

Modélisation et commande d'un système éolien à base d'une machine asynchrone à double alimentation pour la fourniture de puissances au réseau électrique

Y. BOUSSAIRI¹, A. ABOULOIFA¹, I. LACHKAR, F. GIRI C. AOUADI¹, A. HAMDOUN¹

¹ LTI Lab, Faculty des Sciences Ben Msik, University Hasan II of Casablanca, BP 7955 Casablanca, Morocco.

² LISER Lab, ENSEM of Casablanca, University Hasan II of Casablanca, BP 7955 Casablanca, Morocco.

³ GREYC Lab, University of Caen Basse-Normandie, UFR de Sciences, Campus 2 BP. 5186, 14032 Caen, french.

yasser.boussairi@univh2m.ma, yasserboussairi@gmail.com.

Résumé- Dans ce travail, nous étudions la modélisation et la commande d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une génératrice asynchrone à double alimentation. Tout d'abord, le modèle mathématique de l'ensemble du système étudié est développé dans les coordonnées du Parc d-q. Par la suite, la stratégie de commande proposée est conçue à partir d'une technique de commande de type Backstepping dont les objectifs : Extraire le maximum de puissance à partir des vitesses variables du vent (MPPT) ; Injecter le courant électrique dans le réseau tout en gardant un très bon facteur de puissance (PFC). Finalement les résultats des différentes simulations de toute la chaîne de conversion, réalisées sous environnement MATLAB/Simulink.

MOTS-CLES ENERGIE EOLIENNE, GENERATRICE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION (GADA), MPPT, PFC, MATLAB/SIMULINK.

I. INTRODUCTION

De nos jours, l'énergie éolienne est devenue une solution viable pour la production d'électricité en complément des autres sources d'énergie. Le système éolien étudier convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, habituellement cette énergie est elle-même transformée en énergie électrique grâce au générateur qui permet une production d'électricité à vitesse variable. Ceci permet alors mieux exploiter les ressources éoliennes pour les différentes conditions climatiques (vitesse du vent...).

En fait, le rotor capte l'énergie cinétique du vent

et transmet sa rotation directement à l'arbre principal. L'énergie cinétique a été convertie en énergie mécanique. Un mouvement rapide est transmis à l'arbre de sortie qui est relié au générateur, ce dernier convertissant l'énergie mécanique du mouvement rotatif en énergie électrique, avant d'injecter l'énergie produite dans le réseau [1], le générateur est relié à des convertisseurs de puissance. Le convertisseur côté réseau contrôle la tension du bus continue et le facteur de puissance [2, 3]. En outre, le convertisseur de puissance côté générateur contrôle la puissance active et la puissance réactive produite par la GADA [4].

Cet article présente une méthode de contrôle d'un Générateur Asynchrone à Double Alimentation, Cette méthode donne un outil pour la conception récursive de la loi de commande basée sur la théorie de Lyapunov [5].

Cet article est organisé comme suit : la section II présente Le modèle mathématique de l'ensemble système étudier. Ensuite, la section II présente la conception de la loi de commande par l'approche de backstepping ; La troisième section, présente les résultats des simulations sous l'environnement Matlab/Simulink, cet article fini par une conclusion.

