

Commande et analyse des performances d'une station de pompage photovoltaïque fonctionnant en régime optimal

M.N. Mansouri*, N. Ghanmi et M.F. Mimouni

Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, Tunisie

(reçu le 20 Janvier 2008 – accepté le 30 mars 2008)

Résumé - Le travail présenté dans cet article étudie les performances d'une structure de pompage constituée par un moteur asynchrone accouplé à une pompe centrifuge. L'ensemble est alimenté par un générateur photovoltaïque (GPV) à travers deux convertisseurs statiques pilotés de manière indépendante. Deux stratégies de commande ont été mises en œuvre. La première, basée sur la mesure du courant photovoltaïque assure le fonctionnement du GPV avec sa puissance maximale via la commande d'un hacheur survolteur. La deuxième, utilise le concept de la commande vectorielle par orientation du flux rotorique pour piloter le fonctionnement du moteur asynchrone entraînant la pompe centrifuge. Par ailleurs, nous avons établi dans cet article, une relation explicite permettant d'adopter la vitesse de rotation de consigne de la machine asynchrone et par conséquent, le débit de la pompe en fonction de l'état d'ensoleillement. Des travaux de simulation fournis permettent de dégager les limites statiques de fonctionnement et les performances dynamiques de la structure proposée.

Abstract – The work presented in this paper studied performances of a pumping structure constituted by an asynchronous motor coupled to a centrifugal pump. The considered system is supplied by a photovoltaic generator (GPV) through two static converters piloted in an independent manner. Two strategies of command have been examined. The first one based on the measure of the photovoltaic current, ensures the working of the GPV with its maximal power via the control of a boost converter. The second, use the concept of the vectorial control by orientation of rotor flux to pilot the working of the asynchronous motor coupled the centrifugal pump. Otherwise, we established in this paper, an explicit relation permitting to determine the reference rotor speed of the asynchronous machine and therefore the debit of the pump according to the state of insolation. Finally, simulation results leads the proposed structure to the optimum operating condition and permits to localise the static limits of working in steady state and the dynamic regimes.

Mots clés: Générateur photovoltaïque - Convertisseurs statiques - Moteur asynchrone - Pompe centrifuge - Commande vectorielle - MPPT.

1. INTRODUCTION

Devant les contraintes environnementales exigées d'une part et l'augmentation du coût de production de l'électricité d'autre part, la tendance actuelle est orientée vers l'exploitation des sources d'énergie renouvelables. Dans ce cadre, la Tunisie est dotée d'un potentiel solaire important qui offre une grande opportunité pour le développement global d'un projet économique dans le pays [1]. Ainsi, durant ces dernières années et suite à la mise en place d'un Projet de Recherche Fédéré (PRF) avec l'Agence Nationale de Maîtrise de l'Energie (ANME), nous nous sommes intéressés à l'étude de la mise en place des systèmes de production d'énergie solaire notamment au niveau des systèmes embarqués, tels que les véhicules électriques, les systèmes de pompage et dans les sites isolés non électrifiés. Bien entendu, cette étude doit permettre l'amélioration des performances de gestion en vue d'optimiser le rendement en énergie de l'installation [2].

Dans ce travail, la problématique envisagée consiste à maîtriser le fonctionnement d'une station de pompage équipée d'un moteur asynchrone entraînant une pompe centrifuge. Suite à l'évolution technologique, en particulier au niveau de l'électronique de puissance et de la microélectronique, il est devenu possible de mettre en œuvre des algorithmes de commande des

* mohamednejib.mansouri@enim.rnu.tn _ mfaouzi.mimouni@enim.rnu.tn _ nasrghanmi@yahoo.fr

systèmes électromécaniques à vitesse variable caractérisés par de hautes performances [3]. Par ailleurs, les applications modernes de commande basées sur l'utilisation du moteur asynchrone sont les plus considérées dans le système électrique de point de vue technique de contrôle, elles représentent un problème complexe multi variables et constitue un champ d'application important de la théorie de commande vectorielle [4]. D'autre part, la résolution d'un problème de commande de la machine asynchrone alimenté par un GPV doit permettre d'assurer une bonne dynamique, un rendement en énergie élevé, une grande robustesse et une implémentation simple.

Ici, la charge du moteur asynchrone est une pompe centrifuge qui impose un couple résistant dépendant de sa vitesse de rotation. Ceci permet par conséquent de contrôler le débit et la hauteur manométrique de la pompe.

L'adoption de la technique de commande directe du moteur asynchrone par orientation du flux rotorique fournit des performances dynamiques élevées en terme de la maîtrise de la dynamique du couple électromagnétique via la maîtrise de la dynamique du flux rotorique [5]. Il est bien connu que l'implémentation de cette technique demande la détection du vecteur flux qui n'est pas directement mesurable. La connaissance de ce vecteur permet de réaliser la transformation de Park demandée pour assurer le découplage entre les deux grandeurs flux et couple de manière similaire que celle d'une machine à courant continu à excitation séparée. L'estimation du vecteur flux rotorique est basée sur l'utilisation du modèle mathématique de la machine asynchrone. Cette grandeur est utilisée ensuite dans une procédure de régulation de flux offrant la dynamique souhaitée. Nous avons opté pour la mise en œuvre d'une structure de commande en vitesse de la machine asynchrone en utilisant un onduleur de tension commandé via une technique de modulation vectorielle.

En ce qui concerne la source photovoltaïque (PV) utilisée pour alimenter le système de pompage, nous avons considéré un générateur de puissance allant jusqu'à 1.5 kW pour un éclairage de l'ordre de 1000 W/m². De plus, la source PV doit assurer, via une commande appropriée du convertisseur statique DC/DC utilisé, un transit de puissance maximale. Plusieurs techniques développées dans la littérature durant la dernière décennie, ont permis de faire fonctionner le GPV en régime optimal MPPT (Maximum Power Point Tracking). Dans ce travail, nous avons implanté la technique de perturbation et observation. Dans ce même cadre, pour exploiter au maximum l'énergie produite par le GPV et déterminer les limites statiques de fonctionnement, nous avons établi une relation explicite de la vitesse de rotation de référence de la machine asynchrone en fonction de l'éclairage.

Le travail est organisé en quatre sections. La première section est réservée à la présentation de la structure du système de pompage et à la modélisation mathématique des différents constituants. La deuxième section, présente la méthode du flux orienté ainsi que l'étude des différentes boucles de régulation. La troisième section est consacrée à la recherche d'une relation explicite de la vitesse de consigne de la machine en fonction de l'éclairage existant. La quatrième section résume l'ensemble des travaux de simulation réalisés sur un système de pompage de 1.5 kW de puissance.

2. PRESENTATION DE LA STRUCTURE DU SYSTEME DE POMPAGE

La structure étudiée est constituée d'un générateur photovoltaïque de 24 modules en série, d'un convertisseur DC/DC fonctionnant en MPPT, d'un onduleur et d'un moteur asynchrone de 1.5 kW de puissance couplé à une pompe centrifuge comme l'indique la figure 1.

3. MODELISATION DE LA STRUCTURE ETUDIEE

3.1 Modèle du générateur photovoltaïque

Le modèle simplifié d'un générateur photovoltaïque est décrit par la relation suivante:

$$I_{pv} = N_p \times I_{ph} - N_p \times I_s \left(\exp \left(\frac{A_t \times V_{pv}}{N_s} \right) - 1 \right) \quad (1)$$

où I_{pv} est le courant débité par le générateur photovoltaïque, V_{pv} est la tension aux bornes du générateur photovoltaïque, I_{ph} est le photo courant directement proportionnel à l'ensoleillement, N_s est le nombre de modules en série et N_p est le nombre de branches en parallèles.

