

CONTRÔLE VECTORIEL-LOGIQUE FLOUE POUR LE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE

CHAFIAA SERIR, DJAMILA REKIOUA

Mots-clés : Commande vectorielle, Pompage photovoltaïque, Hacheur, Contrôleur logique flou, Groupe motopompe asynchrone.

Ce papier traite la modélisation et la commande vectorielle (CV) d'un système de pompage photovoltaïque (PV) au fil de soleil. L'objectif principal de cette contribution est de montrer l'importance de l'application de la CV à un système fortement non linéaire. Le système est constitué d'une pompe centrifuge entraînée par un moteur asynchrone (MAS) triphasé à rotor à cage d'écureuil, lui-même alimenté en tension grâce à un onduleur de tension triphasé à modulation des largeurs des impulsions (MLI) sinus triangle. Afin d'optimiser leur rendement énergétique quelque soient les conditions météorologiques, nous avons intercalé entre l'onduleur et le générateur photovoltaïque (GPV) un adaptateur de point de puissance maximale connu sous le nom de maximum power point tracking (MPPT). Parmi les diverses techniques des MPPT présentées dans la littérature, nous avons adopté le contrôleur par la logique flou (CLF) et la méthode de perturbation et d'observation (P&O).

1. INTRODUCTION

L'énergie solaire photovoltaïque est de plus en plus utilisée pour opérer diverses applications terrestres comme l'éclairage, les télécommunications, la réfrigération et le pompage [1]. L'étude d'une station de pompage photovoltaïque fait appel à une contribution avant de prendre le chemin à la mise en marche de point de vue systématique et même stratégique, qui est liée d'une manière homogène à la variation d'ensoleillement, dont elle n'est pas commandable [2]. Par ailleurs en faisant appel aussi à une maîtrise de variables technico-économiques, tel que, la gestion, l'optimisation d'énergie et dimensionnement rigoureux, tout ça nous oriente dans la transperçassions dans les démarches afin d'avoir un système bien adapté à notre cahier de charges bien déterminé.

Le système photovoltaïque de pompage le plus courant, selon l'état de l'art actuel, est au fil de soleil tel que le stockage s'effectue indirectement sous forme d'eau dans un réservoir. Cette solution est plus économique et environnemental en raison de l'élimination de la batterie et son circuit de charge [3].

L'adaptateur MPPT est la clé des succès des applications PV [4]. Le point de puissance maximale du système de pompage PV dépend de la charge, l'éclairement et la température [5]. A cet effet, de nombreuses techniques sont présentées dans la littérature. Dans notre papier, nous avons utilisé le contrôleur basé sur la logique flou (CLF) et la méthode de perturbation et d'observation (P&O).

La MAS occupe une place très importante dans l'industrie et les transports. Elle est appréciée pour sa robustesse, son faible coût d'achat et d'entretien. Cependant, sa commande est plus difficile à réaliser par rapport aux machines à courant continu, d'autant plus que son association avec un GPV présente des difficultés majeures à cause de la complexité du modèle globale obtenu. En effet, l'équation caractéristique du GPV est non linéaire s'ajoute au modèle complexe de la MAS pour former un modèle global fortement non linéaire, ce qui complique sa commande.

De nombreuses stratégies de contrôle ont été développées pour en faire une machine facile à commander.

Dans ce papier, nous montrons l'importance de l'application de la CV pour simplifier le modèle de la machine asynchrone, cette commande développée assure la convergence rapide de la vitesse du rotor et du flux rotorique à leurs références.

2. PRÉSENTATION DE LA STRUCTURE DU SYSTÈME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE

La structure étudiée est constituée d'un générateur photovoltaïque, d'un convertisseur dc/dc fonctionnant en MPPT, d'un onduleur de tension à MLI et d'un moteur asynchrone de 1.5 kW de puissance couplé à une pompe centrifuge (Fig. 1).