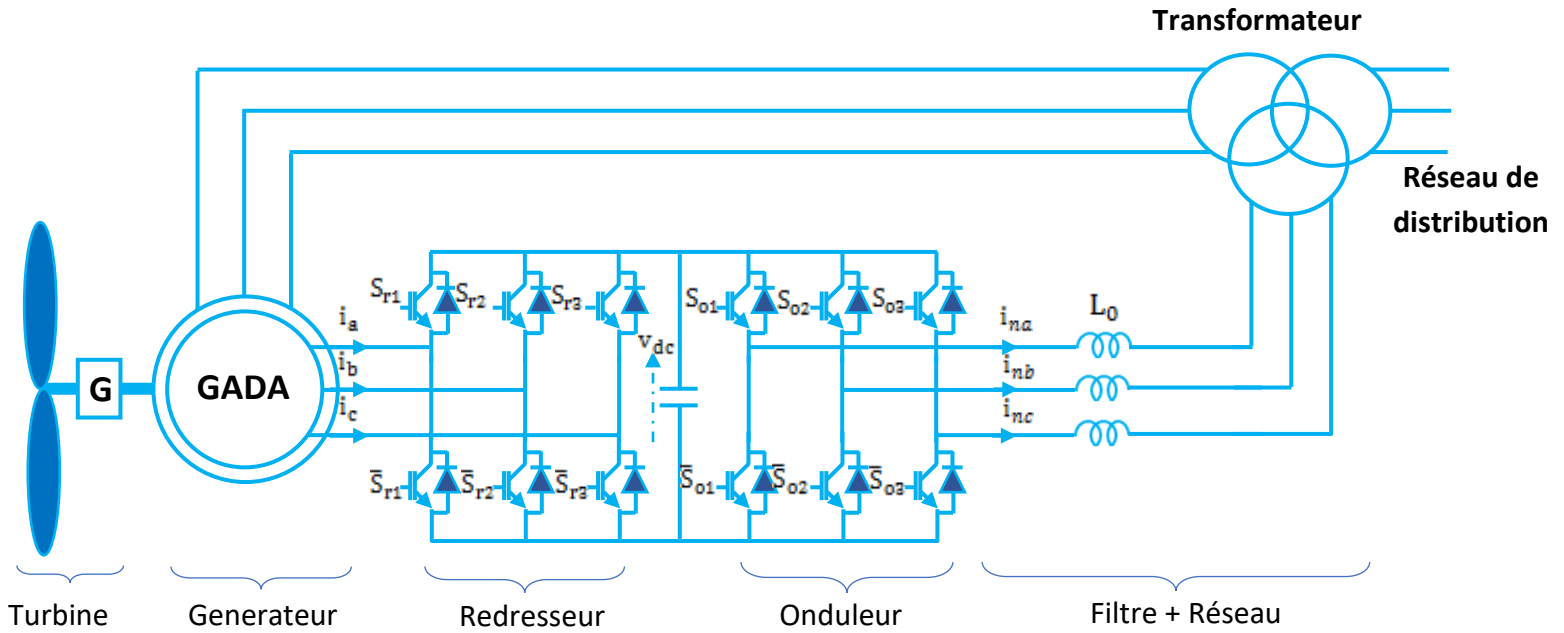


Fig. 1 Architecture d'un système éolien à base d'une GADA

II. MODELISATION

A. Modélisation de la combinaison 'Générateur – DC/AC'

La modélisation de la machine asynchrone à Double Alimentation a déjà fait l'objet de nombreuses études, le choix d'un modèle de représentation qu'il soit formel ou issu d'une identification se fait toujours en fonction du type de commande à réaliser. La machine est alimentée en tension : les composantes du vecteur de commande de l'équation d'état seront donc des tensions. Les différentes grandeurs seront dans un premier temps, exprimées dans leurs repères respectifs (a, b, c). Un premier changement de variable permettra d'exprimer ses tensions dans le repère (d, q) [4].

Comme toute machine, la GADA peut être représentée par trois enroulements statoriques et trois enroulements rotoriques

L'équation de tension s'écrit :

Pour le stator

$$v_s = [R_s] i_s + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \quad (1)$$

avec

$$v_s = [v_{sa} \ v_{sb} \ v_{sc}]^T : \text{Tensions statorique}$$

$$i_s = [i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc}]^T : \text{Courants statorique}$$

$$\varphi_s = [\varphi_{sa} \ \varphi_{sb} \ \varphi_{sc}]^T : \text{Flux statorique}$$

Pour le rotor

$$v_r = [R_r \frac{d}{dt} [\varphi_r]] \quad (2)$$

avec

$$v_r = [v_{ra} \ v_{rb} \ v_{rc}]^T : \text{Tensions rotorique}$$

$$i_r = [i_{ra} \ i_{rb} \ i_{rc}]^T : \text{Courants rotorique}$$

$$\varphi_r = [\varphi_{ra} \ \varphi_{rb} \ \varphi_{rc}]^T : \text{Flux rotorique}$$

le modèle le plus approprié pour étudier le comportement dynamique de la machine et la mise en œuvre des lois de contrôle est un modèle exprimé en coordonnées de PARK [6], Le modèle du parc est en fait, le remplacement des bobinages statoriques (a,b,c) par des bobinages équivalents (d,q). Nous pouvons passer de l'un à l'autre point de repère en utilisant une matrice de transition. Le changement de variable effectué aux équations des tensions, courants et flux, on obtient :