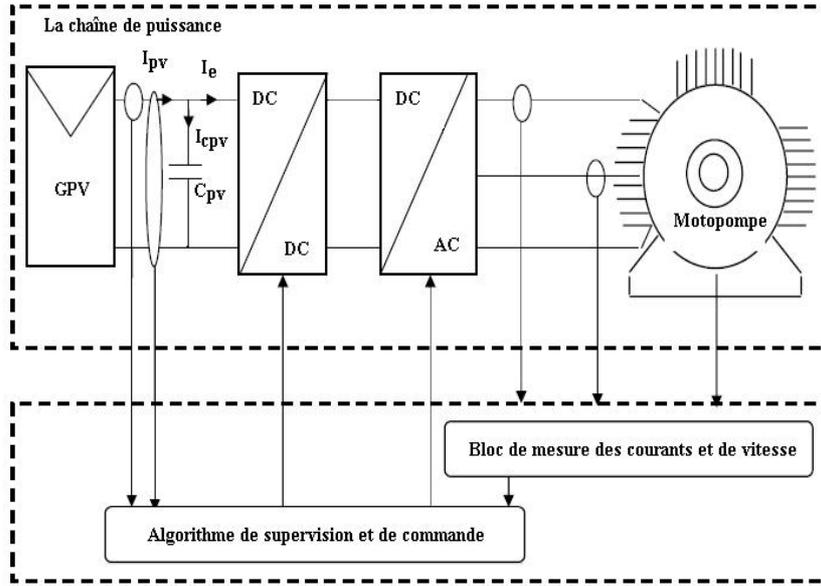


Fig. 1: Structure de commande de la station de pompage photovoltaïque

La figure 2 présente les caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ et $P(V_{pv})$, pour diverses valeurs d'éclairement (E_{ns}) à température de jonction constante ($T = 300\text{ K}$), d'un GPV constitué de 24 modules à 16 cellules en série (Annexe).

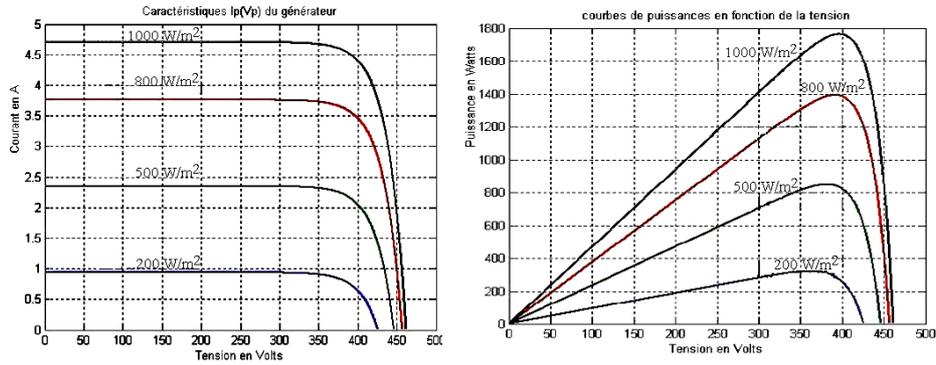


Fig. 2: Caractéristiques du GPV en fonction de l'éclairement

La différence de potentiel aux bornes de générateur photovoltaïque est égale à la différence de potentiel aux bornes du condensateur branché en parallèle avec le GPV, ce qui permet d'écrire:

$$\frac{dV_{pv}}{dt} = \frac{1}{C_{pv}} (I_{pv} - I_e) \quad (2)$$

3.2 Modèle du hacheur

Le hacheur permet, à partir d'une tension photovoltaïque, d'obtenir une tension continuellement variable de V_{co} à V_{eopt} (dévolteur) et même au delà de V_{eopt} (survolteur) avec l'avantage d'une commande rapide. La valeur moyenne de la tension de sortie du hacheur $\langle V_{sh} \rangle$ peut être exprimée en fonction de la valeur moyenne de la tension d'entrée du hacheur $\langle V_e \rangle$ et le rapport cyclique α par la relation suivante:

$$\begin{cases} \langle V_{sh} \rangle = \frac{1}{1-\alpha} \langle V_e \rangle \\ \langle I_{sh} \rangle = (1-\alpha) \langle I_e \rangle \end{cases} \quad (3)$$

3.3 Modèle de l'onduleur

L'onduleur de tension utilisé est commandé par une modulation de type vectorielle. Le principe de cette modulation repose en premier lieu sur le calcul du vecteur tension exprimé dans le repère de concordia \bar{V}_{ref} à appliquer aux bornes de la machine via l'algorithme de commande et en second lieu à synthétiser les instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs pour période de modulation constante. Le vecteur tension \bar{V}_{ref} délivré par un onduleur de tension triphasé dont l'état des interrupteurs est contrôlé par 3 grandeurs booléennes, Si ($i = a, b, c$) telle que: $S_j = 1$: interrupteur haut fermé et interrupteur bas ouvert

$S_j = 0$: interrupteur haut ouvert et interrupteur bas fermé.

En fonction de l'état des interrupteurs S_a, S_b, S_c , le rapport cyclique α et la tension photovoltaïque V_{pv} , le vecteur tension statorique est exprimé par:

$$V_s = \frac{2}{3} \frac{V_{pv}}{1-\alpha} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad \text{avec } a = e^{j 2\pi/3} \quad (4)$$

Les combinaisons des 3 grandeurs (S_a, S_b, S_c), permettent de générer 8 positions du vecteur \bar{V}_s dont deux correspondent au vecteur nul : (S_a, S_b, S_c) = (0 0 0) ou (1 1 1). Soient:

$$\begin{cases} \bar{V}_s(k) = \frac{2}{3} \frac{V_{pv}}{1-\alpha} e^{j(k-1)\pi/3} & k = 1 \text{ à } 6 \\ \bar{V}_s(k) = 0 & k = 7, 8 \end{cases} \quad (5)$$

Afin d'obtenir une fréquence minimale des interrupteurs de chaque bras d'onduleur, il est nécessaire d'arranger les séquences de fonctionnement des interrupteurs de façon que la phase de transition d'un état à l'autre est bien assuré seulement par le changement d'état des interrupteurs.

L'onduleur est considéré comme un organe qui exécute instantanément une commande caractérisée par une clé et une durée T_e de sorte que l'onde fondamentale de sortie peut être représentée par une valeur moyenne instantanée égale à \bar{V}_{sref} .

$$\bar{V}_{sref} = V_s^* e^{j\rho} \quad (6)$$

avec ρ désignant la phase du vecteur tension désirée.

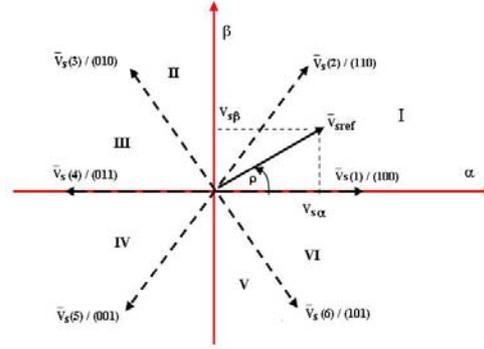


Fig. 3: Synthèse de la technique MLI vectorielle

Pour déterminer les instants de conduction des interrupteurs, nous supposons que la tension d'entrée de commande désirée $\bar{V}_{sref}(k)$ est constante durant un cycle de fonctionnement des interrupteurs T_e . Si pour un moment, \bar{V}_{sref} est localisée dans la région **I** par exemple, deux vecteurs adjacents différents à \bar{V}_{sref} notés $\bar{V}_s(1)$ et $\bar{V}_s(2)$ seront sélectionnés durant la moitié de la période d'échantillonnage. Soient T_1 , T_2 et T_0 les instants correspondants respectivement aux tensions $\bar{V}_s(1)$, $\bar{V}_s(2)$ et $\bar{V}_s(7)$ et/ou $\bar{V}_s(8)$.