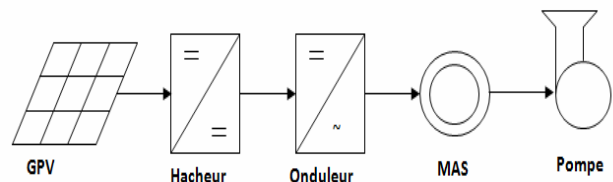


Fig. 1 –Structure de la station de pompage PV.

3. MODÉLISATION ET SIMULATION DU GVP

Ce modèle est caractérisé par une résolution très simple, l'expression du courant est donnée par l'équation (1) :

$$I_{pv} = I_{sc} \left[1 - C_1 \left(e^{\frac{V_{pv}}{C_2 V_{oc}}} - 1 \right) \right] + \Delta I_{pv}, \quad (1)$$

avec

$$C_1 = \left[1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right] e^{-\frac{V_m}{C_2 V_{oc}}} \quad \text{et} \quad C_2 = \frac{\left(\frac{V_m}{V_{oc}} \right) - 1}{\ln \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right)},$$

$$\Delta I_{pv} = \alpha_{sc} \left(\frac{E}{E_{ref}} \right) (T_c - T_{cref}) + \left(\frac{E}{E_{ref}} - 1 \right) I_{sc}, \quad (2)$$

$$\Delta V_{pv} = \beta_{oc} (T_c - T_{cref}) + R_s \Delta I_{pv}, \quad (3)$$

avec I_{pv} le courant du générateur photovoltaïque, V_{pv} la tension du générateur photovoltaïque.

Table 1

Caractéristiques du GPV SHARP NT175E1

Paramètres électriques du panneau dans les STC : l'éclairement $E_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$, la température de la cellule $T_{cref} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	
Puissance max du panneau P_m	175 W
Courant au PPM I_m	4.95 A
Tension au PPM V_m	35.4 V
Courant de court-circuit I_{sc}	5.4 A
Tension en circuit ouvert V_{oc}	44.4 V
Coefficient d'incrémentement du courant α_{sc}	0.053 mA/ $^\circ\text{C}$
Coefficient d'incrémentement de la tension β_{oc}	-156 mV/ $^\circ\text{C}$

Figure 2 présente la caractéristique ($P_{pv}-V_{pv}$), pour diverses valeurs d'éclairement E à température de jonction constante ($T_{cref} = 25^\circ\text{C}$), d'un GPV.

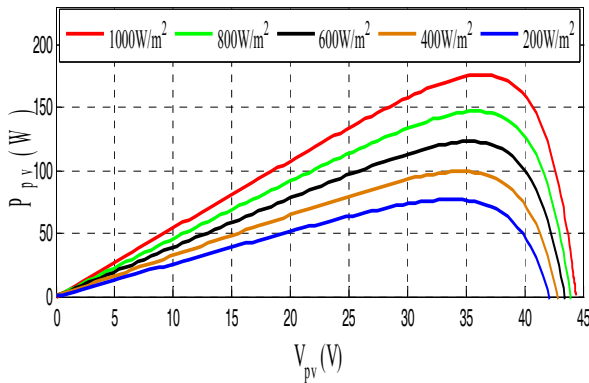
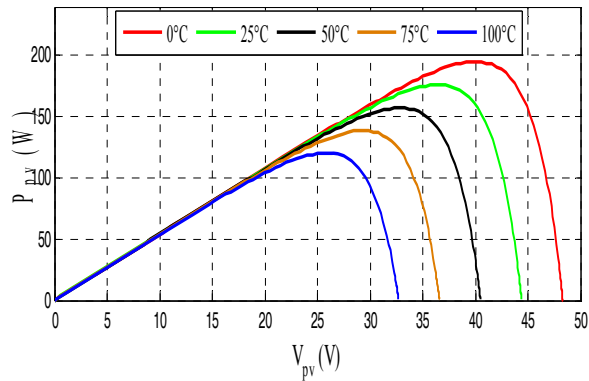
Fig. 2 – Influence de l'éclairement (W/m^2) sur la caractéristique $P_{pv}-V_{pv}$.

