

Commande d'une éolienne à base d'une génératrice synchrone à aimant permanent avec convertisseur complet

S. El Hani ^{1*} et S. Guedira ^{2†}

¹ Université Mohammed V Souissi, Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technique, Rabat, Maroc

² Ecole Normale de l'Industrie Minérale, Rabat, Maroc

(reçu le 14 Février 2014 et accepté le 30 Décembre 2014)

Résumé - Dans le présent article, nous discutons le problème de la recherche de la puissance maximum d'une éolienne, (Maximum Power Point Tracking, 'MPPT'), à base d'une Générateur Synchrone à Aimant Permanent (PMSG) débitant dans le réseau de puissance à travers une chaîne complète de convertisseurs statiques. Pour cela, nous proposons un schéma de commande de la machine synchrone, comportant un premier dispositif alternatif/continu suivi d'un second dispositif continu/alternatif. Le principe MPPT repose sur la variation de vitesse de la turbine suivant celle du vent en cas de raccordement indirect de la génératrice avec le réseau. Les simulations sur Matlab-Simulink, présentées en fin d'article, confirment une bonne adéquation du schéma de commande, du choix des paramètres de réglage ainsi que l'architecture de la chaîne de conversion aux objectifs assignés.

Abstract - In this article, we discuss the problem of finding the maximum power of a wind turbine, (Maximum Power Point Tracking 'MPPT'), based on a Permanent Magnetic Synchronous Generator (PMSG) feeding into the network power through a complete chain of static converters. For this, we propose a scheme for controlling the synchronous machine with a first continuous device alternative/continuous followed by a second DC / AC device. The principle of the MPPT is based on the change in the turbine speed according to the wind one in the case of an indirect connection from the generator to the network. The Matlab-Simulink simulations, presented at end of the article, confirm a good fit of the control scheme, the choice of settings parameters and the design of the chain of conversion to the assigned objectives.

Mots clés: Machine synchrone à aimant permanent – Eolienne - Convertisseur complet – MPPT.

1. INTRODUCTION

Face à la flambée des prix du pétrole et l'épuisement, à plus ou moins long terme, des sources d'énergies fossiles, différentes solutions de substitution ont été envisagées. Le début du 21^{ème} siècle a été marqué par une ruée spectaculaire vers les énergies renouvelables. L'ultime objectif est de s'affranchir de la dépendance vis-à-vis des sources conventionnelles d'énergies.

Récemment, cette tendance a été accrue, d'autant plus, par des considérations d'ordre écologique. En effet, la consommation élevée des sources énergétiques fossiles traditionnelles cause de sérieux dommages environnementaux. Aussi, tous les pays sont appelés aujourd'hui à contribuer à l'effort international de lutte contre les changements climatiques.

* s.elhani@um5s.net.ma

† guedirasaid@gmail.com

Parmi les énergies renouvelables, trois grandes familles émergent: d'origine mécanique (houle, éolien), d'origine électromagnétique (modules photovoltaïques) ou d'origine thermique (géothermie, solaire thermique, ...).

En particulier, l'énergie éolienne peut être convertie en énergie mécanique pour le pompage de l'eau ou en énergie électrique par l'utilisation de générateurs appropriés. Cette deuxième forme de conversion s'est considérablement développée dans le monde, aussi bien à travers des applications domestiques ou bien industrielles en connexion avec le réseau de puissance électrique.

Financièrement parlant, les aérogénérateurs présentent un niveau de rentabilité faible [3], vu le coût important de leur installation. Cependant, ils présentent plusieurs avantages en termes de préservation des ressources naturelles non-renouvelables, de limitation de pollution environnementale et d'autonomie de fonctionnement.