La synthèse du vecteur tension \bar{V}_{sref} en utilisant la technique de modulation vectorielle nous impose de le reconstituer sur une période T_e comme suit:

$$\bar{V}_{ref} \times T_e = \bar{V}_s(1) \times T_1 + \bar{V}_s(2) \times T_2 \quad (7)$$

La réalisation d'une MLI régulière symétrique en tenant compte de la contrainte imposée sur la période T_e permet d'écrire la relation suivante:

$$T_e = 2(T_1 + T_2 + 2T_0) \quad (8)$$

En décomposant en parties réelle et imaginaire la relation (7), on trouve:

$$\begin{cases} T_1 = \sqrt{3} \frac{V_s^* (1-\alpha)}{V_{pv}} T_e \times \sin\left(\frac{\pi}{3} - \rho\right) \\ T_2 = \sqrt{3} \frac{V_s^* (1-\alpha)}{V_{pv}} T_e \times \sin(\rho) \end{cases} \quad (9)$$

Soit en généralisant

$$\begin{cases} T_k = \sqrt{3} \frac{V_s^* (1-\alpha)}{V_{pv}} T_e \times \sin\left(S\frac{\pi}{3} - \rho\right) \\ T_{k+1} = \sqrt{3} \frac{V_s^* (1-\alpha)}{V_{pv}} T_e \times \sin\left(\rho - (S-1)\frac{\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (10)$$

avec $\rho = \omega_s t + \rho_0 \text{ modulo } 2\pi$, modulo $(S-1)2\pi/3$; $r = T_1 / T_e$ est le rapport cyclique sur le vecteur V_k et S le numéro des secteurs.

3.4 Modèle de la machine asynchrone

La structure triphasée symétrique d'une machine asynchrone est représentée par son modèle diphasé équivalent de Park ou de concordia [6]. Le modèle électromagnétique transitoire de la

machine dans le repère de concordia est régi par le modèle faisant intervenir les composantes du vecteur flux rotorique et courant statorique comme variables d'état et les composantes du vecteur tension statorique comme variables de commande. Sa représentation matricielle est donnée par:

$$\frac{dX}{dt} = [A]X + [B]U \quad (11)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & a_2 & a_3 \\ 0 & a_1 & -a_3 & a_2 \\ a_4 & 0 & a_5 & a_6 \\ 0 & a_4 & -a_6 & -a_5 \end{bmatrix}, [X] = \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ \varphi_{r\alpha} \\ \varphi_{r\beta} \end{bmatrix}, [B] = \begin{bmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ et } [U] = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$[\dot{X}] = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & a_2 & a_3 \\ 0 & a_1 & -a_3 & a_2 \\ a_4 & 0 & a_5 & a_6 \\ 0 & a_4 & -a_6 & -a_5 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ \varphi_{r\alpha} \\ \varphi_{r\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{avec: } a_1 = \frac{R_s + \left(\frac{M}{l_r}\right)^2 R_r}{\sigma l_s}, \quad a_2 = \frac{M}{\sigma l_s l_r T_r}, \quad a_3 = \frac{M \omega}{\sigma l_s l_r},$$

$$a_4 = \frac{M}{T_r}, \quad a_5 = \frac{1}{T_r}, \quad a_6 = \omega_s - \omega \quad \text{et} \quad b_1 = \frac{1}{\sigma l_s}.$$

Pour générer le modèle complet de la machine, on ajoute au modèle électromagnétique, l'équation du mouvement suivante:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{P}{J} C_{em} - \frac{P}{J} C_r - \frac{f}{J} \omega \quad (12)$$

où C_r est le couple résistant imposé par la charge, f est le coefficient de frottement visqueux et C_{em} désigne le couple électromagnétique développé par la machine. Il s'exprime en fonction du flux rotorique et courant statorique par:

$$C_{em} = \frac{3}{2} P \frac{M}{l_r} (\varphi_{r\beta} i_{s\alpha} - \varphi_{r\alpha} i_{s\beta}) \quad (13)$$

3.5 Modèle de la pompe centrifuge

La pompe centrifuge applique un couple de charge proportionnel au carré de la vitesse de rotation du moteur.

$$C_r = K_{ch} \times \Omega^2 \quad (14)$$

avec K_{ch} désigne la constante de proportionnalité.

Connaissant les performances d'une pompe centrifuge (Q , H et P) pour la vitesse N , les lois de similitude permettent de déterminer les performances (Q' , H' et P') pour une vitesse N' en utilisant les relations suivantes:

$$Q' = Q \frac{N'}{N}, \quad H' = H \left(\frac{N'}{N}\right)^2, \quad P' = P \left(\frac{N'}{N}\right)^3 \quad (15)$$

avec Q et Q' , les débits correspondants respectivement à la vitesse N et N' ; H et H' les hauteurs manométriques totales correspondantes respectivement à la vitesse N et N' ; et P et P' sont les puissances du moteur correspondant respectivement à la vitesse N et N' .

4. STRATEGIES DE COMMANDE AVEC OPTIMISATION DE LA PUISSANCE FOURNIE PAR GPV

4.1 Localisation du maximum de puissance

La puissance crête fournie par le générateur est le produit de la tension V_{pv} avec le courant I_{pv} . Au point de puissance maximale, on a:

$$\frac{d(V_{pv} \cdot I_{pv})}{dI_{pv}} = 0 \quad (16)$$

En utilisant les lois de dérivation partielle, on obtient:

$$V_{pv} + I_{pv} \frac{dV_{pv}}{dI_{pv}} = 0 \quad (17)$$

d'après l'équation (1), on peut écrire:

$$\exp\left(A_t \times \frac{V_{pv}}{N_s}\right) = \frac{N_p \times I_{ph} - I_{pv} + N_p \times I_s}{N_p \times I_s} \quad (18)$$

Ce qui permet d'exprimer la tension aux bornes du générateur en fonction du courant débité.

$$V_{pv} = \frac{N_s}{A_t} \log\left(\frac{N_p \times I_{ph} - I_{pv} + N_p \times I_s}{N_p \times I_s}\right) \quad (19)$$

La dérivée de V_{pv} par rapport à I_{pv} est égale à:

$$\frac{dV_{pv}}{dI_{pv}} = \frac{N_s}{A_t} \frac{1}{N_p \times I_s} \frac{-N_p \times I_s}{N_p \times I_{ph} - I_{pv} + N_p \times I_s} = -\frac{N_s}{A_t} \frac{1}{N_p \times I_s - I_{pv} + N_p \times I_s} \quad (20)$$

Nous considérons \bar{I}_{opt} et \bar{V}_{opt} les valeurs optimales respectivement du courant et de la tension du générateur qui correspondent au point de puissance maximale. En combinant les relations (17), (19) et (20), nous obtenons:

$$\log\left(\frac{N_p \times I_{ph} - \bar{I}_{opt} + N_p \times I_s}{N_p \times I_s}\right) - \frac{\bar{I}_{opt}}{N_p \times I_{ph} - \bar{I}_{opt} + N_p \times I_s} = 0 \quad (21)$$

En résolvant (21), nous obtenons une relation linéaire qui peut être approximée par:

$$I_{pvopt} = 0.94 N_p \times I_{ph} \quad (22)$$

Ainsi la puissance maximale délivrée par le générateur photovoltaïque en tenant compte des deux expressions (19) et (22) est exprimée en fonction de l'éclairement par:

$$P_{max} = \frac{0.94 N_s \times N_p \times h}{A_t} \times E_{ns} \times \log\left(\frac{0.06 h \times E_{ns} + I_s}{I_s}\right) \quad (23)$$

où h est la constante de proportionnalité entre l'ensoleillement (E_{ns}) et le photo courant I_{ph} .