Figure 3 présente la caractéristique ($P_{pv}-V_{pv}$), pour diverses valeurs de la température de jonction (T_c) à éclairement constant ($E_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$), d'un GPV.

Fig. 3 – Influence de la température ($^\circ\text{C}$) sur la caractéristique $P_{pv}-V_{pv}$.

4. CÔNTROLEUR MPPT BASÉ SUR LA LOGIQUE FLOUE [6, 7, 8]

La logique floue a fait son apparition en 1965 avec les travaux de L. Zadeh, ce dernier a formalisé la représentation et le traitement de connaissances imprécises ou approximatives afin de traiter des systèmes de grande complexité ou mal connu. L'objectif de la commande est d'extraire et de poursuivre la puissance maximale d'un générateur photovoltaïque pour différents ensoleillements et différentes valeurs de température. Elle est constituée de trois étapes, à savoir fuzzification, méthode d'inférence et défuzzification.

4.1. FUZZIFICATION

Pendant la fuzzification, les variables numériques d'entrée sont converties en variables linguistiques en se basant sur les fonctions d'appartenance (Fig. 4).

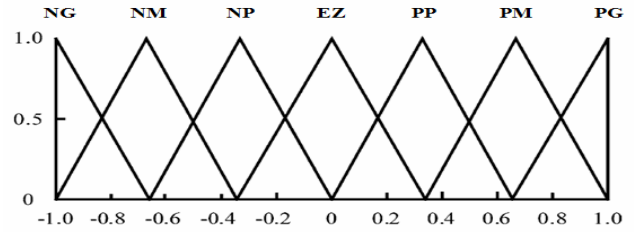


Fig. 4 – Fonction d'appartenance des variables linguistiques des entrées et de sortie.

Dans ce cas, nous employons sept classes qui sont notées comme suit: NG pour négatif grand, NM pour négatif moyen, NP pour négatif petit, EZ pour environ zéro, PG pour positif grand, PM pour positif moyen et PP pour positif petit.

Les deux variables d'entrée de FLC sont l'erreur e et la variation de l'erreur Δe .

$$e(k) = \frac{P_{pv}(k+1) - P_{pv}(k)}{V_{pv}(k+1) - V_{pv}(k)} \quad (4)$$

$$\Delta e(k) = e(k+1) - e(k) \quad (5)$$

4.2. INFÉRENCE FLOUE

Les règles floues permettent de déterminer le signal de sortie du régulateur en fonction des signaux d'entrée, en utilisant la table des règles suivante.

Table 2

Table des règles de décision à sept classes

$e \backslash \Delta e$	NG	NM	NP	EZ	PP	PM	PG
NG	NG	NG	NG	NG	NM	NP	EZ
NM	NG	NG	NG	NM	NP	EZ	PP
NP	NG	NG	NM	NP	EZ	PP	PM
EZ	NG	NM	NP	EZ	PP	PM	PG
PP	NM	NP	EZ	PP	PM	PG	PG
PM	NP	EZ	PP	PM	PG	PG	PG
PG	EZ	PP	PM	PG	PG	PG	PG

4.3. DÉFUZZIFICATION

La défuzzification utilise la méthode du centre de la gravité pour calculer la sortie de CLF qui est le changement du rapport cyclique.

$$d\alpha = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(\alpha_j) \alpha_j}{\sum_{j=1}^n \mu(\alpha_j)} \quad (6)$$

Selon les résultats de la simulation dans des conditions standards, on peut voir que le contrôleur par la logique floue (CLF) est plus précis et plus stable (Fig. 5, Zoom) et donne une réponse plus rapide par rapport à la méthode de perturbation et d'observation (P&O).

