le régulateur PI s'écrit alors comme suit [5]:

$$FTBO = \frac{p + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{p}{K_p}} \cdot \frac{\frac{M \cdot V_s}{L_s \cdot \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{p + \frac{L_s \cdot R_r}{L_s \cdot \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}} \quad (1)$$

En effectuant la compensation de la fonction de transfert en boucle ouverte, celle-ci devient :

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

Par ailleurs et en boucle fermée, nous aurons :

$$FTBF = \frac{1}{1 + \tau_r p} \quad \text{Avec} \quad \tau_r = \frac{1}{K_p} \cdot \frac{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{MV_s} \quad (3)$$

Le temps de réponse τ_r sera choisi lors de la simulation afin d'offrir le meilleur compromis entre performances et rapidité [10] [14][15].

De ce fait, les gains des correcteurs seront exprimés en fonction des paramètres de la machine comme suit :

$$\begin{cases} K_p = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{MV_s} \\ K_i = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{R_r L_s}{MV_s} \end{cases} \quad (4)$$

III.2. Régulateurs IP

Tel que décrit précédemment, la régulation du système consiste tout d'abord en sa réécriture sous forme d'un modèle simplifié mono-variable lequel sera utilisé pour dimensionner et les régulateurs PI et ceux IP (Figure. 3) [6].

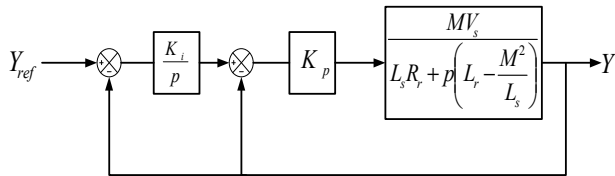


Fig. 3– Système régulé par un régulateur IP.

La fonction de transfert en boucle fermée (FTBF) avec le régulateur IP s'écrit alors comme suit:

$$FTBF = \frac{K_i K_p A}{p^2 + (K_p A + B)p + K_i K_p A} \quad (5)$$

Tel que :

$$\begin{cases} A = \frac{MV_s}{L_s L_r - M^2} \\ B = \frac{L_s R_r}{L_s L_r - M^2} \end{cases} \quad (6)$$

Par identification avec un système de second ordre de fonction de transfert donnée par:

$$FT = \frac{K \omega_n^2}{p^2 + 2\xi \omega_n p + \omega_n^2} \quad (7)$$

Les gains des correcteurs s'exprimeront en fonction des paramètres de la machine comme suit :

$$\begin{cases} K_i = \frac{\omega_n^2 (L_s L_r - M^2)}{K_p MV_s} \\ K_p = \frac{2\xi \omega_n (L_s L_r - M^2) - L_s R_r}{MV_s} \end{cases} \quad (8)$$

Afin d'avoir des performances acceptables, la dynamique des puissances est imposée à $\omega_n = 5000$ rd/s. Le choix de ξ est fait de manière que le coefficient d'amortissement du système en boucle fermée soit optimal environ 0.7.

III.3. Régulateurs RST

Un régulateur de type RST est polynomial, il est considéré comme une alternative aux régulateurs PI [5]. L'utilisation de ce type de régulateurs permet un meilleur compromis entre rapidité et performance. Les éléments R, S et T intervenant dans ce type de régulation sont des polynômes dont le degré est fixé suivant les fonctions de transfert de poursuite et de régulation en boucle ouverte.

Ces polynômes sont calculés à l'aide d'une stratégie de placement de pôles robustes [7]. Cette stratégie permet le réglage des performances de l'asservissement à l'aide de deux paramètres de synthèse (T_c et T_f).

Ces paramètres sont respectivement les horizons de commande et de filtrage à partir desquels sera défini le placement des pôles de la fonction de transfert en boucle fermée [8][9].

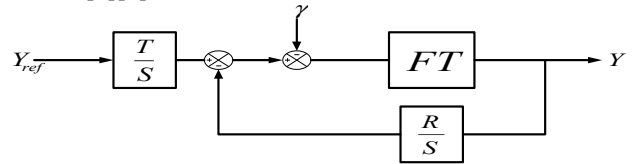


Fig. 4– Schéma bloc d'un système régulé par RST.

