

JOURNAL
de la
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
de
L'UNIVERSITÉ DE LOMÉ



LOME - TOGO

Le Journal de la Recherche Scientifique de l'Université de Lomé est
référéncé dans African Journal on Line (AJOL) [www.inasp.org/ajol]

VOLUME 16
(2014)

Numéro 1

ETUDE DU COMPORTEMENT DYNAMIQUE D'UN SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAIQUE DANS MATLAB/SIMULINK

AGBOKPANZO R. G.^{1*}, HOUNGAN K.T.¹, ESPANET C.², GOUDJO C.¹

1- Université d'Abomey-Calavi (UAC)

2- Université de Franche comté (UFC)

(*) E-mail : richgille@gmail.com

(Reçu le 16 Octobre 2013 ; Révisé le 25 Février 2014 ; Accepté le 06 Mars 2014)

RESUME

L'objectif du présent travail est d'étudier par la simulation sous MATLAB/SIMULINK le comportement dynamique d'un système de pompage composé d'un générateur photovoltaïque, d'un onduleur, d'un moteur à induction et d'une pompe centrifuge.

Le modèle global du système est bouclé : la sortie tension du GPV est couplée à l'entrée tension de l'ensemble convertisseur-moteur ; la sortie courant du moteur est couplée à l'entrée courant du GPV. Le modèle retenu pour le GPV est du type analytique exponentiel. L'onduleur, à commande MLI, est modélisé en supposant que les interrupteurs sont parfaits. Le moteur à induction utilise le modèle dynamique classique dans le référentiel orthogonal dq de Park : cela permet d'utiliser comme tension et courant en relation avec le GPV les grandeurs en courant continu du référentiel dq. Des résultats de simulations en régime transitoire démontrent le fonctionnement du modèle complet. Ce modèle est la première étape vers le dimensionnement optimal global d'un système complet permettant d'alimenter en eau une maison ou un groupe de maisons.

Mots clés: générateur photovoltaïque, onduleur MLI, moteur à induction, pompe centrifuge.

ABSTRACT

The objective of the present work is to study by the simulation software MATLAB/SIMULINK an association consisting of a photovoltaic generator, an inverter, an induction motor and a centrifugal pump as mechanical load.

The model used for global simulation is a closed loop model: the voltage output of PVG model is coupled with the voltage entry of converter-induction motor model; the current output of the latter is coupled with the current entry of the PVG. The model selected for the study of the photovoltaic generator is the exponential analytical model. The inverter is controlled with a PWM law and is modeled as realized with ideal switches. The model for the induction motor is based on the classic dynamic model in the dq orthogonal Park reference frame: This model allows you to use as voltage and current relationship with the PVG, direct current quantities of the dq reference frame.

Key words: photovoltaic generator, PMW inverter, induction engine, centrifugal pump.

1. INTRODUCTION

Un générateur photovoltaïque (GPV) ne se comporte pas comme une source conventionnelle à cause de la relation rigide liant le courant et la tension : contrairement à

la source de puissance conventionnelle considérée comme source de puissance infinie, un GPV est une source de puissance finie. Sur ce type de source, le comportement des moteurs électriques pendant les phases transitoires n'est pas toujours simple à

analyser. L'étude se propose de caractériser le fonctionnement d'un dispositif composé d'une pompe centrifuge entraînée par un moteur asynchrone triphasé à cage alimenté par un générateur photovoltaïque à travers un onduleur de tension à commande à modulateur de largeurs d'impulsion. La figure 1 donne le schéma synoptique du dispositif. L'onduleur est réglé en imposant la fréquence f_s et la valeur efficace V_s de la tension fondamentale désirée.

L'objectif final du projet développé par l'Université d'Abomey-Calavi en collaboration avec l'Université de Franche-Comté est de développer un outil de dimensionnement optimal d'un tel système. La première étape est de disposer d'un modèle dynamique du dispositif permettant d'analyser le fonctionnement du dispositif en régime dynamique. C'est l'objectif du travail présenté dans cet article.

