

COMMANDE A FLUX VIRTUEL ORIENTE DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE A CAGE DOUBLE ÉTOILE

YACINE BENDJEDDOU¹, RACHID ABDESSEMED², ELKHEIR MERABET²

Mots clés: Commande à flux virtuel orienté, Génératrice double étoile (GASDE), Flux virtuel, PI-flou.

Cet article est consacré à l'étude des performances de la génératrice asynchrone à cage double étoile (GASDE) en site isolé. Le système de commande est composé d'une GASDE raccordé à un bus continu et une charge en sortie de deux redresseurs à commande MLI. Une étude comparative entre la technique de commande conventionnelle et la commande adaptée basée sur l'introduction de la SVM-PI-flou et un nouvel estimateur de flux (flux virtuel statorique) afin d'améliorer la qualité d'énergie et d'atténuer les harmoniques du courant.

1. INTRODUCTION

La génératrice à induction convient très bien à la production de l'énergie électrique à grande vitesse, même si de nombreux problèmes doivent être résolus, telle que la tension aux bornes d'un générateur à induction auto-excité qui dépend fortement de la vitesse du rotor, de la capacité aux bornes des enroulements et de la charge.

Dans les systèmes isolés (autonomes), les générateurs à induction à cage à excitation par condensateur, appelés générateurs asynchrones à excitation autonome, sont très utilisés.

Aussi, ces dernières années, les machines à induction double étoile ont pris leurs parts dans la recherche scientifique en raison de leurs avantages ; entre autres, la segmentation de la puissance et le faible taux des harmoniques. Différents types ont été envisagés pour diverses applications motrices et génératrices puisque deux ensembles d'enroulements du stator offrent la possibilité d'une conversion d'énergie plus flexible. Par exemple, l'énergie peut être transférée non seulement entre le stator et le rotor comme dans les machines à un seul enroulement, mais également indirectement entre l'ensemble des enroulements du stator. Pour obtenir de bonnes performances dynamiques d'une machine double étoile commandée, la résistance du rotor et l'inductance magnétisante doit être déterminée avec précision.

Plusieurs techniques de commande sont utilisées dans les systèmes de génération de l'énergie électrique au moyen de la machine à induction afin de contrôler la tension générée en fonctionnement autonome ou de la puissance quand celle-ci est raccordée au réseau électrique.

La technique de contrôle par tension (VOC) proposée est implantée par [1][2] garantit des performances dynamique et statique élevées via des boucles de contrôle des courants internes. Cette méthode est très utilisée. Elle a été développée et améliorée. Un compensateur PI est appliqué aux variables du carré de référence en rotation de manière à obtenir une erreur à l'état stationnaire zéro en réponse aux commandes de pas. Ensuite, les variables du référentiel tournant doivent être restaurées dans le référentiel stationnaire triphasé en utilisant la transformation inverse. Dans cette technique de commande, la génératrice est connectée à un redresseur à commande MLI avec des régulateurs de courant et de tension utilisant la commande VOC.

Les performances de cette technique de commande

dépendent largement de la qualité de la technique de contrôle du courant appliquée. Cette technique a plusieurs avantages tels que : la forme du courant statorique sinusoïdale et de bas harmoniques (THD), une fréquence de commutation fixe, une mise en œuvre facile et une compensation efficace des harmoniques d'ordre supérieurs. Cette technique nécessite l'introduction de la PLL (boucle de verrouillage de phase) pour déterminer l'angle de phase. Cependant, ces avantages sont occupés par une exigence de capteurs de tension de ligne.

Dans ce travail, une commande VOC à orientation de la tension avec estimation de flux virtuel est envisageable sur la génératrice double étoile, l'estimation de flux virtuel en fonction de la tension de bus continu et des états de commande de bras de redresseur. Cette technique permet de simplifier le système de commande et d'améliorer la précision d'estimation de la position de flux.

