Revue des Energies Renouvelables Vol. 14 N°1 (2011) 109 – 120

Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation

F. Kendouli*, K. Nabti, K. Labed et H. Benalla†

Laboratoire d'Electrotechnique de Constantine, 'LEC'
Département d'électrotechnique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Université Mentouri, Route Ain El Bey, Constantine, Algérie

(reçu le 30 Janvier 2011 – accepté le 25 Mars 2011)

Résumé – *Ce travail porte sur la modélisation et le contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) pour les fortes puissances, suivie d'un redresseur MLI à bande d'hystérésis et d'une batterie pour stocker l'énergie emmagasiné. Un algorithme est développé sous Matlab/Simulink.*

Abstract – *This paper describes the modeling and control system of a wind turbine for high power using a variable speed doubly fed induction generator (DFIG) with a hysteresis band Pulse Width Modulation (PWM) rectifier and a battery for storing the wind energy. The algorithme has been developed using Matlab/Simulink.*

Mots clés: Turbine éolienne - GADA - MLI à bande d'hystérésis.

1. INTRODUCTION

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années [1]. Parmi ces sources d'énergies, les générateurs éoliens occupent une place particulière. En effet d'une part, l'énergie éolienne est appelée à se développer fortement dans de nombreuses régions, et d'autre part, cette énergie très fluctuante, du fait d'importantes variations de la vitesse du vent, peut affecter significativement la qualité de la tension et du courant dans le réseau ou elle est injectée.

L'intérêt porté à la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) ne cesse de croître surtout dans le domaine des énergies renouvelables. En effet, dans le domaine éolien, la GADA présente bien des avantages: le convertisseur lié à l'armature rotorique est dimensionné au tiers de la puissance nominale du rotor, les pertes dans les semi-conducteurs sont faibles, etc. [2].

L'avènement de l'électronique de puissance a eu un impact majeur sur le monde industriel au cours des dernières décennies. Cet avènement s'est produit par l'arrivée sur le marché des composants d'électronique de puissance, tels que les thyristors, les triacs, les GTO, les IGBT ou les transistors de forte puissance. Ces composantes ont permis le développement de convertisseurs statiques de grande puissance qui permettent la conversion de la puissance électrique d'une forme quelconque à une autre forme. Ces convertisseurs apportent un progrès considérable au niveau des procédés industriels.

* Kendouli_fairouz@hotmail.fr
† benalladz@yahoo.fr

L'utilisation de ces convertisseurs statiques dans les installations de conversion d'énergie électrique participe à détériorer la 'qualité' du courant et de la tension des réseaux de distribution. En effet, ces systèmes consomment des courants non sinusoïdaux, l'article présente une synthèse des redresseurs MLI à bande d'hystérésis, qui sont classés comme une solution de ce problème.

2. MODELE DE LA TURBINE

L'éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor: la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site [3].

L'évolution du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne. A partir de relevés réalisés sur une éolienne, l'expression du coefficient de puissance a été approchée, pour ce type de turbine, par l'équation suivante [4]**:**

$$C_p(\lambda,\beta) = 0.22\left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5\right)e^{\frac{-21}{\lambda_i}} \tag{1}$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