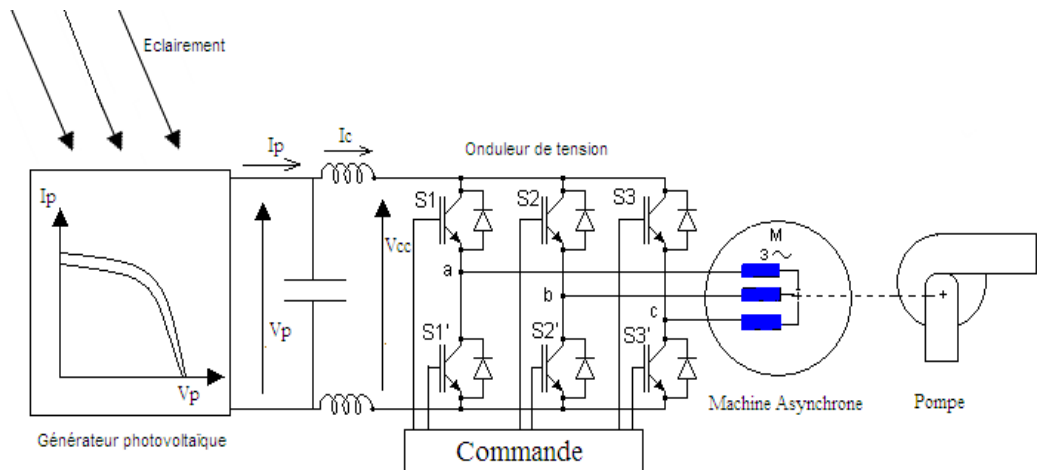


Figure 1 : Schéma synoptique du système

2. METHODOLOGIE

La simulation nécessite l'élaboration du modèle mathématique de chaque bloc du système et du dispositif global.

2.1 Modèle du groupe motopompe

2.1.1. Modèle du moteur

Le modèle du moteur est basé sur le modèle de Park original dans un référentiel tournant à la vitesse de synchronisme.

Nous avons commencé cette modélisation avec la détermination de la vitesse de la

motopompe par application de la transformée sur le modèle global de l'équation de charge suivante :

$$C_{em}(t) = J \frac{d\Omega_m(t)}{dt} + F_v \Omega_m(t) + C_r \quad (1)$$

$$\Omega_m(s) = \frac{C_{em}(s) - C_r(s)}{sJ + F_v} \quad (2)$$

Le bloc de simulation qui correspond à la détermination de la vitesse de rotation et de la puissance mécanique $P_m = C_{em}(t)\Omega_m$ est indiqué comme suit :

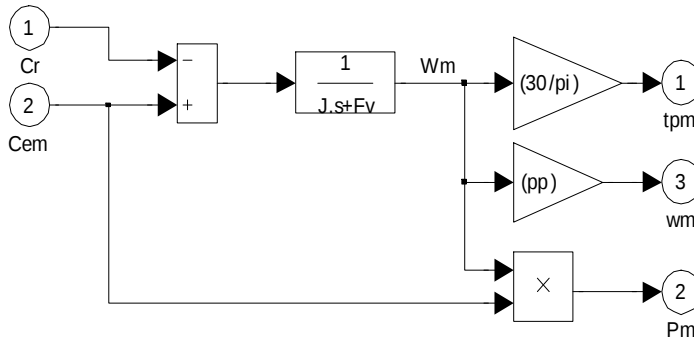


Figure 2 : Modèle simulink de la vitesse et de la puissance

En procédant à la détermination des inconnues à l'entrée de chaque bloc nous avons obtenu d'autres modèles correspondant dont les associations conduisent modèle de la machine asynchrone dont le sous-système est donné à la figure 3 :

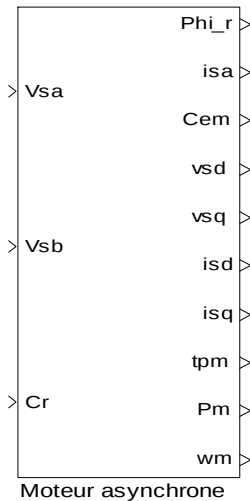


Figure 3 : Modèle dynamique du moteur asynchrone.

2.1.2. Le modèle de la pompe

Il est basé sur l'expression de son rendement qui est le quotient de la puissance hydraulique empruntée au fluide par la puissance mécanique exercée sur l'arbre :

$$\eta_p = \frac{\rho g H Q}{P_m} \Rightarrow Q = \frac{P_m \eta_p}{\rho g H} \quad (\text{BETKA A. et MOUSSI A, 2003 ; MOHAMED A., 2007}) \quad (3)$$

La hauteur manométrique totale est liée au

débit par la relation suivante :

$$H = a\omega^2 - b\omega Q - cQ^2 \quad (\text{MOUSSI A., SAADI A., 2002 ; BOUDEN A., 2008}) \quad (4)$$

Où a, b et c sont des paramètres dépendants de la nature de la pompe.

