

RENDEMENT MAXIMISE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE ALIMENTE PAR UNE SOURCE PHOTOVOLTAÏQUE

*A. BETKA, A. MOUSSI **

*Centre universitaire Larbi Ben M'Hidi Oum El-Bouaghi
Institut d'Electrotechnique*

LARYSS member

** Institut d'Electrotechnique, Université de Biskra,
LARYSS member*

Résumé: *Le rendement d'un moteur à induction alimenté par une source photovoltaïque se trouve dégradé une fois que l'éclairement varie loin de sa valeur nominale. Pour surmonter cet handicap, une loi de commande judicieuse basée sur un contrôle de la fréquence est suggéré. Les résultats de simulation montrent qu'un rendement optimum est constamment maintenu, offrant par conséquent une amélioration de la stabilité du système et permet d'augmenter la quantité pompée.*

Mots clés: *système photovoltaïque, moteur à induction, rendement.*

1. INTRODUCTION

L'utilisation de l'énergie solaire pour le pompage d'eau est particulièrement bien adaptée aux zones rurales où l'eau fait cruellement défaut. La demande croissante en eau dans ces zones, destinée à l'alimentation en eau potable ainsi qu'à l'irrigation, fait qu'un intérêt grandissant est porté sur l'utilisation des modules solaires comme source d'énergie aux groupes 'moto-pompes'.

La majeure partie des systèmes de pompage actuellement implantés utilisent comme actionneur électrique le moteur à courant continu ou le moteur sans balais BLDC. Les problèmes de coût et de maintenance ont favorisé le moteur à induction à cage qui constitue ainsi une nouvelle alternative.

Dans cet article, une opération optimale d'un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil est présentée. Le problème d'optimisation consiste en l'amélioration du rendement de la machine par l'ajustement de la fréquence fournie par l'onduleur de tension alimentant le moteur. Pour mener une étude de comparaison, on effectue une simulation du système fonctionnant à fréquence fixe. Les résultats obtenus montrent qu'avec la technique proposée, on améliore le rendement du moteur, la stabilité de fonctionnement ainsi que le gain en eau.

2. MODELISATION DU SYSTEME

Le système de pompage est l'association d'un ensemble de sous-systèmes interconnectés qui sont le générateur photovoltaïque, l'hacheur adaptateur, d'impédance (MPPT), l'onduleur de tension, le moteur à induction à cage, la pompe centrifuge associée à une canalisation de refoulement. La figure 1 schématise le synoptique d'un tel système.

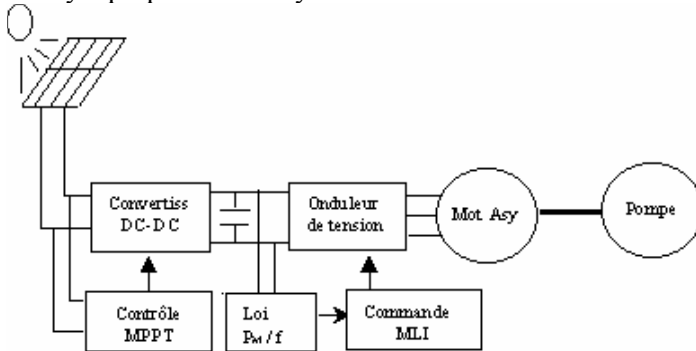


Figure 1: Synoptique du système

2.1 Modèle du générateur solaire:

C'est une matrice formée de 16 modules en série type AEG-40, dont la caractéristique I-V peut être décrite par l'équation [2] :

$$I = I_{cc} - I_0 \left(\exp\left(\frac{V + R_s \cdot I}{V_{th}}\right) - 1 \right) \quad (1)$$

