

## Etude d'une machine asynchrone à double alimentation en pompage photovoltaïque

Arezki Adjati <sup>1\*</sup>, Ahmed Azib et Toufik Rekioua <sup>2†</sup>

<sup>1</sup> Département de Génie Electrique, Faculté de Technologie

<sup>2</sup> Laboratoire de Technologie Industrielle et de l'Information, LTII

Département Electronique, Faculté de Technologie

Université A. Mira, Targa Ouzemour, Béjaïa, Algeria

(reçu le 10 Février 2014 – accepté le 30 Septembre 2014)

**Résumé** - *L'avancée spectaculaire de l'emploi des énergies renouvelables et les multiples avantages des machines multiphasées sont les catalyseurs de l'utilisation du moteur asynchrone à double étoile pour entraîner une pompe centrifuge. Dans cet article, une application sur l'alimentation d'un village en eau potable est étudiée, selon deux configurations des panneaux solaires, avec au préalable, un dimensionnement des différents organes constituant la chaîne de pompage.*

**Abstract** - *The dramatic employment of renewable energy and the multiple benefits of multiphase advanced machinery are the catalysts for the use of double star induction motor to drive a centrifugal pump. In this paper, an application on the supply of a village drinking water is studied in two configurations of solar panels, with previously sizing of the various bodies constituting the chain pump.*

**Mots clés:** Machine asynchrone à double étoile – Pompage d'eau - Energies renouvelables - Pompage photovoltaïque.

### 1. INTRODUCTION

Le pompage solaire est une technologie intéressante pour l'alimentation en eau des sites isolés, avec un débit et une hauteur manométrique totale, ayant pour maximum  $Q_{\max} = 100\text{m}^3/\text{j}$  à HMT = 10 mètres. Au-delà, la surface des panneaux solaires à installer devient vite importante et l'installation très onéreuse. [1, 2]

Avec un bon rendement, une fiabilité excellente et une autonomie de fonctionnement, le 'pompage photovoltaïque' peut fonctionner avec des batteries de stockage, ou bien, directement, au fil du soleil dit 'fil de l'eau'.

Ce dernier est considéré comme un système plus simple, plus fiable et moins coûteux, où l'eau est pompée dans un château d'eau, similaire à un accumulateur, avant de la distribuer par gravité en cas de besoins.

Les performances dépendent de l'ensoleillement, de la température ambiante ou bien, encore, du rendement des modules photovoltaïques, des différents convertisseurs, du moteur et de la pompe utilisés.

### 2. COMPOSANTS D'UN SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE

Un système de pompage photovoltaïque se compose d'un générateur photovoltaïque, d'un adaptateur de charge, avec un commutateur de champ qui permet de modifier

---

\* [adjati@hotmail.fr](mailto:adjati@hotmail.fr)

† [to\\_reki@yahoo.fr](mailto:to_reki@yahoo.fr) , [Labo.ltii.bejaia@gmail.com](mailto:Labo.ltii.bejaia@gmail.com)

l'agencement série-parallèle des modules en fonction de la charge ou de l'éclairement, d'un hacheur buck-boost, d'un filtre passe-bas, de deux onduleurs triphasés qui alimentent les deux étoiles du moteur asynchrone à double étoile qui entraîne l'arbre d'une pompe centrifuge.