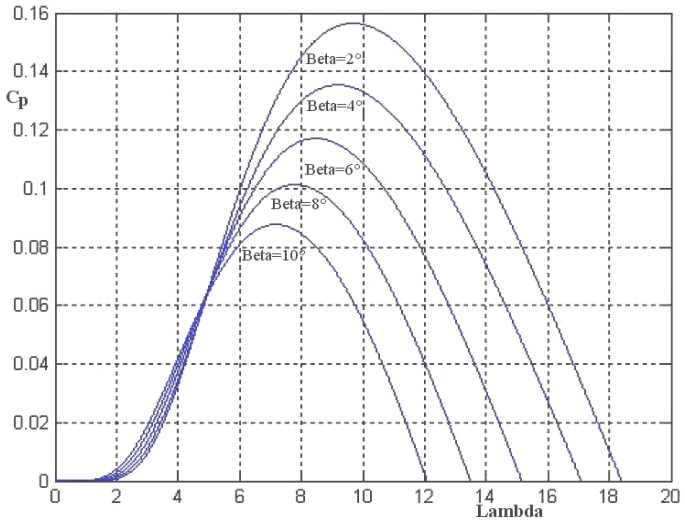


Fig. 1: Coefficient de puissance en fonction du ratio de vitesse (λ) et de l'angle de calage (β)

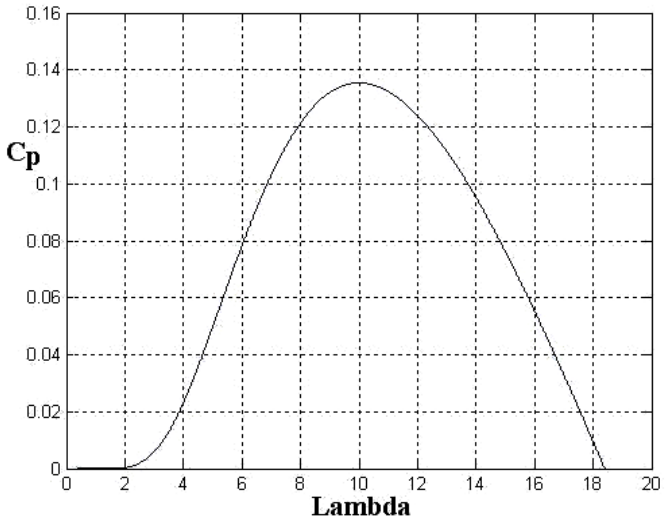


Fig. 2: Coefficient aérodynamique en fonction
du ratio de vitesse de la turbine (λ)

La puissance mécanique récupérée par une turbine éolienne peut s'écrire sous la forme:

$$P_{aer} = C_p(\lambda,\beta) \times \frac{\rho \times S \times v^3}{2} \tag{2}$$

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique est donc directement déterminé par:

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_p \times \frac{\rho \times S \times v^3}{2} \times \frac{1}{\Omega_{turbine}} \tag{3}$$

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice (Fig. 3).

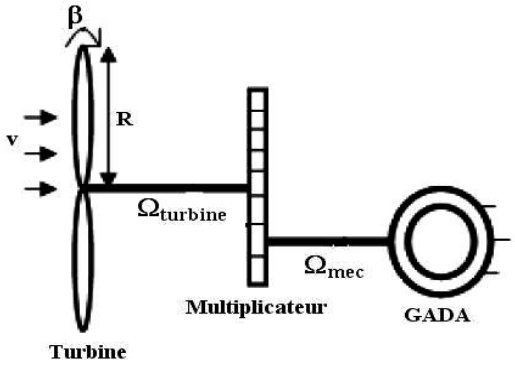


Fig. 3: Structure du système de conversion éolien

Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes:

$$C_r = \frac{C_{aer}}{G} \tag{4}$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mer}}{G} \tag{5}$$

Avec: G le gain du multiplicateur de vitesse

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_r \tag{6}$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partie du couple mécanique total (C_{mec}) appliqué au rotor:

$$J \times \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \tag{7}$$

Où: J est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice. Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique (C_{em}) produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux (C_{vis}), et le couple (C_r).

