

# Amélioration du contrôle direct de puissance réactive appliquée à un aérogénérateur basé sur le DFIG

Oualid DJOUDI, Sofia LALOUNI BELAID, Salah TAMALOUZT

Laboratoire de Technologie Industrielle et de l'Information (LTII), Faculté de Technologie, Université de Bejaia, 06000 Bejaia, Algérie

**RESUME** - Cet article présente une stratégie améliorée de contrôle direct de la puissance réactive (DRPC) basée sur la technique de la modulation par vecteur spatial (SVM) appliquée à un onduleur de tension à deux niveaux alimentant le rotor d'un générateur asynchrone à double alimentation (DFIG) entraîné par une éolienne à vitesse variable (WT). Le contrôle de la puissance réactive est assuré par l'action sur le flux rotorique. Grâce à l'approche de la fréquence de commutation fixe de la SVM, la technique proposée SVM-DRPC permet un contrôle avec des performances meilleures, à savoir la réduction des ondulations dans la machine, souvent rencontrées avec la commande DRPC conventionnelle. Les résultats de simulation obtenus avec la commande SVM-DRPC proposée montrent des améliorations satisfaisantes par rapport à la commande DRPC basée sur la table de commutation (ST-DRPC). Cette amélioration se manifeste par la réduction des ondulations du couple et de la puissance réactive du stator.

**Mots-clés**— *Générateur Asynchrone à Double Alimentation, Contrôle Direct de la Puissance Réactive, Modulation par Vecteur Spatial, Eolienne à Vitesse Variable.*

## 1. INTRODUCTION

La source d'énergie renouvelable la plus utilisée est l'énergie éolienne en raison de sa grande disponibilité et de sa technologie d'exploitation de pointe. De nos jours, les systèmes de conversion de l'énergie éolienne connectés au réseau utilisent plus fréquemment le générateur asynchrone à double alimentation (DG). Grâce à la possibilité de contrôler le DFIG par le rotor, ce dernier peut fonctionner dans une large gamme de vitesse. En outre, la puissance disponible dans le rotor est une fraction de la puissance du stator. Cela est un avantage pour utiliser un convertisseur d'une petite taille pour contrôler le DFIG [1].

Cependant, en raison de son caractère non linéaire, de sa dynamique et de la variation de ses paramètres pendant le fonctionnement, le DFIG est plus difficile à contrôler. Le couple et le flux de cette machine doivent être gérés par des algorithmes de contrôle plus avancés afin de surmonter ces limitations. Plusieurs travaux ont été menés pour contrôler le DFIG dans un système éolien connecté au réseau [2]-[5], [6]. La commande vectorielle à flux orienté (FOC) est la commande la plus citée sur le contrôle de l'ensemble WT-DFIG. Toute en assurant le découplage du couple électromagnétique par rapport au flux rotorique, le rendement optimal de l'éolienne peut être obtenu en contrôlant la vitesse mécanique du DFIG. Cette technique de commande permet une réponse plus fine en régime permanent par la présence d'une boucle interne pour le courant. Toutefois, les

performances de la commande sont affectées par les variations paramétriques [2].

Le contrôle direct du couple (DTC) est l'un des algorithmes proposés pour commander l'éolienne basée sur le DFIG. Cet algorithme est introduit pour la première fois en 1985 par Takahashi. En raison de son implémentation plus simple, de sa réponse transitoire améliorée et de sa faible dépendance aux paramètres de la machine, cette commande surpassé la commande vectorielle à flux orienté [3]. Toutefois, les ondulations de flux et de couple sont le principal problème de la DTC traditionnelle. Cela est due à la fréquence de commutation variable des régulateurs à hystéresis. Plusieurs travaux ont été proposés dans le but d'améliorer les performances de la commande DTC appliquée sur l'ensemble WT-DFIG tout en gardant ses avantages; simplicité d'implémentation et indépendance aux variations paramétriques. La Référence [4] propose une DTC appliquée sur un convertisseur multi-niveaux, afin de bénéficier du haut degré de liberté dans la sélection du vecteur de tension approprié. Dans [5] la table de commutation classique de la DTC et les régulateurs à hystéresis ont été remplacé par un contrôleur flou. Les techniques présentées dans [4-8] permettent de réduire les ondulations du flux et du couple en régime permanent. Cependant, la fréquence de commutation est constamment variable.