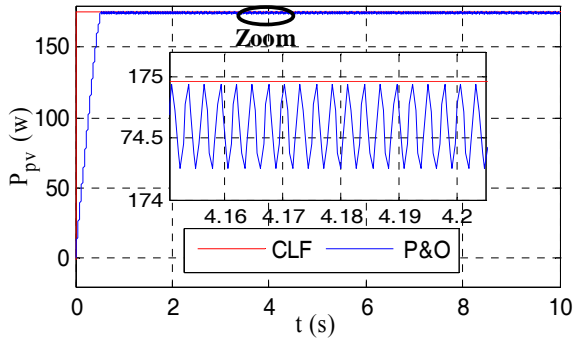


Fig. 5 – Allure de la puissance (1000 W/m² et 25°C).

5. APPLICATION DE LA CV [9–11]

La théorie de cette commande permet d’assimiler la machine asynchrone (MAS) à une machine à courant continu à excitation séparée. Figure 6 illustre l’équivalence entre l’expression du couple que l’on réalise avec la commande classique d’une machine à courant continu et la commande vectorielle réalisée sur une machine à induction.

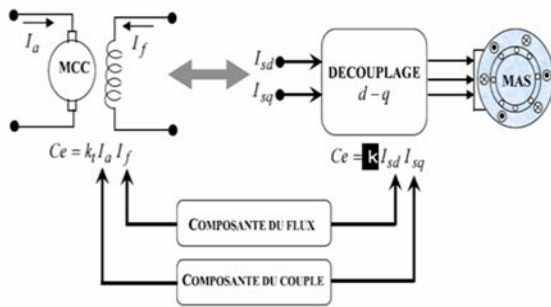


Fig. 6 – Principe de découplage.

Nous appliquons la commande vectorielle par l’orientation du flux rotorique à la machine asynchrone :

Le flux rotorique direct $\phi_{rd} = \phi_r$ et le flux rotorique quadrature $\phi_{rq} = 0$.

L’expression du couple électromagnétique est donnée par :

$$C_{em} = p \frac{M}{L} \phi_r i_{sq}. \tag{7}$$

L’expression du flux rotorique (eq. 8) est donnée en fonction du courant statorique directe (i_{sd}), inductance mutuelle maximale entre une phase de stator et une phase de rotor (M) et de la constante du temps τ_r

$$\phi_r = \frac{M i_{sd}}{1 + \tau_r s}. \tag{8}$$

La vitesse rotorique est estimée par l’équation suivante:

$$\omega_r = \frac{M i_{sq}}{\tau_r \phi_r}. \tag{9}$$

Alors, la vitesse ω_s est donnée par l’équation (eq.10)

$$\omega_s = \frac{M i_{sq}}{\tau_r \phi_r} + p \Omega. \tag{10}$$

L’expression de la vitesse de référence est donnée par l’équation suivante:

$$\Omega_{ref} = \sqrt[3]{\frac{P_{pv}}{k}}. \tag{11}$$

Figure 7 représente le système global étudié.

Table 3

Paramètres de la machine asynchrone

Puissance nominale P_n	1.5 kW
Courant nominal i_{sn}	5.2/3 A
Tension V/U	220/380 V
La fréquence f	50 Hz
Nombre de paire de pôle p	2
La vitesse de rotation nominale N_n	$N = 1480$ tr/mn