4.2 Optimisation par asservissement du rapport cyclique

Pour assurer le fonctionnement au point de puissance maximale, il faut ajuster le rapport cyclique α pour garantir à tout moment l'adaptation de la tension. Le rôle de l'algorithme MPPT

est de générer ce rapport cyclique en minimisant l'erreur entre la tension aux bornes du générateur photovoltaïque et la tension de référence.

Le schéma fonctionnel proposé pour réaliser le fonctionnement de l'algorithme MPPT est illustré par la figure 3.

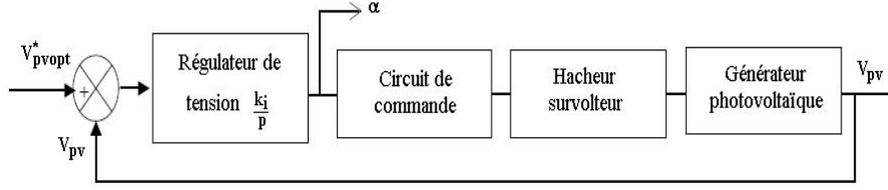


Fig. 4: Schéma bloc de l'ajustement du rapport cyclique

Le signal d'erreur sera intégré et transmis au circuit de commande qui va générer une onde d'impulsions caractérisée par un rapport cyclique proportionnel à la sortie de l'intégrateur. Cette onde sera appliquée à la base du transistor de puissance pour lui faire fonctionner dans la séquence voulue. Lorsque le signal d'erreur est différent de zéro, la sortie du circuit de commande est continuellement croissante ou décroissante en fonction du signe de l'erreur et par la suite le rapport cyclique évolue pour annuler le signal d'erreur. La variation de l'ensoleillement engendre le changement de la tension de référence pour créer un nouveau signal d'erreur permettant un nouveau rapport cyclique correspondant à un autre régime optimal. Le courant I_{pv}^* est égal au courant optimal donné (22), alors que la tension V_{pv}^* est égale à la tension fournie par le générateur. Ainsi, le rapport cyclique est décrit par:

$$\dot{\alpha} = k \cdot k_i (0.94 I_{ph} - I_{pv}) \quad (24)$$

5. STRATEGIE DE COMMANDE VECTORIELLE DU MOTEUR ASYNCHRONE

Cette stratégie de commande est assez développée dans la littérature durant les dernières décennies [7], elle reste cependant la plus répandue dans les applications industrielles caractérisées par de hautes performances. La particularité essentielle de cette technique de contrôle réside au niveau du découplage naturel existant entre les deux grandeurs flux rotorique et couple électromagnétique développé pour la machine asynchrone. Ceci est assuré via le contrôle des deux composantes i_{sd} et i_{sq} du vecteur courant statorique. Ainsi, le modèle destiné à la commande vectorielle du moteur asynchrone par orientation du flux rotorique est obtenu en considérant le courant statorique et le flux rotorique comme variables d'état. Ce modèle est décrit par le système d'équations suivant:

$$\begin{cases} \frac{dI_{sd}}{dt} = -\sigma I_s \left(R_s + \frac{M^2}{L_r \cdot \tau_r} \right) I_{sd} + \frac{M}{L_r \cdot \tau_r} \sigma I_s \cdot \phi_{rd} + \frac{M}{L_r} \sigma I_s \cdot \omega \cdot \phi_{rq} + \sigma I_s V_{sd} \\ \frac{dI_{sq}}{dt} = -\sigma I_s \left(R_s + \frac{M^2}{L_r \cdot \tau_r} \right) I_{sq} + \frac{M}{L_r \cdot \tau_r} \sigma I_s \cdot \phi_{rq} - \frac{M}{L_r} \sigma I_s \cdot \omega \cdot \phi_{rd} + \sigma I_s V_{sq} \\ \frac{d\phi_{rd}}{dt} = \frac{M}{\tau_r} \times I_{sd} - \frac{1}{\tau_r} \times \phi_{rd} + \omega \times \phi_{rq} \\ \frac{d\phi_{rq}}{dt} = \frac{M}{\tau_r} \times I_{sq} - \frac{1}{\tau_r} \times \phi_{rq} + \omega \times \phi_{rd} \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{p^2}{J} \times \frac{M}{L_r} (\phi_{rd} \times I_{sq} - \phi_{rq} \times I_{sd}) - \frac{p}{J} \times C_r - \frac{f}{J} \times \omega \end{cases} \quad (25)$$

En orientant le vecteur flux rotorique sur l'axe d, le modèle de commande devient:

$$\begin{cases} \frac{dI_{sd}}{dt} = -\sigma I_s \left(R_s + \frac{M^2}{L_r \cdot \tau_r} \right) I_{sd} + \omega_s \cdot I_{sq} + \frac{M}{L_r \cdot \tau_r} \sigma I_s \cdot \phi_r + \sigma I_s V_{sd} \\ \frac{dI_{sq}}{dt} = -\sigma I_s \left(R_s + \frac{M^2}{L_r \cdot \tau_r} \right) I_{sq} - \omega_s \cdot I_{sd} - \frac{M}{L_r} \sigma I_s \cdot \phi_r - \sigma I_s V_{sq} \\ \frac{d\phi_r}{dt} = \frac{M}{\tau_r} \times I_{sd} - \frac{1}{\tau_r} \times \phi_r \\ 0 = \frac{M}{\tau_r} \times I_{sq} - \omega_g \times \phi_r \end{cases} \quad (26)$$

Le couple électromagnétique est donné par:

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \frac{M}{L_r} \phi_{rd} I_{sq} \quad (27)$$

Nous pouvons constater que le niveau du flux rotorique dépend de la composante I_{sd} alors que la composante I_{sq} permet de contrôler le couple électromagnétique. Il faut signaler que ce modèle va servir aussi pour estimer les grandeurs rotoriques non accessibles et pour synthétiser les boucles de régulation.

5.1 Estimation du flux rotorique, de la pulsation de glissement et du couple

Le flux rotorique est estimé à base de la composante statorique I_{sd} , grandeur accessible à partir de la mesure des courants réels statoriques après de la transformation de Park.

$$\Phi_r = \frac{M}{1 + s \times \tau_r} I_{sd} \quad (28)$$

avec s l'opérateur de Laplace.

La pulsation de glissement est estimée à base de la composante statorique quadrature I_{sq} . Elle est exprimée par l'expression (29).

$$\omega_g = \frac{M}{\tau_r} \cdot \frac{1}{\Phi_r} \cdot I_{sq} \quad (29)$$

Le couple électromagnétique est estimé par l'expression (30):

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \frac{M}{L_r} \Phi_r I_{sq} \quad (30)$$

5.2 Synthèse des boucles de régulation

Les régulateurs utilisés sont de type PI dont les fonctions de transfert sont données par:

$$R(s) = \frac{K}{\tau \cdot s} \cdot (1 + \tau \cdot s) \quad (31)$$

Pour la synthèse des paramètres du régulateur, nous avons adopté la méthode de compensation des pôles par les zéros [8].