La modulation par vecteur spatial (SVM) est une technique qui offre la possibilité de régler la fréquence de commutation. L'intégration de la technique SVM dans la commande DTC permet de surmonter le phénomène d'ondulation en imposant une fréquence de commutation constante [9-10]. La SVM-DTC a été appliquée sur le DFIG par [11]. Les ondulations du flux et du couple ont été réduites avec une fréquence de commutation fixe. Cependant, le contrôle du flux de puissance par le convertisseur côté réseau (CCR) est négligé. En outre, l'avantage de contrôler la puissance réactive statorique n'a pas été exploité.

L'objectif de cet article est de démontrer l'amélioration des performances du SVM-DTC tout en contrôlant la puissance réactive statorique et le flux de puissance entre le rotor et le réseau. Le logiciel MATLAB/Simulink est utilisé pour simuler le système de contrôle proposé afin de tester les suppositions théoriques.

## 2. MODELISATION DE L'ENSEMBLE WT-DFIG

Le modèle mathématique du DFIG exprimé dans le référencement synchrones d-q est décrit par les équations suivantes.

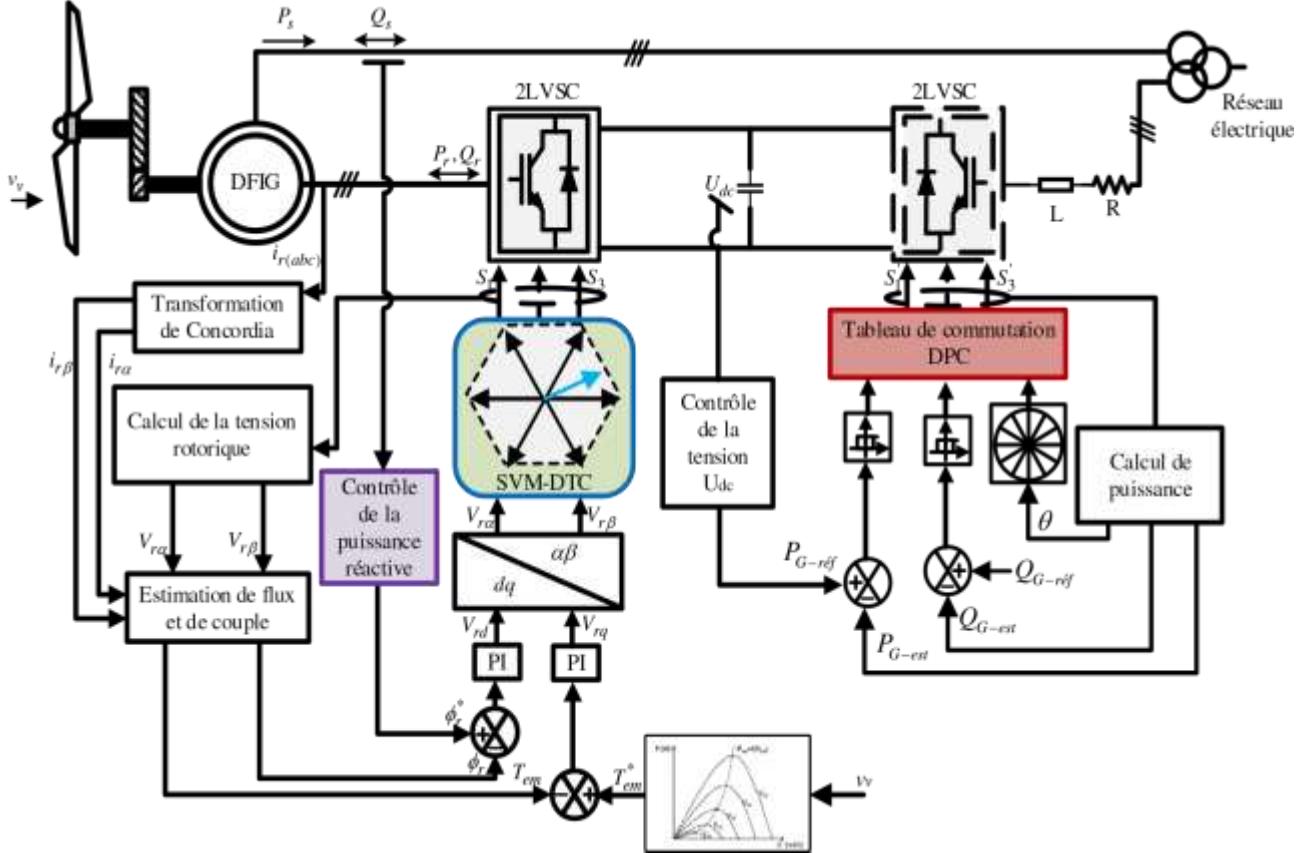


Fig. 1. Schéma synoptique du contrôle proposé.