L'adaptation de l'équation (1) à d'autres niveaux d'éclairéments est obtenue à travers les équations :

$$I_{cc} = I_{cc_{ref}} \cdot \left(\frac{E}{E_{ref}}\right) \quad (2)$$

$$V_{oc} = V_{oc_{ref}} + V_{th} \cdot \ln\left(\frac{E}{E_{ref}}\right) \quad (3)$$

$$I_0 = \frac{I_{cc}}{\exp\left(\frac{V_{oc}}{V_{th}}\right) - 1} \quad (4)$$

L'extraction de la puissance maximale (optimale) du générateur est assurée par un hacheur adaptateur d'impédance (Maximum Power Point Tracker), de gain en tension K :

$$K = \frac{U}{V} \quad (5)$$

2.2. Modèle de l'onduleur

La commande de l'onduleur est faite selon la stratégie PWM naturelle. Les signaux de commande des interrupteurs sont déterminés par l'intersection d'une référence sinusoïdale appelée "modulatrice" de fréquence f avec une triangulaire de haute fréquence f_p appelée "porteuse". On définit par conséquent deux indices :

- Indice de modulation : $M = \frac{f_p}{f}$

- Indice de réglage de tension r compris entre 0 et 1 : $r = \frac{V_{\text{mod}}^{\Delta}}{V_p^{\Delta}}$

Pour $M \geq 9$ et pour un calage optimum, on démontre que:

1-La fondamentale de la tension de sortie possède comme valeur efficace [3] :

$$V_m = \frac{rU}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

Les harmoniques se localisent autour des fréquences centrales $k_1.M.f$ ($k_1= 1, 2, 3, \dots$). Pour le cas étudié, on choisit : $r = 0.8$ et $M = 15$.

2.3. Modèle du moteur à induction

Le moteur à induction est modélisé selon le schéma équivalent conventionnel (figure 2).

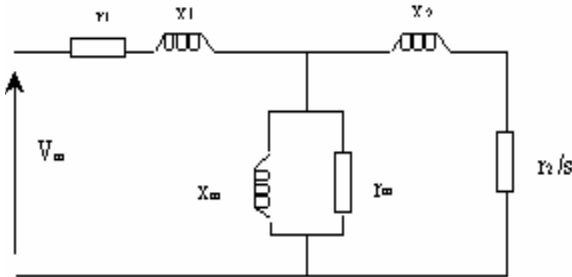


Figure 2 : schéma équivalent du moteur

Le fonctionnement est déterminé par deux types d'équations :

a) Equation électrique

$$P_{abs} = 3 \cdot R_{eq} \cdot \frac{V_m^2}{Z_{eq}^2} \quad (7)$$

Avec Z_{eq} l'impédance équivalente par phase :

$$Z_{eq} = R_{eq} + jX_{ec} \quad (8)$$

b) Equation mécanique

$$C_e = C_r + C_0 \cdot \omega \tag{9}$$

Le couple électromagnétique C_e est donné par [3] :

$$C_e = 3 \cdot p \cdot \left(\frac{V_m}{\omega_s} \right)^2 \frac{s \cdot \omega_s \cdot \frac{X_m^2}{r_2}}{\left[n - \frac{s}{r_2} (x_{11} \cdot x_{22} - x_m^2) \right]^2 + \left[x_{11} + \frac{s \cdot n \cdot x_{22}}{r_2} \right]^2} \tag{10}$$

Dans la relation (10), C_r désigne le couple résistant de la pompe centrifuge, analogue à un couple de ventilation :

$$C_r = C (1 - s)^2 \cdot \omega \tag{11}$$

C est une constante dépendant des données nominales de la pompe et C_0 est le coefficient de frottement. Le couple électromagnétique passe par un maximum dit de décrochage correspondant à un glissement :

$$s_d \cong \frac{r_2}{x^2} \tag{12}$$

2.4. Modèle de la pompe

La caractéristique Hauteur-Débit d'une pompe centrifuge est obtenue faisant appel aux lois de similitude. L'expression analytique de ce faisceau de courbes peut être approximativement décrite par la forme quadratique [2] :