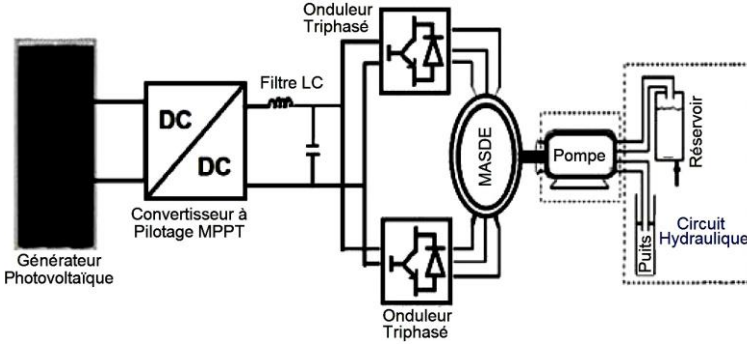


Fig. 1: Schéma de l'installation photovoltaïque

**2.1 Modèle de la machine asynchrone à double étoile**

**2.1.1 Equations électriques [3-7]**

$$\left[ \begin{array}{l} \text{Pour l'étoile1} - [V, abc_1] = [R_s] \times [i, abc_1] + \frac{d}{dt} [\varphi, abc_1] \\ \text{Pour l'étoile2} - [V, abc_2] = [R_s] \times [i, abc_2] + \frac{d}{dt} [\varphi, abc_2] \\ \text{Pour le rotor} - [0] = [R_r] \times [i_r, abc] + \frac{d}{dt} [\varphi_r, abc] \end{array} \right.$$

**2.1.2 Equations magnétiques**

$$\left[ \begin{array}{l} \varphi, abc_1 \\ \varphi, abc_2 \\ \varphi_r, abc \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{ccc} [L_{s1,s1}] & [L_{s1,s2}] & [L_{s1,r}] \\ [L_{s2,s1}] & [L_{s2,s2}] & [L_{s2,r}] \\ [L_{r,s1}] & [L_{r,s2}] & [L_{r,r}] \end{array} \right] \times \left[ \begin{array}{l} i, abc_1 \\ i, abc_2 \\ i_r, abc \end{array} \right]$$

**2.1.3 Energie magnétique**

$$\omega_{mag} = \frac{1}{2} \left( [I_{s1}]^t [\varphi_{s1}] + [I_{s2}]^t [\varphi_{s2}] + [I_r]^t [\varphi_r] \right)$$

**2.1.4 Couple électromagnétique**

$$C_{em} = d\omega_{mag} / d\theta_m = p \times d\omega_{mag} / d\theta_e$$

**2.1.5 Equation mécanique**

$$J \times d\Omega / dt = C_{em} - C_r - F_r \times \Omega$$

**2.2 Modélisation des onduleurs**

Les onduleurs sont commandés par la technique de modulation des largeurs d'impulsions 'MLI' qui consiste à comparer une onde modulante basse fréquence dite 'tension de référence' à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire avec un indice de modulation 'm = 21' et un coefficient de réglage de tension 'r = 0.8'. [3]

### 2.3 Modélisation du générateur photovoltaïque

Le courant,

$$I_G = P_1 \times E_s \times \left[ 1 + P_2 \times (E_s - E_{sref}) + P_3 \times (T_j - T_{jref}) \right] - \frac{V_G + R_s \times I_G}{R_p} \\ - \left[ P_4 \times T_j^3 \times \exp\left(-\frac{E_g}{K \times T_j}\right) \right] \times \left[ \exp\left(\frac{e \times (V_G + R_s \times I_G)}{A \times K \times T_j}\right) - 1 \right] \\ - \left[ P_5 \times T_j^3 \times \exp\left(-\frac{E_g}{2 \times K \times T_j}\right) \right] \times \left[ \exp\left(\frac{e \times (V_G + R_s \times I_G)}{2 \times A \times K \times T_j}\right) - 1 \right]$$

délivré par le panneau solaire est fonction de l'ensoleillement  $E_s$  [W/m<sup>2</sup>] et de la température de jonction des cellules  $T_j$  [°C]. [8]

## 3. DIMENSIONNEMENT DE LA POMPE PHOTOVOLTAÏQUE

Les données de base d'une pompe consistent à connaître le débit  $Q_n$  [m<sup>3</sup>/j], ainsi que la hauteur manométrique totale. [9]

### 3.1 Evaluation des besoins en eau

Afin de prévoir la capacité du réservoir  $V$  [m<sup>3</sup>], il est impératif de déterminer les besoins réels en eau de l'utilisateur durant l'année.