Théoriquement, le pouvoir de récupération des générateurs à turbines éoliennes est limité à environ 58 % de l'énergie cinétique du vent [3]. C'est la limite de Betz. Le coefficient de puissance C_p , tient compte de cette limite, ainsi que des pertes mécaniques par friction et varie suivant la vitesse de rotation de la turbine. C'est pourquoi, le suivi du point de fonctionnement à puissance maximale est recommandé. Nombreuses sont les recherches menées sur les approches de recherche du MPPT [5]. Ces dernières sont classées en deux catégories. La première catégorie, sans capteur [8], se base sur le suivi de la variation de puissance. La seconde à capteur [8] est dédiée à la recherche du MPPT par le contrôle du couple et de la vitesse spécifique de la turbine, connue communément par TSR, 'Tip Speed Ratio', [6, 7].

La commande TSR régule directement la vitesse où le couple de la turbine en vue de garder le TSR à une valeur optimale par mesure de la vitesse de la turbine. La méthode de recherche du MPPT, 'Hill Climb Search: HCS' présentée en [10] consiste à asservir la vitesse à une référence dynamique en concordance avec le sens de variation de la puissance active de sortie.

Cette méthode ne nécessite pas de lecture préalable de la vitesse du vent ni de celle de l'éolienne. Elle ne nécessite pas, non plus, la connaissance de caractéristiques de l'éolienne. L'algorithme de recherche de la puissance maximale par HCS se base sur l'annulation de la dérivée première de la puissance à l'extremum de puissance.

La quantité d'énergie récupérée par les systèmes de conversion de l'énergie éolienne à vitesse variable 'Variable Speed Wind Energy Conversion System: VS-WECS', dépend de la précision avec laquelle est faite la recherche du MPPT et aussi du type de générateur utilisé. Les chaînes de conversion d'énergie associées utilisent souvent un générateur synchrone à aimants permanents [12]. Ce type de machine permet de s'affranchir du problème d'alimentation en courant d'excitation, lourd à gérer dans une machine synchrone classique.

Afin de maximiser l'efficacité de l'aérogénérateur éolien, diverses solutions ont été examinées à différents niveaux de la chaîne de conversion [9], selon le raccordement direct ou indirect au réseau.

Le raccordement indirect du générateur au réseau électrique offre, outre l'avantage d'optimiser la puissance soutirée au vent, la possibilité d'économiser des temps importants de démarrage et de synchronisation avant couplage avec le réseau. Un schéma conventionnel d'une PMSG raccordée au réseau à travers un convertisseur complet, consiste à l'utilisation de deux dispositifs, alternatif/continu et continu/alternatif.

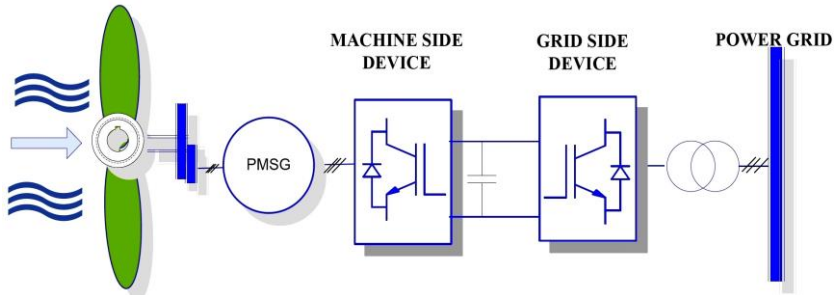


Fig. 1: VS- WECS conventionnel

L'interface électronique de puissance, placée entre le générateur et le réseau, aura pour rôle de commander le générateur afin d'extraire le maximum de puissance du vent [2]. Le schéma conventionnel du VS-WECS utilise un redresseur commandé (Fig. 1).

En effet, Li *et al.*, [1] a proposé un schéma de commande de la génératrice synchrone par redresseur commandé à MLI. Ce dispositif demande une logistique importante en composants de puissance (06 interrupteurs commandables en fermeture et en ouverture). Mais les auteurs n'ont pas été au-delà d'une modélisation par représentation d'état du système de puissance.