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

Où :  $V_{sd}$ ,  $V_{sq}$ ,  $V_{rd}$  et  $V_{rq}$  sont respectivement la tension du stator et du rotor dans le cadre d-q;  $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$ ,  $i_{rd}$  et  $i_{rq}$  sont respectivement le courant du stator et du rotor dans le cadre d-q ;  $R_s$  et  $R_r$  sont respectivement la résistance de phase du stator et du rotor;  $\omega_s$  et  $\omega_r$  sont respectivement les pulsations de courant du stator et du rotor.

Les flux magnétiques du DFIG sont définis comme suit :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s i_{sq} + M i_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r i_{rd} + M i_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r i_{rq} + M i_{sq} \end{cases} \quad (2)$$

Où  $\varphi_{sd}$ ,  $\varphi_{sq}$ ,  $\varphi_{rd}$  et  $\varphi_{rq}$  sont respectivement les flux du stator et du rotor dans le cadre d-q ;  $L_s$ ,  $L_r$  et  $M$  sont

respectivement les inductances du stator, du rotor et l'inductance mutuelle.

Le couple mécanique à la sortie de la turbine éolienne est donné par l'équation 3.

$$T_m = \frac{\pi}{2\lambda} \cdot \frac{C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot R^3 \cdot v_v^2}{G} \quad (3)$$

Où  $\rho$  la densité de l'air,  $R$  le rayon du rotor,  $G$  le gain du multiplicateur et  $v_v$  la vitesse du vent.  $C_p$  : représente le coefficient de puissance, il est fonction du rapport de vitesse  $\lambda$  et de l'angle de calage des pales  $\beta$ .

Le couple électromagnétique peut être écrit comme une fonction du courant et du flux du rotor, comme indiqué dans l'expression suivante:

$$T_{em} = P(\varphi_{rd} i_{rq} - \varphi_{rq} i_{rd}) \quad (4)$$

### 3. PRINCIPE DE LA COMMANDE SVM-DRPC

Le schéma synoptique du contrôle proposé est montré par la Fig. 1. Les sorties des deux régulateurs PI pour les variables de commande conçoivent le vecteur de tension de référence (amplitude/angle) dans le cadre stationnaire  $\alpha\beta$  (Fig. 2). Pour générer le vecteur de tension de référence à la sortie du convertisseur, la technique SVM attribue un temps d'application équitable pour les deux vecteurs adjacents. Un temps d'application est alloué au vecteur tension nulle pour

compléter la période d'échantillonnage. Par conséquent, une fréquence de commutation fixe est obtenue. Les temps d'application des vecteurs adjacents et du vecteur nul sont donnés par les équations suivantes.

$$T_k = \frac{\sqrt{3} T_s V_r^*}{U_{dc}} \sin\left(\frac{k}{3}\pi - \theta\right) \quad (5)$$

$$T_{k+1} = \frac{\sqrt{3} T_s V_r^*}{U_{dc}} \sin\left(\theta - \frac{k-1}{3}\pi\right) \quad (6)$$

$$T_0 = T_s - T_k - T_{k+1} \quad (7)$$

Où :  $T_k$  et  $T_{k+1}$  représentent respectivement la durée du premier et du deuxième vecteur adjacent et  $T_0$  représente la durée du vecteur nul.