Dans le présent article, nous considérons que la fonction de transfert du système à réguler est de la forme $\frac{A}{B}$. Aussi, et dans ce sens, si Y_{ref} est prise comme étant la référence du système et γ sa perturbation et afin de faire une régulation du système par placement des pôles robustes, il est nécessaire de placer respectivement les fonctions $\frac{R}{S}$ et $\frac{T}{S}$ sur la boucle de retour et la référence (Figure 3). Dans le cas de la machine asynchrone à double alimentation traitée dans cette étude les termes A et B s'expriment comme :

$$\begin{cases} A = L_s R_r + p L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \\ B = M V_s \end{cases} \quad (9)$$

D'autre part, et tel qu'il est illustré sur la figure (3), la fonction de transfert du système en boucle ouverte s'exprimera comme suit :

$$Y = \frac{BT}{AS + BR} Y_{ref} + \frac{BS}{AS + BR} \gamma \quad (10)$$

Le principe du placement de pôles consiste à spécifier un polynôme arbitraire de stabilité D(p) correspondant au dénominateur des fonctions de transfert en poursuite et régulation et à calculer S(p) et R(p) de sorte que conformément à l'équation de BEZOUT, l'on ait [5][11][12]:

$$D = AS + BR \quad (11)$$

Nous aboutissons par conséquent au système suivant relatif au modèle de la machine asynchrone à double alimentation [6]:

$$\begin{cases} A = a_1 p + a_0 \\ B = b_0 \\ D = d_3 p^3 + d_2 p^2 + d_1 p + d_0 \\ R = r_1 p + r_0 \\ S = s_2 p^2 + s_1 p + s_0 \end{cases} \quad (12)$$

Le polynôme D étant de degré 3, en respectant la stratégie de placement des pôles, ce qui nous oblige à définir trois pôles respectifs. Ainsi, ce polynôme sera décomposé en un produit de deux polynômes (D=CF) où le coefficient C possède un pôle simple, et un autre, F ayant un pôle double.

De ce fait, l'horizon de commande et celui de filtrage sont définis tel que :

$$\begin{cases} T_c = -\frac{1}{P_c} \\ T_f = -\frac{1}{P_f} \end{cases} \quad (13)$$

P_c et P_f : sont les pôles respectifs des polynômes C et F.

Le pôle de commande P_c à pour rôle d'accélérer le système, il est n fois supérieur au pôle du polynôme A. Pour accroître la robustesse de la régulation, les horizons doivent être déséquilibrés. Nous choisissons T_c égale à k fois T_f , les valeurs de « n » et « k » seront choisies judicieusement lors de la simulation pour mieux l'affiner.

IV. ANALYSE DES PERFORMANCES (RESULTATS ET INTERPRETATIONS)

Dans ce qui suivra, nous allons étudier les performances des différentes structures de commande ainsi que des différents types de régulateurs cités précédemment. La

MADA sera connectée à un onduleur à deux niveaux qui est alimenté par une tension parfaitement constante. Cette analyse sera réalisée par simulation en utilisant le logiciel Matlab / Simulink et les essais de performance et de robustesse seront établis. Par ailleurs, et afin d'étudier la viabilité des commandes précédemment réalisées ; une comparaison sera naturellement effectuée pour déterminer la configuration la plus adéquate pour une application dans le domaine éolien.

IV.1. Suivi de consignes

Cet essai consiste à réaliser des échelons de puissances actives et réactives tout en maintenant une vitesse d'entraînement de la MADA constante.

Le but de la régulation précédemment établie étant la commande en puissance active et réactive de la MADA, il devient impératif d'analyser le suivi des consignes imposées (Figure 5 et 6). Dans cette optique, il a été constaté dans le cas des régulateurs PI que la commande directe est plus lente que celles indirectes. Le suivi de consigne se fait avec un retard plus important. Un compromis a eu lieu pour limiter les oscillations autour de la référence. Car une constante de temps plus petite impliquerait une oscillation plus importante.

Tel que constaté avec les régulateurs PI une erreur statique apparaît dans la mesure de la puissance réactive lors de la diminution de la puissance active. Ceci est aussi dû à la non considération des résistances statoriques dans l'estimation des courants rotoriques.

Dans le cas des régulateurs RST l'amplitude des oscillations autour de la valeur de référence reste importante. Ceci est dû à la machine utilisée lors de la simulation dont la résistance statorique n'est pas négligeable. Il est à noter qu'un tel phénomène peut être atténué en utilisant des convertisseurs multi niveaux.

