

## Conception d'un Convertisseur DC / AC à PWM Micro Programmée pour Système de Pompage PV au Fil du Soleil

M.D. Draou et S.A. Chikhi

Station d'Expérimentation des Equipements Solaires en Milieu Saharien, Route de Reggane, B.P. 478, 01000 Adrar

**Résumé** – *L'objectif de ce travail est l'étude et le développement d'un convertisseur DC / AC triphasé à sortie PWM piloté par une carte électronique utilisant la technique micro programmée; ainsi que son expérimentation sur site réel et la comparaison de l'étude théorique avec les données de l'expérimentation (analyse spectrale).*

**Abstract** - *The objective of this work is the study and the development of a three-phase converter DC/AC at exit PWM controlled by an electronic chart using the programmed micro technique; as its experimentation on real site and the comparison between the theoretical study and the data of the experimentation (spectral analysis)*

**Mots clés:** Système de pompage PV au fil du soleil - Microprocesseur - Moteur asynchrone triphasé - PWM.

### 1. INTRODUCTION

Dans cet article, nous présentons l'étude, la conception et l'expérimentation d'un convertisseur DC/AC triphasé pour la commande d'un moteur asynchrone destiné à un système de pompage d'eau au fil du soleil avec la technique de modulation micro programmée.

Nous axons la présentation sur l'élaboration du circuit de génération des signaux PWM et les techniques adoptées.

L'objectif de notre réalisation est de permettre :

- Au convertisseur de commander le moteur avec le maximum d'énergie recueillie par le générateur photovoltaïque, donc utilisation de la variation de la fréquence et de la tension de commande du moteur en fonction de l'énergie incidente avec la relation ( $U / f = Cte$ ) [1].
- Suivre la tension du générateur PV (photovoltaïque) pour permettre un transfert maximal d'énergie pour les courbes U, I du module pour différents ensoleillements.

Pour satisfaire ces objectifs, l'étude et la recherche bibliographique [2, 3] nous ont amené à choisir une modulation PWM avec la technique d'annulation des harmoniques de tension [4] et une variation de l'indice de modulation proportionnellement à la fréquence pour assurer une bonne rejection des harmoniques pour l'ensemble de l'intervalle de fréquence utilisé (20 - 50 Hz), et de ce fait la tension du générateur sera constante quelle que soit la variation de l'ensoleillement et au point optimum de la courbe U,I du générateur PV, du moins pour les valeurs grandes et moyennes de l'énergie incidente.

### 2. METHODE D'UTILISATION DE LA MODULATION PWM

#### 2.1 Etude mathématique de la modulation PWM

Le développement en série de Fourier d'une onde en PWM en double symétrie pour un indice m quelconque est de la forme suivante [1] :

$$a_n = \frac{2E}{n\pi} \left( 1 + 2 \sum_{i=1}^m (-1)^i \cos(n, \theta_i) \right) \quad (1)$$

où :  $a_n$  : coefficients de Fourier;  $\theta_i$  = instants de commutation; m : nombre d'instant de commutation pour  $\frac{1}{4}$  de période (indices de modulation); n = rang des harmoniques  $n = 2k - 1$  avec  $k \in \mathbb{N}^*$ ; E = valeur de la tension DC appliquée.

Dans notre cas d'utilisation d'un pont triphasé de puissance, nous utilisons les équations des tensions de ligne (tension entre deux points milieu du pont) et sont données par l'équation suivante :

$$a'_n = \frac{2\sqrt{3}E}{n\pi} \left( 1 + 2 \sum_{i=1}^m (-1)^i \cos(n\theta_i) \right) \quad \text{où} \quad n = 6k \pm 1 \quad (2)$$

Pour permettre une variation de la fréquence en fonction de la tension de commande du moteur avec une modulation PWM, il faudrait calculer les éléments de l'équation (1) pour chaque fréquence en donnant la valeur

adéquate de la tension pour la fréquence donnée. La méthode que nous avons étudiée et élaborée consiste à calculer les instants de commutation  $\theta_i$  pour chaque fréquence (donc tension de commande) de façon à donner l'amplitude correspondante à la fréquence au fondamental et d'annuler  $(m - 1)$  harmoniques tel qu'il est représenté ci-dessous :

$$\begin{aligned} (2/\pi) \left( 1 + 2(-\cos \theta_1 + \cos \theta_2 - \cos \theta_3 + \dots + (-1)^m \cos \theta_m) \right) &= a_1 / E \\ (2/5\pi) \left( 1 + 2(-\cos 5\theta_1 + \cos 5\theta_2 - \cos 5\theta_3 + \dots + (-1)^m \cos 5\theta_m) \right) &= 0 \\ \dots\dots\dots \\ (2/(6k \pm 1)\pi) \left( 1 + 2(-\cos(6k \pm 1)\theta_1 + \dots + (-1)^m \cos(6k \pm 1)\theta_m) \right) &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

avec :  $a_1/E$  = représente la profondeur de modulation correspondante à une fréquence donnée. Un ensemble de programmes en Matlab ont été élaborés pour :