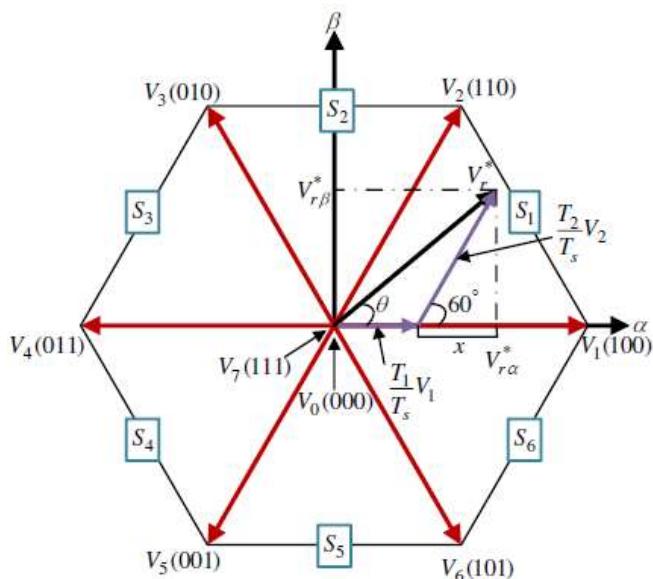


Fig. 2. Projection du vecteur de tension de référence.

#### 4. CONTROLE DE CONVERTISSEUR COTE RESEAU (CCR)

Le CCR est l'intermédiaire entre le convertisseur côté machine (CCM) et le réseau. Sa tâche principale consiste donc à transporter la puissance active et réactive entre ces deux éléments. Parmi les commandes les plus couramment utilisées ces dernières années se trouve la commande directe de puissance (DPC). Elle ne nécessite pas la transformée de Park et le bloc de modulation PWM. Pour contrôler la puissance active et réactive transmise par le CCR, il suffit de connaître les valeurs instantanées des puissances et la position du vecteur de tension appliqué au CCR. Sur la base de ces trois paramètres, une table de commutation est

construite pour la sélection directe du vecteur de tension approprié.

La puissance active/réactive peut être déterminée à partir de la tension et du courant du CCR selon l'équation suivante.

$$\begin{cases} P_g = V_{G\alpha} i_\alpha + V_{G\beta} i_\beta \\ Q_g = V_{G\alpha} i_\beta - V_{G\beta} i_\alpha \end{cases} \quad (8)$$

Pour mieux localiser la position du vecteur tension CCR, le cadre fixe est divisé en 12 secteurs. L'équation suivante permet d'obtenir la position du vecteur tension CCR.

$$(n-2)\frac{\pi}{6} \leq \theta_n \leq (n-1)\frac{\pi}{6} ; n=1,2,..,12 \quad (9)$$

La sélection du vecteur de tension approprié par la commande DPC se fait en appliquant les règles du tableau 1. Où 1 représente la sortie de régulateur à hystérésis, lorsque l'erreur est supérieure au niveau positif de la bande d'hystérésis, et 0 lorsque l'erreur est inférieure au niveau négatif de la bande d'hystérésis. Le schéma de la commande de CCR par la DPC est donné par la Fig. 1.

#### 5. RESULTATS DE SIMULATION

Une simulation est effectuée sur MATLAB/Simulink afin de tester la technique de contrôle proposée. La Fig. 3 montre le profil de vitesse du vent. L'évolution du couple électromagnétique, de la puissance réactive statorique et de la puissance réactive au point de couplage commun (PCC) sont illustrées respectivement par les Figs 4, 5 et 6. Les résultats de simulation du couple, de la puissance réactive statorique et de la puissance réactive au PCC obtenus par la technique SVM-DRPC montrent des améliorations satisfaisantes par rapport à la commande classique ST-DRPC. La réduction des ondulations est considérable.

L'évolution du courant des trois phases rotorique est représentée par la Fig. 7. Fig. 8 montre l'évolution du rendement aérodynamique de la WT. Un fonctionnement avec une extraction optimale de la puissance du vent est assuré. L'allure de la tension du bus continu et de la puissance réactive au niveau de CCR sont présentés respectivement par les Figs. 9 et 10. La tension du bus continu suit sa référence malgré la variation de la vitesse de DFIG. Tandis qu'un fonctionnement avec un facteur de puissance unitaire est obtenu dans le coté rotor lorsque la puissance réactive est imposée nulle au niveau de CCR.

Figs. 11 et 12 montrent respectivement, le spectre harmonique du courant statorique pour la commande ST-DRPC et la technique SVM-DRPC proposée. Le taux de distorsion harmonique (THD) est moins important avec la SVM-DRPC que la ST-DRPC. L'amélioration de l'allure du courant statorique est avoisinant les 55%.