Le couple résistant qu'oppose la pompe au moteur est donné par la relation :

$$C_r = C_{rs} + k\omega^2(t) \quad (\text{BOUDEN A., 2008}) \quad (5)$$

Avec C_{rs} le couple résistant statique et k le coefficient de proportionnalité. En effet la pompe centrifuge est considérée comme développant un couple proportionnel au carré de la vitesse ; le débit d'eau pompée est proportionnel à la vitesse de rotation du moteur.

La figure 4 indique le bloc de simulation de la pompe centrifuge.

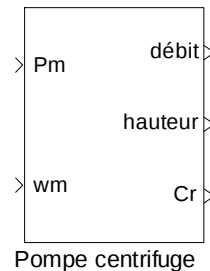


Figure 4 : Bloc de simulation de la pompe centrifuge

2.2 Modèle de l'onduleur

L'onduleur délivrera une tension alternative au groupe motopompe à partir de la source continue photovoltaïque. La partie puissance de l'onduleur est triphasée. La première

hypothèse simplificatrice pour sa modélisation consiste à considérer la commutation des interrupteurs comme instantanée : les deux interrupteurs d'un même bras sont alors équivalents à un commutateur connectant alternativement la borne de la charge aux bornes de l'alimentation continue V_{cc} .

La figure 5 donne le schéma réel de la partie puissance de l'onduleur (avec l'alimentation fractionnée en deux parties $\frac{V_{cc}}{2}$) et le schéma simplifié correspondant (incluant la commande MLI).

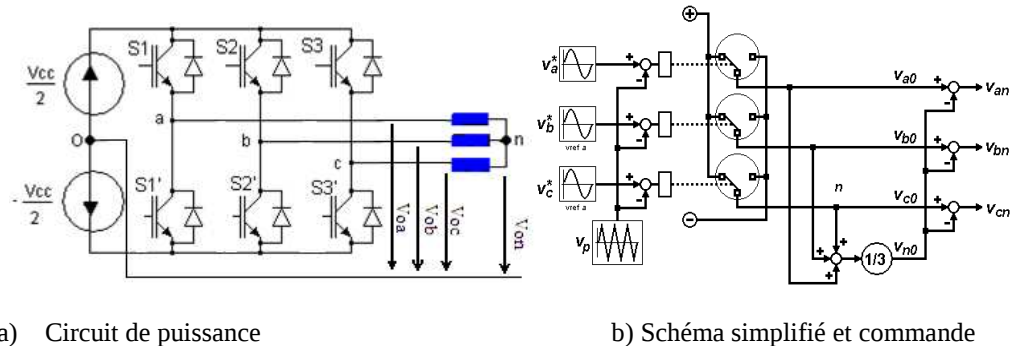
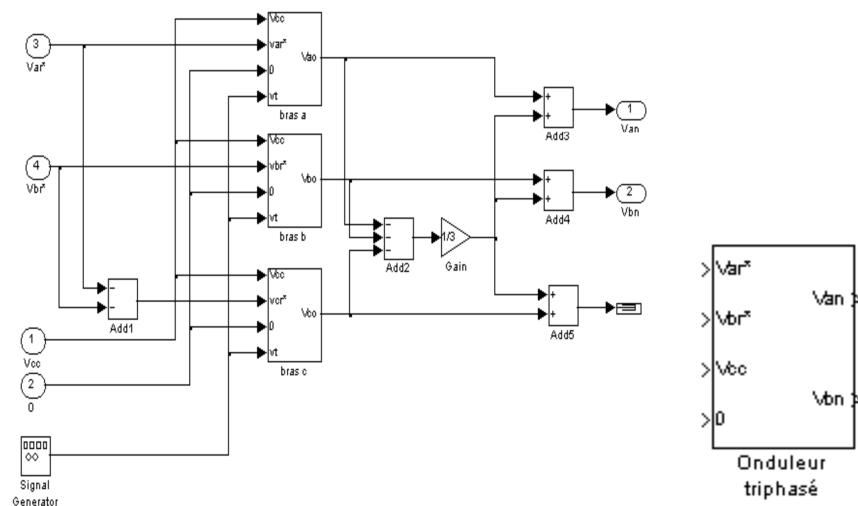


Figure 5 : Circuit de puissance d'un onduleur triphasé et son schéma simplifié.

