

Modélisation d'un groupe moteur-pompe dans le banc d'essai de pompage photovoltaïque de l'URAER Ghardaïa

Yahia Bakelli¹, Amar Hadj Arab² et Boubekeur Azoui³

¹ Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, 'URAER'
B.P. 88, Z.I. GaraaTaam, Ghardaïa, Algérie

² Division Energie Solaire Photovoltaïque
Centre de Développement des Energies Renouvelables
B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger, Algérie

³ Laboratoire de Recherche d'Electrotechnique, Département d'Electrotechnique
Université Hadj Lakhdar, 1, Rue Chahid Boukhrouf, B.P. 499, Batna, Algérie

(reçu le 10 Février 2012 – accepté le 29 Mars 2012)

Résumé - Le pompage d'eau est un facteur important dans le développement des zones rurales et isolées des pays en développement. L'utilisation de système de pompage photovoltaïque (PV) pour l'exhaure de l'eau dans ces zones s'avère une solution très fiable à condition d'être bien dimensionner. Le dimensionnement des systèmes PV, en particulier ceux de pompage d'eau, nécessite l'utilisation de modèle qui reflète la réalité et ils se doivent d'être précis. Dans ce travail, nous allons présenter un modèle d'un groupe moteur-pompe couplé à un générateur photovoltaïque, ce modèle reliant la puissance électrique consommée par l'électropompe au débit d'eau pompée pour chaque hauteur de pompage. Les paramètres du modèle et l'erreur d'approximation sont obtenus en utilisant des mesures expérimentales. A cet effet, nous avons utilisé le banc d'essai de pompage photovoltaïque de l'URAER. Les résultats sont très satisfaisants.

Abstract - The water pumping is an important factor in the development of rural and remote areas of developing countries. The use of solar pumping system for the exordium of water in these areas is a very reliable solution if properly sized. The sizing of systems PV, especially water pumping, requires the use of model that reflects reality and it needs to be precise. In this work we present a model of a pump unit coupled to a PV generator, the model linking the electrical power consumed by the pump to the flow of water pumped per pumping height. The model parameters and the approximation error are obtained using experimental measurements for this purpose, we used the test bench of photovoltaic pumping of URAER. The results are very satisfactory.

Mots clés: Système photovoltaïque - Pompage d'eau - Modélisation - Modèle moteur-pompe.

1. INTRODUCTION

Aujourd'hui, la production d'énergie à partir des énergies renouvelables, constitue un excellent moyen pour protéger l'environnement et de contribuer au développement durable et ce, du fait qu'elle est considérée comme une énergie très propre.

Dans le cas de l'Algérie, l'énergie photovoltaïque (PV) est fortement appliquée pour le pompage de l'eau, surtout en zones arides où l'irradiation solaire est importante et les besoins en eau sont extraordinaires.

Le système présenté, est un système de pompage photovoltaïque constitué d'un générateur PV, d'un moteur à courant continu et d'une pompe.

Les pompes submersibles sont fortement utilisées dans les applications de pompage à travers le monde. Dans ce contexte, il sera présenté la modélisation d'un groupe moteur-pompe de type Grundfos™ 5A-6 à partir de données expérimentales issues du banc d'essais de pompage photovoltaïque de l'URAER.

2. DESCRIPTION DU BANC D'ESSAIS DU SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE DE L'URAER

Le banc d'essais installé au niveau du l'URAER permet de tester et caractériser différents systèmes de pompage photovoltaïque. Il permet de simuler des hauteurs de pompage dans des conditions réelles d'opération. Les intervalles de mesure peuvent atteindre 2.75 kW de puissance, 120 m de hauteur de pompage et 10 m³/h de débit d'eau. Les systèmes de pompage peuvent être alimentés, soit à l'aide du générateur photovoltaïque, soit à l'aide d'une alimentation DC programmable. [1]

Ce banc d'essais est réalisé en acier inoxydable. Il est facilement démontable. Il est constitué des éléments suivants:

- une cuve inoxydable d'une profondeur de 2 m et de 1 m de diamètre considéré comme un puits artificiel
- un circuit hydraulique
- des capteurs de débit et de niveaux
- une armoire de visualisation
- des armoires de connexion et de configuration
- un générateur photovoltaïque de 2.75 kW
- un data logger pour l'acquisition de données
- un ordinateur personnel PC pour le stockage et le traitement des mesures.

3. MODELES MATHEMATIQUE EXISTANTS POUR L'ENSEMBLE MOTEUR POMPE

Eckstein [2] et Al-Ibrahim [3] ont présenté les paramètres caractéristiques des moteurs et des pompes. Ils ont développé un modèle, permettant de prédire les performances de l'ensemble moteur-pompe en utilisant les relations liant le débit, la hauteur manométrique et la puissance fournie.