Tableau 1. Table de commutation DPC pour le contrôle de CCR

$H_P$	$H_Q$	Sectors											
		$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$	$N_5$	$N_6$	$N_7$	$N_8$	$N_9$	$N_{10}$	$N_{11}$	$N_{12}$
0	1	$V_6$	$V_1$	$V_1$	$V_2$	$V_2$	$V_3$	$V_3$	$V_4$	$V_4$	$V_5$	$V_5$	$V_6$
	0	$V_1$	$V_2$	$V_2$	$V_3$	$V_3$	$V_4$	$V_4$	$V_5$	$V_5$	$V_6$	$V_6$	$V_1$
1	1	$V_7$	$V_7$	$V_0$	$V_0$	$V_7$	$V_7$	$V_0$	$V_0$	$V_7$	$V_7$	$V_0$	$V_0$
	0	$V_6$	$V_7$	$V_1$	$V_0$	$V_2$	$V_7$	$V_3$	$V_0$	$V_4$	$V_7$	$V_5$	$V_0$

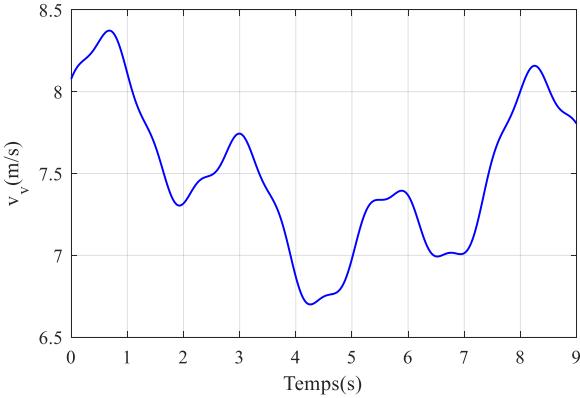


Fig. 3. Vitesse du vent.

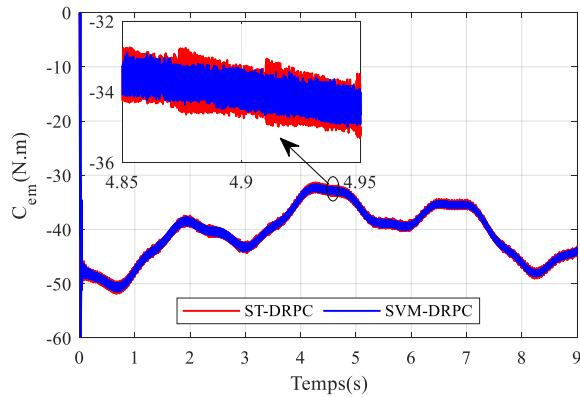


Fig. 4. Evolution du couple électromagnétique avec zoom.

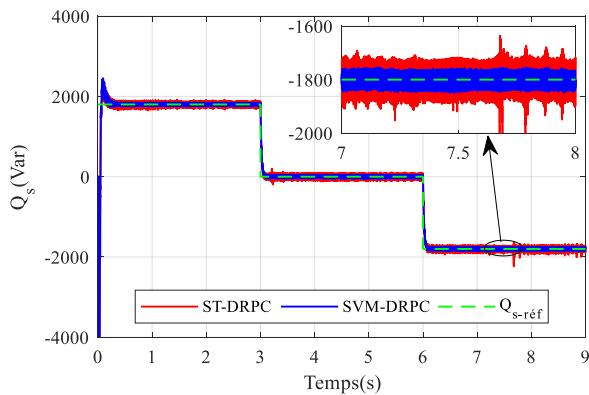


Fig. 5. Allure de la puissance réactive statorique avec zoom.

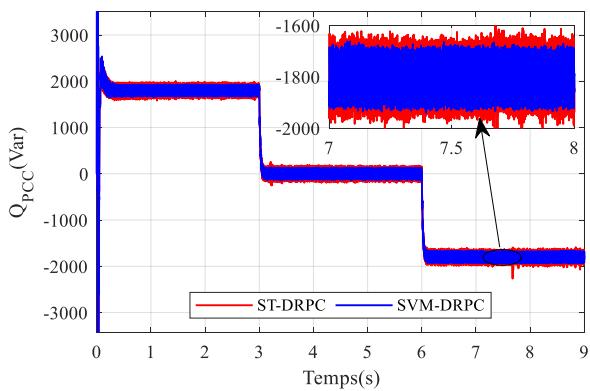


Fig. 6. Allure de la puissance réactive au point de couplage commun (PCC) avec zoom.