$$H = a_0 \cdot \omega^2 + a_1 \cdot \omega \cdot Q + a_2 \cdot Q^2 \tag{13}$$

a_0 , a_1 et a_2 sont des constantes dépendant des dimensions de la pompe. Le rendement d'une telle pompe est le quotient de la puissance hydraulique empruntée au fluide par la puissance mécanique exercée sur l'arbre:

$$\eta_p = \frac{\rho g H Q}{C (1 - s)^3 \omega_s^3} \tag{14}$$

2.5. Modèle de la canalisation de refoulement

L'expression de la caractéristique résistante H-Q de la canalisation de refoulement, représentée sur la figure 3, est donnée par :

$$H = H_g + \psi \cdot Q^2 \tag{15}$$

ψ est une constante dépendant des coefficients de pertes de charge ainsi que du diamètre de la canalisation.

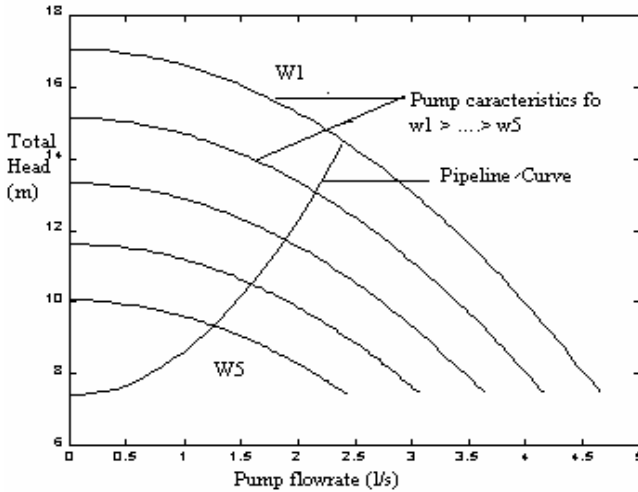


Figure 3 : Caractéristique H-Q de la pompe utilisée

3. SIMULATION AVEC FREQUENCE FIXE

Du fait de la non linéarité de la caractéristique I-V, le circuit MPPT oblige le système à fonctionner en permanence sur le point à puissance maximale du générateur, une fois l'éclairement ou la température change. Le hacheur capte alors la puissance électrique absorbée selon une période d'échantillonnage, et commence à incrémenter ou décrémenter le rapport cyclique α pour annuler le gradient de la puissance P_e :

$$\frac{\delta P_e}{\delta \alpha} = 0 \quad (16)$$

L'onduleur à commande MLI naturelle possède une fréquence de sortie fixe en ajustant la fréquence de la modulatrice $f = 50$ Hz. On aura à déterminer la valeur momentanée du vecteur :

$$X = [s \ K]^T \quad (17)$$

solution du système d'équations (18), formé par les équations (1), (5), (6), (7) et (9).

$$F(X) = 0 \quad (18)$$

4. SIMULATION AVEC FREQUENCE VARIABLE

Sur la figure 4 est illustrée l'allure du rendement du moteur comme fonction de l'éclairement et pour $f = 50$ Hz. On distingue que le moteur possède une valeur optimale du rendement $\eta_0 = 0.71$ avec un glissement $s_0 = 0.02$, obtenue pour l'éclairement nominal $E = 1000$ w/m². Une fois l'éclairement dévie de sa valeur

nominale, le rendement se dégrade impliquant l'augmentation des pertes à l'intérieur de la machine.