Ce modèle ne peut pas être appliqué à tous genres d'électropompes. Car pour obtenir les paramètres du modèle, on a besoin de séparer physiquement le moteur de la pompe et de mesurer son/ses courant et tension caractéristique débit - tension (Q – V) selon le couple et la vitesse.

Aussi ils existent des électropompes sous forme d'un bloc compact unique.

Les caractéristiques des moteurs et des pompes peuvent être déterminées par le courant, la tension, la hauteur et le débit. Plusieurs modèles théoriques de pompes centrifuges et moteurs à courant continu existent dans la littérature, basés sur les données du constructeur, qui fournit généralement les données hauteur-débit et courant-tension.

Kou a présenté un modèle qui donne la tension V en fonction du courant I et de la hauteur h [4].

$$V(I, h) = a_0 + a_1 I + a_2 I^2 + a_3 h + a_4 h^2$$

où $a_0 - a_4$ sont les coefficients du modèle.

La fonction $I-V-H$ est utilisée pour trouver les caractéristiques $I-V$ du système de pompage photovoltaïque.

La courbe $I-V$ du générateur photovoltaïque à certaines conditions météorologiques, et la courbe $I-V$ du moteur-pompe pour une hauteur donnée, sont résolues simultanément afin de déterminer le point de fonctionnement.

L'autre caractéristique du moteur-pompe est la fonction débit donnée en fonction du courant I et de la hauteur h .

$$Q(I, h) = b_0 + b_1 I + b_2 h$$

b_0 à b_2 étant les coefficients de la fonction.

Hadj Arab *et al.* [5] ont effectué une partie expérimentale basée sur les mesures de deux pompes centrifuges et deux pompes volumétriques. Les caractéristiques des pompes ont été obtenues à partir du banc d'essais de pompage du CDER, et ce, en vue de procéder à leur modélisation.

Ils ont fixé la hauteur de pompage et faisant varier la tension d'entrée (DC), puis ils ont mesuré la tension, le courant et le débit. Ils ont refait cette opération pour d'autres hauteurs. Et enfin, ils ont obtenu deux courbes mesurées $I-V$ et $Q-V$ pour l'ensemble moteur-pompe et ce pour chaque hauteur. Leurs expressions mathématiques sont données par [5]:

$$I(V) = a \times V + b$$

$$Q(V) = c \times V^2 + dV + e$$

Par la suite, ils ont généralisé le modèle pour toutes les hauteurs en liant tous les coefficients a , b , c , d et e à la hauteur de pompage h par des équations du second degré de la forme suivante:

$$a(h) = a_0 + a_1 h + a_2 h^2$$

Un autre modèle a été développé par Hamidat *et al.* [3, 6]. Ce modèle relie directement la puissance électrique utile P en fonction du débit d'eau de la pompe Q . La relation du modèle est définie comme suit:

$$P = \alpha \times Q^2 + \beta \times Q^2 + \delta \times Q + \gamma$$

Le modèle sera généralisé pour différentes hauteurs en mettant les coefficients α , β , δ et γ de la forme,

$$\alpha(h) = a_0 + a_1 h + a_2 h^2 + a_3 h^3$$

où a_0 , a_1 , a_2 , a_3 sont des constantes à déterminer pour chaque sous-système de pompage.

4. MODELISATION DE L'ELECTROPOMPE GRUNDFOS 5A-6

L'électropompe choisie est de marque Grundfos™ de type immergée modèle 5A-6 avec moteur MSF3 dont les performances sont les suivantes: puissance 900 W V_{DC} 30-

300 V V_{AC} 1 x 90 V_{max} , courant 7A. L'électropompe est munie d'un détecteur d'eau qui coupe l'alimentation en cas d'absence d'eau.

La caractérisation de la pompe en question a été effectuée dans le banc d'essais des systèmes de pompage photovoltaïque de l'URAER pendant l'année 2008, alimentée par un générateur photovoltaïque formé de 2 branches de 6 modules Isofoton, 110 W en série.

Les résultats de cette caractérisation sont présentés dans la figure 1 suivante.