Le schéma correspondant ainsi que son sous-système sont donnés à la figure 6 :



a) Capture du bloc détaillé de l'onduleur triphasé MLI correspondant

b) Sous système

Figure 6 : Schéma du bloc de simulation de l'onduleur triphasé.

La commande de l'onduleur est du type MLI sinus triangle et il est à noter que dans ce modèle, le signal triangulaire est fourni par le générateur de signal.

La deuxième hypothèse simplificatrice pour la modélisation consiste à considérer que les harmoniques sont parfaitement filtrées. L'onduleur peut donc être considéré comme

transparent dans l'analyse de sorte qu'on ne considère que la tension fondamentale dont l'expression phase à neutre est :

$$V_{an1}(t) = \sqrt{2}V_s \sin(2\pi f_s t) \quad (6)$$

$$\sqrt{2}V_s = \frac{1}{2}rV_{cc} \quad (7)$$

Les variables de commande de l'onduleur sont la fréquence f_s et la valeur efficace V_s de la tension fondamentale de l'alimentation statorique ; le coefficient de réglage en tension r permet d'imposer cette valeur efficace à partir de l'alimentation constante V_{cc} .

2.3 Modèle du générateur photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque (GPV) est une source électrique à courant continu composée d'une association série-parallèle de plusieurs convertisseurs (cellules) photovoltaïques pour correspondre à une utilisation donnée. En tant que source électrique, un générateur photovoltaïque délivre une tension v_p aux bornes de la charge qui lui soutire un

courant i_p . La relation entre v_p et i_p est différente de celle des sources conventionnelles. Plusieurs modèles du générateur photovoltaïque permettent de mettre en évidence cette relation. Parmi ces modèles, le plus simple est le modèle analytique exponentiel déterminé par :

$$i_p = I_{cc} \left(1 - \exp\left[\kappa\left(\frac{v_p}{V_o} - 1\right)\right] \right) \quad (\text{NARAT P., 1987}) \quad (8)$$

$$\text{Ou } v_p = V_o \left(1 + \frac{\log\left(1 - \frac{i_p}{I_{cc}}\right)}{\kappa} \right) \quad (9)$$

κ : Facteur de forme qui varie avec vieillissement des cellules,

V_o : Tension en circuit ouvert qui varie peu avec l'éclairement,

I_{cc} : Courant de court-circuit considéré comme proportionnel à l'éclairement incident.

La figure 7 donne les caractéristiques du GPV en fonction de l'éclairement pour une température donnée.

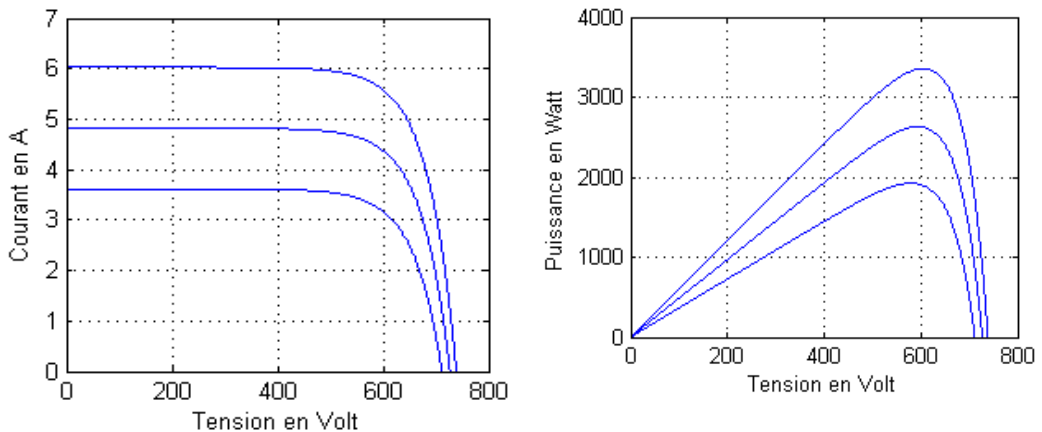


Figure 7 : Caractéristique du générateur photovoltaïque

La variation de l'éclairement sur une journée type dépend du lieu géographique.