$$C_{mec} = C_r - C_{em} - C_{vis} \tag{8}$$

Le couple résistant du aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f :

$$C_{vis} = f \times \Omega_{mec} \tag{9}$$

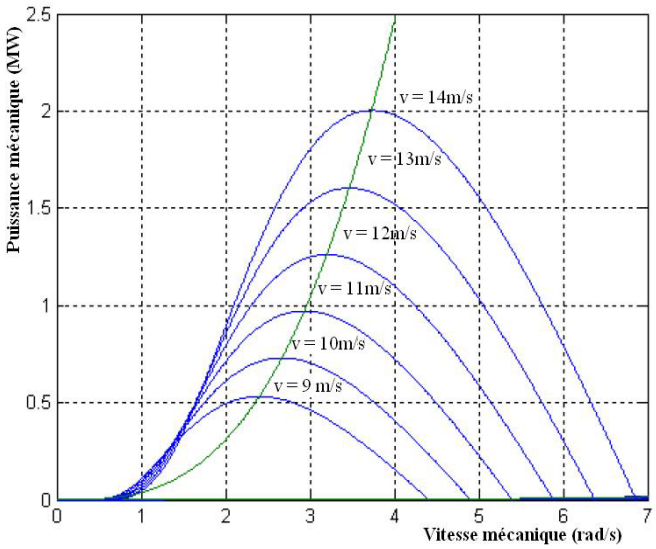


Fig. 4: Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donnée

La vitesse variable permet également d'améliorer la qualité de la puissance électrique produite, en introduisant de la souplesse dans la réaction du système face aux fluctuations brusques de la vitesse du vent.

L'inconvénient principal de ce genre de système est le surcoût introduit par l'incorporation des convertisseurs de puissance. Ce coût dépendant de la taille de ces convertisseurs, il devient relativement important pour les éoliennes de grande taille. De plus les performances des composants électroniques utilisés par ces convertisseurs tels que les transistors IGBT diminuent à partir d'une certaine puissance [5].

Au vu de la caractéristique suivante, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe, les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités.

3. MODELE DE LA GADA

La génératrice asynchrone à double alimentation est classiquement modélisée dans le repère de Park, donnant lieu aux équations suivantes [6].

$$\nu_{sd} = R_s \times i_{sd} + \frac{d}{dt}\Psi_{sd} - \frac{d\theta_s}{dt} \times \Psi_{sq} \tag{10}$$

$$\nu_{sq} = R_s \times i_{sq} + \frac{d}{dt}\Psi_{sq} + \frac{d\theta_s}{dt} \times \Psi_{sd} \tag{11}$$

$$\Psi_{sd} = L_s \times i_{sd} + M \times i_{rd} \tag{12}$$

$$\Psi_{sq} = L_s \times i_{sq} + M \times i_{rq} \tag{13}$$

$$\nu_{rd} = R_r \times i_{rd} + \frac{d}{dt}\Psi_{rsd} - \frac{d\theta_r}{dt} \times \Psi_{rq} \tag{14}$$

$$\nu_{rq} = R_r \times i_{rq} + \frac{d}{dt}\Psi_{rsq} + \frac{d\theta_r}{dt} \times \Psi_{rd} \tag{15}$$

$$\Psi_{rd} = L_r \times i_{rd} + M \times i_{rd} \tag{16}$$

$$\Psi_{rq} = L_r \times i_{rq} + M \times i_{sq} \tag{17}$$

L'équation mécanique est la suivante:

$$C_{em} = C_r + J \times \frac{d\Omega}{dt} + f \times \Omega \tag{18}$$

Où,

i_d , i_q : Courants statoriques

ν_d , ν_q : Tensions statoriques

$\psi_{s_{d,q}}$, $\psi_{r_{d,q}}$: Flux statoriques et rotoriques diphasés dans un repère tournant

R_s , R_r : Résistances statorique et rotorique

L_s , L_r : Inductance cyclique propre statorique et rotorique

M : Inductances cycliques mutuelle stator – rotor

p : Nombre de paires de pôles de la machine.

$$\omega_r = d\theta_r / dt \tag{19}$$

ω_r : Vitesse angulaire (pulsation) électrique du rotor

C_r : Couple résistant

C_{em} : Couple électromagnétique

Ω : Vitesse de rotation de la machine.