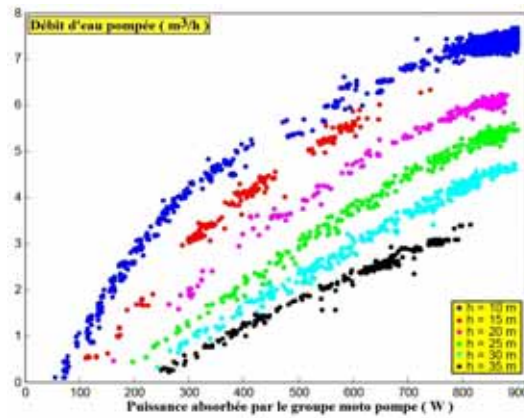


Fig. 1: Courbes $Q(P)$ du groupe moto pompe Grundfos pour différentes hauteurs de pompage

Ainsi, pour différentes hauteurs, nous avons tracé le débit Q en fonction de la puissance électrique consommée par le groupe électropompe. Ceci est visualisé sur l'armoire d'affichage et enregistré dans la chaîne d'acquisition de données. On a opté pour la représentation du débit comme étant une fonction de la puissance produite par le générateur PV, ($Q(P)$) au lieu du modèle inverse, proposé par Hamidat *et al.* [6-8].

La modélisation de ces courbes nous permet de faire ressortir trois modèles mathématiques vérifiant les critères d'erreur, à savoir: RMSE et R^2 .

Ces modèles mathématiques sont divisés en trois catégories, selon leur nombre de coefficients:

4 coefficients: Polynôme de degré 3 (3PF) de la forme:

$$y = a + b.x + c.x^2 + d.x^3$$

3 coefficients: Modèle de pression de vapeur (VPM):

$$y = \exp(a + b/x + c \ln(x))$$

2 coefficients: Modèle exponentielle modifiée (EM):

$$y = a \times \exp(b/x)$$

Les modèles ont été généralisés pour différentes hauteurs en mettant les coefficients a , b , c et d sous la forme,

$$\alpha(h) = a_0 + a_1 h + a_2 h^2 + a_3 h^3$$

Le **Tableau 1** suivant donne un récapitulatif des résultats de l'application des différents modèles choisis pour les hauteurs de pompage testés, les critères RRMSE (Relative Root Mean Square), ainsi que R^2 le coefficient de corrélation.

L'indice en occurrence dans $RRMSE_1$ et R_1^2 désigne l'erreur entre les données mesurées et les données calculées, par contre l'indice 2, c'est-à-dire, dans $RRMSE_2$ et R_2^2 étant l'erreur entre les données mesurées et celles calculées en appliquant les modèles généralisés.

Tableau 1: Récapitulatif des résultats de l'application des différents modèles simples et généralisés pour différentes hauteurs de pompage de la pompe Grundfos 5A-6

h (m)	Erreur	Polynomial de degré 3	Exponentiel modifié	Pression de vapeur
10	$RRMSE_1$	0.011	0.011	0.010
	R_1^2	0.991	0.990	0.991
	$RRMSE_2$	0.012	0.011	0.011
	R_2^2	0.991	0.991	0.991
15	$RRMSE_1$	0.027	0.026	0.025
	R_1^2	0.993	0.993	0.993
	$RRMSE_2$	0.028	0.030	0.027
	R_2^2	0.993	0.993	0.993
20	$RRMSE_1$	0.007	0.015	0.015
	R_1^2	0.994	0.993	0.993
	$RRMSE_2$	0.015	0.015	0.017
	R_2^2	0.994	0.993	0.993
25	$RRMSE_1$	0.020	0.021	0.021
	R_1^2	0.994	0.994	0.994
	$RRMSE_2$	0.020	0.021	0.022
	R_2^2	0.994	0.994	0.994
30	$RRMSE_1$	0.019	0.020	0.020
	R_1^2	0.993	0.992	0.992
	$RRMSE_2$	0.019	0.020	0.021
	R_2^2	0.993	0.992	0.992
35	$RRMSE_1$	0.029	0.030	0.030
	R_1^2	0.991	0.990	0.990
	$RRMSE_2$	0.029	0.030	0.030
	R_2^2	0.991	0.990	0.990

Les résultats de la modélisation présentés dans le **Tableau 1** nous permettent de conclure qu'il n'y a pas de supériorité d'un modèle sur les autres modèles.

En considérant uniquement les résultats des modèles généralisés que l'on juge importants, le modèle choisi sera utilisé dans le programme de simulation. On peut confirmer qu'en général:

- L'ensemble des modèles généralisés donnent de bons résultats;
- Les RRMSE pour tous les modèles confondus sont dans l'intervalle 0.7 - 3.1 %;
- Le Modèle de Pression de Vapeur donne les meilleures prestations pour le critère d'erreur RRMSE (à 0.1 % près) et ceci pour les faibles hauteurs;
- Les modèles polynomial et quadratique sont plus performants pour les grandes hauteurs;
- Le Modèle Polynomial d'ordre 3 présente les meilleures performances, en vertu du RRMSE (à 0.1 % près) pour l'ensemble des hauteurs testées;
- Le Modèle Exponentiel Modifié présente une stabilité de ses performances entre les deux modèles appliqués (modèle simple et modèle généralisé) par rapport aux autres modèles.