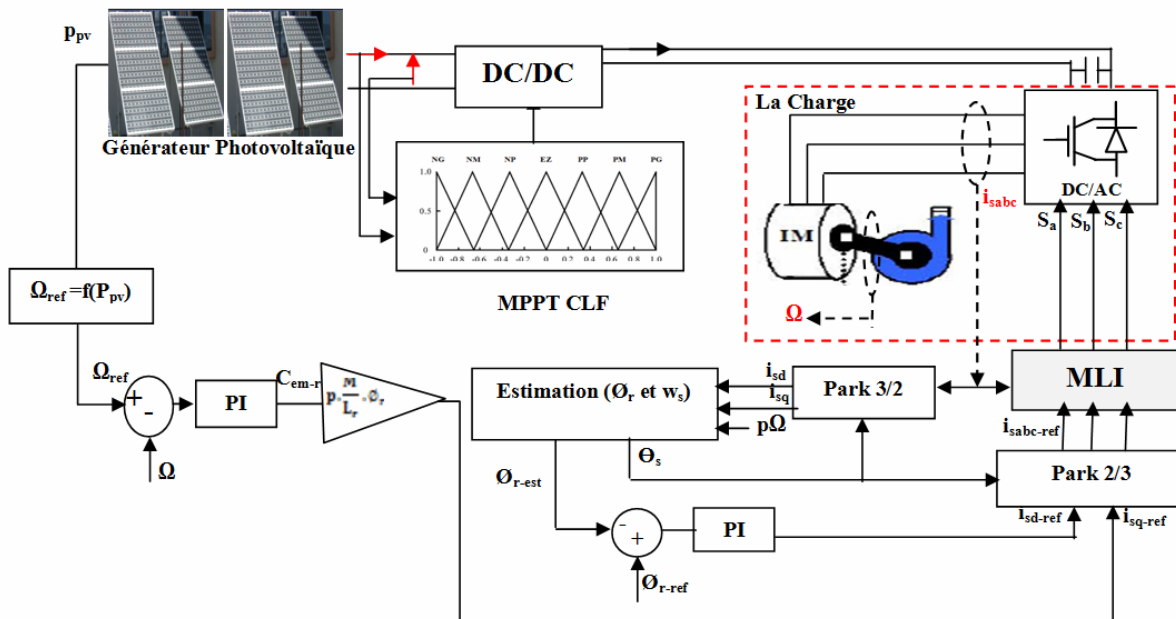


Fig. 7 – Schéma global de système de pompage photovoltaïque.

6. RÉSULTATS DE SIMULATION

Nous avons simulé le débit du système de pompage photovoltaïque pour un débit volumique désiré $q_{v(désiré)} = 23 \text{ m}^3/\text{h}$ sous matlab-simulink. Dans la première partie, nous avons appliqué la méthode (P&O) et le contrôleur (CLF) pour optimiser le GPV avec la CV pour commander le moteur asynchrone. Figures 8 et 9 représentent respectivement le profil de l'ensoleillement et celui de la température.

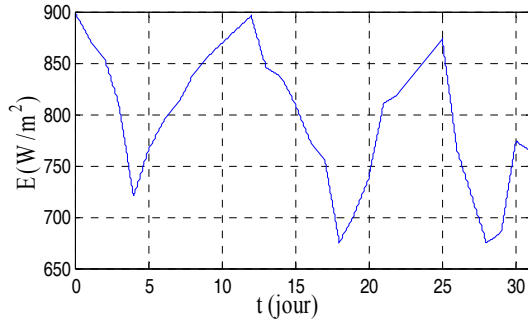


Fig. 8 – Profil d'ensoleillement.

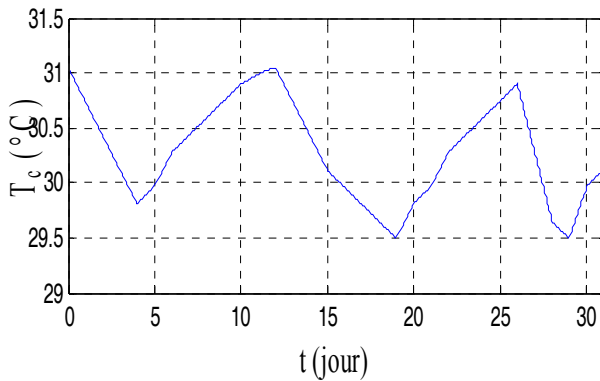


Fig. 9 – Profil de la température.

D'après Fig. 10 on voit clairement que le débit est amélioré par l'application du contrôleur logique flou, il nous a permis aussi de gagner plus de 7 heures de temps par rapport à la commande classique.