4. MODELE DU REDRESSEUR MLI

Contrairement aux redresseurs classiques, les redresseurs MLI sont réalisés à l'aide de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. La possibilité de commande à l'ouverture permet un contrôle total du convertisseur, parce que les interrupteurs peuvent être commutés, selon les besoins, aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture [7].

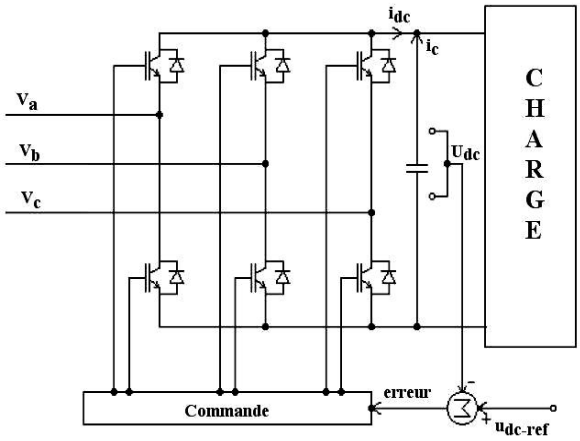


Fig. 5: Topologies de base d'un redresseur de tension

Le redresseur de tension fonctionne en gardant la tension du bus continu à une valeur de référence désirée, en utilisant une commande en boucle fermée.

La méthode de la bande d'hystérésis permet la commutation des interrupteurs du redresseur, lorsque l'erreur entre le signal et sa consigne excède une amplitude fixée. Cette amplitude est communément appelée fourchette ou bande d'hystérésis. Cette technique ne demande qu'un comparateur à hystérésis par phase [8, 9].

Le comparateur à hystérésis fonctionne selon le principe expliqué en figure 6, l'interrupteur s'ouvre si l'erreur devient inférieure à $-H/2$, et il se ferme si cette dernière est supérieure à $+H/2$, où H représente la fourchette (ou largeur) d'hystérésis. Si l'erreur est maintenant comprise entre $-H/2$ et $+H/2$ (c'est-à-dire, qu'elle varie à l'intérieur de la fourchette d'hystérésis), l'interrupteur ne commute pas [10].

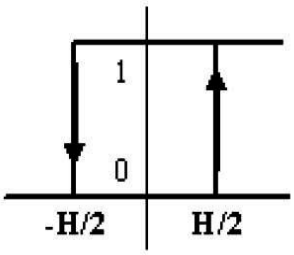


Fig. 6: Principes de fonctionnement de Modulateur MLI à bande d'hystérésis

On peut faciliter la modélisation et réduire le temps de simulation en modélisant le redresseur par un ensemble d'interrupteurs idéaux, ces interrupteurs étant complémentaires, leur état est défini par la fonction suivante [11] :

$$S_j = \begin{cases} +1, \overline{S_j} = -1 \\ +1, \overline{S_j} = -1 \end{cases} \qquad \text{pour} \quad j = a, b, c \tag{20}$$

Puis les tensions de phase d'entrée et le courant de sortie peuvent être écrits en fonction de S_j, V_{dc} et les courants d'entrée i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}.

$$i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0 \tag{21}$$

Les tensions d'entrée entre phases du redresseur peuvent être décrites par:

$$u_{Sab} = (S_a - S_b) \times V_{dc} \tag{22}$$

$$u_{Sbc} = (S_b - S_c) \times V_{dc} \tag{23}$$

$$u_{Sca} = (S_c - S_a) \times V_{dc} \tag{24}$$

Les équations de tension pour le système triphasé équilibré sans raccordement neutre peuvent être écrites ainsi:

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = R_s \times \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + L_s \times \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{Sa} \\ U_{Sb} \\ U_{Sc} \end{bmatrix} \tag{25}$$

avec,

$$\begin{aligned} u_{Sa} &= \frac{2S_a - S_b - S_c}{3} V_{dc} \\ u_{Sb} &= \frac{2S_b - S_a - S_c}{3} V_{dc} \\ u_{Sc} &= \frac{2S_c - S_a - S_b}{3} V_{dc} \end{aligned} \tag{26}$$