### 3.2 Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire

La puissance hydraulique nécessaire pour déplacer l'eau d'un point à un autre est donnée par:  $P_h = \rho \times g \times HMT$ .

### 3.3 Détermination de l'énergie solaire disponible

La connaissance au préalable de l'énergie solaire disponible sur le site à implanter l'installation de pompage est primordiale pour tout dimensionnement.

### 3.4 Dimensionnement des panneaux

Le nombre de panneaux nécessaires est donné par la relation suivante:  $N_p = P_g / P_s$  avec  $P_g = V \times (E_c / Q_n (1 - \sum \text{pertes}))$ .

La puissance du générateur photovoltaïque, est fonction de l'énergie journalière demandée par la charge '  $E_c$  ', des pertes et de la puissance normalisée du panneau sous les conditions ' noct '.

### 3.5 Dimensionnement du moteur et de la pompe

Il est possible d'estimer la puissance nécessaire délivrée,

$$P_{\text{délivrée}} = \frac{P_{\text{élec}}}{\eta_{\text{onduleur}}} = \frac{P_{\text{mec}}}{\eta_{\text{onduleur}} \times \eta_{\text{moteur}}} = \frac{P_h}{\eta_{\text{onduleur}} \times \eta_{\text{moteur}} \times \eta_{\text{pompe}}}$$

et le besoin de la charge en énergie électrique exprimé en [kWh/j], [10]

$$E_c = P_{\text{délivrée}} \times T_{\text{pompage}} = P_{\text{délivrée}} \times V / Q_n \cdot$$

## 4. APPLICATION

Pour le besoin en eau potable d'un village isolé, un château d'eau d'une capacité de 150 m<sup>3</sup> est érigé, alimenté par un débit nominal 'Q<sub>n</sub> = 30 m<sup>3</sup>/h' et une hauteur manométrique totale 'HMT = 17 m'. Ces calculs permettent de dimensionner le champ photovoltaïque et le nombre de panneaux envisageables à cette application.

### 4.1 Puissance hydraulique

$$P_h = \rho \cdot g \cdot \text{HMT} \cdot Q_n = 1000 \times 9.81 \times 17 \times (30 / 3600) \cong 1390 \text{ W}.$$

### 4.2 Puissance mécanique

La pompe centrifuge avec un rendement de 55 % a besoin d'une énergie mécanique de,

$$P_{\text{mec}} = P_h / \eta_{\text{pompe}} = 1390 / 0.55 \cong 2527 \text{ W}.$$

### 4.3 Puissance électrique

Le rendement des moteurs à courants alternatifs est au voisinage de 85 %, d'où,

$$P_{\text{élec}} = P_{\text{mec}} / \eta_{\text{onduleur}} = 2527 / 0.85 = 2973 \text{ W}.$$

### 4.4 Puissance électrique demandée

La puissance électrique réellement demandée est,

$$P_{\text{délivrée}} = P_{\text{élec}} / \eta_{\text{onduleur}} = 2973 / 0.95 = 3129 \text{ W}.$$

La durée de pompage est,  $T_{\text{pompage}} = V / Q_n = 150 / 30 = 5$  heures .

L'énergie électrique demandée est,

$$E_c = P_{\text{délivrée}} \times T_{\text{pompage}} = 3129 \times 5 = 15645 \text{ Wh/j}.$$

### 4.5 Puissance du générateur photovoltaïque

Les pertes de puissance attribuables à la température et à la poussière sont supposées présenter un cinquième de la puissance délivrée par l'ensemble des modules.

$$P_g = \frac{E_c / T_{\text{pompage}}}{(1 - \sum \text{pertes})} = \frac{P_{\text{délivrée}}}{(1 - \sum \text{pertes})} = \frac{3129}{(1 - 0.2)} \cong 3911 \text{ W}.$$

### 4.6 Nombre de panneaux

Le modèle du panneau utilisé est le panneau de type Siemens SM110-24, ayant une puissance nominale normalisée de 110 W<sub>c</sub>.

$$N \geq P_g / P_s = 3911 / 110 = 35.55 \text{ panneaux}.$$

Le nombre de panneaux est donc de 36 modules photovoltaïques.

