

Amélioration de la qualité de l'énergie électrique d'une chaîne de production hybride photovoltaïque éolienne connectée à un site isolé

R. Redjem *, K. Nabti et A. Bouzid †

Département d'Electrotechnique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Université Mentouri, Route Ain El Bey, 25000 Constantine, Algérie

(reçu le 20 Décembre 2017 - accepté le 28 Décembre 2017)

Résumé – Ce travail vise à améliorer la qualité de l'énergie électrique d'une ligne de production hybride éolienne photovoltaïque connectée à un site isolé. Tout d'abord, la modélisation mathématique de chaque élément du système de conversion est présentée. Les différentes parties de la chaîne de conversion sont ensuite connectées ensemble pour construire le système global. Ensuite, nous étudions le lien entre les chaînes photovoltaïques et éoliennes. Le système d'énergie hybride est utilisé pour alimenter un site isolé avec un contrôle orienté tension (VOC). Le but du système de contrôle est d'améliorer la qualité de l'énergie générée en régulant la tension U_{dc} du circuit intermédiaire pour qu'il suive la valeur de référence U_{dref} . La validité du modèle unifié développé et la faisabilité des stratégies de contrôle proposées sont toutes confirmées par des résultats simulés à l'aide du logiciel Simulink / Matlab. Les résultats de la simulation sont utilisés pour analyser le comportement de l'ensemble du système et fournir les informations nécessaires qui conduisent à son utilisation dans les conditions appropriées, ce qui conduit à améliorer l'ensemble du système.

Abstract - This work focuses on improving the quality of the electrical energy of a wind photovoltaic hybrid production line connected to an isolated site. First, the mathematical modeling of each element of the conversion system is presented. The different parts of the conversion chain are then connected together to build the overall system. Then we study the link between photovoltaic and wind energy chains. The hybrid energy system is used to power an isolated site with voltage-oriented control (VOC). The purpose of the control system is to improve the quality of the energy generated by regulating the voltage U_{dc} of the intermediate circuit so that it follows the reference value U_{dref} . The validity of the unified model developed and the feasibility of the proposed control strategies are all confirmed by simulated results using Simulink/ Matlab software. The results of the simulation are used to analyze the behavior of the whole system and provide the necessary information that leads to its use in the appropriate conditions, which leads to improve the whole system.

Mots clés: Photovoltaïque - Eolien - Energie renouvelable - VOC - Hacheur survolteur - Redresseur - Onduleur - PI - MSAP - Redresseur MLI.

1. INTRODUCTION

Face à une demande croissante d'énergie et à l'épuisement à plus ou moins long terme des énergies fossiles, différentes solutions de substitution ont été envisagées. Suite aux crises pétrolières, certains pays ont mené une politique orientée vers le nucléaire alors que d'autres ont massivement utilisé les énergies renouvelables.

Les types de modèles utilisés dans le domaine des énergies nombreux, parmi les énergies renouvelables, trois grandes familles émergent: les énergies renouvelables sont d'origine mécanique (la houle, l'éolien), énergie électrique (panneaux photovoltaïques) ou l'énergie sous forme de la chaleur (géothermie, solaire thermique,...).

* redjemradia@yahoo.fr ; Idor2003@yahoo.fr

† You.bouzid@yahoo.fr

La consommation mondiale d'électricité au cours des dernières décennies est généralement liée au développement de l'industrie. L'énergie renouvelable, permet une production d'énergie électrique décentralisée, ce qui contribue à la solution de fournir aux zones isolées l'énergie nécessaire.

La combinaison de sources d'énergie renouvelables pour optimiser la production d'énergie électrique est étudiée dans beaucoup de recherches telles que [1-7], qui se concentrent sur les aspects météorologiques, techniques et économiques.

L'avantage d'un système hybride par rapport au système éolien seul ou au système photovoltaïque pur dépend de nombreux facteurs fondamentaux: la disponibilité de l'énergie primaire et son coût, la difficulté de réalisation de chaque système, le système de stockage et d'autres facteurs d'efficacité.

Loi de Betz- D'après la théorie de Betz, la puissance du vent est [8]

$$P_{\text{vent}} = \frac{1}{2} S_{\text{éolienne}} \cdot \rho \cdot v^3 \quad (1)$$

Avec $S_{\text{éolienne}}$, la surface balayée par l'éolienne, ρ , la masse volumique de l'air (1.25 kg/m^3) et v , la vitesse du vent.

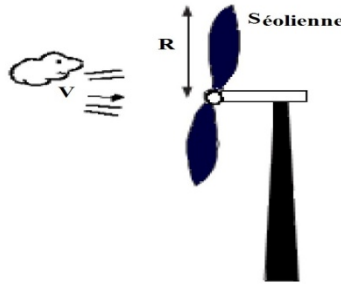


Fig. 1: Eolienne simplifiée

L'éolienne ne peut récupérer qu'une partie de la puissance du vent (P_{vent}). La puissance du vent et la puissance extraite par l'éolienne $P_{\text{éolienne}}$ peut s'exprimer en fonction du coefficient de puissance C_p :

$$P_{\text{éolienne}} = C_p \cdot P_{\text{ent}} \quad (2)$$

D'après Betz, le coefficient de puissance C_p ne peut être supérieur à $16/27$. Le coefficient C_p diffère pour chaque éolienne, dépend de l'angle d'inclinaison des pales β_i et du rapport de vitesse λ , [9, 10].