Finalement, on déduit l'équation de couplage des côtés alternatif et continu:

$$C \times \frac{dV_{dc}}{dt} = \left(S_a i_{sa} + S_b i_{sb} + S_c i_{sc}\right) - I_{ch} \quad (27)$$

Un schéma fonctionnel dans le repère $d-q$ est présenté dans la figure 7.

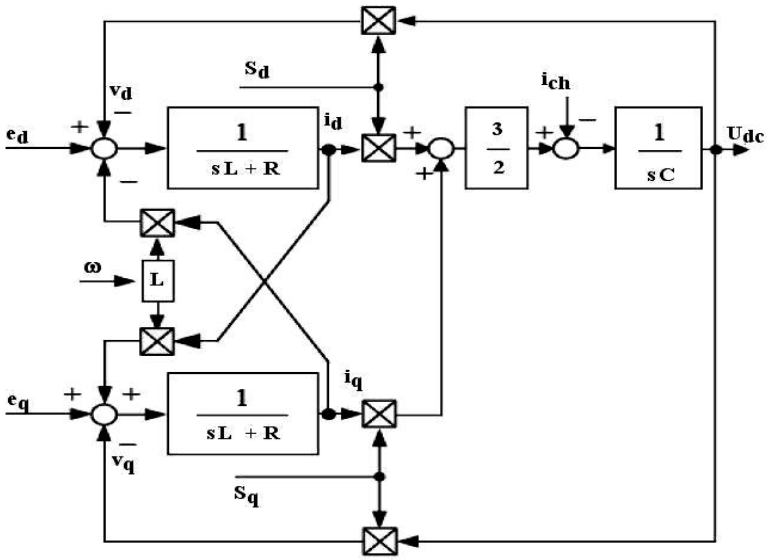


Fig. 7: Schéma fonctionnel du redresseur
MLI de tension dans le référentiel tournant $d-q$

5. RESULTATS DE SIMULATION

Les principaux paramètres des éléments considérés du système [12]:

GADA: $R_s = 3.82\,m\Omega$, $R_r = 2.97\,m\Omega$, $L_s = 12.241$ mH, $L_r = 12.177$ mH, $M = 12.12$ mH, $P = 2$.

Turbine: $R = 40$ m, $J = 256$ kgm^2, $\rho = 1.2$ kg/m^3, $G = 70$.

Le fonctionnement du dispositif complet a été simulé sous environnement Matlab/Simulink, la référence de la tension à la sortie du redresseur étant prise égale à 600 V, nous avons simulé le modèle de profil de vent en deux formes:

La vitesse du vent sera modélisée sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques:

$$V_v(t) = 8 + 0.2\sin(0.1047 \times t) + 2\sin(0.2665 \times t) + 0.2\sin(3.6645 \times t) \quad (28)$$

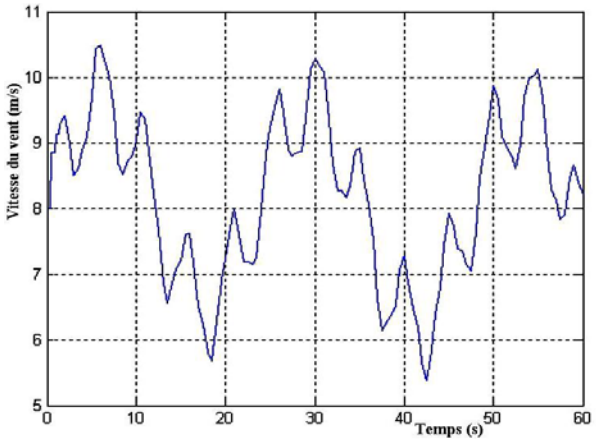


Fig. 8: Variation de la vitesse du vent (m/s)