2. MODELISATION D'UN GENERATEUR ASYNCHRONE A DOUBLE ETOILE AUTO-EXCITE

Le modèle de la génératrice asynchrone double étoile est le même que le moteur asynchrone double étoile. Le modèle PARK du générateur asynchrone double étoile dans le référentiel au champ tournant (d, q). Le DSIG contient deux enroulements de stator de phase identiques décalés d'un angle électrique, et un rotor à cage d'écurieul [3].

Le modèle électrique de la DSIG dans le référentiel synchrone (d-q) qui se présentait en [4–5] :

$$v_{ds1} = -r_1 i_{ds1} - \omega_e \Psi_{qs1} + p \Psi_{ds1} \quad (1)$$

$$v_{qs1} = -r_1 i_{qs1} + \omega_e \Psi_{ds1} + p \Psi_{qs1} \quad (2)$$

$$v_{ds2} = -r_2 i_{ds2} - \omega_e \Psi_{qs2} + p \Psi_{ds2} \quad (3)$$

$$v_{qs2} = -r_2 i_{qs2} + \omega_e \Psi_{ds2} + p \Psi_{qs2} \quad (4)$$

$$v_{dr} = 0 = r_r i_{dr} - (\omega_e - \omega_r) \Psi_{qr} + p \Psi_{dr} \quad (5)$$

$$v_{qr} = 0 = r_r i_{qr} + (\omega_e - \omega_r) \Psi_{dr} + p \Psi_{qr} \quad (6)$$

¹ Ecole supérieure en génie électrique et énergétique d'Oran ESGEE, Laboratoire de Génie électrique et matériaux (LGEM), 31000, E-mail: yacineunivers@yahoo.fr

² Université de Batna-2, Faculté de technologie, Laboratoire d'Electrotechnique de Batna (LEB), 05000, Algérie, E-mail: rachid.abdessemed@gmail.com

On peut contrôler séparément les courants $i_{d1,2}, i_{q1,2}$ des deux étoiles par action sur les composantes $u_{d1,2}, u_{q1,2}$. La figure ci-dessous présente la boucle de réglage des courants.

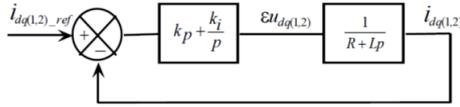


Fig. 2 – Bloc de régulation du courant.

La fonction de transfert en boucle fermée de bloc de régulation s'écrit comme suit :

$$G_{BF}(p) = \frac{\frac{k_i}{k_p} p + 1}{\frac{L}{k_i} p^2 + \frac{R + k_p}{k_i} p + 1} \quad (7)$$

Après simplification, on aura : $k_i = 2 \quad k_i = 2\zeta\omega - R$, $k_p = L\omega^2$, $\zeta = \frac{\sqrt{2}}{2}$ et ω en fonction du temps de réponse choisi. Le bloc de découplage VOC implanté sous Matlab Simulink des correcteurs de courants et de tension est présenté sur (Fig. 1). La boucle de régulation de tension consiste à fournir le courant i_d de référence. La Figure 6 présente l'algorithme global de commande VFOC appliqué sur la GASDE. Le régulateur de la tension du bus continu fournit le courant i_d de référence. Le correcteur est un PI présenté sur la (Fig. 3) [6,7].

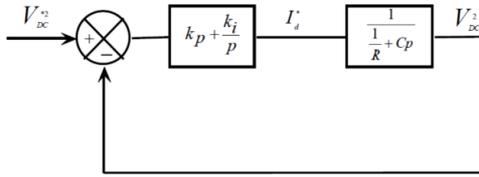


Fig. 3 – Bloc de régulation de tension.

De manière similaire à la détermination des paramètres du correcteur PI du courant, la fonction de transfert en boucle fermée de système s'écrit :

$$G_{BF}(p) = \frac{\frac{k_i}{k_p} p + 1}{\frac{C}{k_i} p^2 + \frac{1}{R} + \frac{k_p}{k_i} p + 1} \quad (8)$$

On aura : $k_i = 2\zeta\omega C - \frac{1}{R}$, $k_p = C\omega^2$, $\zeta = \frac{\sqrt{2}}{2}$ et ω en fonction du temps de réponse optimal.