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{v} \quad (3)$$

2. MODELISATION DE LA MACHINE SYNCHRONNE A AIMANTS PERMANENTS

Les machines à courant alternatif sont généralement modélisées par des équations non linéaires (équation différentielle). Cette non-linéarité est due aux inductances et coefficients d'équations dynamiques qui dépendent de la position et du temps du rotor.

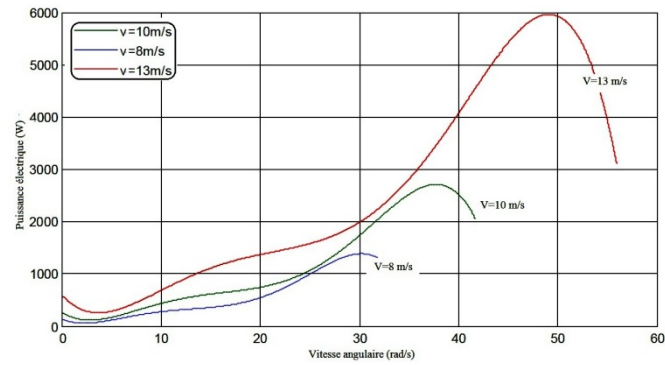


Fig. 2: Puissance théorique disponible pour un type de vent donné

Une transformation de 3 à 2 phases est nécessaire pour simplifier le modèle (réduire le nombre d'équations). Basé sur certaines hypothèses simplificatrices, le modèle de la machine est donné comme suit [11].

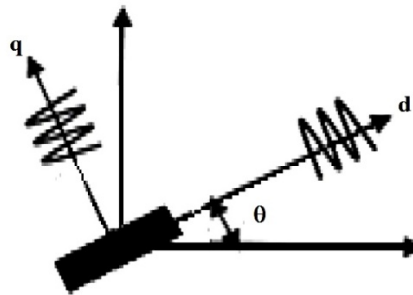


Fig. 3: Modèle de la machine en biphasé

Equations électriques

$$V_d = R_s \cdot i_d + L_d \cdot \frac{di_d}{dt} - \Psi_q \cdot \omega_r \quad (4)$$

$$V_q = R_s \cdot i_q + L_q \cdot \frac{di_q}{dt} + \Psi_d \cdot \omega_r \quad (5)$$

avec

$$\Psi_d = L_d \cdot i_d + \Psi_f \quad (6)$$

$$\Psi_q = L_q \cdot i_q \quad (7)$$

Les relations (4) et (5) deviennent alors

$$V_d = R_s \cdot i_d + L_d \cdot \frac{di_d}{dt} - L_q \cdot i_q \cdot \omega_r \quad (8)$$

$$V_q = R_s \cdot i_q + L_q \cdot \frac{di_q}{dt} + (L_d \cdot i_d + \Psi_d) \cdot \omega_r \quad (9)$$

Expression du couple électromagnétique

$$C_{em} = p \cdot ((L_d - L_q) \cdot i_d + \Psi_f) \cdot i_q \quad (10)$$

Equation mécanique

L'équation mécanique s'écrit:

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f \Omega = C_{em} - C_r \quad (11)$$

$$\Omega = \frac{\omega_r}{p}$$

3. MODELE DE L'ONDULEUR DE TENSION

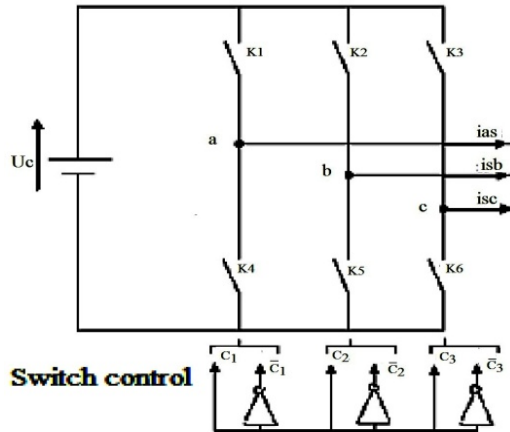


Fig. 4: Schéma d'un onduleur de tension triphasé

Pour simplifier la modélisation de l'onduleur, nous supposons que les commutateurs sont idéaux (pas de temps de commutation, pertes négligées). C_K est le signal de commande de l'interrupteur commandé [12, 13]. Où V_{sabc} est le vecteur des tensions simples à la sortie de l'onduleur, et est donné par:

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \cdot U_c \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} = U_c \cdot [T_s] \cdot [C_K] \quad (12)$$

4. MODELE DU REDRESSEUR

La réversibilité de l'onduleur de tension à deux niveaux lui permet de fonctionner en redresseur de courant. Les modèles élaborés pour les onduleurs de tension à deux niveaux sont valables pour les redresseurs de tension en tenant compte des nouvelles conventions des deux sources (réseaux et la charge).