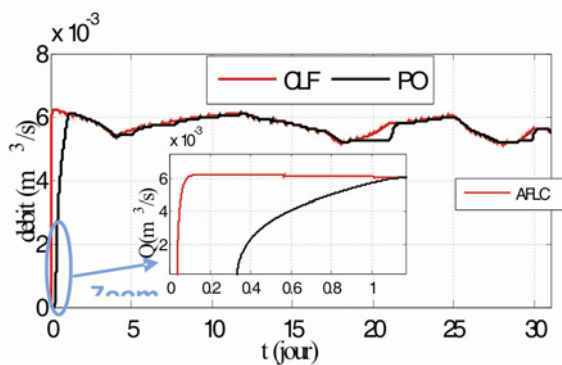


Fig. 10 – Allure du débit.

Dans la deuxième partie, nous avons appliqué seulement le contrôleur (CLF) et la CV pour commander le moteur asynchrone.

On remarque que l'allure référence de la tension du bus continu est maintenue constante et suit sa (Fig. 11), quelles que soient les variations de l'ensoleillement et de la température.

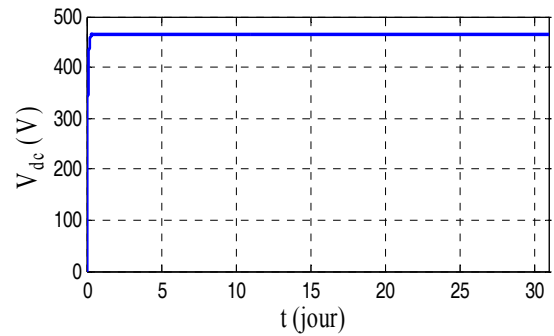


Fig. 11 – Tension de bus continu.

On voit bien que toutes les caractéristiques du moteur suivent leurs références et on constate également qu'à l'instant de la perturbation, les caractéristiques $C_{em}(t)$ – Fig. 14, $i_{sq}(t)$ – Fig. 16, $i_{abc}(t)$ – Fig. 17 et l'allure de la vitesse – Fig. 12, subissent une variation instantanée. Par contre les allures du flux – Fig. 13, et du courant $i_{sd}(t)$ – Fig. 15, ne varient pas, cela est dû au découplage entre le flux et le couple imposé par la commande vectorielle.

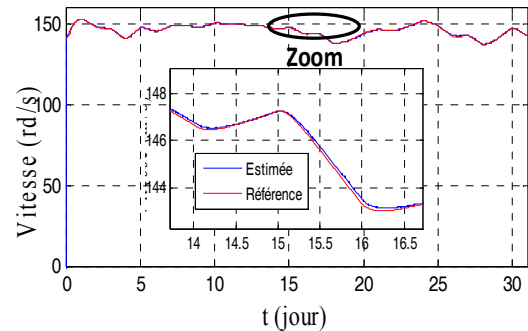


Fig. 12 – La vitesse de référence et estimée.

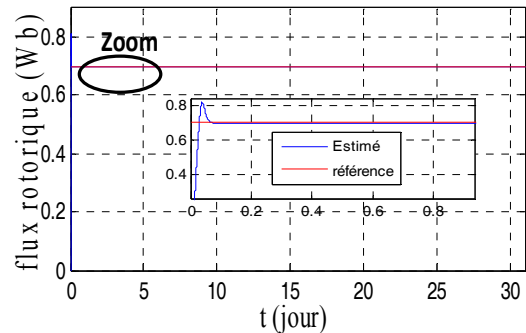


Fig. 13 – Flux de référence et estimé.