6. LA MODULATION MLI VECTORIELLE (SVM)

La modulation MLI vectorielle est l'une des techniques les plus utilisées pour générer une tension un courant sinusoïdaux grâce à sa simplicité et son efficacité avec une faible distorsion des harmoniques.

Dans la SVM, on représente par un seul vecteur des tensions sinusoïdales de sortie que l'on désire. On approxime au mieux ce vecteur pendant chaque intervalle de modulation en agissant sur la commande des trois jeux d'interrupteurs complémentaires.

Cette MLI vectorielle ne s'appuie pas sur des calculs séparés pour chaque bras du redresseur mais sur la détermination d'un vecteur de contrôle global approximé sur une période de modulation T . Les huit vecteurs de tension redéfinis par la combinaison des interrupteurs sont représentés dans le plan $(\alpha\beta)$, (Fig. 4).

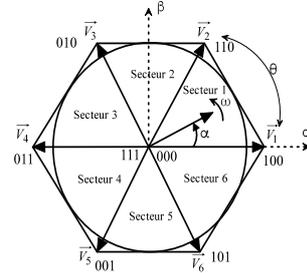


Fig. 4 – Représentation des vecteurs de tension dans le repère $\alpha\beta$.

Pour concevoir la commande MLI vectorielle, on doit suivre les étapes suivantes : Calcul des vecteurs de références ; Détermination du secteur ; Calcul des temps d'application ; Génération des impulsions.

7. CALCUL DES VECTEURS DE REFERENCES

Comme pour l'onduleur, d'après la Fig. 4, on distingue 8 états possibles des interrupteurs du redresseur MLI, permettant de calculer les vecteurs de références V_α et V_β [6,7].

$$\begin{pmatrix} V_{\alpha ref} \\ V_{\beta ref} \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} \quad (9)$$

8. DETERMINATION DU SECTEUR

L'hexagone du diagramme vecteur d'espace du redresseur se subdivise en 6 secteurs. Le secteur est déterminé selon la position du vecteur V_{sref} sur le plan (α, β) . Cette position présente la phase θ de ce vecteur défini comme suit :

$$\theta = \arctan\left(\frac{\Psi_{s\beta}}{\Psi_{s\alpha}}\right) \quad (10)$$

Table 1

Les 6 secteurs, $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$.

θ	$0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{2\pi}{3}$	$\frac{2\pi}{3} \leq \theta \leq \pi$	$\pi \leq \theta \leq \frac{4\pi}{3}$	$\frac{4\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{5\pi}{3}$	$\frac{5\pi}{3} \leq \theta \leq 2\pi$
S_i	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6

9. CALCUL DES TEMPS D'APPLICATION

T_1 et T_2 sont les deux temps d'application des vecteurs V_1 et V_2 , où le vecteur référence se trouve dans le secteur 1 et les vecteurs adjacents sont V_1 et V_2 . On note T_0 le temps d'application des vecteurs nuls où leur somme doit être inférieure à la période T_s de commutation du redresseur [6].

$$\begin{aligned} V_{sref} T_s &= T_1 V_1 + T_2 V_2 \\ T_s &= T_1 + T_2 + T_0 \end{aligned} \quad (11)$$

On peut déterminer les expressions de T_1 et T_2 :

$$T_1 = \frac{\sqrt{3}T_s V_{sref}}{V_{DC}} (\sin(\frac{n}{3}\pi) \cos(\alpha) - \cos(\frac{n}{3}\pi) \sin(\alpha))$$

$$T_2 = \frac{\sqrt{3}T_s V_{sref}}{V_{DC}} (-\sin(\frac{n-1}{3}\pi) \cos(\alpha) - \cos(\frac{n-1}{3}\pi) \sin(\alpha))$$

(12)

où :

- $n=1$ à 6 : (représente les secteurs 1 à 6 et $(0 \leq \alpha \leq 60^\circ)$);
- V_{DC} : la tension de bus continu de redresseur;
- T_1 : le temps d'application du vecteur V_1 ;
- T_2 : le temps d'application du vecteur V_2 ;
- T_s : la période de commutation;
- T_0 : la durée d'application de la séquence de roue libre.