Le pont redresseur est constitué de trois bras avec deux transistors (thyristors) bipolaires antiparallèle avec des diodes (figure 5). Ces bras sont présentés comme des interrupteurs pouvant être commandés en ouverture '1' et en fermeture '0'. La tension redressée U_{dc} est en fonction des états de ces interrupteurs.

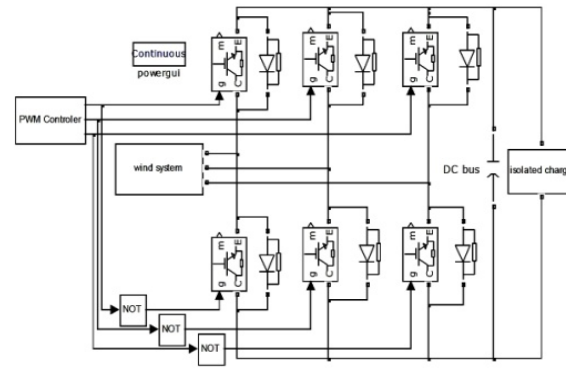


Fig. 5: Schéma d'un bloc redresseur

On peut donc déduire les tensions de phase [14]:

$$\begin{aligned} v_a &= f_a \cdot U_{dc} \\ v_b &= f_b \cdot U_{dc} \\ v_c &= f_c \cdot U_{dc} \end{aligned} \quad (13)$$

$$U_{dc} = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{v_a}{f_a} + \frac{v_b}{f_b} + \frac{v_c}{f_c} \right) \quad (14)$$

avec,

$$\begin{aligned} f_a &= \frac{2s_a - (s_b + s_c)}{3} \\ f_b &= \frac{2s_b - (s_a + s_c)}{3} \\ f_c &= \frac{2s_c - (s_a + s_b)}{3} \end{aligned} \quad (15)$$

5. COUPLAGE DE LA CHARGE AVEC LE GENERATEUR EOLIEN

La chaîne de conversion éolienne (figure 6) est composée d'une turbine éolienne entraînant une génératrice synchrone à aimant permanent, associée à un redresseur MLI, qui est à son tour connecté à un onduleur alimentant une charge (RL).

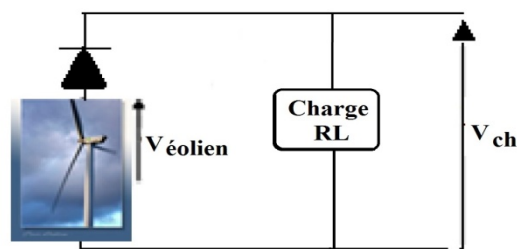


Fig. 6: Schéma couplage générateur éolien avec la charge

6. MODELE DU PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE

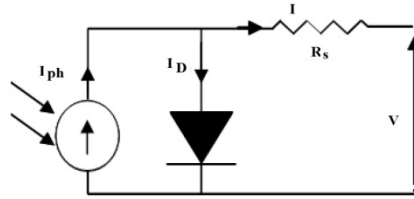


Fig. 7: modèle du panneau photovoltaïque

A partir de la figure 7, les nœuds de loi nous permettent d'écrire les relations suivantes:

$$I_{ph} = I_D + I \quad (16)$$

Le courant photovoltaïque est proportionnel à l'éclairement peut être donné par:

$$I_{ph} = I_{ph}(T_1) \times (1 + K_0 \times (T - T_1)) \quad (17)$$

$$I_{ph}(T_1) = I_{cc}(T_1) \times (G/G_0) \quad (18)$$

$$K_0 = \frac{I_{cc}(T_2) - I_{cc}(T_1)}{T_2 - T_1} \quad (19)$$

Le courant I_D de jonction est donné par:

$$I_D = I_s \left(e^{(V_D/V_T)} - 1 \right) \quad (20)$$

V_T est la tension thermodynamique donnée par:

$$V_T = nKT/q \quad (21)$$

$$V_D = V + R_s I \quad (22)$$

Remplacer dans l'équation (16), l'équation caractéristique devient:

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\left(\frac{q(V + R_s I)}{nKT} \right)} - 1 \right) \quad (23)$$

Modélisation du hacheur survolteur [15]