5.2.1 Boucle de régulation du flux

La sortie du régulateur de flux permet de générer le courant statorique direct de référence I_{sd}^* et ce en utilisant bien entendu la relation (27). Le schéma fonctionnel de la boucle de régulation du flux est donné par la figure 5.

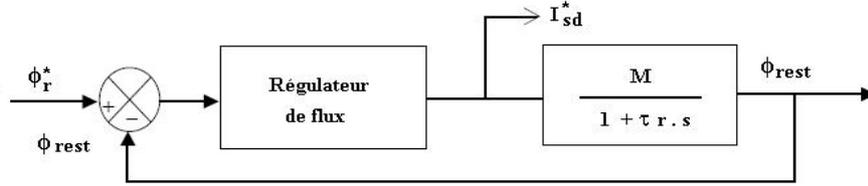


Fig. 5: Schéma fonctionnel de la boucle de régulation du flux rotorique

5.2.2 Boucle de régulation de vitesse

La pompe exerce un couple de charge proportionnel au carré de la vitesse. Le modèle de l'équation mécanique est non linéaire. L'élaboration de la fonction de transfert liant les variations du couple électromagnétique à la vitesse de rotation demande la linéarisation de l'équation mécanique autour d'un point de fonctionnement statique. La fonction de transfert $H(s)$ est alors donnée par:

$$H(s) = \frac{\Delta \Omega}{\Delta C_{em}} = \frac{1}{2 \cdot k_{ch} \cdot \Omega_0} \cdot \frac{1}{1 + \frac{J}{2 \cdot k_{ch} \cdot \Omega_0} \cdot s} \quad (32)$$

Les paramètres du régulateur sont donnés par:

$$\tau_v = \frac{J}{2 \cdot k_{ch} \cdot \Omega_0} \quad \text{et} \quad K_v = 5.5 \times (2 \cdot k_{ch} \cdot \Omega_0) \quad (33)$$

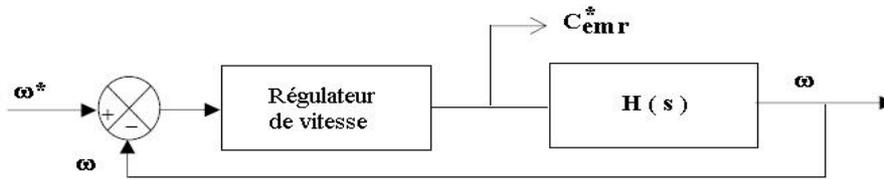


Fig. 6: Schéma fonctionnel de la boucle de régulation de vitesse

5.2.3 Boucles de régulation des courants

Les schémas fonctionnels des boucles de régulation des courants sont donnés par les figures 7 et 8. Les fonctions de transfert $H_d(s)$ et $H_q(s)$ sont données par les expressions (34) et (35).

$$H_d(s) = \frac{I_{ds}(s)}{V_{dsl}(s)} = \frac{1}{1 + \frac{k_s}{\left(R_s + \frac{M^2}{L_r \times \tau_r} \right)} \times s} \quad (34)$$

$$H_q(s) = \frac{I_{qs}(s)}{V_{qs}(s)} = \frac{1}{1 + \frac{k_s}{\left(R_s + \frac{M^2}{L_r \times \tau_r} \right)} \times s} \quad (35)$$

Les paramètres des régulateurs sont alors donnés par:

$$\tau_d = \frac{k_s}{\left(R_s + \frac{M^2}{L_r \times \tau_r}\right)} = \tau_q \quad \text{et} \quad K_d = 1,5 \times \left(R_s + \frac{M^2}{L_r \times \tau_r}\right) = K_q \quad (36)$$

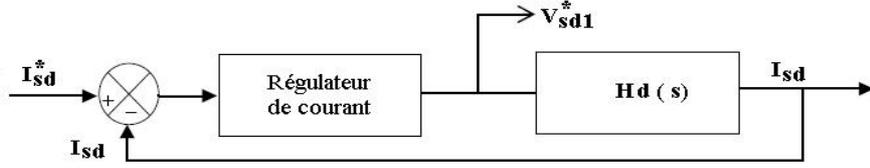


Fig. 7: Schéma fonctionnel de la boucle de régulation de I_{sd}

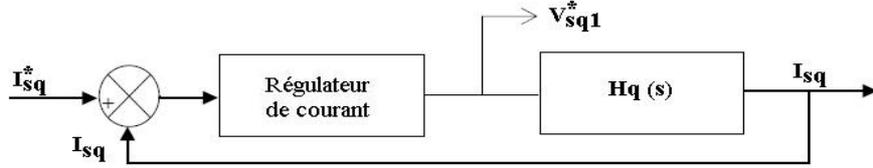


Fig. 8: Schéma fonctionnel de la boucle de régulation de I_{sq}

5.4 Calcul de la vitesse de consigne correspondante au fonctionnement optimal du GPV

La commande en vitesse du moteur asynchrone entraînant la pompe centrifuge permet de contrôler son débit. Bien entendu, la boucle de régulation de la vitesse nécessite la connaissance de la vitesse de référence. Il est alors impératif de déterminer une relation explicite de la vitesse de consigne en fonction de l'ensoleillement. Pour ce faire, on considère qu'en régime optimal, le bilan de puissance de la machine asynchrone est donné par:

$$P_a - \frac{3}{2} \cdot R_s \cdot I_s^2 = P_t \quad (37)$$

et ce en négligeant les pertes fer. P_{max} représente la puissance absorbée éventuellement fournie par le générateur photovoltaïque et P_t est la puissance transmise au rotor. Cette dernière s'exprime en fonction du couple électromagnétique et de la vitesse de synchronisme par la relation suivante.

$$P_t = C_{em} \times \Omega_s = C_{em} \times \frac{\omega_s}{p} \quad (38)$$

D'autre part, nous avons:

$$C_{em} = k_{ch} \times \Omega^2 = \frac{k_{ch}}{p^2} \times \omega^2 \quad (39)$$

donc la relation (38) devient:

$$P_t = \frac{k_{ch}}{p^3} \times (\omega_g + \omega) \times \omega^2 \quad (40)$$

De plus, le module du courant statorique est exprimé en fonction des courants statoriques direct et quadrature par:

$$I_s = \sqrt{I_{ds}^2 + I_{qs}^2} \quad (41)$$

En se référant aux équations (29) et (39), le courant statorique quadrature est exprimé par:

$$I_{sq} = \frac{2 \cdot L_r \cdot k_{ch}}{3 \cdot p^3 \cdot M \cdot \Phi_r} \times \omega^2 \quad (42)$$

La composante directe du courant statorique est donnée par la relation suivante:

$$I_{sd} = \frac{\Phi_r}{M} \quad (43)$$

En remplaçant I_{sd} par son expression (41), la relation (28) de la pulsation de glissement devient:

$$\omega_g = \frac{2 \cdot R_r \cdot k_{ch}}{3 \cdot p^3 \cdot \Phi_r^2} \times \omega^2 \quad (44)$$