$$[i_{rdq}] = p(\theta) [i_{rabc}] \quad (3)$$

$$[v_{rdq}] = p(\theta) [v_{rabc}] \quad (4)$$

$$[\varphi_{rdq}] = p(\theta) [\varphi_{rabc}] \quad (5)$$

D'où les équations de tensions statoriques et rotoriques de la MADA s'écrivent :

$$v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \varphi_{sq} \omega_s \quad (6)$$

$$v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} - \varphi_{sd} \omega_s \quad (7)$$

$$v_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \varphi_{rq} \omega_r \quad (8)$$

$$v_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} - \varphi_{rd} \omega_r \quad (9)$$

Nous considérons dans tout ce qui suit, le vecteur

$[i_{rd} \ i_{rq} \ \varphi_{sd} \ \varphi_{sq} \ \omega]^T$ comme vecteur d'état et $[v_{rd} \ v_{rq}]$ comme variables de commande, d'où le modèle du système global en espace d'état est exprimé en coordonnées d-q s'écrit comme suit :

$$\frac{di_{rd}}{dt} = -\mu i_{rd} + \omega_r i_{rq} + \alpha \frac{R_s}{L_s} \varphi_{sd} + \frac{1}{L_r \sigma} v_{rd} - \alpha v_{sd} \quad (10)$$

$$\frac{di_{rq}}{dt} = -\mu i_{rq} - \omega_r i_{rd} + \alpha p \omega \varphi_{rq} + \frac{1}{L_r \sigma} v_{rq} - \alpha v_{sq} \quad (11)$$

avec

$$\mu = \frac{R_s}{L_r \sigma} + \frac{R_s M_{sr}^2}{L_r L_s^2 \sigma} \quad \text{et} \quad \alpha = \frac{M_{sr}}{L_r L_s \sigma}$$

Nous avons exprimé les équations de la machine mais il reste également le couple électromagnétique. Ce dernier peut être dérivé de l'expression de la co-énergie obtenue à l'aide d'un bilan de puissance

$$C_{em} = \frac{p M_{sr}}{L_s} (\varphi_{sq} i_{rd} - \varphi_{sd} i_{rq}) \quad (12)$$

Et la relation qui lie le couple et la vitesse s'écrit :

$$j \frac{d\omega}{dt} = C_{em} - C_r - f \omega \quad (13)$$

B. Modélisation de la combinaison 'AC / DC - Filtré

Les onduleurs sont les convertisseurs statiques continus alternatifs permettant de fabriquer une source de tension alternative à partir d'une source de tension continue. On peut réaliser un onduleur triphasé en regroupant, en parallèle, trois onduleurs monophasés (en pont ou en demi-pont) et commander les interrupteurs de chacun pour obtenir à la sortie trois phases décalées de 120°.

Ce sous-système est décrit par l'ensemble d'équations différentielles suivantes dans le repère de PARK [5, 6]:

$$\frac{di_{nd}}{dt} = -\frac{1}{L_0} v_d + \omega_n i_{nq} + \frac{1}{L_0} v_{dc} u_{nd} \quad (14)$$

$$\frac{di_{nq}}{dt} = -\frac{1}{L_0} v_q + \omega_n i_{nd} + \frac{1}{L_0} v_{dc} u_{nq} \quad (15)$$

Où (v_d, v_q) , (i_{nd}, i_{nq}) et (u_{nd}, u_{nq}) désignent la tension moyenne de réseau et le courant d'entrée et la commande l'onduleur en dq coordonnée (transformation de Park).

III. CONCEPTION DU CONTROLEUR

Objectifs de commande.

Il y a trois objectifs de contrôle :

- Régulateur de vitesse : Forcer la vitesse du générateur de suivre un signal de référence variant.
- Contrôle de la tension continue Vdc ce qui en fait le suivi d'un signal de référence donné Vdc-ref. Ceci est généralement réglé à une valeur

constante égale à la tension nominale entrant dans l'onduleur.

- PFC : le courant d'entrée du redresseur doit être sinusoïdal et en phase avec la tension alternative d'alimentation.