## 5. RESULTATS DE SIMULATION

Les 36 panneaux photovoltaïques peuvent être regroupés, selon le besoin, en tension et en courant où deux configurations vont être traitées et simulées.

### 5.1 Mise en parallèle de deux branches de dix-huit panneaux en série chacun

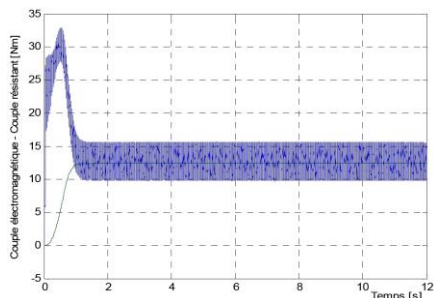


Fig. 2: Couple électromagnétique

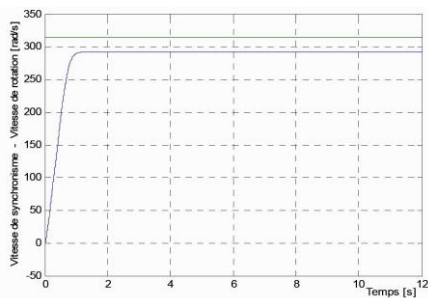


Fig. 3: Vitesse de rotation

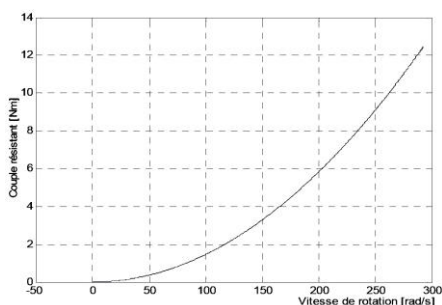


Fig. 4: Couple – Vitesse de rotation

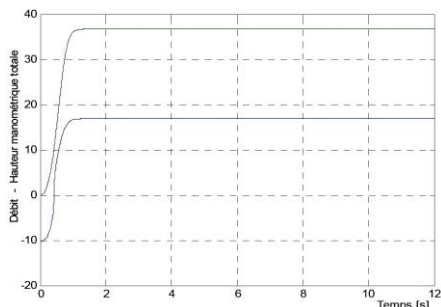


Fig. 5: Débit – Hauteur manométrique

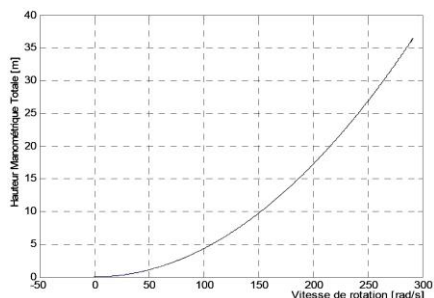


Fig. 6: HMT – Vitesse de rotation

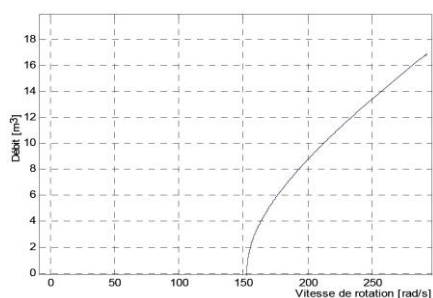


Fig. 7: Débit - Vitesse de rotation

Au démarrage, le couple de la machine oscille avant de se stabiliser autour d'une valeur de 12.5 Nm, la pompe oppose un couple résistant qui croît en suivant l'évolution du couple moteur et tant que sa vitesse n'atteint pas une certaine vitesse de 150 rad/s, la pompe tourne sans fournir de débit à sa sortie, puis l'ensemble moteur-pompe atteint une vitesse de 292 rad/s.