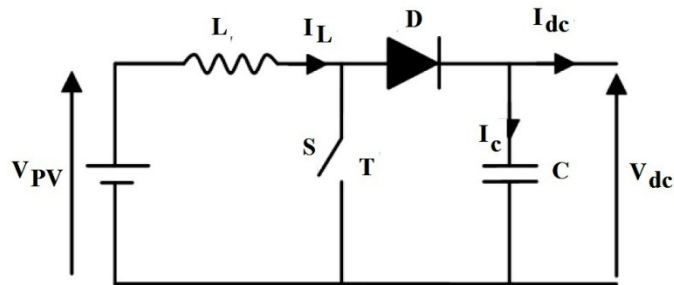


Fig. 8: Schéma électrique du convertisseur

La modélisation de ce convertisseur nécessite une analyse des différentes séquences de fonctionnement, demandant ($S = 1$) quand le commutateur est fermé et T ($S = 0$) pour T ouvert, nous pouvons représenter le convertisseur par un seul système d'équations, que nous appelons modèle instantané. Nous considérons les commutateurs parfaits.

$$V_{PV} = L \cdot \frac{dI_L}{dt} + V_{dc} \cdot (1 - s) \quad (24)$$

$$(1 - S) I_L = c \cdot \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{ch} \quad (25)$$

7. COUPLAGE LA CHARGE AVEC LES DEUX GENERATEURS (EOLIEN-PHOTOVOLTAÏQUE)

Le système solaire-éolien parallèle peut être architecturé comme suit:

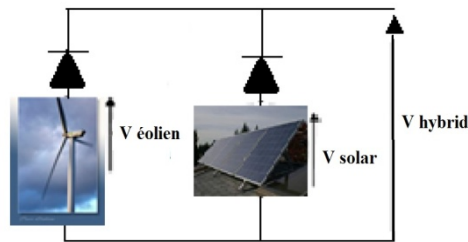


Fig. 9: Schéma de principe d'une chaîne de conversion éolienne photovoltaïque globale (connexion en parallèle)

Pour protéger la source inférieure, deux diodes sont utilisées. La différence de potentiel entre les bornes de la diode est négative, elle est donc bloquée et offre une protection contre le retour du courant vers la source photovoltaïque, ce qui a un effet destructeur surtout sur les panneaux solaires [16]. Les conditions de connexion sont expliquées par l'équation suivante:

$$V_{hybride} = \begin{cases} V_{solaire} - \text{if } (V_{solaire} \geq V_{éolien}) \\ V_{éolien} - \text{if } (V_{solaire} < V_{éolien}) \end{cases} \quad (26)$$

8. AMELIORATION DE LA QUALITE DE L'ENERGIE ELECTRIQUE

La qualité de l'énergie devient une des priorités majeures qui concernent tous les acteurs en présence, qu'ils soient gestionnaires des réseaux, consommateurs ou producteurs. Durant ces dernières années, le nombre des systèmes alimentés électroniquement est en forte progression.

La qualité de l'énergie produite est un vaste concept qui recouvre à la fois la continuité de la fourniture électrique, la qualité de l'onde de tension et la qualité des courants. Les facteurs qui sont susceptibles d'affecter la qualité de l'énergie sont [17]:

- La variation de fréquence.
- Les fluctuations de tension.

- Les courants ou tensions harmoniques.
- Le déséquilibre.

Récemment, il y a eu un développement significatif des techniques de contrôle pour les redresseurs actifs. Cette tendance est principalement due à la pollution harmonique des réseaux électriques causés par les redresseurs traditionnels. Comme une question de fait, les redresseurs actifs sont la solution alternative à l'utilisation des filtres. Il existe plusieurs stratégies de contrôle.

Parmi ces derniers, l'un des plus adoptée est la commande à tension orienté (VOC), où le courant de commande est effectué dans l'espace vecteur tension de cadre de référence orientée. Il y a aussi la technique de contrôle à flux orienté (FOC) qui peuvent être appliquées pour améliorer le régime de (VOC).

Contrôle à tension orientée (VOC) [18-21]

La commande vectorielle à tension orientée est basée sur l'estimation de la grandeur électrique à partir du bloc PLL (Phase Locked Loop). Elle est composée d'un détecteur de phase (la transformée de coordonnées), un filtre passe bas (le correcteur) et un oscillateur (l'intégrateur).

Cette boucle garantit le suivi de phase de la composante directe de la tension, afin d'éliminer la composante en quadrature, ce qui produise la phase estimée est égale à la phase des tensions de la génératrice associée.

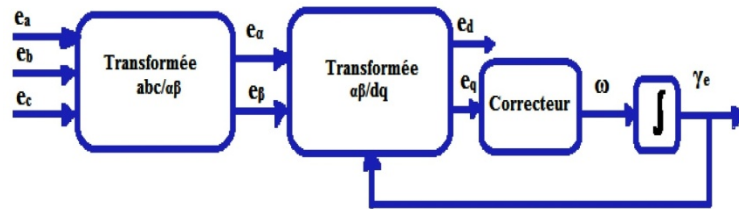


Fig. 10: Structure classique d'une PLL triphasée [21]

La caractéristique principale de la technique de commande en courant est basée sur les transformées dans deux systèmes de coordonnées. Le premier est le système de coordonnées fixe ($\alpha-\beta$), et le deuxième est le système de coordonnée tournant ($d-q$). Les valeurs mesurées de trois phases sont converties en équivalent système de deux phases ($\alpha-\beta$) et alors sont transformées au système de coordonnées tournant dans le bloc ($\alpha-\beta$)/($d-q$).