Sur la base de ces constatations, il est difficile de choisir un modèle parmi les quatre modèles. Nous prenons donc le meilleur de chaque catégorie à savoir: modèle polynomial, modèle pression de vapeur et modèle exponentiel modifié, puis nous appliquons d'autres critères de choix.

En observant les courbes caractéristiques $Q(P)$ pour différentes hauteurs et à partir de leurs tracés, on a pu remarquer que le modèle polynomial présente une baisse de performances pour les faibles valeurs de P ; ce qui se traduit par une déformation de ces courbes $Q(P)$.

De surcroît, on remarque une surestimation par rapport aux données mesurées. Par contre les deux autres modèles présentent une estimation correcte.

Un autre paramètre qui influence le choix d'un des modèles, c'est bien le temps de calcul du programme de simulation.

Matlab dispose d'une fonction qui nous permet de connaître le temps nécessaire pour exécuter une instruction, ce qui nous a permis d'évaluer ce temps pour le calcul de chaque modèle 30 fois.

Pour le modèle 3PF (Polynomial d'ordre 3), le temps de calcul T_{cal} pour exécuter 30 fois l'instruction est estimé à 0,218 s

Pour le modèle VPM (Modèle Pression de Vapeur), le temps de calcul T_{cal} , pour exécuter 30 fois l'instruction est estimé à 0,172 s

Alors que pour le modèle Modèle Exp (Modèle Exponentiel modifié), il est estimé à 0,094 s

C'est pour les raisons suivantes:

- Ayant une $RRMSE \leq 3\%$ pour toutes les hauteurs testées, comparables aux autres modèles.
- Possédant un nombre réduit de paramètres (en l'occurrence 2 coefficients); ce qui facilite son implantation
- Proche d'un modèle réel
- Un temps d'exécution réduit par rapport aux autres modèles.

Que le modèle exponentiel modifié, de la forme: $Q = a \times \exp(b/P)$, est choisi pour modéliser l'ensemble moteur-pompe Grundfos 5A-6 avec moteur MSF3.

5. CONCLUSION

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à la modélisation de l'un des composants du système de pompage, qui est le groupe moteur-pompe. Chaque modélisation est basée sur des équations relativement simples, provenant de la littérature scientifique.

La validation de certains modèles a permis de préciser leur domaine d'incertitude. L'implémentation de ces modèles dans un environnement de simulation adapté permettra d'étudier le comportement des composants en fonction de certains paramètres.

REFERENCES

- [1] Y. Bakelli, S. Semaoui, A. Hadj Arab, B. Azoui, F. Chenlo and A. Boutelhig, '*Banc d'Essais de Systèmes de Pompage Photovoltaïque de l'URAER*', 3^{ème} Congrès International sur les Energies Renouvelables et l'Environnement, CERE'2006, Mahdia, Tunisie, 6-8 Novembre 2006.
- [2] J.H. Eckstein, '*Detailed Modelling of Photovoltaic System Components*', MS Thesis, Mechanical Engineering, University of Wisconsin, Madison, 1990.
- [3] A.M. Al-Ibrahim, '*Optimum Selection of Direct-Coupled Photovoltaic Pumping System in Solar Domestic Hot Water Systems*', PhD Thesis, University of Wisconsin, Madison, 1997.
- [4] Q. Kou, '*A Method for Estimation the Long-Term Performance of Photovoltaic Pumping System*', MS thesis, Mechanical Engineering, University of Wisconsin, Madison, 1996.
- [5] A. Hadj Arab, M. Benghanem and F. Chenlo, '*Motor-Pump System Modelization*', Renewable Energy, Vol. 31, N°7, pp. 905 - 913, Juin 2006.
- [6] A. Hamidat and B. Benyoucef, '*Mathematic Models of Photovoltaic Motor-Pump Systems*', Renewable Energy, Vol. 33, N°5, pp. 933 - 942, Mai 2008.
- [7] A. Hamidat, '*Simulation des Systèmes de Pompage Photovoltaïques Destinés pour l'Alimentation en Eau Potable et pour la Petite Irrigation*', Thèse de Doctorat, Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, 2004.
- [8] Y. Bakelli, A. Hadj Arab and B. Azoui, '*Optimal Sizing of Photovoltaic Pumping System with Water Tank Storage using LPSP Concept*', Solar Energy, Vol. 85, N°2, pp. 288 - 294, 2011.