A. Contrôle de la MADA

La commande des machines électriques est devenue un domaine de recherche très actif durant ces trois dernières décennies[8, 9]. Cet intérêt est motivé par le fait que les machines électriques constituent un actionneur peu coûteux et peu encombrant pour la plupart des entraînements industriels. La difficulté de la commande des machines asynchrones réside dans le découplage des deux paramètres de commande : flux magnétique et couple électromagnétique

Dans ce papier nous avons utilisé une approche de backstepping, et pour appliquer cette technique sur la MADA, nous passons par trois étapes comme montre la figure.2. Dans chaque étape nous calculons l'erreur associée et nous assurons la stabilité du système en choisissant la bonne fonction de Lyapunov afin de trouver les commandes.

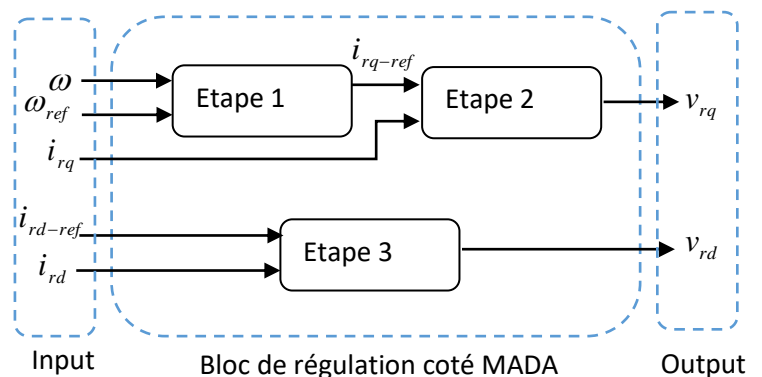


Fig. 2 Structure interne du régulateur

Stabilisation de sous-système (10)

Boucle du courant i_d : Afin d'imposer la référence du courant sur l'axe d égale à zéro on utilise un régulateur de backstepping. On écrit sous forme d'un système 1^{er} ordre.

On définit l'erreur du courant de la manière suivante :

$$e_1 = i_{d-ref} - i_d \quad (16)$$

La dynamique d'erreur de cette équation est donnée par :

$$\dot{e}_1 = \frac{di_{rd}}{dt} - \frac{di_{rd-ref}}{dt} \quad (17)$$

En remplaçant $\frac{di_{rd}}{dt}$ par l'équation (10) nous obtenons :

$$\dot{e}_1 = -\mu i_{rd} + \omega_r i_{rq} + \alpha \frac{R_s}{L_s} \varphi_{sd} + \frac{1}{L_r \sigma} v_{rd} - \alpha v_{sd} - \frac{di_{rd-ref}}{dt} \quad (18)$$

Notre objectif exige que \dot{e}_1 converge vers zéro, ce qui est satisfait en choisissant v_{rd} comme commande réelle.

La fonction de Lyapunov étendue sera définie :

$$v_1 = \frac{1}{2} e_1^2 \quad \text{et sa dérivée est: } \dot{v}_1 = e_1 \dot{e}_1$$

Pour $\dot{v}_1 < 0$ on pose $\dot{e}_1 = -k_1 e_1$

D'où la loi de commande est donnée par :

$$v_{rd} = L_r \sigma (\mu i_{rd} - \omega_r i_{rq} - \alpha \frac{R_s}{L_s} \varphi_{sd} + \frac{di_{rd-ref}}{dt} - k_1 e_1) \quad (19)$$

Stabilisation de sous-système (11-13)

Boucle de la vitesse ω : Pour résoudre le problème de suivi de vitesse, on définit l'erreur de poursuite en vitesse par :

$$e_2 = \omega_{ref} - \omega \quad (20)$$

La dynamique d'erreur de vitesse est donnée par :

$$\dot{e}_2 = \frac{d\omega_{ref}}{dt} - \frac{d\omega}{dt} \quad (21)$$

En remplaçant $\frac{d\omega}{dt}$ par l'équation (13) nous obtenons :

$$\dot{e}_2 = -\frac{pM_{sr}}{L_s} \varphi_{sq} i_{rq} - \frac{C_r}{j} - \frac{f}{j} \omega - \frac{d\omega_{ref}}{dt} \quad (22)$$