2.4 Modèle du dispositif global

Le modèle global est basé sur la relation de puissance au niveau de la chaîne de conversion. La puissance P_{abc} absorbée par le groupe motopompe à partir de l'onduleur et la

puissance P_p fournie par le GPV à l'onduleur

sont respectivement données par :

$$P_{abc} = \frac{3}{2}(v_{sd}i_{sd} + v_{sq}i_{sq}) \quad (10)$$

$$P_p = v_p i_p \quad (11)$$

La puissance P_{abc} est calculée en utilisant les variables de Park (HOUNGAN K. T., 1996).

On fait comme approximation que les pertes

de puissance dans l'onduleur sont négligées. Cette approximation a été utilisée pour modéliser et valider par expérimentation la commande d'un groupe de pompage photovoltaïque (NARAT P., 1987); la différence entre ce travail et le présent est que le programme de modélisation a été fait dans un environnement texte alors que la modélisation sous SIMULINK se fait dans un environnement graphique par manipulation de blocs fonctionnels. On a alors :

$$\frac{3}{2}(v_{sd}i_{sd} + v_{sq}i_{sq}) = v_p i_p \quad (12)$$

Si on considère que la phase initiale de la tension de la phase *a* du système triphasé est nulle on a :

$$v_{sa}(t) = V_{max} \sin(\omega_s t) \Rightarrow v_{sd} = 0 \quad (13)$$

La relation (12) peut alors se simplifier :

$$\frac{3}{2}v_{sq}i_{sq} = v_p i_p \quad (14)$$

$$\text{Soit } \begin{cases} \frac{3}{2}v_{sq} = v_p \\ i_{sq} = i_p \end{cases} \quad (15)$$

Le courant i_{sq} sortant du moteur sert de variable d'entrée au modèle du GPV et la sortie v_p du GPV sert d'alimentation à l'onduleur. Toutefois, la tension à la sortie de l'onduleur comporte des harmoniques de sorte que la tension v_{sd} n'est pas nulle. Pour prendre en compte cet aspect, le courant i_{sq} est alors multiplié par un facteur k_i déterminé de manière à ce que l'égalité (12) soit vérifiée; l'alimentation de l'onduleur est finalement déterminée par :

$$\begin{cases} i_p = k_i i_{sq} \\ V_c = V_p = V_0 \left(1 + \frac{\log(1-i_p/I_{cc})}{\chi}\right) \end{cases} \quad (16)$$

La figure 8 représente la capture d'écran du modèle sous SIMULINK représentant, au niveau sous-système, les liens entre les différents blocs du système.

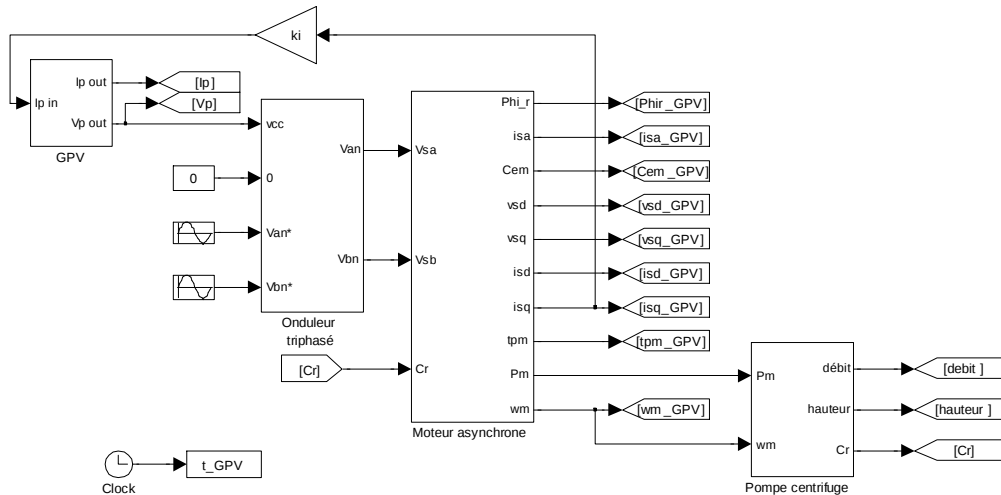


Figure 8 : Capture du modèle SIMULINK du dispositif global, niveau sous-système.

3. QUELQUES RESULTATS

La simulation a été faite en considérant un GPV dont le facteur de forme est $\chi = 14$ et en utilisant les caractéristiques d'un groupe de 750 W présenté en annexe. L'onduleur est commandé en MLI sinus triangle à une fréquence de 5 kHz. Le réglage de la tension et de la fréquence est basé sur la loi dite

$\frac{V}{f}$ constant (garantissant un flux constant).