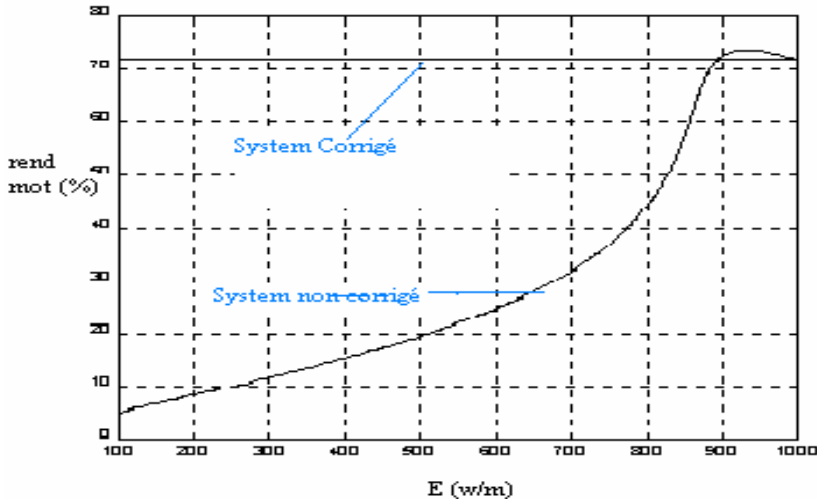


Figure 4 : Rendement du moteur

Par un ajustement adéquat de la fréquence de sortie de l'onduleur f , la valeur η_0 du rendement peut être maintenue en accord avec le changement de l'éclairement.

Pour les conditions nominales, on a l'égalité suivante :

$$P_{M_N} \cdot \eta_0 = C_1 (1 - s_0)^3 f_N^3 \quad (19)$$

Si l'éclairement change, l'équation (19) devient :

$$P_M \cdot \eta = C_1 (1 - s)^3 f^3 \quad (20)$$

Pour le maintien du rendement η_0 avec une valeur de glissement s_0 ; des équations (19) et (20), la nouvelle fréquence de l'onduleur devient [3] :

$$f = \sqrt[3]{\frac{P_M}{P_{M_N}}} f_N \quad (21)$$

Pour l'implémentation de l'algorithme, f désigne la fréquence de la modulatrice.

5. RESULTATS DE SIMULATION

La loi de commande (21) a été appliquée aux données d'un banc d'essai installé à l'unité de recherche de l'université de Batna, et qui consiste en deux réservoirs amont et aval séparés par une canalisation de refoulement. Sur les figures 4 à 8, on expose un ensemble de caractéristiques définissant les performances du système comme fonction de l'éclairement et pour une température $T=25^\circ\text{C}$.

Commentaires

- La figure 4 représente le rendement du moteur avec et sans optimisation et l'on peut remarquer que le rendement optimum $\eta_0=0.71$ est maintenu pour le système corrigé. La loi de commande agit en grande partie sur la minimisation des pertes fer du moment que ces dernières sont fonction de la fréquence.
- Sur la figure 5 est illustrée la courbe du glissement pour les deux simulations effectuées. On remarque que pour le système à fréquence fixe et pour $s < s_d$, le fonctionnement du moteur est stable, alors que pour $s > s_d$, la vitesse de la machine est le siège d'oscillations indésirables affectant la stabilité de fonctionnement. Contrairement, le système corrigé fonctionne en permanence au début de la phase stable de la caractéristique couple-vitesse ($s = s_0$), évitant par conséquent le décrochage de la machine.