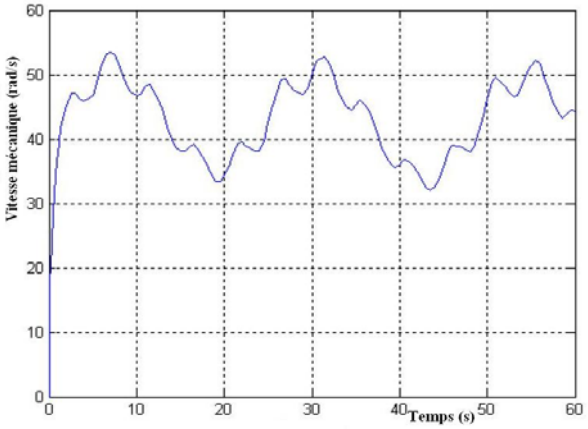


Fig. 9: Variation de la vitesse mécanique (rad/s)

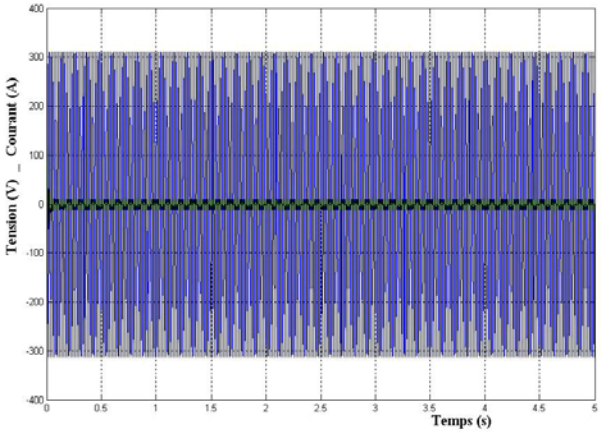


Fig. 10: Variation de la tension et du courant de la GADA

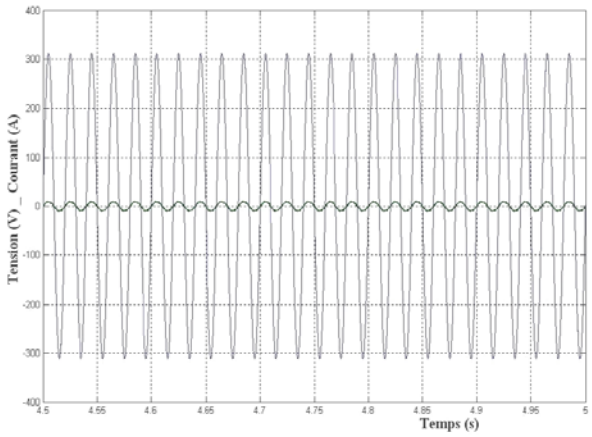


Fig. 11: Variation de la tension et du courant de la GADA (Zoom)

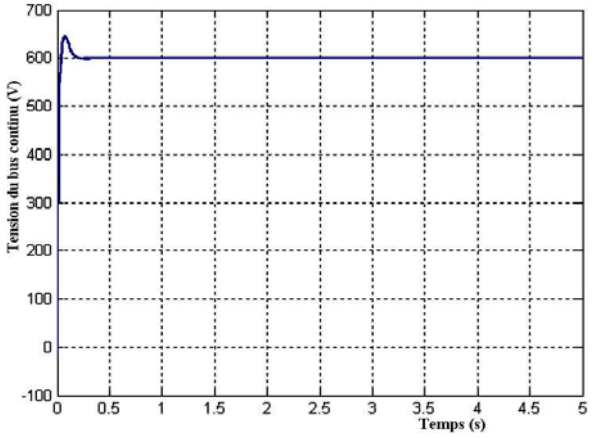


Fig. 12: Variation de la tension redressée en fonction du temps

On observe que la tension du bus continu reste en moyenne et égale à 600 V.