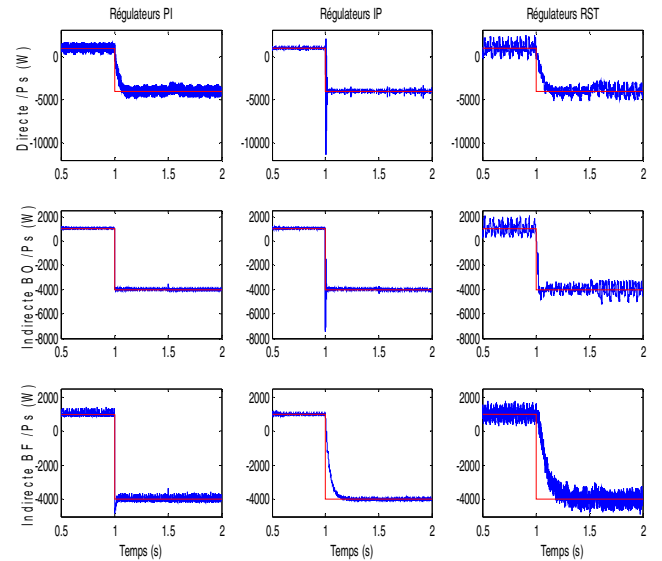


Fig. 5– Puissances actives statoriques (Test de poursuite de Consignes imposées).

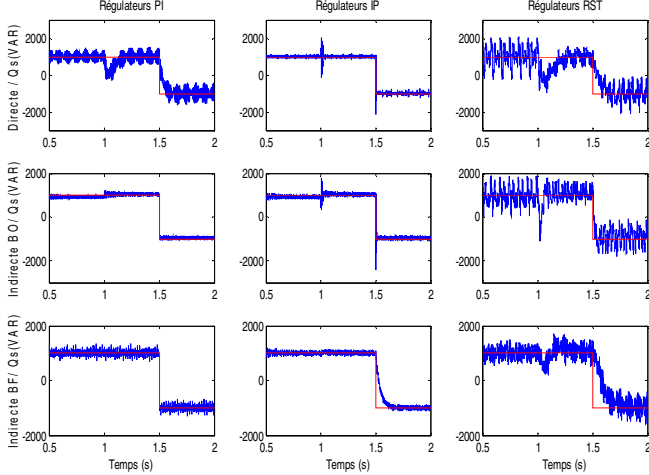


Fig. 6– Puissances réactives statoriques (Test de poursuite de consignes).

IV.2. Performances

Cet essai nous permet de vérifier dans quelles mesures les puissances suivent leurs consignes lorsque la vitesse de rotation de la machine varie brusquement (Figures 7 et 8).

A travers les résultats obtenus dans ces figures (7 et 8), nous pouvons remarquer que la machine réagit différemment aux perturbations de vitesse d'entraînement suivant la commande utilisée. Celle-ci a d'autant plus d'effet pour la commande directe, que pour la commande indirecte pour laquelle l'effet de la perturbation est moins important. Il l'est particulièrement pour la commande à boucle de puissance fermée, car la perturbation est pratiquement annulée avec ce type de commande. Il est constaté dans le cas de la commande directe que les régulateurs IP rejettent plus efficacement les effets de la perturbation de la vitesse. Néanmoins, dans le cas de la commande indirecte les régulateurs PI et RST donnent des résultats probants.

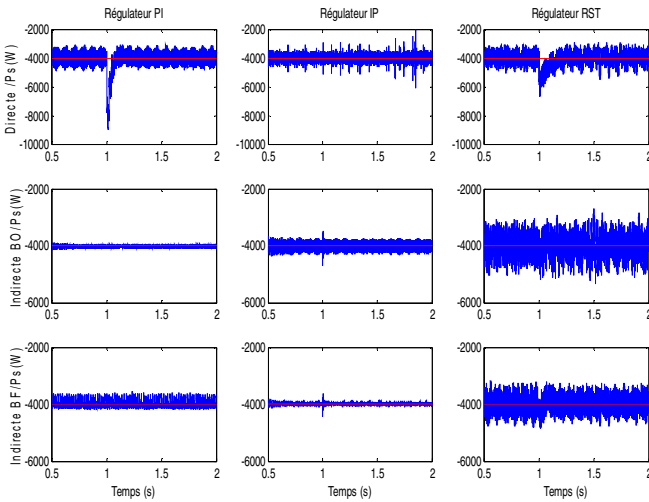


Fig. 7– Puissances actives statoriques (Teste de performances).