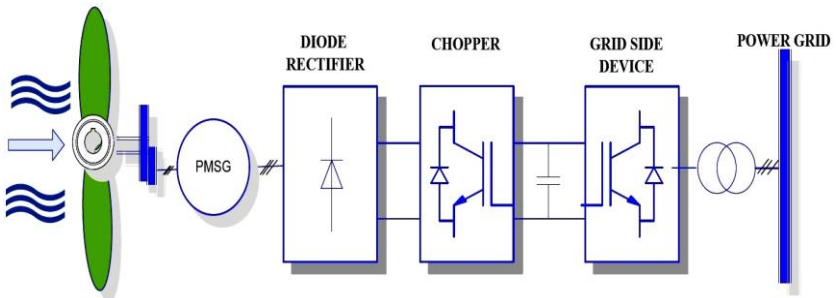
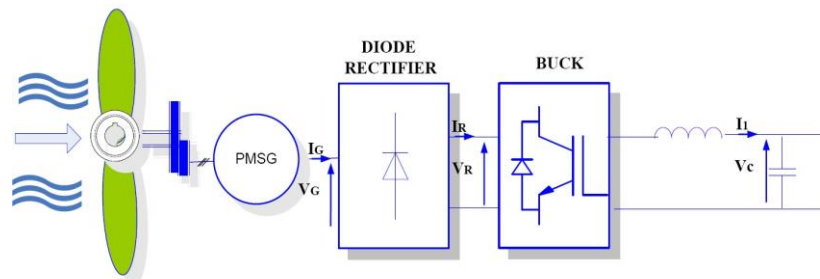


Fig. 2: VS-WECS à redresseur à diodes et hacheur dévolteur

Le schéma de commande de la machine synchrone à aimant permanent que nous proposons (Fig. 2), est un convertisseur complet qui relie la PMSG au réseau de puissance. Côté machine, ce convertisseur comporte un redresseur à diodes suivi d'un hacheur dévolteur [5]. Par rapport à la solution du redresseur à MLI comportant 03 bras d'interrupteurs commandés, cette variante de commande utilise un dispositif de matériels ralliant performance, fiabilité et coût minimum. Par contre, le dispositif de conversion côté réseau, comporte un hacheur boost. Le schéma complet du convertisseur est donné à la figure 3.



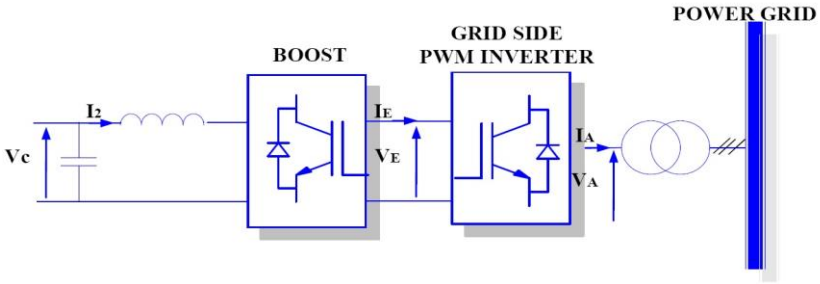


Fig. 3: VS-WECS proposé

Il s'agit d'une récupération instantanée de l'énergie dans le réseau de puissance. Elle permet de réaliser l'économie d'une batterie ou d'un accumulateur.

La méthode proposée de recherche MPPT requiert la lecture en temps réel de la vitesse du vent, ainsi que la connaissance préalable des caractéristiques de la turbine. Elle présente les avantages par rapport à la méthode, dite Hill Climb Search, de la rapidité de convergence et d'une meilleure stabilité autour du point de régime permanent [9].

La régulation du courant de la génératrice est effectuée en commande linéaire par retour d'état. Les résultats sont illustrés par des simulations en fin d'article.