Choisissez la fonction candidate Lyapunov suivante :

$$v_2 = \frac{1}{2} e_2^2 \quad (23)$$

La dérivée temporelle de la fonction de Lyapunov, peut être obtenue comme

$$\dot{v}_2 = e_2 \left(-\frac{pM_{sr}}{L_s} \varphi_{sq} i_{rq} - \frac{C_r}{j} - \frac{f}{j} \omega - \frac{d\omega_{ref}}{dt} \right) \quad (24)$$

Selon la définition de la stabilité de Lyapunov, pour que l'erreur de suivi converge vers zéro, (24) doit être :

$$\dot{v}_2 = -k_2 e_2^2, \quad k_2 > 0 \quad (25)$$

Choissant i_{rq} comme commande virtuelle.

Suivant la méthode de backstepping et pour assurer la stabilité de la vitesse, la commande virtuelle est donnée par l'équation suivante :

$$i_{rq-ref} = \frac{L_s}{\varphi_{sq} pM_{sr}} \left(\frac{C_r}{j} - \frac{f}{j} \omega - \frac{d\omega_{ref}}{dt} - k_2 e_2 \right) \quad (26)$$

Pour le suivi du courant de l'axe q, e_3 est sélectionné comme nouvelle variable d'état pour l'erreur de suivi de courant.

$$e_3 = i_{rq} - i_{rq-ref} \quad (27)$$

La dérivée de e_3 est donnée par :

$$\dot{e}_3 = -\mu i_{rq} - \omega_r i_{rd} + \alpha p \omega \varphi_{rq} + \frac{1}{L_r \sigma} v_{rq} - \alpha v_{sq} - \frac{di_{rq-ref}}{dt} \quad (28)$$

Pour un nouveau système basé sur e_2 et e_3 , nous définissons La deuxième fonction de Lyapunov :

$$v_3 = v_2 + \frac{1}{2} e_3^2 \quad (29)$$

La dérivée temporelle de v_3 est donnée par :

$$\dot{v}_3 = \dot{v}_2 + e_3 \dot{e}_3 \quad (30)$$

Utilisation l'équations 27 et 23, Où u_q est la variable de contrôle réelle. la loi de contrôle de stabilisation est définie comme suit:

$$v_{rq} = L_r \sigma \left(\mu i_{rq} + \omega_r i_{rd} - \alpha p \omega \varphi_{rq} + \alpha v_{sq} + \frac{di_{rq-ref}}{dt} - k_3 e_3 \right) \quad (31)$$

B. Contrôle onduleur DC/AC

Régulateur du courant sortant de l'onduleur pour répondre PFC.

L'objectif du correcteur de la facteur de puissance (PFC) signifie que le courant de sortie de l'onduleur doit être sinusoïdal et en phase avec la tension alternative d'alimentation. En conséquence, le courant i_{ndq} doit être suivre un signal de référence $i_{ndq-ref}$.

$$i_{ndq-ref} = \beta v_n \quad (32)$$

A ce point β est un paramètre positif qui est autorisé à être variable dans le temps.

On définit l'erreur de poursuite des courants par :

$$e_4 = i_{nd} - i_{nd-ref} \quad (33)$$

$$e_5 = i_{nq} - i_{nq-ref} \quad (34)$$

Utilisons les équations (14-15), la dynamique de l'erreur est donnée par :

$$\dot{e}_4 = -\frac{1}{L_0} v_d + \omega_n i_{nq} + \frac{1}{L_0} v_{dc} u_{nd} - \frac{di_{nd-ref}}{dt} \quad (35)$$

$$\dot{e}_5 = -\frac{1}{L_0} v_q + \omega_n i_{nd} + \frac{1}{L_0} v_{dc} u_{nq} - \frac{di_{nq-ref}}{dt} \quad (36)$$