- le calcul des instants de commutation pour chaque fréquence (20 à 50 Hz) au pas de 0.5 Hz du système d'équation (3) par la méthode Gauss Newton [5].
- le calcul des autres instants de commutation pour l'onde complète (360°).
- le calcul des instants de commutation des deux autres tensions par déphasage de 120°.
- le calcul des durées des états logiques de la combinaison des trois signaux triphasés.

La résolution du système d'équations (3) nous donne plusieurs solutions pour chaque valeur de l'indice  $m$ . Seules les solutions qui remplissent la formule ( $U / f = \text{Cte}$ ) sont retenues. A titre d'exemple, nous donnons deux figures représentant les solutions du système pour  $m = 6$  (Fig. 1) et  $m = 8$  (Fig. 2), et les spectres de 3 fréquences différentes en figure 4.

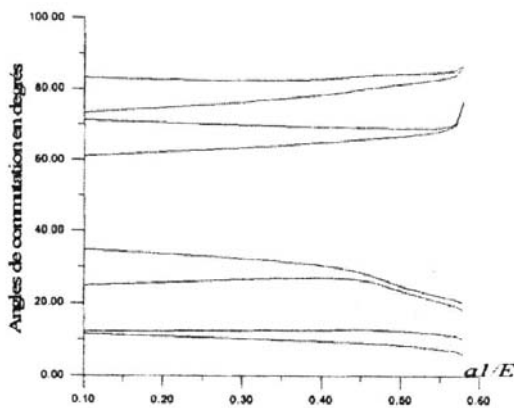


Fig. 1: Angles de commutation pour  $m = 6$

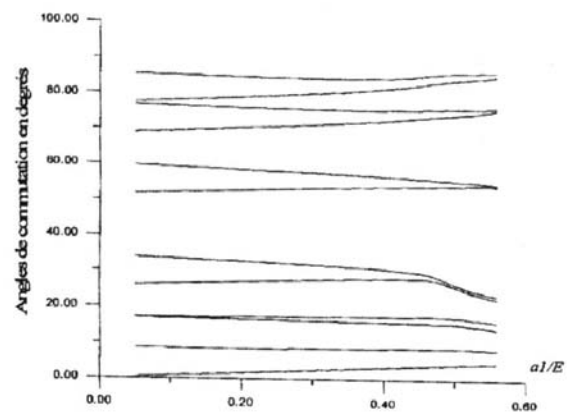


Fig. 2: Angles de commutation pour  $m = 8$

## 2.2 Mise en application de la modulation adoptée

L'organigramme adopté tient compte de la variation de la tension DC du générateur PV pour accomplir la variation de la tension de commande et de la fréquence en choisissant le vecteur des combinaisons - durées de la fréquence appropriée afin d'adapter l'énergie solaire incidente à la puissance fournie au moteur d'une manière optimale (au rendement du convertisseur près et surtout pour les éclaircissements supérieurs à 400 W/m<sup>2</sup>).

La précision des signaux et la conformité des signaux générés par l'organigramme par rapport aux signaux étudiés théoriquement dépend en grande partie de :

- La vitesse de travail du microprocesseur choisi et la durée de ses instructions
- La complexité et la longueur de l'organigramme de génération des signaux.

Pratiquement, nous avons réalisé une carte électronique à base du microprocesseur 6802 avec un PIA 6821, une EPROM de 8 ko (pour les données) et un convertisseur A/N, et nous avons pu avoir des fréquences de modulation de 2 kHz avec une bonne similitude des signaux calculés théoriquement et ceux générés par le circuit électronique.

## 2.3 Simulation des résultats de l'étude théorique

Le calcul des états logiques des trois signaux triphasés fait ressortir des cas où la durée est plus grande que la durée d'exécution du cycle de l'organigramme et qui sont éliminés comme donnée dans la mémoire des données. Nous aurons donc d'autres angles qui seront un peu différents de ceux calculés. Pour cela nous avons élaboré un programme en Matlab, qui calcule le spectre des données traitées qui seront réellement utilisées par le circuit électronique. Les résultats de simulation sont donnés en figure 3.