10. GENERATION D'IMPULSION

Les signaux de commande (s_a, s_b, s_c) en fonction de T_{xon} sont donnés sur le tableau ci-dessous.

Table 2

Tableau de génération de d'impulsion de commande.

Secteur signaux	1	2	3	4	5	6
S_a	T_{aon}	T_{bon}	T_{con}	T_{con}	T_{bon}	T_{aon}
S_b	T_{bon}	T_{aon}	T_{aon}	T_{bon}	T_{con}	T_{con}
S_c	T_{con}	T_{con}	T_{bon}	T_{aon}	T_{aon}	T_{bon}

11. DES CORRECTEURS PI-FLOU

On remplace les correcteurs PI classiques par des PI-floous. La Figure 5 présente les correcteurs PI-floous de la tension et des courants [12], où E est l'erreur, exprimée par:

$$E(k) = V_{DC}^*(k) - V_{DC}(k-1), \tag{13}$$

dE est la dérive de l'erreur E exprimé par:

$$dE(k) = E(k) - E(k-1). \tag{14}$$

La sortie de régulateur est donnée comme suit :

$$P^*(k) = P^*(k-1) - dU(k). \tag{15}$$

P^* : la puissance de référence. Si on note dE la variation de l'erreur E et du la variation du signal de commande u , l'équation en z devient [11–13] :

$$du = k_p dE(z) + k_i E(z). \tag{16}$$

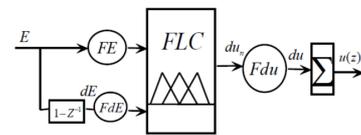


Fig. 5 – Structure du correcteur PI-floou.

La sortie du correcteur PI est accordé à la variation de l'erreur E et à sa variation. Il semble, tout à fait naturel de conserver les entrées et sorties pour le correcteur flou.

Ces paramètres sont ajustés en temps réel en fonction de la perturbation qui augmente. Il s'agit d'associer la sortie du régulateur flou aux actions proportionnelles et intégrales du signal de commande. Le contrôleur flou est composé de trois blocs [9–11,13] :

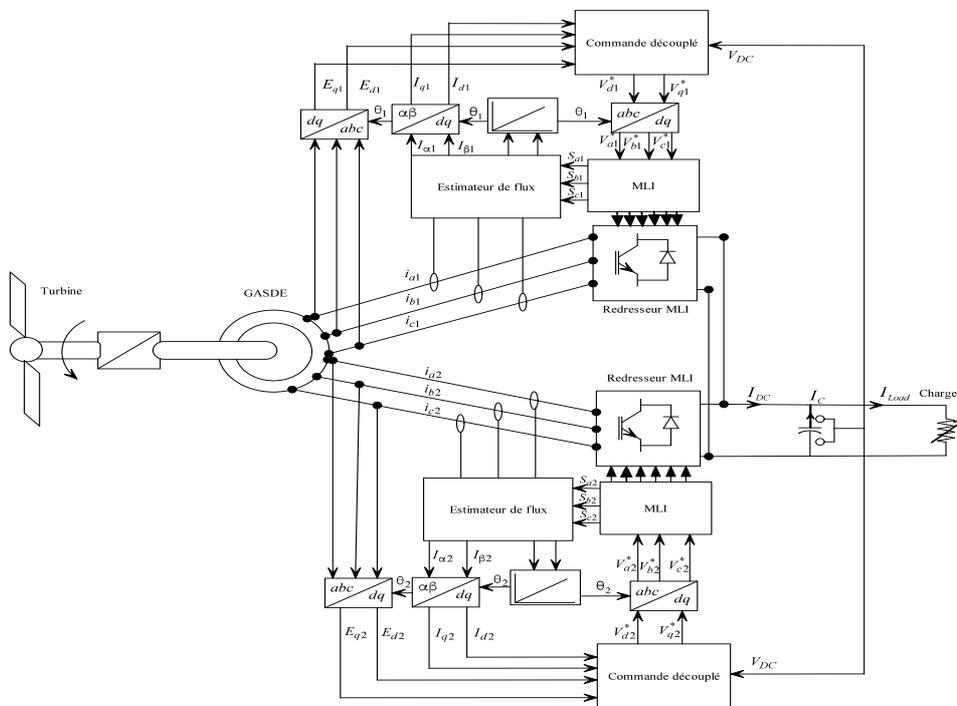


Fig. 6 – Algorithme de commande VFOC appliquée sur la GASDE.