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_e & \sin \gamma_e \\ -\sin \gamma_e & \cos \gamma_e \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad (27)$$

Grâce à ce type de transformation, les grandeurs de commande sont des signaux continus.

Une transformation inverse ($d-q$)/($\alpha-\beta$) est réalisée sur la sortie du système de commande qui donne des signaux des références du redresseur dans les coordonnées fixes.

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_e & \sin \gamma_e \\ -\sin \gamma_e & \cos \gamma_e \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} \quad (28)$$

Pour les deux transformations de coordonnées, l'angle du vecteur de tension γ_e est défini comme:

$$\begin{aligned} \sin \gamma_e &= e_\beta / \sqrt{(e_\alpha)^2 + (e_\beta)^2} \\ \cos \gamma_e &= e_\alpha / \sqrt{(e_\alpha)^2 + (e_\beta)^2} \end{aligned} \quad (29)$$

Dans le système de coordonnées tournantes (d-q), le vecteur courant \vec{i} à deux composantes perpendiculaire $\vec{i} = [i_d, i_q]$. Ainsi, les puissances active et réactive peuvent être commandées indépendamment. La condition pour un facteur de puissance unitaire est obtenue quand le vecteur courant \vec{i} est aligné avec le vecteur de tension \vec{e} , en choisissant l'orientation de la tension vers l'axe d, on obtient un modèle dynamique simplifié.

Le système de commande classique utilise la commande en boucle fermée du courant dans le système de coordonnées tournant, la commande à tension orientée (VOC).

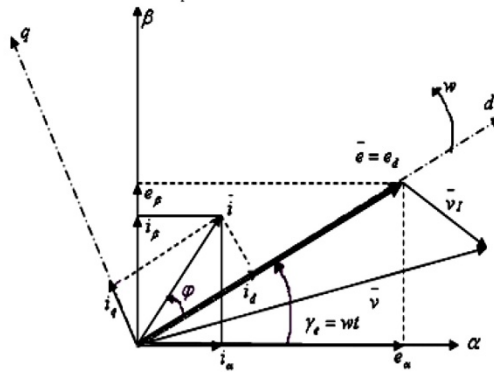


Fig. 11: Diagramme vectoriel de la commande du VOC

Les équations de tension dans le système de coordonnées tournantes (d-q) sont:

$$\begin{aligned} e_d &= R \cdot i_d + L \frac{di_d}{dt} + V_d - \omega \cdot L \cdot i_q \\ e_q &= R \cdot i_q + L \frac{di_q}{dt} + V_q + \omega \cdot L \cdot i_d \end{aligned} \quad (30)$$

En négligeant la résistance, les équations (29) reçoivent:

$$\begin{aligned} e_d &= L \frac{di_d}{dt} + V_d - \omega \cdot L \cdot i_q \\ 0 &= L \frac{di_q}{dt} + V_q + \omega \cdot L \cdot i_d \end{aligned} \quad (31)$$

Boucle de régulation

La fonction de transfert en boucle ouverte de la boucle PLL est défini par:

$$FTBO(p) = \left(k_p + \frac{k_i}{p} \right) \cdot \frac{1}{p} \quad (32)$$

Donc elle est décrite en boucle fermée par:

$$FTBF(p) = \frac{FTPO(p)}{1 + FTBO(p)} = \frac{(k_i/k)p + 1}{(1/k_i)p^2 + (k_p/k_i) + 1} \quad (33)$$

D'autre part la fonction de transfert en boucle fermée est définie par:

$$FTBF(p) = \frac{(k_i/k)p + 1}{(1/\omega_n^2)p^2 + (2\xi/\xi_n^2) + 1} \quad (34)$$

Donc,

$$k_p = 2\xi\omega_n \quad (35)$$

$$k_i = \omega_n^2 \quad (36)$$

On prend $\omega_n = \omega_c / 5$ pour avoir une régulation interne rapide [14]

$$\text{avec, } \omega_c = 2\pi f_c \quad (37)$$

Où, ω_c , est la pulsation de commutation et f_c , la fréquence de commutation.

Etude de la commande découplée de tension

Il y a un couplage entre les axes de la transformation de Park, donc une variation sur i_d provoque une variation sur i_q et l'inverse.

Le schéma de la commande découplée pour le redresseur MLI doit être appliqué [23, 4], ce qui est montré dans la figure 12.

$$\begin{aligned} e_d &= R \cdot i_d + L \frac{di_d}{dt} + v_d - \omega \cdot L \cdot i_q \\ e_q &= R \cdot i_q + L \frac{di_q}{dt} + v_q + \omega \cdot L \cdot i_d \end{aligned} \quad (38)$$

Le découplage entre l'axe d et q est réalisé par la variable u_d et u_q :

$$\begin{aligned} u_d &= e_d - v_d - \omega \cdot L \cdot i_q = R \cdot i_d + L \frac{di_d}{dt} \\ u_q &= e_q - v_q + \omega \cdot L \cdot i_d = R \cdot i_q + L \frac{di_q}{dt} \end{aligned} \quad (39)$$

Où u_d et u_q , sont les signaux de sortie des régulateurs de courant.