2. ALGORITHME

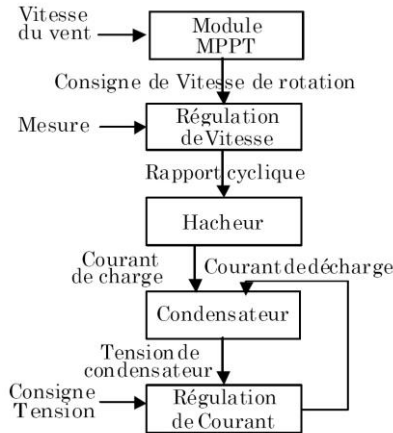


Fig. 4: Algorithme de commande

3. SCHEMA DU MONTAGE DE PUISSANCE

Le dispositif de conversion comporte deux étages et un condensateur intermédiaire:

- Un dispositif Alternatif-Continu: constitué d'un redresseur à diodes suivi d'un hacheur buck pour le réglage du courant de charge I_1 du condensateur.
- Un dispositif Continu-Alternatif: constitué d'un hacheur boost pour le réglage du courant de décharge I_2 suivi d'un onduleur de courant à MLI.

Ainsi, pour le réglage et la stabilité du système, on dispose de deux grandeurs d'entrée: les courants I_1 et I_2 .

La régulation du courant débité I_1 par la génératrice se fait par le biais d'un module de charge du condensateur constitué d'un hacheur buck assurant la charge à courant constant d'un condensateur.

Le courant I_2 permet d'assurer la décharge de ce condensateur vers le réseau alternatif. Cette fonction est assurée par un module de décharge dans le réseau de puissance constitué d'un hacheur boost suivi d'un onduleur de courant à MLI à travers un transformateur d'isolation.

4. MODELISATION MATHEMATIQUE DE LA CHAINE DE CONVERSION EOLIENNE

4.1 Eolienne

La puissance récupérable de l'éolienne est donnée par l'expression:

$$P_E = \frac{1}{2} \times \rho \times \pi \times R^2 \times V^3 \times C_p(\lambda, \beta)$$

$$\lambda = R \times \omega / V$$

La figure ci-après montre l'allure de C_p en fonction de λ pour une éolienne à axe horizontal à 3 pâles.

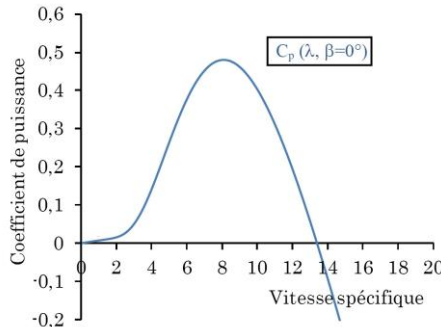


Fig. 5: Coefficient de puissance en fonction de la vitesse

Le maximum de puissance reçue par l'éolienne est atteint pour λ_{max} qui donne $C_{p_{max}}$ (Maximum inférieur à la limite théorique de Betz).

En utilisant un capteur de vitesse du vent, le module MPPT permet d'élaborer la consigne de vitesse de la génératrice assurant une puissance maximale selon la vitesse du vent.

Les variations de la vitesse du vent sont représentées par une loi de Weibull dont la densité de probabilité est donnée par l'expression suivante:

$$f(V) = K \times C^{-K} \times V^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{C}\right)^k}$$

La distribution de Rayleigh, adoptée par les fabricants, considère la valeur 2 pour le paramètre K .

La fonction de répartition est donnée par l'expression:

$$F(V) = 1 - e^{-\left(\frac{V}{C}\right)^K}$$

$F(V)$ traduit la probabilité que la vitesse du vent soit comprise entre 0 et V .