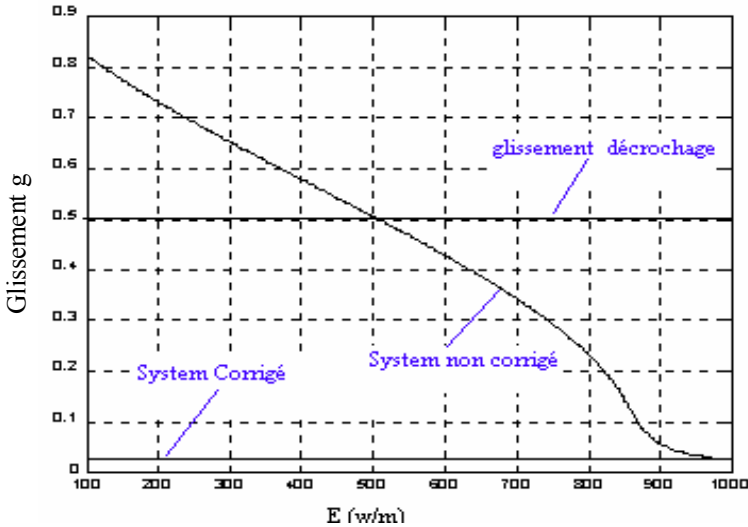


Figure 5 : Courbe du glissement

- De même, la figure 6 caractérise les allures du débit de la pompe. Ce dernier est obtenu en égalisant les équations (13) et (15). Deux remarques méritent d'être indiquées :
 1. Pour le système à fréquence variable, la pompe arrive à vaincre la hauteur géométrique et commence à délivrer l'eau à un éclairement $E_1= 250 \text{ w/m}^2$, alors que pour le système fonctionnant à fréquence fixe l'éclairement atteint la valeur $E_2= 500 \text{ w/m}^2$.
 2. La courbe du débit, pour le système corrigé, se situe au-dessus de celle du système sans correction et ceci pour toute la gamme d'éclairements. Par conséquent, on augmente le gain journalier en eau.

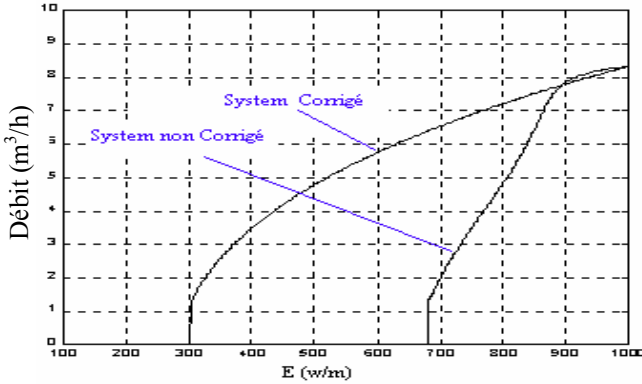


Figure 6 : Débit de la pompe

- La figure 7 représente la courbe de la fréquence d'alimentation f , où l'on constate qu'au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'éclairage nominal, la loi de commande oblige la fréquence à diminuer, et ce pour :
 - a) maintenir le glissement s à sa valeur optimale.
 - b) améliorer le rendement de la machine, en diminuant le courant de magnétisation, et en particulier pour les faibles vitesses.

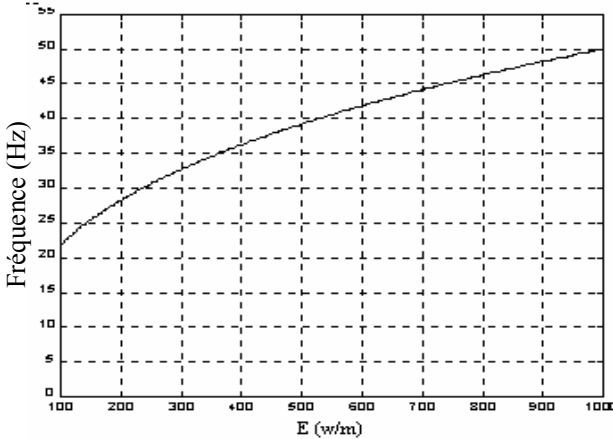


Figure 7 : Allure de la fréquence

- Sur la figure 8 est illustré le gain du hacheur adaptateur d'impédance MPPT. On distingue que le convertisseur DC-DC est du type 'Buck-Boost', qui peut être à stockage inductif ou capacitif. Cette nature est due à ce que le moteur et la pompe ne présentent pas la même puissance nominale fournie et absorbée respectivement.