Le système d'état découplé est présenté donc, par:

$$\begin{bmatrix} di_d/dt \\ di_q/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & 0 \\ 0 & -R/L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L & 0 \\ 0 & 1/L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} \quad (40)$$

Il est possible de commander indépendamment les composants du courant i_d et i_q par action sur u_d et u_q , ainsi, il est simple de dimensionner les régulateurs.

La figure 12 présente le schéma fonctionnel pour le réglage du courant.

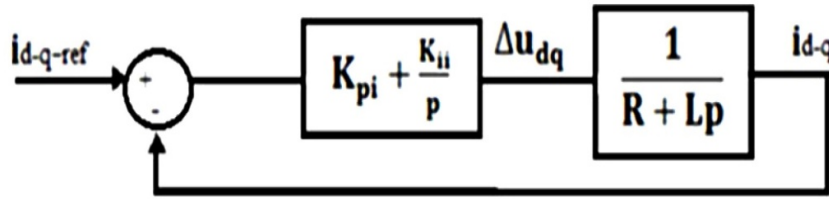


Fig. 12: Schéma fonctionnel pour le réglage du courant

Dans ce cas, les contrôleurs des courants utilisés, sont de type PI. Les paramètres K_i et K_p sont calculés en fonction de temps de réponse et le coefficient d'amortissement.

Donc la fonction de transfert en boucle fermée de ce système s'écrit:

$$FTBF(p) = \frac{(k_{ii}/k_{pi})p + 1}{(L/k_{ii})p^2 + (R + k_{pi}/k_{ii})p + 1} \quad (41)$$

$$k_{ii} = L \cdot \omega_n^2 \quad (42)$$

avec, $\xi = \frac{\sqrt{2}}{2}$ et ω_n dépend du temps de réponse choisi.

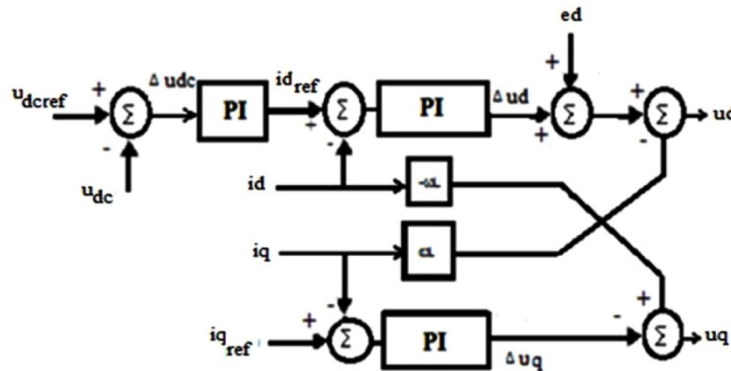
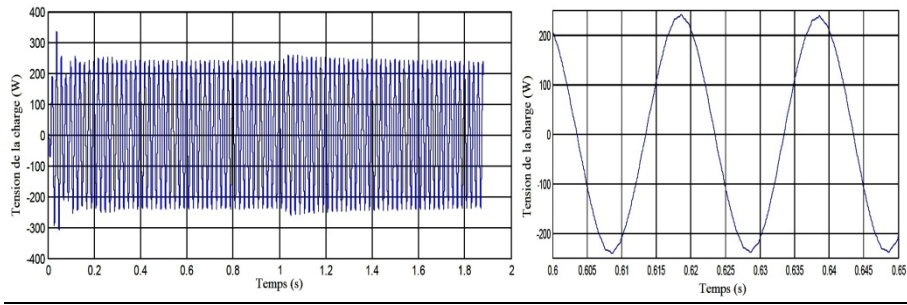


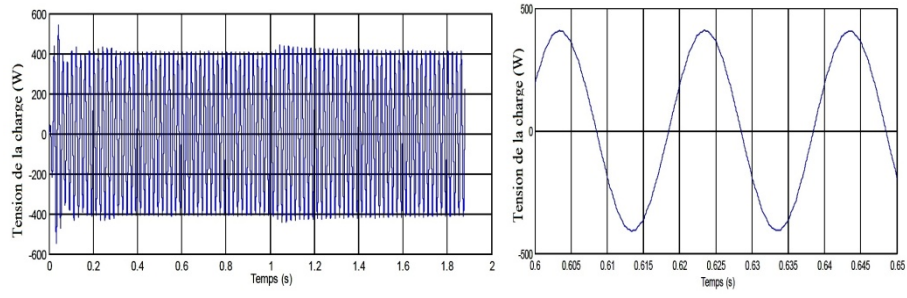
Fig. 13: Schéma de la commande découplée de tension de la commande (VOC)