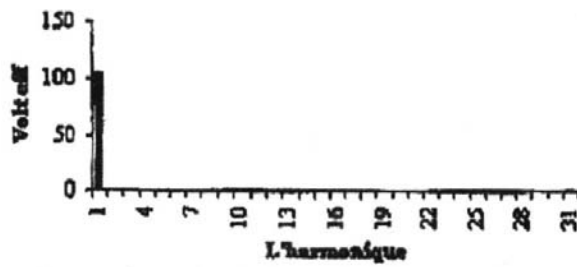
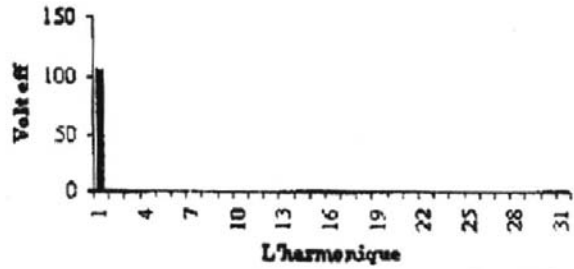
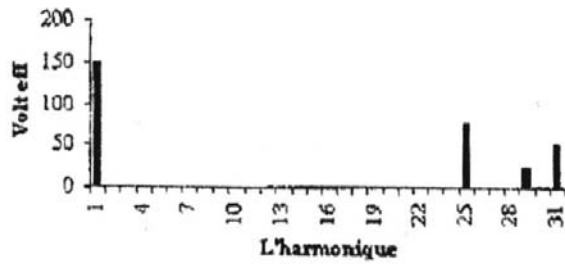
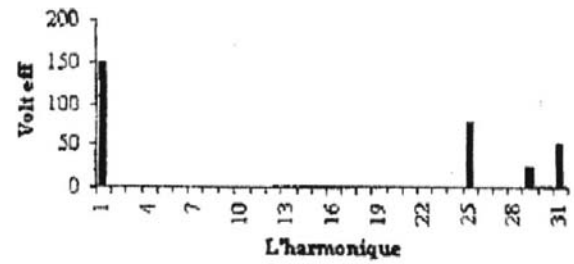
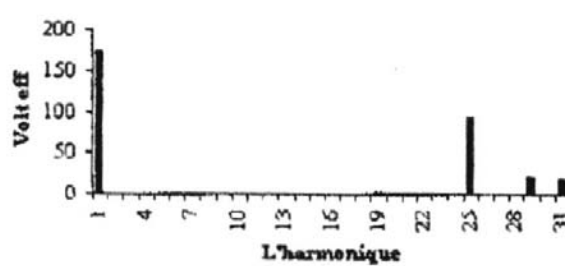
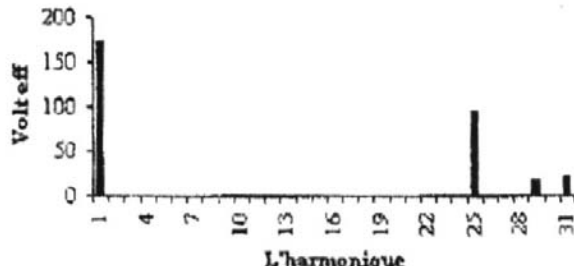
Spectre de tension de ligne simulé pour  $f = 24$  HzSpectre de tension de ligne théorique pour  $f = 24$  HzSpectre de tension de ligne simulé pour  $f = 34$  HzSpectre de tension de ligne théorique pour  $f = 34$  HzSpectre de tension de ligne simulé pour  $f = 39$  HzSpectre de tension de ligne théorique pour  $f = 39$  Hz

Fig. 3: Spectres de tension de ligne simulés et théoriques

### 3. REALISATION DU CONVERTISSEUR

Un convertisseur d'une puissance moyenne de 1,5 kVA a été réalisé pour tester les résultats du circuit de génération de signaux PWM avec la technique micro programmée. Il est constitué de :

- Un circuit de contrôle et de commande
- Un circuit de génération de signaux PWM triphasés
- Un circuit d'alimentation SMPS de 350 VDC en entrée et cinq tensions de sorties isolées [7]
- Un pont triphasé de puissance à base de transistors MOSFET de 12 A / 500 V [6]
- Un filtre d'entrée (tension génératrice PV) avec circuit de protection et de coupe circuit.