En utilisant les relations (41), (42), (43) et (44), la relation (37) devient:

$$P_a - \frac{3}{2} \cdot R_s \cdot \left[\left(\frac{\Phi_r}{M} \right)^2 + \frac{4}{9} \cdot \left(\frac{L_r \cdot k_{ch}}{p^3 \cdot M \cdot \Phi_r} \right)^2 \right] \cdot \omega^4 = \frac{2}{3} \cdot R_r \cdot \left(\frac{k_{ch}}{p^3 \cdot \Phi_r} \right)^2 \cdot \omega^4 + \frac{k_{ch}}{p^3} \cdot \omega^3 \quad (45)$$

Après arrangement, la relation (45) se traduit par un polynôme d'ordre 4 défini comme suit:

$$a \cdot \omega^4 + b \cdot \omega^3 + c = 0 \quad (46)$$

Les coefficients a , b et c sont donnés par les relations suivantes:

$$a = \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{k_{ch}}{p^3 \cdot \Phi_r} \right)^2 \cdot \left[R_r + R_s \cdot \left(\frac{L_r}{M} \right)^2 \right]; \quad b = \frac{k_{ch}}{p^3};$$

$$c = \frac{3}{2} \cdot R_s \cdot \left(\frac{\Phi_r}{M} \right)^2 - \frac{0.94 \cdot N_s \cdot N_p}{A_t} \cdot E_{ns} \cdot \text{Log} \left(\frac{0.06 \cdot h \cdot E_{ns} + I_s}{I_s} \right) \quad (47)$$

Les racines du polynôme (46), donnent la vitesse de consigne correspondante au fonctionnement optimal du GPV. Par ailleurs, cette vitesse dépend de l'ensoleillement. La figure 9 donne la variation de la vitesse de consigne optimale en fonction de l'éclairement.

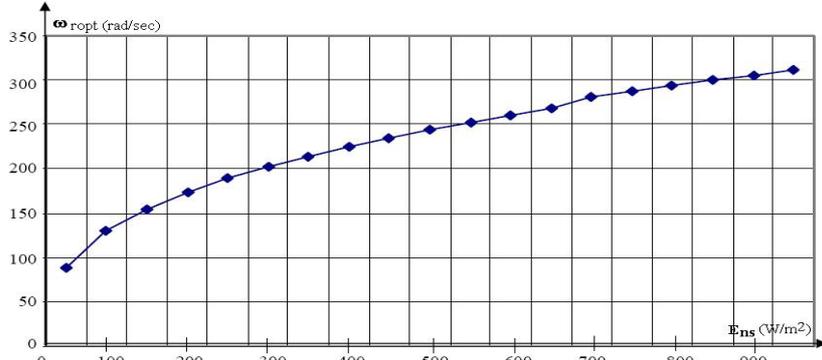


Fig. 9: Variation de la vitesse de consigne optimale en fonction de l'ensoleillement

6. RESULTATS DE SIMULATION

La machine simulée est une machine de laboratoire de 1.5 kW, dont les paramètres sont donnés en annexe. Pour étudier les performances du système au fonctionnement optimal du GPV,

nous appliquons au premier lieu un ensoleillement de 800 W/m^2 , soit alors une vitesse de consigne optimale égale à 287.7 rad/sec . Nous présentons ainsi, les résultats de simulation sans commande MPPT. Puis, nous appliquons un scénario d'ensoleillement réparti sur quatre intervalles de temps définis comme suit:

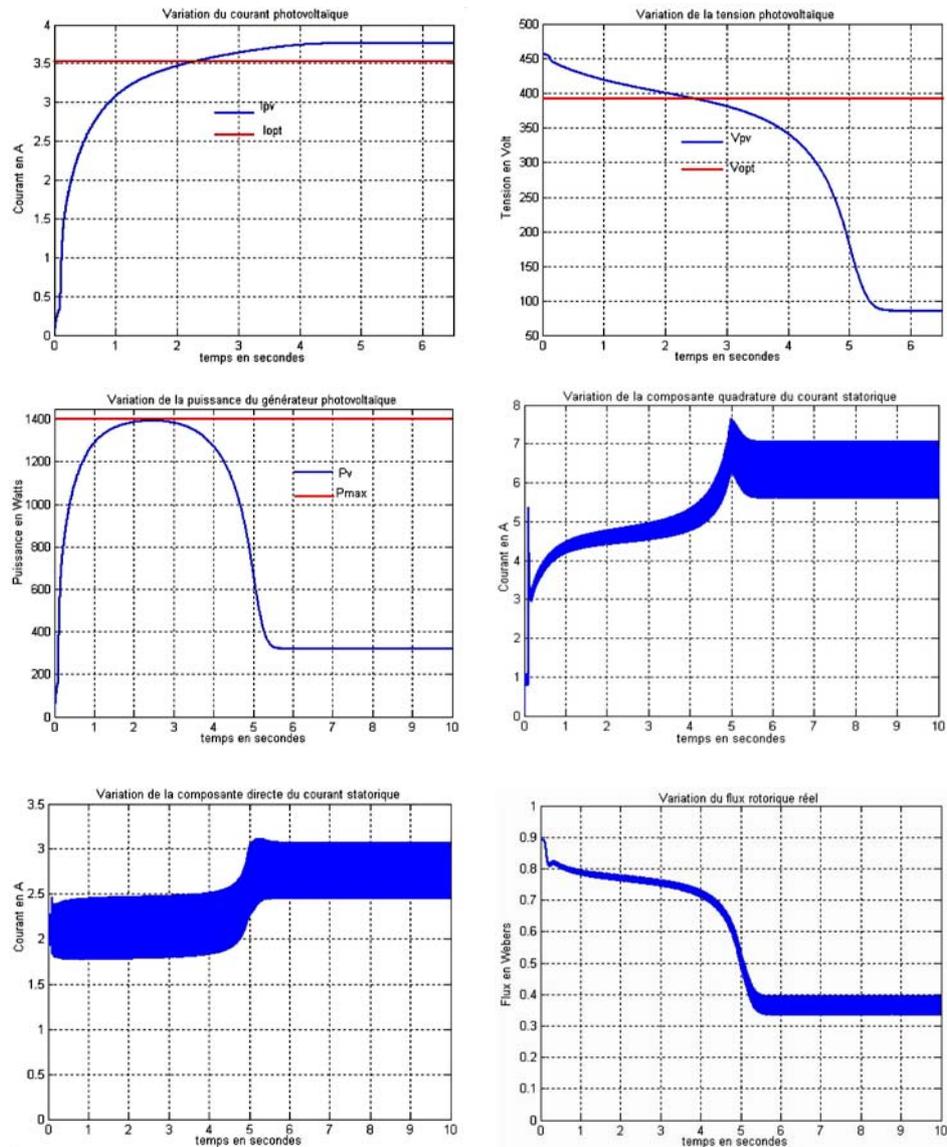
De 0 à 0.1 seconde, on applique une valeur d'ensoleillement égale à 150 W/m^2 .

De 0.1 à 1.5 secondes, on applique une valeur d'ensoleillement égale à 500 W/m^2 .

De 1.5 à 2.5 secondes, on applique une valeur d'ensoleillement égale à 900 W/m^2 .

De 2.5 à 4.5 secondes, on applique une valeur d'ensoleillement égale à 700 W/m^2 .

La figure 10, illustre les résultats de simulation pour le premier cas, alors que la figure 11 présente les résultats de simulation pour le scénario appliqué en utilisant la commande MPPT.