9. RESULTATS DE SIMULATION

La connexion en parallèle de deux chaînes de conversion est effectuée de telle sorte que la tension délivrée en charge tout le temps est la plus grande des deux chaînes de valeur. Si par exemple la tension PV est plus petite, elle agit comme un récepteur.



a- Avant filtrage



b- Après filtrage

Fig. 14: Tension aux bornes de la charge après filtrage (V)

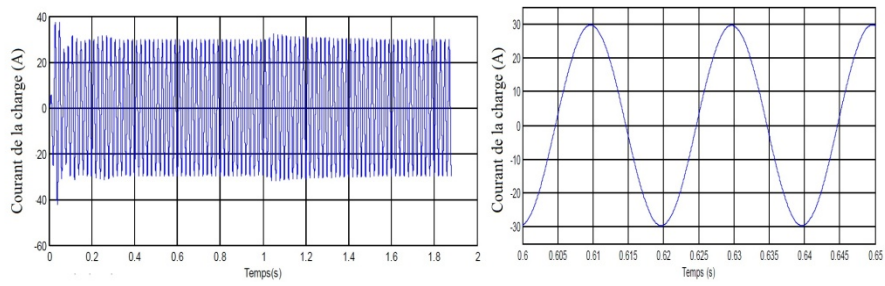
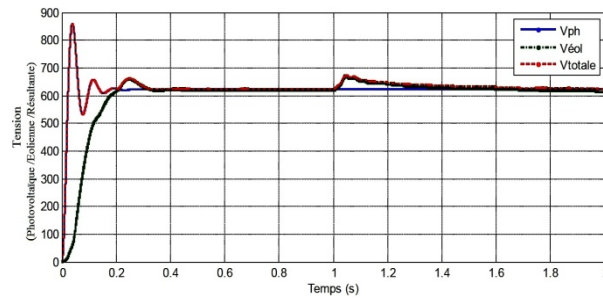


Fig. 15: Courant aux bornes de la charge (A)

Fig. 16: Tensions d'éolien ($V_{\text{éol}}$) et solaire (V_{ph}) et hybride parallèle (V_{totale}) d'un système de génération solaire-éolien connectés en parallèle

La tension aux bornes de la charge est claire et représente une forme d'onde acceptable, mais entaché des harmoniques, influent légèrement sur la forme du courant.

Pour éliminer ces harmoniques est rapprocher les courbes a la forme sinusoïdale désirée, un filtre LC est utilisé, ce qui corrige la forme d'onde et augmente la qualité de la puissance fournie au site alimenté comme le montre la figure 14.

Sur la figure 16, les deux canaux commencent à fournir de l'énergie avec un régime transitoire dont la priorité est le système photovoltaïque car il est plus rapide (système purement électrique) et la tension de sortie est égale à la tension de celui-ci. Lorsque le système éolien atteint les valeurs maximales de la tension transitoire est la plus grande et devient donc la plus dominante.

Lorsque de la variation des conditions atmosphériques le système éolien perd le contrôle est le système solaire le remplacé directement parce qu'il n'est pas sensible à ces variations.

Lorsque les deux systèmes se stabilisent et a causé l'inconvénient majeur de l'oscillation autour du point de fonctionnement), le système éolien est le plus stable.

Pour éliminer ces harmoniques est approximative les courbes à la forme sinusoïdale désirée, un filtre LC est utilisé qui corrige la forme d'onde et augmente la qualité de la puissance au site fourni.

10. CONCLUSION

Le travail présenté ici porte sur l'utilisation d'énergie hybride qui est constitué par un système de conversion éolien associé à des panneaux photovoltaïques.

Ces sources se connectent sur un bus continu raccordé à un réseau isolé par l'intermédiaire d'un onduleur de tension et un filtre LC. Dans un premier temps, nous avons commencé d'étudier les deux systèmes séparément pour tester ces évolutions, et ensuite les deux chaînes sont connectées en parallèle pour assurer la continuité du service sur le site d'alimentation.

La simulation montre que la technique du contrôle de tension orienté donne une faible distorsion dans la tension.

Notre étude présente dans le but 'amélioration de la qualité de l'énergie'. On trouve que la commande vectorielle (VOC) donne des meilleurs résultats au niveau de la qualité du courant.

Les résultats des différentes simulations réalisées sous environnement Matlab/Simulink.