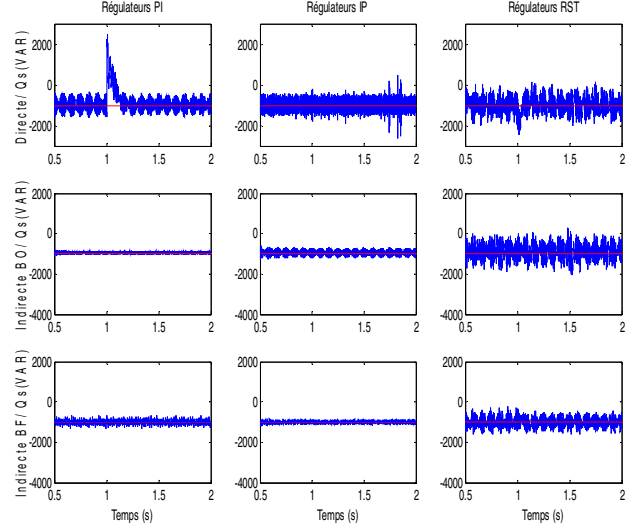


Fig. 8– Puissances réactives statoriques (Teste de performances).

IV.3. Robustesse

Cet essai consiste à faire varier les paramètres du modèle de la machine et de voir si la régulation reste dans les limites des contraintes fixées par le cahier des charges. Cette étude est très importante car dans un système réel les paramètres de la machine sont soumis à des variations causées par différents phénomènes physiques (Saturation et échauffement). Ajoutons à cela que l'identification de ces paramètres est astreinte à des imprécisions dues à la méthode employée ou aux appareils de mesure.

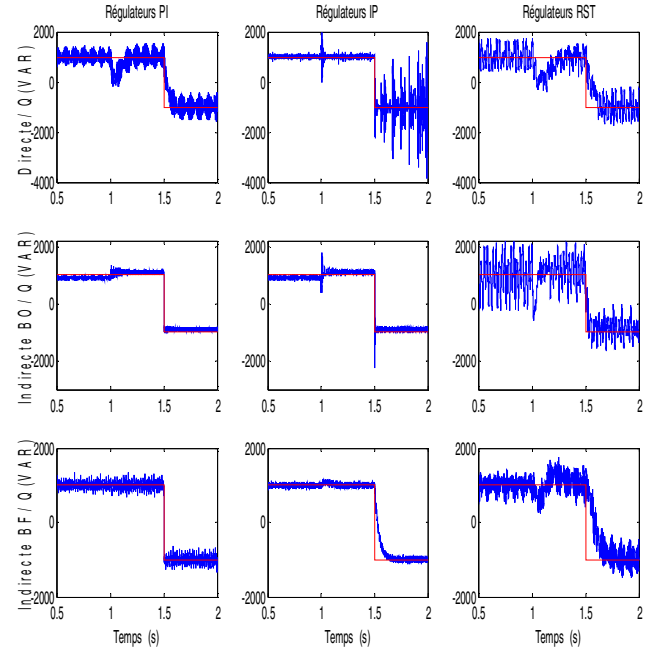


Fig. 9– Puissances actives statoriques (Teste de robustesse avec augmentation de la résistance statorique de 50%).

Afin de faire une analyse objective de la robustesse de la commande, il est impératif de mettre celle-ci dans les conditions les plus défavorables admises par le constructeur. Pour cela les résistances augmentent de 50% à cause des effets de la chaleur.

Lors de variations résistances statoriques (Figures 9 et 10), nous n'avons constaté aucun effet sur le suivi des consignes. Cependant, dans le cas des régulateurs IP, il est à remarquer que la commande directe devient instable avec une énergie réactive négative. Ceci est observé à partir de $t=1.5$ s quand Q passe de 1000 VAR à -1000 VAR. Ce passage est accompagné de l'augmentation des oscillations autour de la référence.

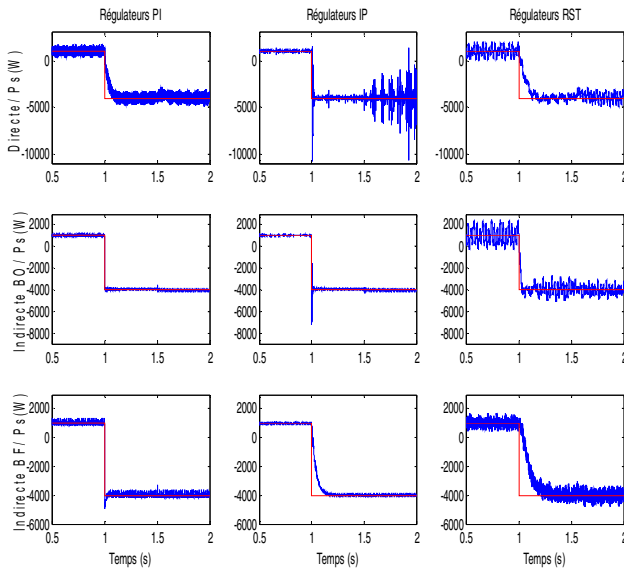


Fig. 10– Puissances réactives statoriques (Teste de robustesse avec augmentation de la résistance statorique de 50%).