Fuzzification : les variables physiques d'entrée $E(k)$ et $dE(k)$ sont transformées en variable flous caractérisant

les valeurs linguistiques prises par ces variables ;

- Règles de bases floues : La base de données de règle de la logique flou se compose de phrases de condition de la logique flou si-et-sinon ;
- Defuzzification : les variables floues sont converties en variables réelles. La méthode utilisée est de centre de gravité et la stratégie d'inférence utilisée est l'algorithme de Mamdani.

12. RESULTATS DE SIMULATION

Le système de commande proposés ci-dessus est simulés et vérifié sous Matlab-Simulink afin d'étudier ses performances. Le modèle de la génératrice asynchrone à cage double étoile (GASDE) utilisé dans la commande est bien expliqué dans [10]. Le système d'échantillonnage utilisé $T_s = 50\mu s$. Parameters de la GASDE: $r_{1,2} = 1.9 \Omega$, $r_r = 2.9 \Omega$, $L_{11,2} = 0.0132 H$, $L_{lr} = 0.0132 H$ and $L_m = 0.011 H$.

Durant la simulation, le système de commande est soumis à des variations de la vitesse d'entraînement Fig. 9 et de la charge Fig. 10. Les résultats de simulation obtenus par la commande VFOC-SVM avec des correcteurs PI-Flou et la commande VFOC-PWM avec des correcteurs PI classique sont présentés ci-dessous :

Les Fig. 7 et Fig. 8 présentent la tension de bus continu en sortie de redresseur pour les deux techniques de commande appliquées. Les résultats obtenus par la nouvelle technique de commande sont meilleurs que la technique conventionnelle. A l'instant $t = 4 s$ et $t = 8 s$, le système de contrôle est soumis à une variation de la charge en sortie du redresseur. Les perturbations dues à ces variations sont rejetées par les correcteurs. La nouvelle technique de commande avec un temps de réponse de 0.1 s présente des dépassements d'environ 0.59 %. Par contre, la technique conventionnelle avec un temps de réponse de 0.2 s présente des dépassements d'environ 0.94 %. Les Fig. 11 et Fig. 14, présentent les courants statoriques suivant l'axe (d,q) et les courants statoriques de ligne obtenus par la commande VFOC-SVM PI-Flou. La distorsion harmonique totale THD du courant de ligne est de 1%, Fig. 12 pour la nouvelle technique, alors qu'elle est de 1.39 %, Fig. 13 pour la technique classique. La Fig. 14 montre les courants statoriques de la première phase de la première étoile et de la première phase de la deuxième étoile. On constate que les deux courants sont déphasés l'un de l'autre de 30° .

La Fig. 15 présente le flux statorique suivant α et β de la première et la deuxième phase. Les deux composantes sont décalées l'une de l'autre de 90° et de son homologue de l'autre phase de 30° .

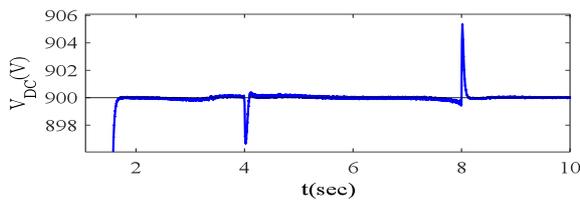


Fig. 7 – VFOC-SVM, PI-Flou.

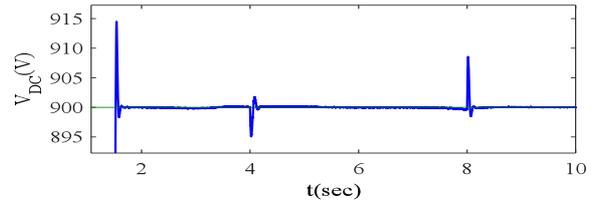


Fig. 8 – VFOC-PWM, PI.