4.2 Génératrice synchrone à aimant permanent

Dans le système d'axes dq , les équations électriques de la génératrice s'écrivent en convention générateur:

$$0 = v_d + R i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q$$

$$\omega \phi_d = v_q + R i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega L_d i_d$$

$$P_G = \frac{3}{2} \omega (\phi_d i_q + (L_d - L_q) i_d i_q)$$

$$v_d = v_G \cos \delta \quad v_q = v_G \sin \delta$$

Les équations mécaniques s'écrivent:

$$\Omega = \omega / p$$

$$J \Omega \frac{d\Omega}{dt} = P_E - P_G$$

On adopte les hypothèses suivantes: la résistance d'induit est négligée, ainsi que les forces électromotrices de transformation. D'autre part, on considère la machine synchrone isotrope ($L = L_d = L_q$); les équations électriques deviennent:

$$v_G = \omega \sqrt{\phi_d^2 - L^2 i^2} \approx \omega \phi_d$$

$$P_G \approx \frac{3}{2} \omega \phi_d \sin \delta i_G$$

La tension de sortie de la génératrice synchrone et la vitesse de rotation sont quasi-proportionnelles. De même, le courant d'induit peut jouer le rôle d'une grandeur d'entrée pour commander la puissance récupérée.

4.3 Redresseur à diodes

Le courant continu i_R à la sortie du redresseur à diodes se traduit en courant alternatif i_G à son entrée dont la valeur efficace du fondamental s'écrit suivant la loi:

$$i_G = \frac{\sqrt{6}}{\pi} i_{R\text{moy}}$$

4.4 Hacheur buck

Ce convertisseur continu-continu, dit série, avec tension d'entrée supérieure à celle de sortie, permet de charger le condensateur à courant constant i_1 . Dans ces conditions, on a:

$$i_R = \alpha_b \langle i_R \rangle$$

Avec, $\alpha_R = v_C / v_R$ (rapport cyclique)

L'inductance L_1 à la sortie est choisie suffisamment élevée pour lisser le courant de sortie i_1 .

4.5 Condensateur de stockage

L'équation du condensateur s'écrit:

$$v_C = \frac{1}{C} \int (i_1 - i_2) dt$$

Le courant i_2 peut jouer un rôle particulier dans le maintien de tension du condensateur de stockage à une valeur constante et, économiquement, ne dépassant pas une valeur de 200 V.

La capacité C est choisie suffisamment élevée pour lisser la tension aux bornes v_C .

4.6 Hacheur boost

Ce convertisseur continu-continu, dit parallèle, permet d'amplifier la tension à la sortie de manière à injecter du courant dans un récepteur de tension v_E supérieure à v_C telle que:

$$v_E = \frac{v_C}{1 - \alpha_t}$$

L'inductance L_2 à l'entrée est choisie suffisamment élevée pour lisser le courant d'entrée i_2 .

4.7 Onduleur MLI

Constitué de 03 bras d'interrupteurs IGBT dont les signaux de grille obéissent à une loi de commande appropriée, il permet d'onduler le courant I_E suivant une référence sinusoïdale arbitraire. Cette référence sera prise en phase avec la tension de phase V_A pour obtenir un échange de réactif nul avec le réseau.

Le fondamental du courant I_A vérifie la condition de conservation de puissance suivante:

$$V_C I_2 = \sqrt{3} U_{A_{\text{eff}}} I_{A_{\text{eff}}}$$

5. MODELISATION DYNAMIQUE

A l'aide des variables exprimées en termes de variations, on définit les vecteurs d'état et de commande tels que:

$$X = \begin{pmatrix} \dot{\Omega} \\ \dot{v}_C \end{pmatrix} \quad U = \begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{pmatrix}$$

On établit l'équation de la représentation d'état:

$$X' = A X + B U$$

$$A = \begin{pmatrix} A_{11} & -A_{12} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} -B_{11} & 0 \\ B_{21} & -B_{22} \end{pmatrix}$$

Ce système est commandable, observable mais instable (existence de deux valeurs propres supérieures ou égales à 0).