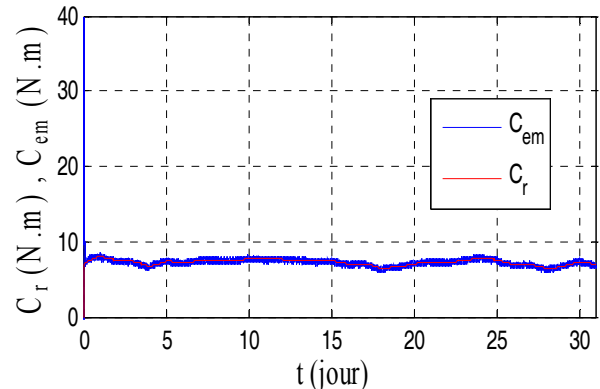


Fig. 14 – Le couple résistant (C_r) et électromagnétique (C_{em}).

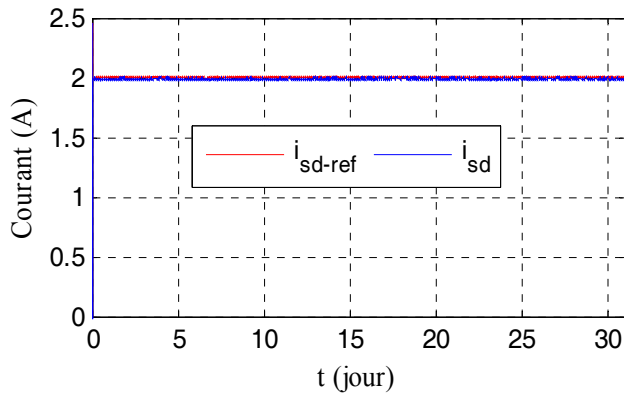


Fig. 15 – L'évolution du courant direct (i_{sd}).

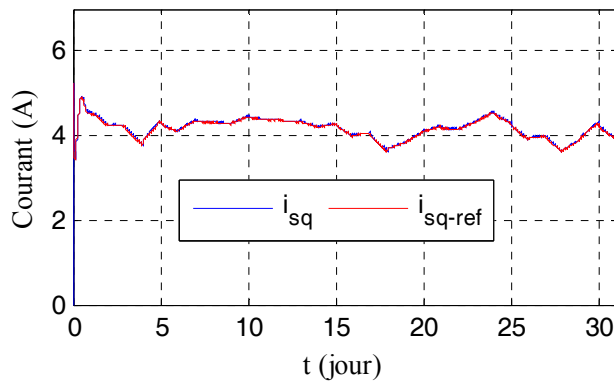


Fig. 16 – L'évolution du courant quadrature (i_{sq}).

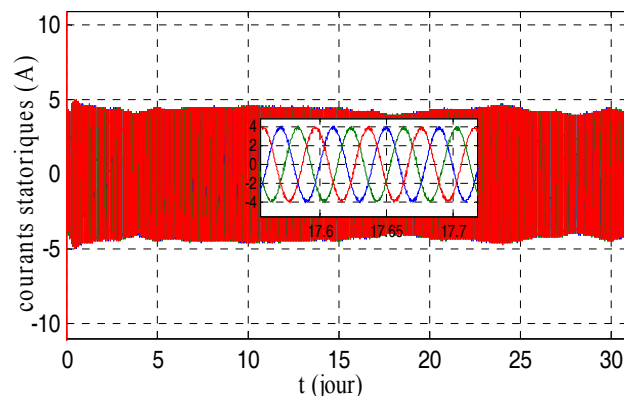


Fig. 17 – L'évolution des courants statoriques.

7. CONCLUSIONS

Dans cet article, nous avons établi la technique de la commande vectorielle ayant pour principe le découplage entre le couple et le flux. Les résultats de simulation que nous avons présenté, montrent clairement la réalisation du découplage. Par ailleurs, l'utilisation du réglage conventionnel à base de régulateur proportionnel intégrateur (PI) donne de bonnes performances, malgré la perturbation due aux changements des conditions météorologiques.

Cette commande, nous a permis de simplifier le modèle de la machine asynchrone en rendant sa commande semblable à celle d'une machine à courant continu à excitation séparée. Le contrôle par logique flou (CLF) peut être vu comme un

pas vers un rapprochement entre le contrôle mathématique précis et la prise de décision humaine. Ce dernier a prouvé qu'il a de bonnes performances, temps de réponse rapide et erreur au régime permanent très faible par rapport à la méthode classique (P & O), et qu'il est robuste aux différentes variations des conditions atmosphériques.