La figure ci-dessous (Figure 6) représente, pour une hauteur fixe ($H = 40\text{m}$), les évolutions des vitesses en tr/min, des couples électromagnétiques, des allures générales du courant de la phase *a* du stator et enfin des tensions pour la source conventionnelle AC 50 Hz, la source DC/AC 50 Hz et les GPV 600V/ (40Aet 8A) 50 Hz.

Eude du comportement dynamique d'un système de pompage photovoltaïque dans Matlab/Simulink

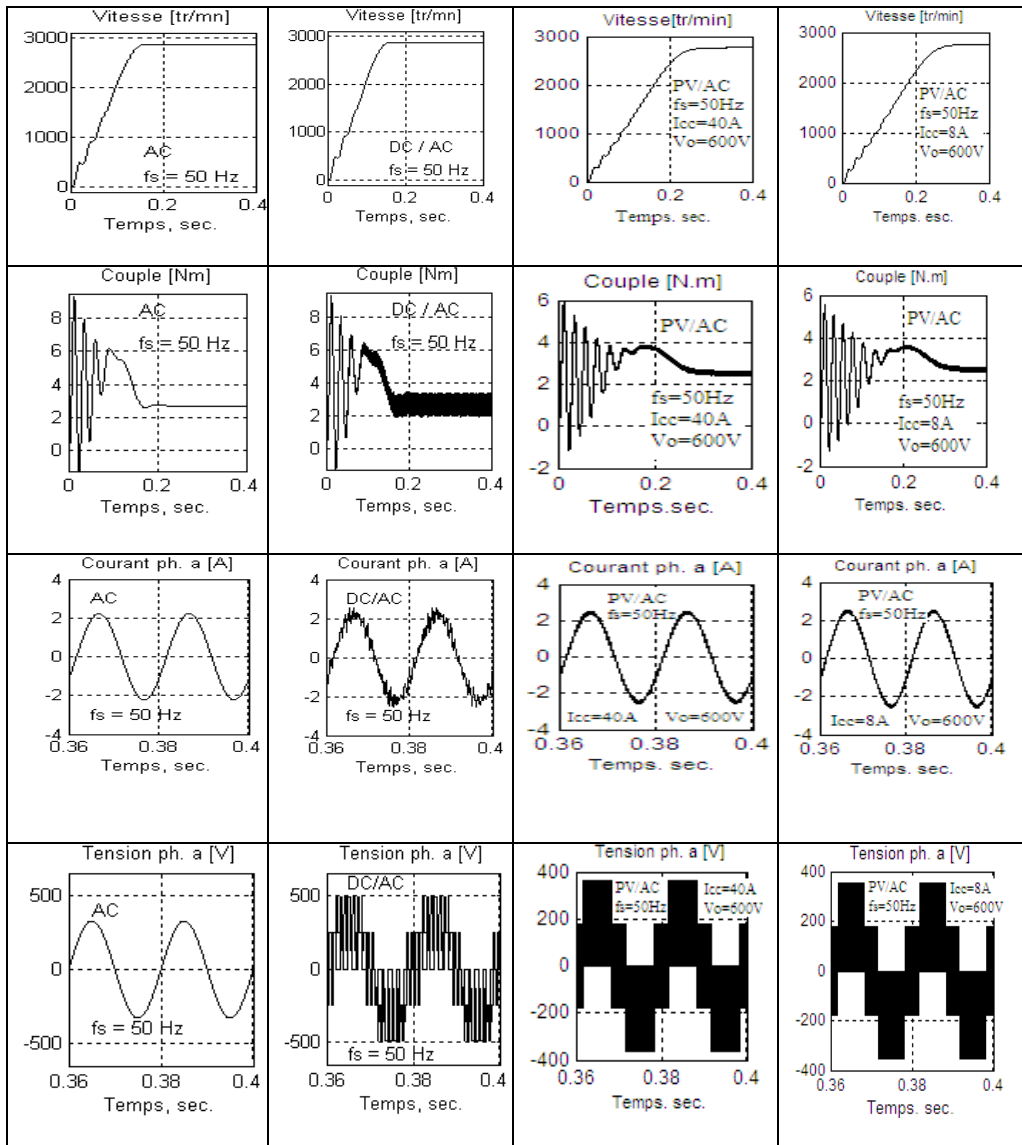


Figure 6 : Allures de la vitesse, du couple, du courant de ligne et de la tension.