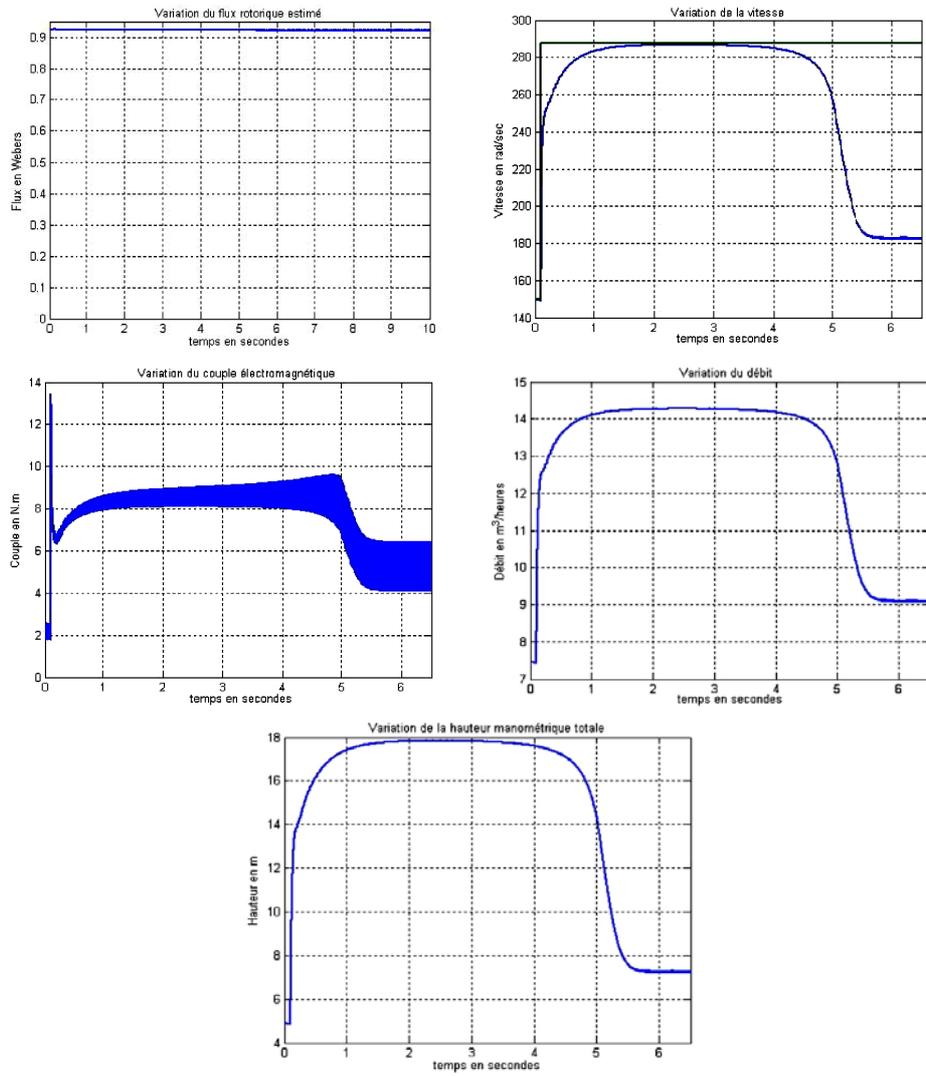
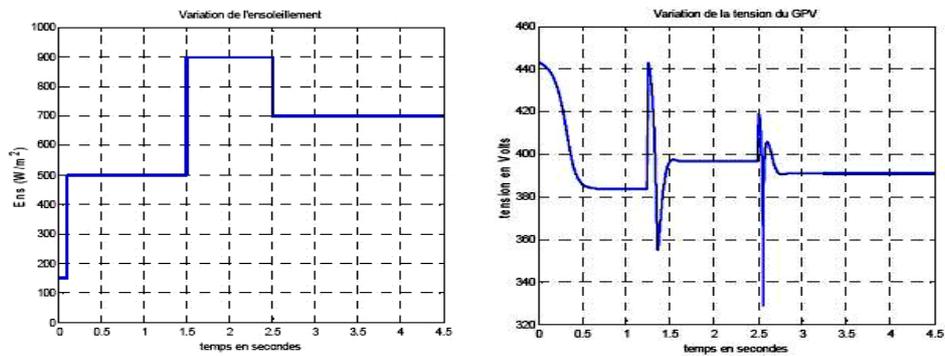
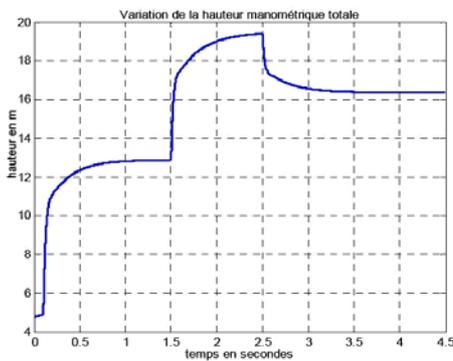
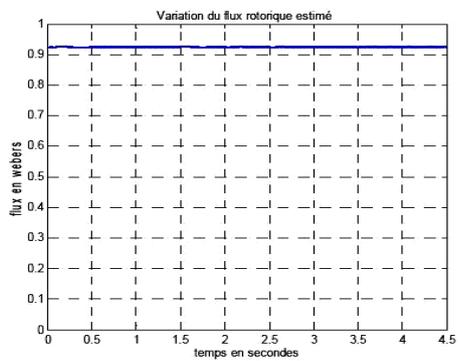
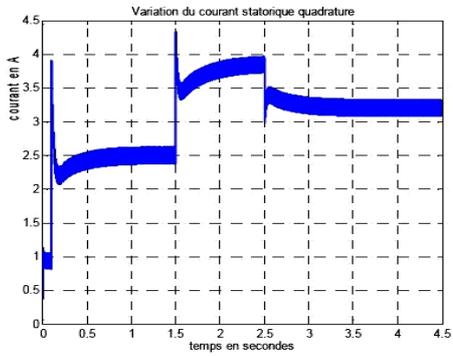
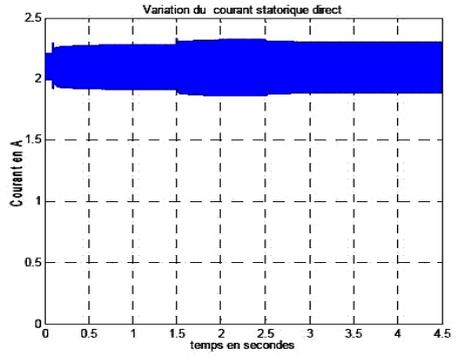
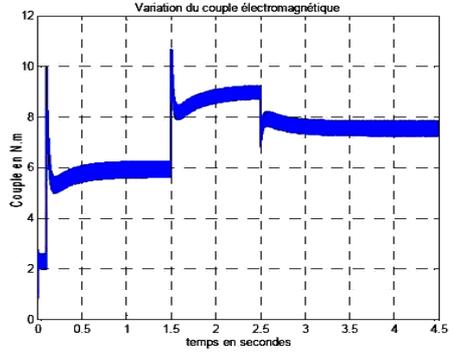
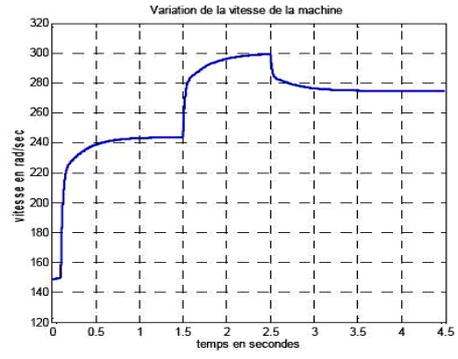
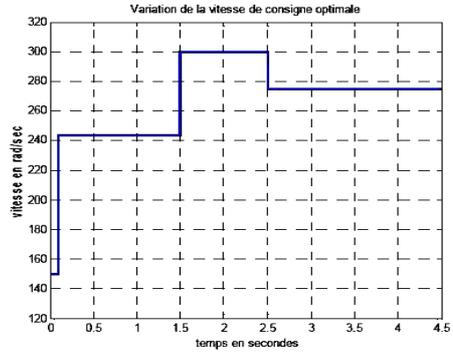
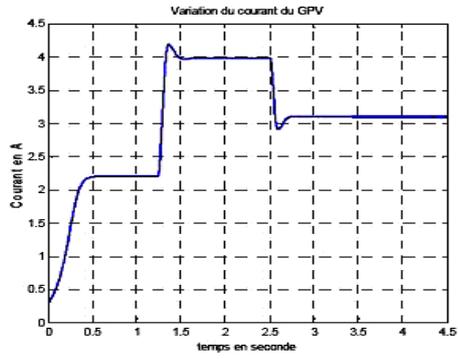