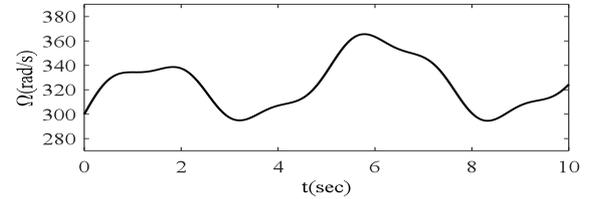


Fig. 9 – La vitesse d'entraînement.

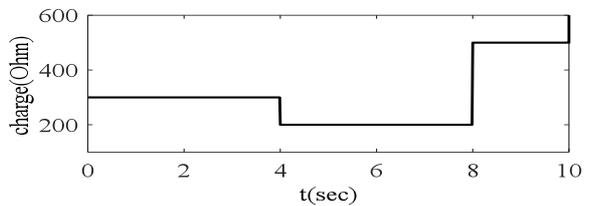


Fig. 10 – Charge en sortie du redresseur (Résistance).

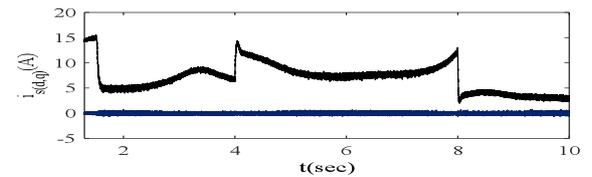


Fig. 11 – Courants statorique dans les axe quadrature (d,q).

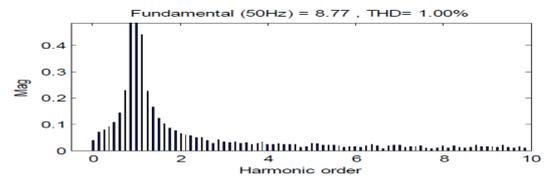


Fig. 12 – THD de la VFOC-SVM, PI-Flou.

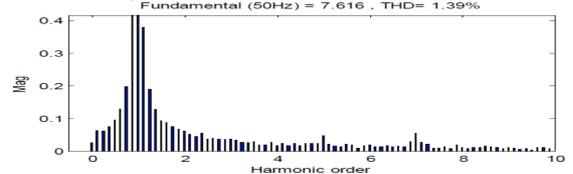


Fig. 13 – THD de la VFOC-PWM, PI classique.

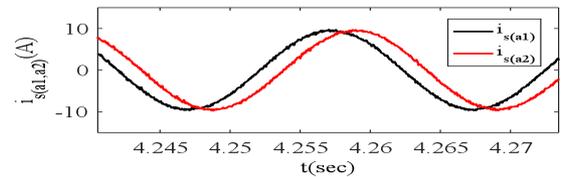


Fig. 14 – $i_{s\alpha 1}$ et i_{sb1} .

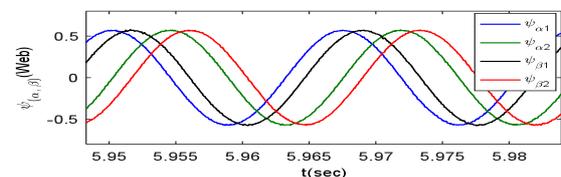


Fig. 15 – $\psi_{\alpha 1}, \psi_{\beta 1}, \psi_{\alpha 2}, \psi_{\beta 2}$.

13. CONCLUSIONS

Cet article est consacré à l'introduction de la commande VFOC-SVM à estimation de flux statorique. L'estimateur du flux remplace les capteurs de tension sans détériorer les performances du redresseur. La qualité du courant statorique en termes d'harmonique est meilleure, réduisant ainsi les effets néfastes sur la durée de vie de la génératrice asynchrone à cage.

La commande vectorielle à orientation de flux statorique avec estimateur de flux virtuel (VFOC) et correcteur PI flou montre de meilleures performances par rapport à la commande classique.