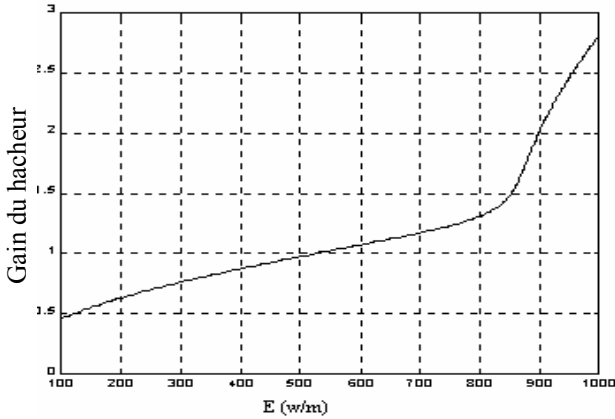


Figure 8 : Courbe du gain du hacheur

• La figure 9 montre l'allure du rendement de la pompe, où l'on remarque qu'une amélioration de ce dernier a été obtenue grâce à la loi de commande suggérée. Cette amélioration se traduit par :

- a) l'optimisation du rendement manométrique en minimisant les pertes de charges à l'intérieure de la pompe.
- b) l'optimisation du rendement volumétrique en maximisant le débit de la pompe.

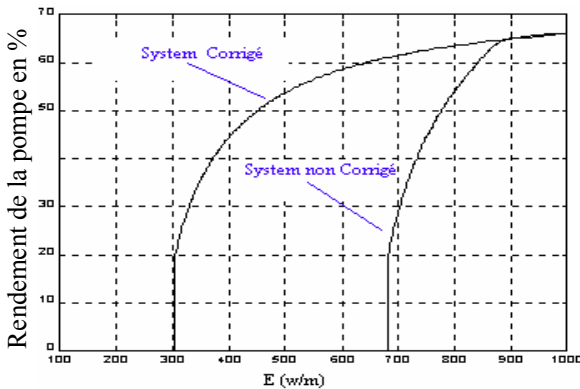


Figure 9 : Allure du rendement de la pompe

6. CONCLUSION

Une opération optimale d'un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil a été décrite dans ce travail. Le critère d'optimisation choisi permet d'une part l'amélioration du rendement du moteur à induction, et assure un fonctionnement stable d'autre part. Les résultats de simulation obtenus montrent qu'une augmentation de la quantité pompée pourra être atteinte par l'algorithme proposé.

Symboles utilisés et leur unité

V :	Tension du générateur (V).
I_{cc} :	Courant de court-circuit (A).
V_{th} :	Tension thermique (V)
I_o :	Courant de saturation inverse (A)
R_s :	Résistance série (Ω).
E :	Eclairement (w/m^2).
I_{op} :	Courant optimum du générateur solaire (A).
V_{op} :	Tension optimale du générateur (V).
P_M :	Puissance électrique maximale extraite (w).
U :	Tension de sortie de l'hacheur (V).
V_m :	Tension simple du moteur.
r_1 :	Résistance d'une phase statorique du moteur (Ω).
r_2 :	Résistance d'une phase rotorique rapportée (Ω).

161

r_m :	Résistance de magnétisation (Ω).
x_1 :	Réactance de fuites d'une phase statorique (Ω).
x_2 :	Réactance de fuites rotorique rapportée (Ω).
x_m :	Réactance de magnétisation.
$x_{11} = x_1 + x_m$:	Réactance cyclique statorique (Ω).
$x_{22} = x_2 + x_m$:	Réactance cyclique rotorique (Ω).
s :	Glissement.
ω_s :	Pulsation statorique .
H :	Hauteur manométrique totale (m).
Q :	Débit (m^3/h).
ρ :	Masse volumique de l'eau (kg/m^3).
g :	Accélération de la pesanteur (m/s^2).
H_g :	Hauteur géométrique (m).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Y. Yao, P. Bustamente and R.S. Ramshaw, 'Improvement of induction motor drive systems supplied by photovoltaic arrays with frequency control', IEEE Transactions on Energy conversion, Vol 9, No. 2, 1994.
2. A. Betka, A. Moussi and B. Azoui, 'Optimum design of photovoltaic pumping system', UPEC99, Leicester UK, 1999.
3. J.M.D.Murphy and F.G.Turnbull, 'Power Electronics Control of AC Motors', Pergamon press.