On cherche à établir à une commande par retour d'état afin de stabiliser le système. Le problème consiste à déterminer K tel que:

$$U = K X$$

Avec,

$$K = \begin{pmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{pmatrix}$$

La matrice d'état en boucle fermée H s'écrit:

$$U = A + BK$$

Avec

$$H = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{pmatrix}$$

Le polynôme caractéristique de H est donné par:

$$F(s) = |sI - H| = s^2 + as + b$$

D'autre part, on cherche à identifier le système à celui stable défini par H_0 tel que:

$$H_0 = \begin{pmatrix} -\lambda_0 & 0 \\ B_{21} & -\lambda_0 \end{pmatrix}$$

Ce système admet comme polynôme caractéristique;

$$F_0(s) = s^2 + 2\lambda_0 s + \lambda_0^2$$

Par identification des deux polynômes, on établit que K_1 est solution de l'équation du second ordre:

$$MK_1^2 + NK_1 + P = 0$$

D'où, les résultats des gains K_1 et K_2 .

6. RESULTATS)

On considère une machine synchrone à aimant permanent aux caractéristiques suivantes: 16 kW, 400 V, 50 Hz.

Caractéristiques électriques standards: $R_s = 0.645 (\Omega)$; $L_1 = 0.002228 (H)$; $L_{md} = 0.05297 (H)$; $L_{md} = 0.02518 (H)$; $J = 0.1278 (kgm^2)$; $f = 0.013$; $p=2$.

Réactance de liaison avec le réseau BT: $10^{-4}H$.

On choisit une éolienne à 3 pâles aux caractéristiques suivantes:

- Puissance nominale: $P_N = 8.1kW$.
- Rayon des pâles: $R=2.245m$.
- Rapport de multiplication: $K_m = 5$.

Le maximum de puissance reçue par l'éolienne est atteint pour $\lambda_{max}=8.1$ qui donne $C_{p_{max}} = 0.48$ (Maximum inférieur à la limite théorique de Betz).

Les courbes de puissance seront représentées dans le graphique ci-dessous pour 03 valeurs significatives de vitesse de vent.

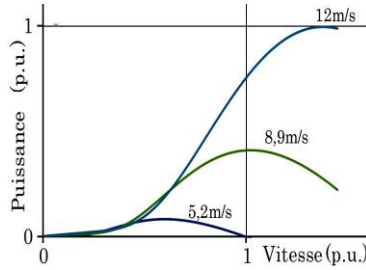


Fig. 6: Courbes de puissance en fonction de la vitesse du vent

D'après ces caractéristiques, il s'avère que :

- A une vitesse du vent de 12 m/s, la puissance maximale est égale à la puissance nominale atteinte à la vitesse de rotation de l'éolienne de valeur 1.38 p.u., (Fig. 6).
- A une vitesse du vent de 8.9 m/s, la puissance maximale est égale à 0.40 p.u. atteinte à la vitesse de rotation nominale.
- A une vitesse du vent d'environ 5.2 m/s, l'éolienne cesse de fonctionner lorsque la vitesse est égale à la vitesse nominale (le cas du raccordement direct), mais le maximum est atteint à la vitesse de 0.6 p.u.

La distribution de Weibull caractérise statistiquement le profil de la vitesse du vent:

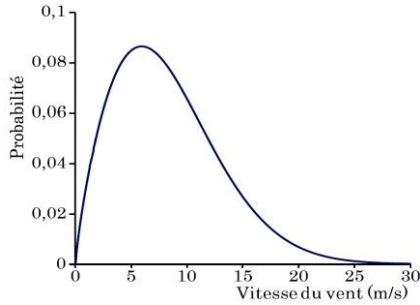


Fig. 7: Distribution de Weibull

Avec des paramètres- $C = 9.3 \text{ m/s}$ et $K = 1.8$. On obtient les résultats suivants-
 Vitesse moyenne de vent: 8.3 m/s , $F(5,2) = 0.30$.