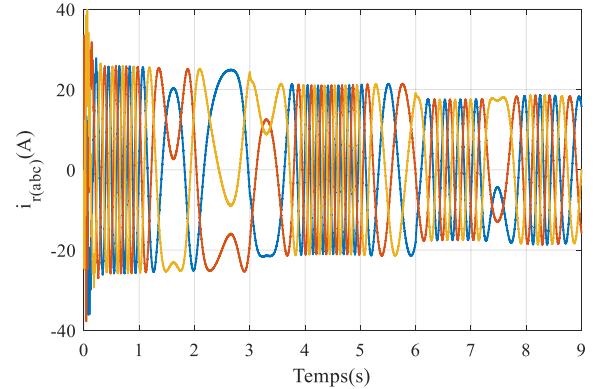


Fig. 7. Evolution du courant rotorique.

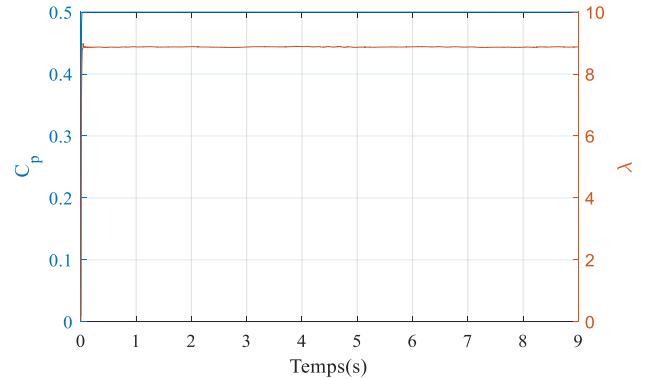


Fig. 8. Allure de rendement aérodynamique et de la vitesse relative de la turbine.

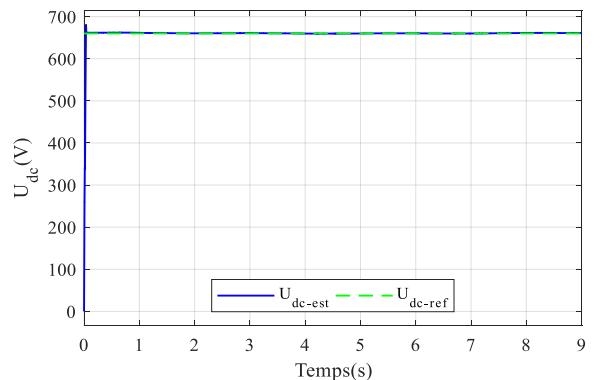


Fig. 9. Allure de la tension du bus continu.

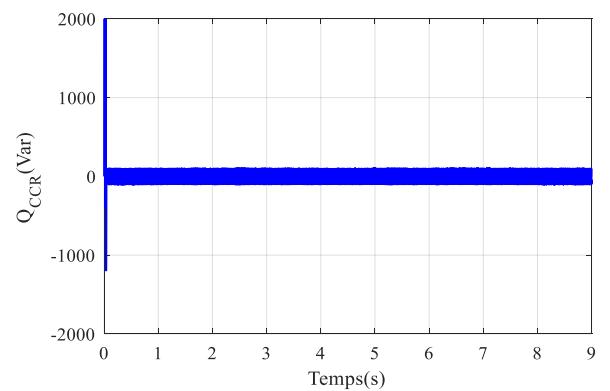


Fig. 10. Allure de la puissance réactive au niveau du CCR.

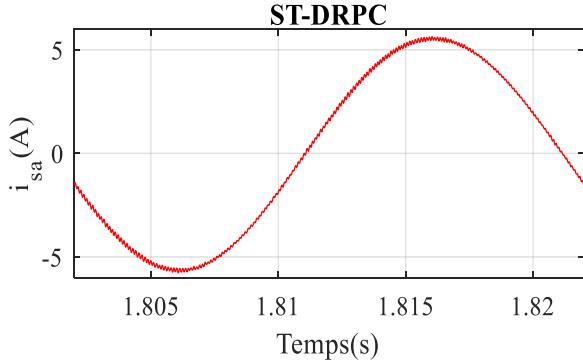


Fig. 11. Analyse spectrale du courant statorique obtenu avec la ST-DRPC.