Le débit et la HMT évoluent de la même manière que la vitesse de rotation et l'évolution de la hauteur manométrique totale en fonction de la vitesse de rotation est semblable à celle du couple résistant.

## 5.2 Mise en parallèle de trois branches de douze panneaux en série chacun

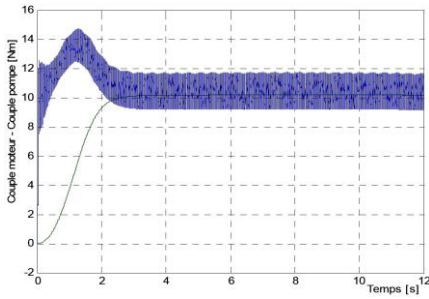


Fig. 8: Couple électromagnétique

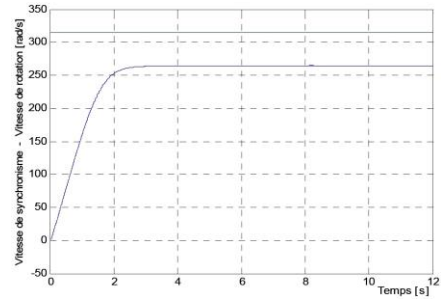


Fig. 9: Vitesse de rotation

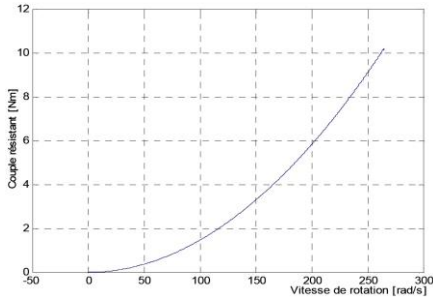


Fig. 10: Couple – Vitesse de rotation

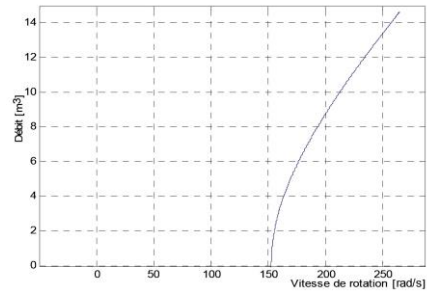


Fig. 11: Débit – HMT

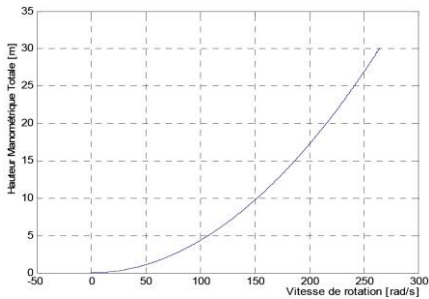


Fig. 12: HMT – Vitesse de rotation

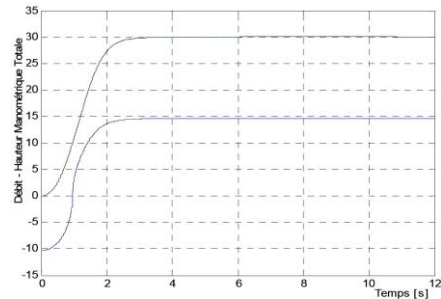


Fig. 13: Débit - Vitesse de rotation

Au début, le couple moteur prend des valeurs importantes au moment où le couple de la pompe varie en fonction du carré de la vitesse de rotation. La variation de l'ensoleillement, donc de la tension à la sortie du générateur photovoltaïque, induit une variation du couple.

Le couple de démarrage est limité au couple de frottement de la pompe à l'arrêt qui s'avère plus important qu'en rotation. Le débit de la pompe centrifuge varie avec la vitesse de rotation, néanmoins, il faut une certaine vitesse minimale pour amorcer la pompe et obtenir un débit.

### 5.3 Discussions des résultats

Le couple de la pompe, sa vitesse de rotation, le débit pompé, ainsi que la hauteur manométrique, obéissent à la variation de l'éclairement. Toutefois, l'usage de la technique de recherche du point de puissance maximale permet de surmonter l'handicap d'un faible éclairement.