Environ 30 % du temps, l'éolienne doit s'arrêter de produire, lorsqu'elle débite à travers un raccordement direct. A titre d'illustration, on considère un profil des vitesses du vent comme ci-dessous:

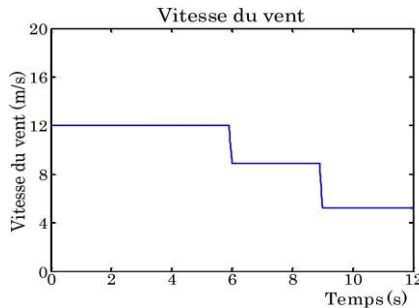


Fig. 8: Profil de vitesse en fonction du temps

Les figures ci-dessous représentent l'éolienne en phase de démarrage puis en régime de production:

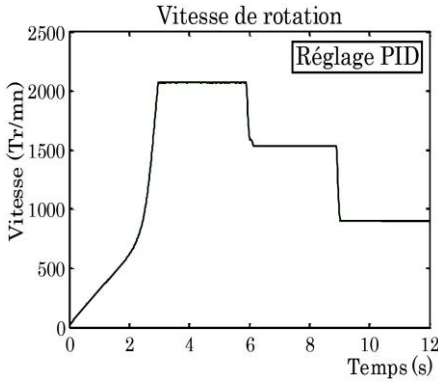


Fig. 9: Vitesse en fonction du temps

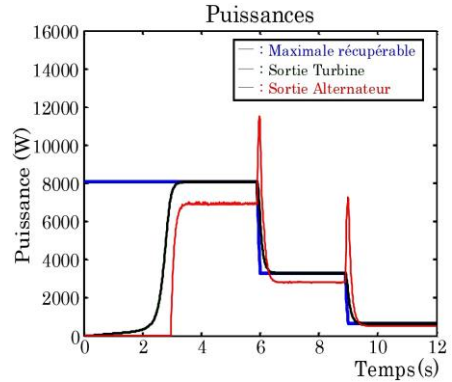


Fig. 10: Puissance en fonction du temps

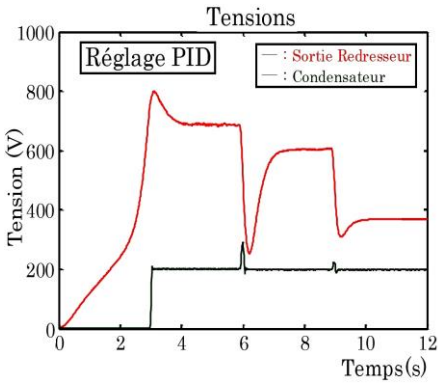


Fig. 11: Tension en fonction du temps

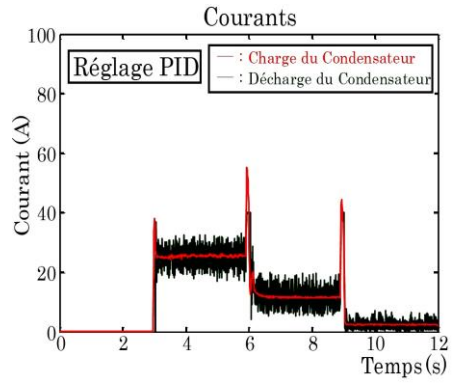


Fig. 12: Courant en fonction du temps

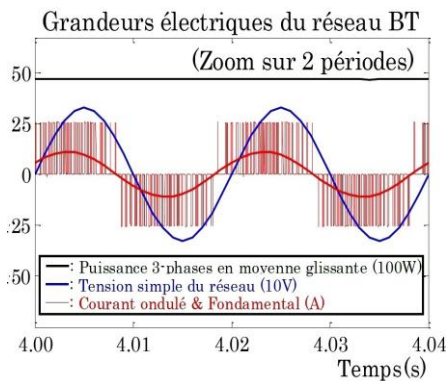


Fig. 13: Grandeurs électriques du réseau électrique

7. CONCLUSION

Notre approche pour la recherche du Point de Puissance Maximum, 'MPPT' s'avère satisfaisante du point de vue de la convergence et de la stabilité du groupe éolien.