Les évolutions de la hauteur et du débit dans le temps sont données par la figure 7 ci-après :

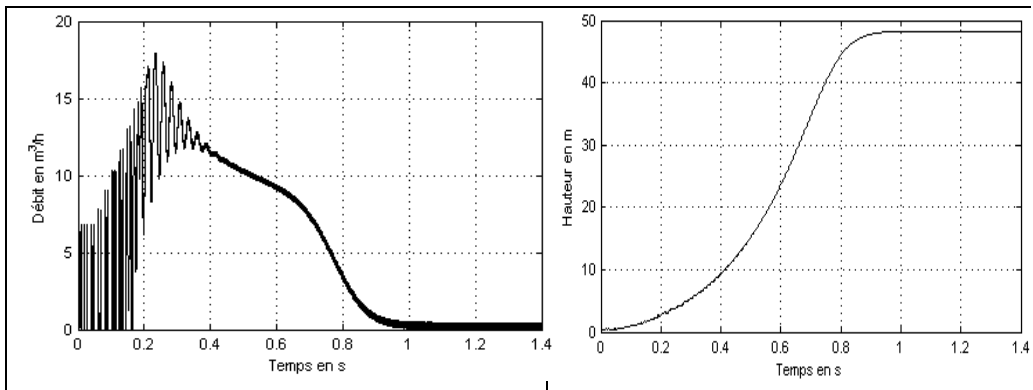


Figure 7 : Courbes de débit et de hauteur en fonction du temps

4. DISCUSSION

Fonctionnement pour un éclairage et une hauteur donnés :

Si on doit démarrer le groupe à l'instant pendant lequel l'éclairage est disponible, le GPV qui donne les mêmes caractéristiques dynamiques et statiques qu'une source conventionnelle (colonne 1 de la figure 6 pour la source AC et colonne 2 pour la source DC/AC) doit être dimensionné pour une tension à vide $V_0 = 600\text{ V}$, et le courant de court-circuit correspondant à cet éclairage est $I_{cc} = 40\text{ A}$ (voir colonne 3 de la figure 6). Lors de la simulation, on a constaté que le comportement du système est le même pour des courants de courts-circuits largement supérieurs à cette valeur.

Les trois premières colonnes indiquent que les courbes de vitesse sont pratiquement identiques aussi bien au niveau de la vitesse permanente pour le régime statique (2852 tr.mn^{-1}) que du temps de réponse à 5% pour le régime dynamique (148 millisecondes). Les courbes du couple sont identiques pour les deux fonctionnements sur convertisseurs statique : les ondulations observées sont inhérentes à l'utilisation d'un onduleur. Dans les trois cas le couple permanent moyen donne la même valeur (2.68 Nm).

Au niveau du courant et de la tension, nous avons les mêmes similitudes pour les deux fonctionnements sur onduleur.

La quatrième colonne du tableau nous donne

une autre indication: lorsqu'on se préoccupe uniquement d'obtenir les mêmes valeurs de régime permanent que les sources conventionnelles, on peut, avec la même tension de circuit ouvert, arriver à démarrer le groupe avec un éclairage beaucoup plus faible : les courbes présentées à la colonne 4 correspondent à un éclairage dont le courant de court-circuit est de 8 A . Si nous considérons la courbe de vitesse, le temps de réponse à 5% est maintenant de 167 millisecondes. Cela n'est en aucun cas un inconvénient pour le système de pompage puisque la rapidité de réponse n'apporte aucun gain au niveau du service demandé. Par contre l'avantage de réduire la dynamique est évident: en termes de dimensionnement du GPV, on réduit considérablement le nombre de modules (et donc le coût) si le seul critère de dimensionnement était de démarrer à fréquence nominale.

La courbe de courant montre que le courant de démarrage met plus de temps à s'abaisser à la valeur de régime permanent, ce qui peut contribuer à augmenter l'échauffement transitoire du moteur. Cependant le régime de fonctionnement d'un système de pompage photovoltaïque n'étant pas à démarrage répété, cet inconvénient ne se fera pas sentir.

Trois types de simulations ont été effectués avec un réglage manuel de la tension et de la fréquence se basant sur la loi $\frac{V}{f}$ constant (garantissant un flux constant): fonc-

tionnement sur une source sinusoïdale normale, fonctionnement sur onduleur MLI alimentée par une source continue conventionnelle et fonctionnement sur un onduleur MLI alimenté par une source photovoltaïque.