Utilisation l'équations (35-36), Où u_{nd} , u_{nq} sont les variables de commande réelle. la loi de contrôle de stabilisation est définie comme suit:

$$u_{nd} = +\frac{L_0}{v_{dc}} \left(\frac{1}{L_0} v_d - \omega_n i_{nq} + \frac{di_{nd-ref}}{dt} - k_4 e_4 \right) \quad (37)$$

$$u_{nq} = \frac{L_0}{v_{dc}} \left(\frac{1}{L_0} v_q - \omega_n i_{nd} + \frac{di_{nq-ref}}{dt} - k_5 e_5 \right) \quad (38)$$

avec $k_4 > 0$ et $k_5 > 0$

IV. SIMULATION

Le dispositif général de la commande est décrit par Fig. 3 a été simulé, dans l'environnement Matlab / Simulink avec les caractéristiques suivantes:

$$p = 3, 50 \text{ Hz}, V_s = 220 \text{ V}, R_s = 0.95 \Omega, R_r = 1.8 \Omega,$$

$$L_m = 0.082 \text{ H}, L_s = 0.094 \text{ H}, L_r = 0.088 \text{ H},$$

$$J = 0.1 \text{ kg/m}^2; f = 0.06 \text{ N m s /rad}$$

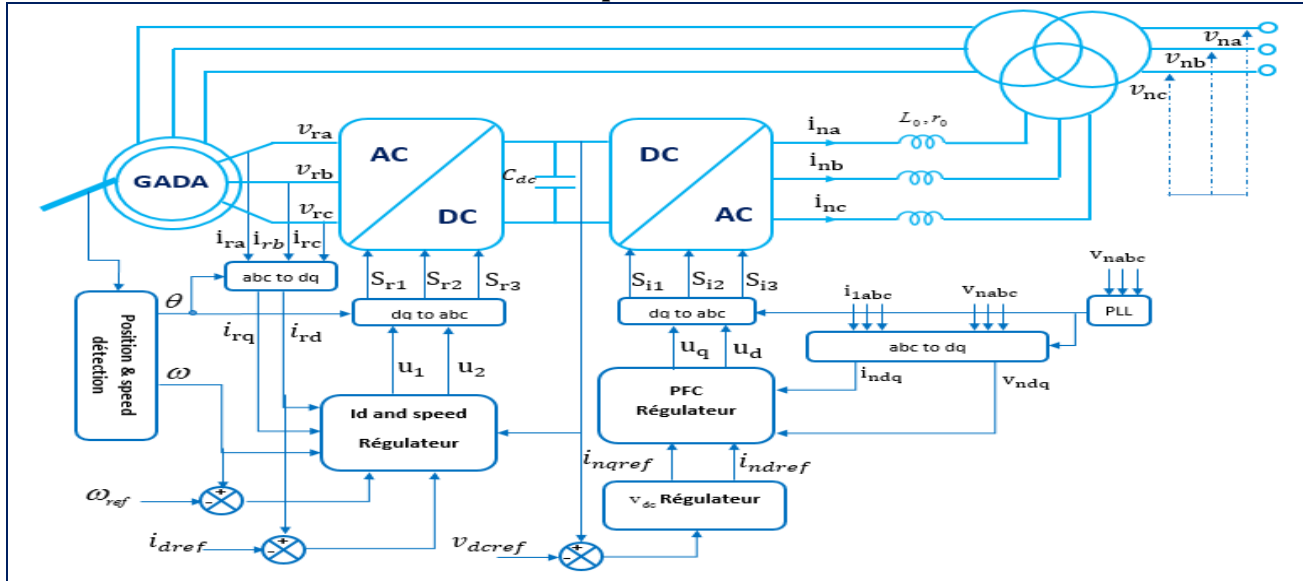


Fig.3 Schéma général de la commande

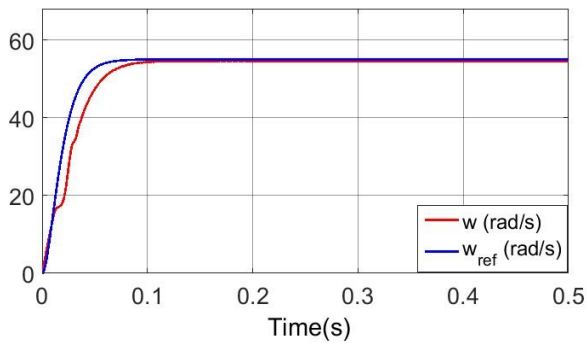


Fig. 4 vitesse avec sa référence

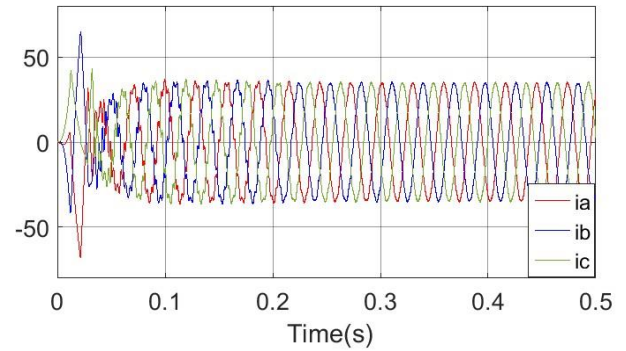


fig. 5 courants statorique

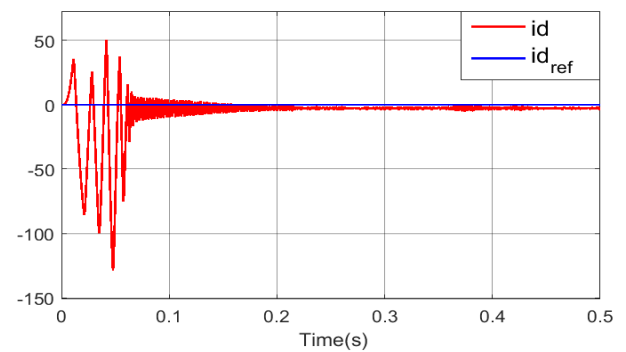
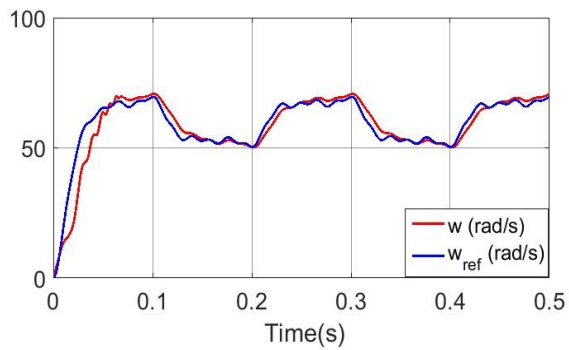