La méthode proposée garantit une production sans interruption de l'énergie électrique, même pour des vitesses de vent faibles. L'article a mis l'accent sur les phases de démarrage, puis amorçage du groupe, dès que la vitesse de consigne est atteinte. Cette opération ne nécessite pas une opération compliquée de synchronisation avant couplage comme dans le cas du raccordement direct.

En outre, l'utilisation de redresseur à diodes et de hacheur buck pour le stockage de l'énergie confère à notre dispositif un caractère fiable et bon marché. Il n'empêche que l'adoption des caractéristiques électriques standards, aussi bien de la génératrice que des composants de puissance soit source de dissipation considérable d'énergie en relation directe avec la quantité de puissance récupérée.

Au stade de conception, une attention particulière devra être accordée à cet aspect.

REFERENCE

- [1] X. Li, W. Xu, X. Yu and Y. Feng, 'Sliding Mode Control of Wind Energy Generation Systems Using PMSG and Input-Output Linearization', Proceedings of the 31st Chinese Control Conference, Hefei, China, July 2012,
- [2] B. Beltran, T. Ahmed-Ali and M.E.H. Benbouzid, 'Sliding Mode Power Control of Variable-Speed Wind Energy Conversion Systems', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 23, N°2, June 2008.
- [3] D. Infield et L. Freris, 'Les Energies Renouvelables pour la Production d'Electricité', Techniques de l'Ingénierie, Dunod, Usine Nouvelle, 2013.
- [4] M. Pöler, 'Le Réseau Electrique, la Qualité de l'Energie et l'Impact des Energies Renouvelables sur le Réseau Electrique', RenAc, Renewable Academy, Séminaire du 24 au 27 Septembre 2012, Maroc.
- [5] H.G. Jeong, R.H. Seung and K.B. Lee, 'An Improved Maximum Power Point Tracking Method for Wind Power Systems', Energies, Vol. 5, N°5, pp. 1339 – 1354, 2012.
- [6] G.D. Moor and H.J. Beuks, 'Maximum Power Point Trackers for Wind Turbines', In Proceedings of Power Electronics Specialist Conference (PESC), Aachen, Germany, pp. 1699-1702, 12-15 June 2004.
- [7] T. Nakamura, S. Morimoto, M. Sanada and Y. Takeda, 'Optimum Control of IPMSG for Wind Generation System', In Proceeding of Power Conversion Conference (PCC), Osaka, Japan, pp. 1435 – 1440, 2-5 April 2002.
- [8] S.M.R. Kazmi, H.J. Goto and O. Ichinokura, 'A Novel Algorithm for Fast and Efficient Speed- Sensorless Maximum Power Point Tracking in Wind Energy Conversion Systems', IEEE Transactions Industrial Electronics, Vol. 58, N°1, pp. 29 – 36, 2011.
- [9] S.A.E.M. Ardjoun, M. Abid et A. Aïssaoui, 'Commande par Mode Glissant d'un Système Eolien à Base d'une Génératrice Asynchrone à Double Alimentation', ICRE'2012, 15/16 Avril 2012, Béjaïa.
- [10] R. Datta and V.T. Ranganathan, 'A Method of Tracking the Peak Power Points for a Variable Speed Wind Energy Conversion System', IEEE Transactions On Energy Conversion, Vol. 18, N°1, pp. 163 - 168, 2003.

- [11] P. Lampola, '*Direct Driven, Low Speed Permanent Magnet Generator for Wind Power Applications*', Acta Politechnica Scandinaviica, Electrical Engineering Series, N°101, ESPOO 2000; Published by the Finnish academies of technology.
- [12] P. Jirutitijaroen, '*Average Power in the Wind and Energy Estimate*', Lectures Notes on Sustainable Energy Systems, National University of Singapore, 2010.