Afin de confirmer les résultats obtenus dans cet article, une validation expérimentale sera envisagée dans les prochains travaux.

Reçu le 17 décembre 2016

RÉFÉRENCES

1. S. Bensmail, D. Rekioua, H. Azzi, *Study of hybrid photovoltaic/fuel cell system for stand-alone applications*, Int. J. Hydrogen Energy, **40**, pp. 13820–13826 (2015).
2. R. Chenni, L. Zarour, A. Bouzid, T. Kerbache, *Comparative study of photovoltaic pumping systems using a permanent magnet synchronous motor (PMSM) and an asynchronous motor (ASM)*, Rev. Energy. Ren., **9**, pp. 17–28 (2006).
3. K. Rahrah, D. Rekioua, T. Rekioua, S. Bacha, *Photovoltaic pumping system in Bejaia climate with battery storage*, Int. J. Hydrogen Energy, **40**, 39, pp. 13665–75 (2015).
4. D. Rekioua, E. Matagne, *Optimisation of Photovoltaic Power Systems: Modelization, Simulation and Control*, Springer, 2012.
5. R. Gules, P.J. Pellegrin, H.L. Hey, J. Imhoff, *A Maximum Power Point Tracking System with Parallel Connection for PV Stand-Alone Applications*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, **55**, pp. 2674–2683 (2008).
6. P. Takun, S. Kaitwanidvilai, C. Jettanasen, *Maximum Power point Tracking using Fuzzy Logic Control for Photovoltaic Systems*, Proceeding of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists, **II**, Hong Kong, March 16–18, 2011.
7. N. Patcharaprakiti, S. Premrudeepr-Echacharn, Y. Sriuthaisiriwong, *Maximum power point tracking using adaptive fuzzy logic control for grid-connected photovoltaic system*, Renew Energy, **30**, 11, pp. 1771–88 (2005).
8. A. Zebar, A. Hamouda, K. Zehar, *Impact of the location of fuzzy controlled static var compensator on the power system transient stability improvement in presence of distributed wind generation*, Rev. Roum. Sci. Techn. – Électrotechn. et Énerg., **60**, 4, pp. 426–436 (2015).
9. C. Serir, D. Rekioua, *Control of photovoltaic water pumping system*, Journal of Electrical Engineering, **15**, 2, pp. 339–344 (2015).
10. A. Mohammedi, N. Mezzai, D. Rekioua, T. Rekioua, *Impact of shadow on the performances of a domestic photovoltaic pumping system incorporating an MPPT control: A case study in Bejaia, North Algeria*, Energy Conversion and Management, **84**, pp. 20–29 (2014).
11. C. Serir, D. Rekioua, N. Mezzai, S. Bacha, *Supervisor control and optimization of multi-sources pumping system with battery storage*, Int. J. Hydrogen Energy, **41**, pp. 20974–20986 (2016).

VECTOR CONTROL OF A MOTOR PUMP SYSTEM POWERS BY A PHOTOVOLTAIC GENERATOR OPTIMIZED BY FUZZY LOGIC CONTROL

Key words: Vector control, Photovoltaic pumping, Chopper, Fuzzy logic controller, Asynchronous motor pump.

This paper deals with modeling and vectorial control (CV) of an autonomous pumping photovoltaic system. The principal objective of this contribution is to show the importance of the application of the CV to a strongly nonlinear system. The system consists of a centrifugal pump driven by an induction motor (IM) supplied by pulse width modulation (PWM) voltage inverter. In order to optimize the power system, we intercalated between the inverter and the photovoltaic generator (GPV) a DC/DC converter to track the maximum power. Among the various techniques of the MPPT presented in the literature, we adopted the controller by fuzzy logic controller (CLF) and the classical pertub and observ (P&O).