REFERENCES

- [1] M. Belhamel, S. Moussa et A. Kaabeche , '*Production d'Electricité au Moyen d'un Système Hybride (Eolien- Photovoltaïque –Diesel)*', Revue des Energies Renouvelables, Zones arides, pp. 49 - 54, 2002.
- [2] C. Aspliden, '*Hybrid Solar-Wind Energy Conversion Systems Meteorological Aspects*', Report N°PNL-SA-10063. Richland: Pacific North West Laboratory, 1981.
- [3] B. Ait Driss, '*Logiciel de Simulation et d'Optimisation des Systèmes Hybrides*', CDER, 1992.
- [4] H.G. Beyer, H. Gabler, G.J. Gerdes, D. Heimann, J. Luther, J. Schumacher-Grohn and R. Steinberger-Willms, '*Wind/Solar Hybrid Electricity Generation for Stand-Alone Systems With Battery and Hydrogen Storage*', Proceeding of the 5th

- International Conference on Energy Options - The role of alternatives in the world energy scene, Reading, England, 07.04.-09.04.1987, pp. 132 - 135, 1987.
- [5] Leong Kit Gan , Jonathan K.H. Shek, Markus A. Mueller, '*Hybrid Wind–Photovoltaic–Diesel–Battery System Sizing Tool Development Using Empirical Approach, Life-Cycle Cost and Performance Analysis: A Case Study in Scotland*', Energy Conversion and Management, Vol. 106, pp. 479 – 494, 2015.
- [6] N. Mezzai, D. Rekioua, T. Rekioua, A. Mohammedi, K. Idjdarane, and S. Bacha, '*Modeling of Hybrid Photovoltaic/Wind/Fuel Cells Power System*', International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 39, N°27, pp. 15158 - 15168, 2014.
- [7] D. Rekioua and E. Matagne, '*Optimization of Photovoltaic Power Systems*', Springer, 2012. ISBN 978-1-4471-2348-4.
- [8] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins and E. Bossanyi, '*Wind Energy*', Handbook, Edition 2001.
- [9] A. Abdelli, '*Optimisation Multicritère d'une Chaîne Eolienne Passive*', Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France 2007.
- [10] H. De Battista and R.J. Mantz, '*Dynamical Variable Structure Controller for Power Regulation of Wind Energy Conversion Systems*', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 19, N°4, 2004.
- [11] S. Diaf, M. Haddadi et M. Belhamel, '*Analyse Technico Economique d'un Système Hybride (Photovoltaïque/Eolien) Autonome pour le Site d'Adrar*', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 9, N°3, pp. 127 - 134, 2006.
- [12] O. Carlson, A. Grauers, J. Svensson and A. Larsson, '*A comparison of electrical systems for variable speed operation of wind turbines*', European Wind Energy Conference, pp. 500 - 505, 1994.
- [13] Guy Sturtzer et Eddie Smigiel, '*Modélisation et Commande des Moteurs Triphasés: Commande Vectorielle des Moteurs Synchrones-Commande Numérique par Contrôleurs DSP-Electrotechnique*', Ellipses Edition marketing S.A. 2000.
- [14] S. Belakehal, A. Bentounsi, M. Merzoug et H. Benalla, '*Modélisation et Commande d'une Génératrice Synchronne à Aimants Permanents Dédiée à la Conversion de l'Energie Eolienne*', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 13 N°1 pp. 149 – 161, 2010.
- [15] S. Belakehal, '*Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables*'. Thèse de Doctorat, Université de Constantine, Algérie 2010.
- [16] A. Ozdamar, N. Ozbalta, A. Akin and E.D. Yildirim, '*An application of a Combined Wind And Solar Energy System In Izmir*', Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 09, pp. 624 – 637, 2005.
- [17] B. Beltran, '*Contribution à la Commande Robuste des Eoliennes à Base de Génératrices Asynchrones Double Alimentation: du Mode Glissant Classique au Mode Glissant d'ordre Supérieur*', Thèse de Doctorat, Université de Bretagne Occidentale, 2010.
- [18] M.P. Kazmierkowski, R. Krishnan and F. Blaabjerg, '*Control in Power Electronics: Selected Problems*', Elsevier Science & Technology Books, 2002.
- [19] R. José and W. Juan, '*PWM Regenerative Rectifiers: State of the Art*', IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 52, N°1, pp. 5 - 22, 2005.
- [20] S. Aurtenechea, '*Predictive Control of the 2L-VSI and 3L-NPC VSI Based on Direct Power Control for MV Grid Connected Power Applications*', Ph.D. Thesis,

Mondragon Unibertsitatea Goi Eskola Politeknikoa Faculty of Engineering, Mondragon (Spain) 2007.

- [21] P. Verdelho and G.D. Marques, '*DC Voltage Control and Stability Analysis of PWM-Voltage-Type Reversible Rectifiers*', IEEE Transactions on Industrial electronics, Vol. 45, N°2, pp. 263 - 273, 1998.
- [22] P. Verdelho and G.D. Marques, '*DC Voltage Control and Stability Analysis of PWM-Voltage-Type Reversible Rectifiers*', IEEE Transactions on Industrial electronics, Vol. 45, N°2, pp. 263 - 273, 1998.
- [23] L. Angquist and L. Lindberg, '*Inner Phase Angle Control of Voltage Source Converter in High Power Application*', In Proceeding IEEE-PESC Conf, Vol. 94, pp. 293 - 298, 1991.
- [24] B.H. Kwon, J.H. Youm and J.W. Lim, '*A Line-Voltage-Sensorless Synchronous Rectifier*', IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 14, N°5, pp. 966 - 972, 1999.