Fig. 6 Courant i_d avec sa référence

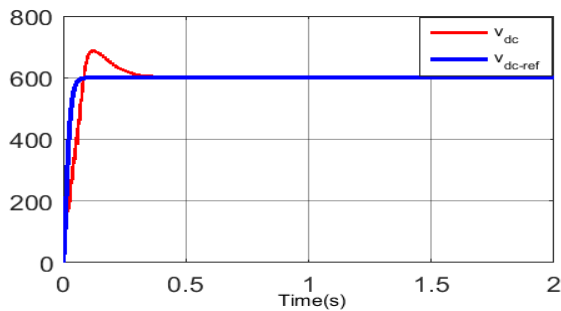


Fig. 7 tension de bus continue avec sa référence

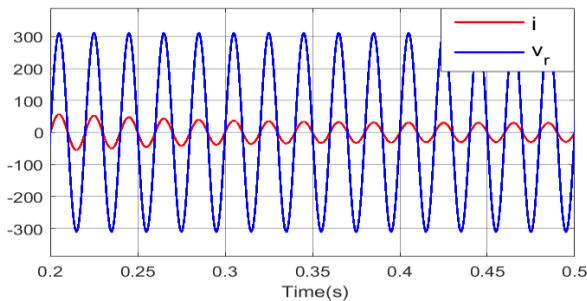


Fig. 8 le courant injecter avec la tension du réseau

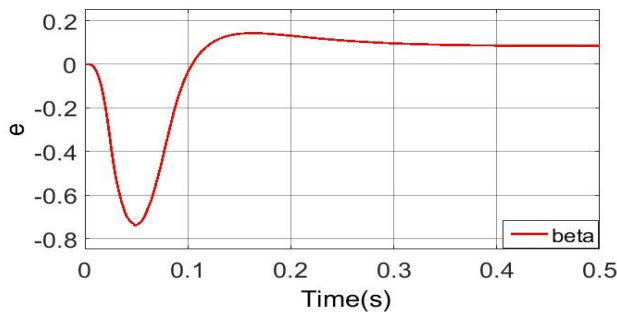


Fig. 9 beta

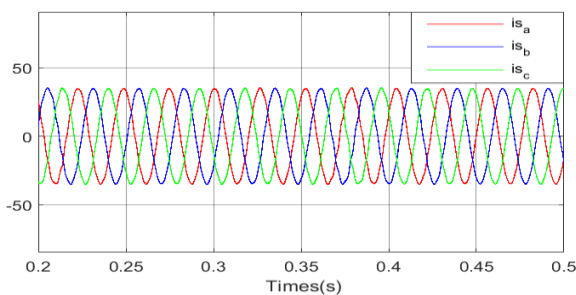


Fig. 10 les courants injecter dans le réseau

Les figures montrent les résultats de la commande par Backstepping appliqué au GADA. L'objectif est de contrôler le fonctionnement du système en boucle fermée en faisant varier la vitesse de rotation de référence 0 rad une valeur finale égale à la vitesse nominale: 157 rad / s. Les figures 4, 5, 6, montrent les résultats de simulation obtenus en utilisant les paramètres nominaux du générateur. Ces figures décrivent la bonne performance du système en boucle fermée en termes de suivi de trajectoire et de rejet de perturbations sur des vitesses multiples: basse et haute vitesse. En outre, l'axe courant du bien suit sa référence. Les figures 7, 8, 9, 10, sont destinées à vérifier la robustesse de la commande u en effectuant des variations sur la valeur de (V_{dc}). les figures montrent que le courant de sortie en phase avec la tension d'alimentation et la liaison CC est Stable à une valeur constante qui est vérifiée Objectifs de contrôle.

V. CONCLUSION

Le problème du contrôle des associations, y compris un redresseur AC/DC et un convertisseur continu / alternatif, et un moteur synchrone a été pris en compte. le contrôleur commande (19), (31), (37) et (16) a été conçu par une technique de commande backstepping, Il a été formellement établi que le contrôleur proposée atteint les objectifs qu'il a été conçu pour: le facteur de puissance presque unitaire; la tension bien régulée DC-link (V_{dc}); aussi la vitesse parfaitement suivit sa référence pour extraire le maximum de puissance. Ces résultats ont été vérifiés par une étude de simulation sous environnement MATLAB/Simulink.

References

Volume I N° 3

Revue de l'Entrepreneuriat et de l'Innovation

- [1] Boussairi, Y., Abouloifa, A., Hamdoun, A., & Aouadi, C. (2015, December). Backstepping controller design for a single phase DC/AC converter applied to grid-connected wind energy. In 2015 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC) (pp. 1-5). IEEE.
- [2] KERAÏ, S., MEKI, G., FODIL, A., et al. Calcul du Convertisseur AC/DC avec Correction de Facteur de Puissance.
- [3] R.PAKU and R. MARSCHALKO, Matlab/simulink/Sim-power-systems Model for a PWM AC-to-DC converter with line conditioning capabilities ,Acta Electrotehnica, Mediamira Science Publisher, Volume 51, Number 2, 2010.
- [4] Khojet El Khil. S, 2006. Commande Vectorielle d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA). Thèse de Doctorat, Institut national Polytechnique de Toulouse.
- [5] Krstic, Kanellakopoulos, Kokotovic Nonlinear and Adaptive Control DesignBook, John Wiley and Sons, 1995.
- [6] Boussairi, Y., Abouloifa, A., Hamdoun, A., & Aouadi, C. (2014, November). Modeling and control of grid connected wind energy conversion system with power factor correction. In Complex Systems (WCCS), 2014 Second World Conference on (pp. 386-391). IEEE.
- [7] DIDAT, J. R., MENY, I., ENRICI, P., et al. Modeling and experimental testing of a grid-connected small Wind Energy Conversion System.
- [8] ROSYADI, Marwan, MUYEEN, S. M., TAKAHASHI, Rion, et al. A design fuzzy logic controller for a permanent magnet wind generator to enhance the dynamic stability of wind farms. Applied Sciences, 2012, vol. 2, no 4, p. 780-800.
- [9] Mohamed Assaad Hamida, Backstepping with integral control for PMSM: Experimental Test, Conférence Internationale Francophone d'Automatique (CIFA2012) Grenoble, France. 4-6 Juillet 2012