Fonctionnement pour un éclairement donné et une hauteur variable :

La figure 7 montre les évolutions du débit et de la hauteur en fonction du temps. Pour un même groupe motopompe et avec une même vitesse, une élévation de la hauteur entraîne une diminution du débit d'eau pompée. Ces courbes nous renseignent sur la hauteur manométrique totale pour laquelle on peut recueillir de l'eau à la sortie de la motopompe. Ainsi, dans notre cas, pour une hauteur (HMT) avoisinant les 48m on obtient un débit moyen d'environ $0.25m^3h^{-1}$.

On peut donc à partir de cette étude trouver le débit d'eau à pomper en imposant une HMT ou inversement.

5. CONCLUSION

A partir des résultats de la simulation, nous avons constaté que pour avoir une vitesse du moteur proche de la vitesse nominale, il faut que la tension en circuit-ouvert soit égale à 600 V pour un éclairement minimal correspondant à un courant de court-circuit

$I_{cc} = 5,27 A$ mais vue la lenteur, nous avons pris 8 A. De même, à partir de la commande $\frac{V}{f}$ constant, nous pouvons avoir la vitesse du moteur désirée en imposant une fréquence donnée.

Pour un accroissement de l'éclairement au-dessus de la valeur minimale, la vitesse en régime permanent et le flux rotorique demeurent constants pour une fréquence et une tension en circuit-ouvert données.

A partir de la caractéristique hauteur-débit de la pompe centrifuge, on peut connaître la hauteur manométrique totale qui correspond au débit voulu (la quantité d'eau souhaitée par jour) et inversement.

Cette étude nous a permis de disposer d'un modèle de simulation pour le système de pompage photovoltaïque ce qui facilitera le dimensionnement de tout autre système similaire dont les paramètres des éléments constitutifs sont connus.

L'objectif visé étant de bien dimensionner le générateur photovoltaïque afin d'assurer un bon fonctionnement du système et d'éviter des dépenses inutiles dans la réalisation du système de pompage, nous y sommes plus ou moins parvenus à travers cette étude.

6. Annexe : Paramètres du système modélisé

- Groupe motopompe

Caractéristiques	Valeurs	Unités
Tension entre phases	400	V
Fréquence	50	Hz
Courant de ligne	1,6	A
Vitesse	2870	tr.mn ⁻¹
Puissance mécanique	750	W
Cos ϕ	0,88	-
Inertie	0,0018	-
Couple statique	0,0185	Nm

Caractéristiques	Valeurs	Unités
Inductance de fuite du stator	27,8	mH
Inductance de fuite du rotor	54,9	mH
Inductance principale	1,0154	H
Résistance du stator	10,661	Ω
Résistance du rotor	0,173	Ω
Résistance pertes fer	245	Ω
Coefficient de frottement visqueux	$3,499.10^{-5}$	Nm. rad ⁻¹ .s ⁻¹
Coefficient de couple centrifuge	$2,773.10^{-5}$	Nm. rad ⁻² .s ⁻²

REFERENCES

1. MOUSSI A., SAADI A., 2002. Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque. *Larhyss Journal*, N°.01.
2. BETKA A., MOUSSI A., 2003. Rendement maximisé d'un moteur asynchrone alimenté par une source photovoltaïque. *Larhyss Journal*, ISBN 1112-3680, n°2, pp. 151-162.
3. BOUDEN A., 2008. Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque. Mémoire de Magister, *Université Mentouri de Constantine*.
4. HOUNGAN K. T, 1996. Simulation d'un variateur de vitesse à commande vectorielle pour un moteur asynchrone : Contribution à l'optimisation de la conversion électromécanique pour l'entraînement d'une pompe centrifuge. *Thèse de doctorat, ESP Dakar*.
5. MOHAMED A., 2007. Optimisation de l'ensemble onduleur, moteur et pompe branché sur un générateur photovoltaïque ». *Master of Sciences in Power Electronics, U. Bradford, Université Mentouri de Constantine*.
6. NARAT P., 1987. Contrôle et observation d'état d'une machine asynchrone associée à un convertisseur statique ; Application à un groupe motopompe alimenté par un générateur photovoltaïque. *Thèse de doctorat*.
7. RAHARIJAONA J. et al, 1998. Adaptation criterions of a photovoltaic generator to an inverter fed permanent magnet synchronous motor. *Int. J. of Solar Energy*, Vol. 20, pp. 19-36.