Fig. 10: Résultats de simulation pour une consigne de vitesse égale à 287.7 rad/sec sous un ensoleillement de 800 W/m^2 sans MPPT





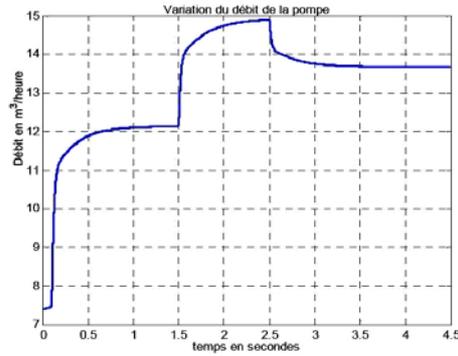


Fig. 11: Résultats de simulation pour un scénario d'ensoleillement avec la commande MPPT

La figure 10 montre que le courant et la tension du GPV ne convergent pas vers leurs valeurs optimales. La puissance débitée par le générateur atteint sa valeur maximale pendant les premiers instants, puis elle diminue vers une valeur très inférieure. Ce qui explique que sans commande MPPT, le générateur ne peut pas fonctionner dans son régime optimal. Le changement des performances du générateur influe alors sur les performances de la machine asynchrone et par la suite sur les performances de la pompe. Ainsi, le flux rotorique est dégradé et la vitesse n'a pas atteint sa consigne. Le débit et la hauteur manométrique totale de la pompe n'atteignent donc pas leurs valeurs désirées.

La figure 11 présente le scénario de l'ensoleillement appliqué sur le GPV. Le changement de l'éclairement influe sur les caractéristiques de la machine asynchrone et par la suite sur les performances de la pompe. Le courant et la tension du GPV convergent vers leurs valeurs optimales montrant ainsi l'efficacité de l'adaptateur MPPT. A chaque fois que l'ensoleillement change, la vitesse de consigne suit sa valeur optimale.

La vitesse de la machine suit sa consigne sans dépassement montrant l'efficacité de la boucle de régulation de vitesse. Ce qui permet par la suite d'atteindre le débit et la hauteur manométrique totale désirés. Le flux rotorique est maintenu constant au voisinage de sa valeur de consigne montrant l'efficacité de la boucle de régulation de flux.

Les résultats de simulation montrent ainsi l'efficacité de l'adaptateur MPPT dans l'extraction de la puissance maximale, afin d'exploiter la vitesse optimale en vue d'obtenir le débit maximal disponible.

7. CONCLUSION

Dans ce papier, nous avons étudié une structure de commande utilisant à la fois le concept de la méthode du flux orienté pour la machine asynchrone et le fonctionnement en MPPT pour l'adaptateur de puissance. La stratégie de commande vectorielle par orientation du flux rotorique a servi ici comme une solution pour contrôler le débit et la hauteur manométrique totale de la station de pompage. La commande avec l'adaptateur MPPT permet d'optimiser la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque en fonction de l'ensoleillement. Ce qui a permis de faire fonctionner la station au point de fonctionnement optimal.

Comme perspective à ce travail, nous comptons développer dans les travaux futurs des lois de commande à base des techniques intelligentes et ceux-ci en vue de surmonter les problèmes de non linéarité du modèle imposé par la source PV et la charge. Par ailleurs, l'amélioration du bilan énergétique pourrait être examiné en considérant le niveau du flux rotorique comme un degré supplémentaire dans la procédure d'optimisation. Dans le même cadre, nous souhaitons investiguer au niveau de l'implantation des lois de commande envisagées, en utilisant la carte DSP MCK 240 ou la carte Dspace 1104.

REFERENCES

- [1] Document, 'Etude Stratégique sur le Développement des Energies Renouvelables en Tunisie', Agence Nationale des Energies Renouvelables, Novembre 2003.
- [2] M.N Eskander and A.M. Zaki, 'A Maximum Efficiency-Photovoltaic-Induction Motor Pump System', Renewable Energy, Vol. 10, N°1, pp. 53 - 60, 1997.
- [3] M.H. Shin, D.S. Hyum and S.Y. Chose, 'An Improved Stator Flux Estimation for Speed Sensorless Stator Flux Orientation Control of Induction Motors', On Power Electronics, Vol. 15, N°2, pp. 312 – 318, 2000.
- [4] P. Vas, 'Vector Control of AC Machines', Oxford, Clarendon Press, 1990.
- [5] K. Akatsu and A. Kawamura, 'Online Rotor Resistance Estimation using the Transient State under the Speed Sensorless Control of Induction Motor', On Power Electronics, Vol. 15, N°3, pp. 553 – 560, 2000.
- [6] T. Lipo, 'A dq Model for Six Phase Induction Machines', In Proceedings of ICEM'80, pp. 680 – 867, Athens, Greece, September 1980.
- [7] M.F. Mimouni, R. Dhifaoui, J.F. Brudny and D. Roger, 'Field-Oriented Control of Double-Star Induction Machine', International Journal System Analysis Modelling Simulation, 'SAMS', Vol. 37, pp. 181 – 202, 2000.
- [8] S.M. Alghuwainem, 'Performance Optimisation of Photovoltaic Generator', First Maghrebian Congress of Electrical Engineering, Tunisia, pp. 40 – 45, 1994.
- [9] T. Martiré, 'Système Photovoltaïque Modulaire pour Pompage sur Sites Profonds', Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, 2001.

ANNEXE

Paramètres des composants du système étudié

Paramètres du moteur

Tension nominale	220 / 380 V
Courant statorique nominal	3.2 A
Puissance nominale	1.5 kW
Couple nominal	12 Nm
Vitesse nominale	1435 tr/mn
Nombre de pôles	4
Résistance du stator	5.72 Ω
Résistance du rotor	4.2 Ω
Inductance du stator	0.462 H
Inductance du rotor	0.462 H
Mutuelle inductance	0.44 H
Moment d'inertie	0.0049 kg.m ²

Paramètres du générateur photovoltaïque

Valeur de la capacité	0.01 μ FV
Température T_a	300 K
Courant de saturation I_s	50 10^{-9} A
Nombre de branches parallèle (N_p)	1
Nombre de branches série (N_s)	36 x 24
Constante h	4.7 10^{-3}

Performances de la pompe à une vitesse de 2900 tr/mn

Débit maximal	30 m ³ /h
Relevage maximal	80 m
Puissance moteur	14 kW