Recue le 17 september, 2019

REFERENCES

1. A. Mehdi, A. Boulahia, H. Medouce, H. Benalla, *Induction generator using AC/DC/AC-PWM converters and its application to the wind-energy systems*, In EUROCON, IEEE., pp. 1038–1043 (2013).
2. S. M. Mahajan, S. S. Kumaresan, et al, *Decoupled control strategy for the operation of capacitor excited induction generator for DC power applications*. IET Power Electroncs., **9**, 13, pp. 2551–2561 (2016).
3. N. Su, W. Huang, S. Zheng, *Closed-loop dynamic control for dual-stator winding induction generator at low carrier ratio with selective harmonic elimination pulse width modulation*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, **68**, 6, pp. 4737–4747, (2021).
4. L. Fatma, S. Haddad, N. Benamrouche, *Active and reactive power control of a dual stator induction generator for wind energy conversion*, Int. J. of Modelling, Identification and Control, **34**, 3, pp. 235-244 (2020).
5. A. Kavousi, S. H. Fathi, J. Milimonfared, M. N. Soltani, *Application of boost converter to increase the speed range of dual-stator winding induction generator in wind power systems*, IEEE Trans. on Power Electronics, **33**, 11, pp. 9599-9610 (2018).
6. A. Rahoui, A. Bechouche, H. Seddiki, et al, *Grid voltages estimation for three-phase pwm rectifiers control without ac voltage sensors*, IEEE Trans. on Power Electronics., **33**, 1, pp. 859–875 (2018).
7. Ab. Bouafia, J.P. Gaubert, K. Fateh, *predictive direct power control of three phase pulsewidth modulation (PWM) rectifier using space vector modulation (SVM)*. IEEE Trans. on Power Electronics., **25**, 1, pp. 228–236 (2010).
8. M. Malinowski, Se. Stynski, W. Kolomyjski, et al, *Control of three level PWM converter applied to variable speed type turbines*, IEEE Trans. on Industrial Electronics., **56**, 1, pp. 69–77 (2009).
9. E. Merabet, H. Amimeur, F. Hamoudi, R. Abdessemed, *Self-tuning fuzzy logic controller for a dual star induction machine*. JEET., **6**, 1, pp. 133–138 (2011).
10. L. Salima, B. Tahar, S. Youcef, *Indirect rotor field-oriented control based on fuzzy logic controlled double star induction machine*, Electric Power and Energy Systems., **57**, pp. 206–211 (2014).
11. T. Zohir, O.P. Malik, A.M. Eltamaly, *Fuzzy logic-based speed control of indirect rotor field oriented controlled double star induction motors connected in parallel to a single six-phase inverter supply*, Electric Power and Energy Systems., **57**, pp. 206–211 (2014).
12. T. Bessaad, R. Taleb, G. Bachir, A. Benbouali, *Fuzzy speed controller design of multi-machines system*, Rev. Roum. Sci. Techn. - Electrotechn. Et Energ., **62**, 4, pp. 417–423 (2017).
13. Y. Bendjeddou, R. Abdessemed, E. Merabet, L. Bentouhami, *Fuzzy controller for self-excited dual star induction generator with online estimation of magnetizing inductance used in wind energy conversion*, Rev. Roum. Sci. Techn. – Electrotechn. Et Energ., **63**, 4, pp. 417–422 (2018).

DIRECTIONAL VIRTUAL FLOW CONTROL OF THE DOUBLE STAR CAGE ASYNCHRONOUS GENERATOR

Key words: Virtual flow oriented control, Double Star Generator (GASDE), Virtual flux, PI-fuzzy.

This article is devoted to the study of the performance of the double star cage asynchronous generator (GASDE) in isolated site. The control system consists of a GASDE connected to a dc bus and a load at the output of two PWM control rectifiers. A comparative study between the conventional control technique and the adapted control based on the introduction of the SVM-PI-fuzzy and a new flux estimator (virtual stator flux) in order to improve the quality of energy and to attenuate the harmonic of the current.