### 4. EXPERIMENTATION DU CONVERTISSEUR

Ce convertisseur a été inséré dans un système de pompage (motopompe immergée de 1,1 kW / 380 VAC, et un générateur de 21 modules solaires UDTS 50) au niveau de la station avec un banc de tests et de mesure, constitué d'un énergimètre Fluke, d'une acquisition de données Fluke et de sonde de mesure (courant et tension AC / DC). Etant donné que le convertisseur possède une sortie modulée triphasée de 220 VAC, nous avons donc adjoint un transformateur élévateur pour l'adapter au motopompe.

Un certain nombre de mesures ont été faites concernant le rendement du convertisseur (de l'ordre de 92 %), des modules PV et du système complet, mais nous sommes surtout intéressés par la réponse spectrale de l'ensemble du système (Fig. 4). Malgré la présence du transformateur, nous remarquons que le spectre relevé lors de l'expérimentation du système est très proche de celui simulé par calcul des données réelles stockées dans la mémoire du circuit électronique.

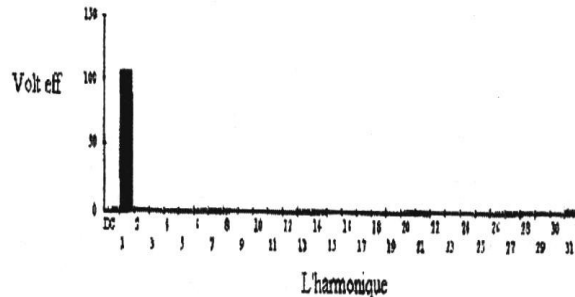
Les graphes correspondants aux valeurs simulées et théoriques du spectre de tension de ligne ont été calculés pour une tension constante appliquée au pont triphasé de 304.5 V.

Le tableau 1 représente les fréquences théoriques, simulées et mesurées.

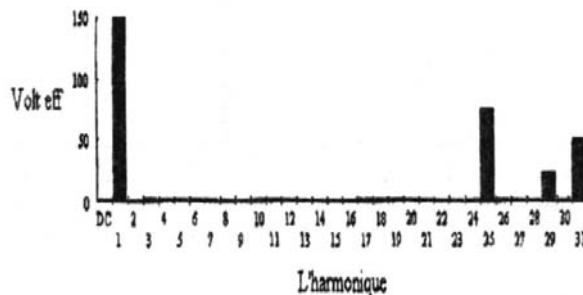
**Tableau 1:** Valeurs de quelques fréquences

Fréquence théorique	Fréquence simulée	Fréquence mesurée
24,00	24,01	23,98
34,00	33,76	33,67
39,00	38,91	38,90

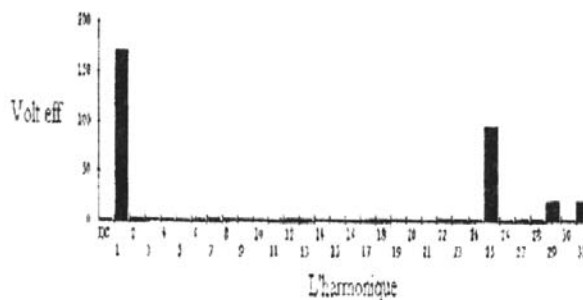
Les graphes mesurés ont été obtenus par l'énergimètre.



Tension de ligne mesurée pour  $f = 24$  Hz



Tension de ligne mesurée pour  $f = 34$  Hz



Tension de ligne mesurée pour  $f = 39$  Hz

Fig. 4: Spectres de tension de ligne mesurées pour certaines fréquences

## REFERENCES

- [1] H. Bühler, '*Convertisseurs Statiques*', Ed. 1991.
- [2] R. Le Doeuff and J. Robert. '*Modelling and Control of Electrical Machines*', Ed. 1991.
- [3] Y. Ait-Gougam, A. Nafa et T. Morsli, '*Etude des Techniques de Modulation Optimale pour Onduleur de Tension Alimentant un Moteur*'.
- [4] G. Séguier, '*Electronique Industrielle*', Ed. Tec. & Doc.
- [5] Siliconix-Inc, '*MOS Power Data Book*', 1985.
- [6] Thomson, '*Discrete Device, Short Form Catalogue*', 1986.
- [7] J.L. Dalmasso, '*Electronique de Puissance et Commutation*', Ed. Tec. & Doc.