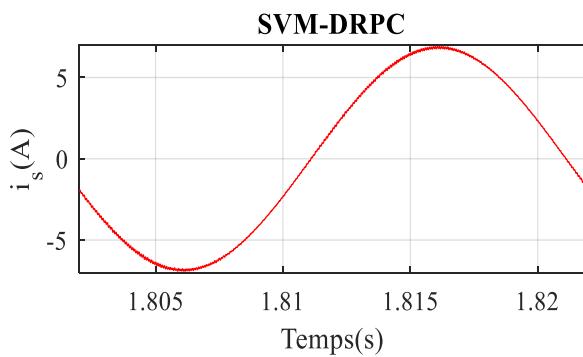


Fig. 12. Analyse spectrale du courant statorique obtenu avec la SVM-DRPC.

#### 4. CONCLUSION

Dans ce travail, un contrôle SVM-DRPC amélioré est appliqué à un système éolien à base d'une DFIG. L'objectif principal est de diminuer les ondulations qui se produisent dans le couple électromagnétique et le flux du rotor avec la ST-DRPC. Les résultats de la simulation montrent de meilleures performances, une réduction significative des ondulations du couple électromagnétique et de la puissance réactive du stator lorsque la commande DRPC est équipée de la technique de modulation SVM. En outre, la tension du bus continu suit parfaitement sa référence.

#### 5. REFERENCES

- [1] S.Kouadria, E.Berkouk, Y.Messlem, M.Denaï, "Improved control strategy of DFIG-based wind turbine using direct torque and direct power control techniques," Journal of Renewable and Sustainable Energy. 10(4), 2018.
- [2] N. El Ouanjili, A. Derouich, A. Ghzizal, M. Taoussi, Y. El Mourabit, Mezioui, K., Bossoufi, B. "Direct torque control of doubly fed induction motor using three-level NPC inverter", Protection and control of Modern Power System, 4(17), 2019.
- [3] S.Tamalouzt, N.Benyahia, T.Rekioua, D.Rekioua, R.Abdessamed "Performances analysis of WT-DFIG with PV and fuel cell hybrid power sources system associated with hydrogen storage hybrid energy system," International Journal of Hydrogen Energy. In press, 43(45), pp.21006-21021, 2016.
- [4] S. Tamalouzt, "Performances of direct reactive power control technique applied to three-level inverter under random behavior of wind speed", Rev. Roum. Sci. Techn.-Électrotechn. et Énerg. 64(1), pp. 33–38, 2019.
- [5] O. Djoudi, S. Lalouni Belaid and S.Tamalouzt, "Multilevel Converter and Fuzzy Logic Solutions for Improving Direct Control Accuracy of DFIG-based Wind Energy System", Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science, 67(2), pp. 136–148, 2023.
- [6] Sahri, Y., Tamalouzt, S., Lalouni Belaid, S., Bacha, S., Ullah, N., Al Ahamdi, AA., Alzaed, AA. "Advanced Fuzzy 12 DTC Control of Doubly Fed Induction Generator for Optimal Power Extraction in Wind Turbine System under Random Wind Conditions", Sustainability, 13(21), 2021.
- [7] Gao, S., Zhao, H., Gui, Y., Zhou, D., Blaabjerg, F. "An Improved Direct Power Control for Doubly Fed Induction Generator", IEEE Transactions on Power Electronics, 36(4), pp. 4672 – 4685, 2021.
- [8] Gao, S., Zhao, H., Gui, Y., Zhou, D., Blaabjerg, F. "An Improved Direct Power Control for Doubly Fed Induction Generator", IEEE Transactions on Power Electronics, 36(4), pp. 4672 – 4685, 2021.
- [9] A.Ammar, A.Bourek, A.Benakcha, " Nonlinear SVM-DTC for induction motor drive using input-output feedback linearization and high order sliding mode control," ISA transactions, pp.428-442, 2017.
- [10] Idir Issad, Kassa Idjdarene, Sofia Lalouni, « Direct Torque Control Using Space Vector Modulation of Wind Pumping System with Storage » Rev. Roum. Sci. Techn.- Électrotechn. et Énerg.Vol. 63, 4, pp. 397–402, 2018.
- [11] R. Gupta, G. Dynamina, "Matlab simulation of DTC-SVM of double fed induction generator for wind energy system", In: Innovation in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT), Vellore, India, 2017.