Le besoin d'un fort courant au démarrage nécessite un couplage des panneaux, de telle manière, à avoir leurs courants s'additionner, puis, revenir au couplage fournissant une tension nécessaire au fonctionnement.

Il est intéressant de signaler que la combinaison des modules photovoltaïques offrant une tension élevée permet de fournir à l'ensemble moteur-pompe une vitesse de rotation plus importante, ce qui procure une augmentation du couple et de la quantité d'eau pompée.

La nécessité à la pompe d'acquérir une certaine vitesse pour pouvoir offrir un débit, demeure une condition incontestable pour les deux cas de figures étudiés.

## 6. CONCLUSIONS

Les moteurs à courant continu sont, de plus en plus, délaissés au détriment des moteurs asynchrones triphasés, et maintenant, une expérience nouvelle consiste à introduire les moteurs asynchrones à double étoile, choisis pour leur fiabilité assurée et leur continuité de service en cas de défaillance de ses parties électriques.

Il est primordial, avant d'entamer un projet de pompage photovoltaïque, de connaître au préalable les conditions météorologiques, notamment, en ce qui concerne la durée d'insolation journalière et le rayonnement disponible au cours d'une année, ce qui nécessite des mesures sur site et l'établissement des cartes climatiques de chaque région susceptible d'accueillir une installation photovoltaïque future.

L'évaluation des besoins en eau, la hauteur manométrique totale et le débit sont d'une très grande importance pour évaluer les diverses puissances permettant la détermination de la dimension du champ photovoltaïque.

## REFERENCES

- [1] C. Ruhl, '*BP Statistical Review of World Energy 2007*', BP Report, June 2007.
- [2] S.M. Aït Cheikh, '*Etude, Investigation et Conception d'Algorithmes de Commande Appliqués aux Systèmes Photovoltaïques*', Thèse de Doctorat d'Etat, Ecole Nationale Polytechnique, 2007.
- [3] D. Hadiouche, '*Contribution à l'Etude de la Machine Asynchrone Double Etoile: Modélisation, Alimentation et Structure*', Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré de Nancy I, Faculté des Sciences et Techniques, 2001.
- [4] Z. Oudjebour, E.M. Berkouk, N. Sami, S. Belgasmi, S. Arezki and I. Messaif, '*Indirect Space Vector Control of a Double Star Induction Fed by Two Five Levels NPC VSI*', International Conference on Electric Machine, ICEM'04, Poland, 2004.
- [5] D. Hadiouche, H. Razik and A. Rezzoug, '*Study and Simulation of Space Vector PWM Control of Double-Stator Induction Motor*', VII IEEE International Power Electronics Congress, 2000, pp. 42 – 47, Acapulco, Mexico, CIEP 2000,
- [6] A. Kalantari, M. Mirsalim and H. Rastegar, '*Adjustable Speed Drive Based on Fuzzy Logic for a Dual Three-Phase Induction Machine*', Proceedings in Electrimacs, Montréal, Canada, 18-21 August 2002.
- [7] R. Pen-Eguiluz, M. Pietrzak-David, V. Riga and B. De Fornel, '*Comparison of Several Speed Sensor Less Strategy of Two different Dual Drive Induction Motor Control Structures*', L2EP, Unité Mixte de Recherche, INPT - ENSEEIHT, CIEP 2002, Mexico, IEEE, pp. 41 - 46, 20-24 October 2002.

- [8] T. Diveux, '*Implantation d'un Système Eolien, Optimisation par Algorithmes Génétiques*', Thèse de Doctorat, ENSAM (LEPT), Septembre 2000.
- [9] P. Silvestre, '*Fundamentos de Hidráulica General*', Limusa, Mexico, p381, 1983.
- [10] A. Labouret et M. Villos, '*Energie Solaire Photovoltaïque*', 3<sup>ème</sup> Edition Dunod, Décembre 2007.