VI. CONCLUSION

Lors de cet article il a été établi la synthèse de trois régulateurs pour la commande de la MADA. Le but de ces régulateurs est de contrôler l'échange de puissances actives et réactives entre le stator de la machine et le réseau en modifiant l'amplitude et la fréquence des tensions rotorique. Bien que le mode direct offre une simplicité de mise en œuvre avec des résultats convenables, le mode indirect justifie sa supériorité par la possibilité de contrôler les courants et de les limiter afin de protéger le bobinage rotorique de la machine. Le régulateur IP étant le plus adapté en termes de performance et de simplicité de réalisation. Il va être choisi pour commander l'éolienne qui est constituée d'une MADA, d'une cascade redresseur -bus continue- onduleur et d'une turbine. Les études ont montré que le système bouclé par un régulateur IP est moins rapide

en poursuite mais a une réaction nettement meilleure en régulation que le système muni du régulateur PI et par rapport le régulateur RST.

REFERENCES

- [1] A. DENDOUGA, « Contrôle des puissances active et réactive de la machine à double alimentation », thèse de doctorat, université de Batna, 2010.
- [2] A. YAHI, " Optimisation de l'Efficacité Energétique d'une Chaîne de Traction Electrique" . Electrotechnique, Université des Sciences et Technologies Houari Boumediene. Docteur d'Etat: (2016). 104.
- [3] S. TOUAMI, L. BARAZANE, Z. ZEGHDI " Conception d'un Régulateur Synergétique pour Le Contrôle d'une Machine Asynchrone Double Etoile", thèse de Master de l'Université des Sciences et Technologies Houari Boumediene, Algérie, 2017.
- [4] L. BARAZANE, "Application des systèmes émergents à la commande d'un moteur asynchrone", Thèse de Doctorat d'Etat, ENP, Alger, 2003.
- [5] A. BOYETTE, "Contrôle - commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne", thèse de doctorat, Université Henri, Nancy 1, 11 décembre 2006.
- [6] L. KHETTACHE, "Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique à double alimentation", mémoire de magister, Université de BATNA, 2007.
- [7] F. POITIER, "Etude et commande de la génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne", thèse de doctorat, Université de Nantes, 19 décembre 2003.
- [8] D. LE GOURIERE, "Energie éolienne", éditions EYROLLES, pp 28-31.
- [9] S. EL AIMANI, " Modélisation de différentes technologies éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension", thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lille et l'Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 6 décembre 2004.
- [10] S. Abdelmalek, L. Barazane, A. Larabi, and H. Belmili, "Contributions to diagnosis and fault tolerant control based on proportional integral observer: Application to a doubly-fed induction generator," in Electrical Engineering (ICEE), 2015 4th International Conference on. IEEE, pp. 1–5, 2015.
- [11] P.DE LARMINAT, "Automatique, commande des systèmes linéaires", Editions HERMES.
- [12] F.IOV, A.D.HANSEN, O.SORENSEN, F.BLAABJERG, "Wind turbine blockset in MATLAB/Simulink", Institute of energy technology, Alborg university, Denmark, Mars 2004.
- [13] MOUILAH KHEIRA «Commande d'une éolienne à machine asynchrone à double alimentation» Thèse de Doctorat en Electrotechnique, université Djilali liabes, sidi bel-abbès, 9/12/2015.
- [14] DJERIRI YUCEF «Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle» Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université Djilali liabes, sidi bel-abbès, november 2015.
- [15] S. Abdeddaim and A. Betka, "Optimal tracking and robust power control of the DFIG wind turbine". Int J Electr Power EnergySyst 2013; 49:234 e 42.
- [16] Abdelmalek, S., Belmili, H., Barazane, L., Larabi, A. A New Robust H_{∞} Control Power. International Conference on Control, Engineering & Information Technology (CEIT'14), Proceedings - Copyright IPCO-2014, pp.123-128, 2014, ISSN 2356-5608.
- [17] S. Abdelmalek et al. "Fault diagnosis for a doubly fed induction generator. Revue Roumaine Des Sciences Techniques-Serie Electrotechnique Et Energetique 61 (2):159–163 (2016).