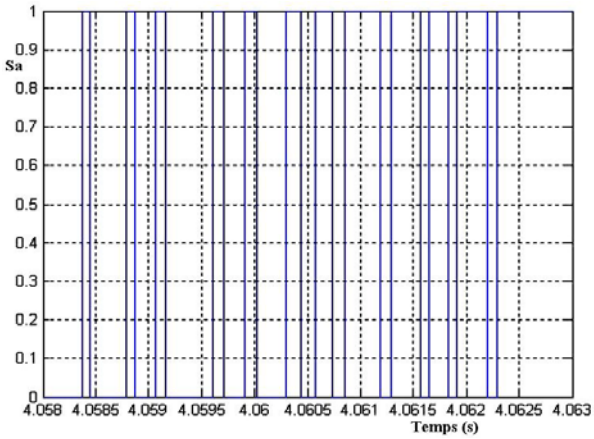


Fig. 13: Impulsions de commande

6. CONCLUSION

Ce travail nous a permis d'étudier le mode de fonctionnement du système de conversion d'énergie éolienne (modèle de la turbine à vitesse variable, modèle de la Génératrice asynchrone à double alimentation et modèle du redresseur MLI à bande d'hystérésis).

Les résultats obtenus par simulation montrent que le rendement du système est très encourageant.

REFERENCES

[1] S. El Aimani, '*Modélisation de Générateurs Eoliens à Vitesse Variable Connectes à un Bus Commun*', Forum International sur les Energies Renouvelables, Tétouan, Maroc, pp. 356 – 362, 2002.

[2] Sejir Khojet El Khil, '*Commande Vectorielle d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA)*', Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Décembre 2006.

[3] A. Mirecki, '*Etude Comparative de Chaînes de Conversion d'Energie Dédiées à une Eolienne de Petite Puissance*', Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Avril 2005.

[4] D. Aguglia, P. Viarouge, R. Wamkeue and J. Cros, '*Determination of Fault Operation Dynamical Constraints for the Design of Wind Turbine DFIG Drives*', Mathematics and Computers in Simulation, Vol. 81, N°2, pp. 252 – 262, 2010.

[5] T. Grinoux, R. Gibert, P. Neau and C. Buthion, '*Eoliennes en Milieu Urbain - Etat de l'Art*', pp. 1 – 129, 2006.

[6] S. El Aimani, '*Modélisation de Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension*', Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lille et Université des Sciences et Technologies de Lille 1, Décembre 2004.

[7] H. Camblong, '*Minimisation de l'Impact des Perturbations d'Origine Eolienne dans la Génération d'Electricité par des Aérogénérateurs à Vitesse Variable*', Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Centre de Bordeaux, Décembre 2003.

[8] M. Malinowski, '*Sensorless Control Strategies for Three - Phase PWM Rectifiers*', PhD Thesis, Warsaw University of Technology, Institute of Control and Industrial Electronics, 2001.

[9] M. Malinowski and M.P. Kazmierkowski, '*Simulation Study of Virtual Flux Direct for Three-Phase PWM Rectifiers*', 26th Annual Conference of the IEEE; Industrial Electronics Society, INCON, Vol. 4, pp. 2620 – 2625, 2000.

[10] Hind Djeghloud, **'***Filtrage Actif de Puissance*', Thèse de Doctorat, Université Mentouri, Constantine, 2007.

[11] S. Belakehal, '*Conception et Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables*', Thèse de Doctorat, Université Mentouri, Constantine, 2010.

[12] Arnaud Gaillard, '*Détection de Défauts des Convertisseurs de Puissance à l'Aide de FPGA: Cas d'un Système Eolien Basé sur une Machine Asynchrone à Double Alimentation*', Jeune Chercheurs en Génie Electrique'08, Lyon, 16 -17 Décembre 2008.