

Printed from

Journal of Scientific Research

<http://www2.univ-bechar.dz/jrs/>

Réalisation d'une commande d'un onduleur triphasé à cinq niveaux avec vérification expérimentale

FZ ZERHOUNI¹, M. ZEGRAR²,

¹ Département d'électronique, faculté du génie électrique, USTOMB
Bp 1505, Oran El M'naouer
Email : zerhouni_fz@yahoo.fr

² Département d'électronique, faculté du génie électrique, USTOMB
Bp 1505, Oran El M'naouer
Email : zegrar2@yahoo.fr

Published on 30 December 2012

The Editor, on behalf of the Editorial Board and Reviewers, has great pleasure in presenting this number of the Journal of Scientific Research. This journal (ISSN 2170-1237) is a periodic and multidisciplinary journal, published by the University of Bechar. This journal is located at the interface of research journals, and the vulgarization journals in the field of scientific research. It publishes quality articles in the domain of basic and applied sciences, technologies and humanities sciences, where the main objective is to coordinate and disseminate scientific and technical information relating to various disciplines.

The research articles and the development must be original and contribute innovative, helping in the development of new and advanced technologies, like the studies that have concrete ideas which are of primary interest in mastering a contemporary scientific concepts. These articles can be written in Arabic, French or English. They will not be published in another journal or under review elsewhere. The target readership is composed especially of engineers and technicians, teachers, researchers, scholars, consultants, companies, university lab, teaching techniques and literary ... The journal is obtainable in electronic form, which is available worldwide on the Internet and can be accessed at the journal URL:

<http://www2.univ-bechar.dz/jrs/>.

Director of Journal
Pr. BELGHACHI Abderrahmane

Editor in Chief
Dr. HASNI Abdelhafid

Co-Editor in Chief
Dr. BASSOU Abdesselam

Editorial Member

TERFAYA Nazihe
BOUIDA Ahmed
LATFAOUI Mohieddine
MOSTADI Siham

Reviewers board of the Journal.

Pr. KADRY SEIFEDINE (The American University in KUWAIT)
Pr. RAZZAQ GHUMMAN Abdul (Al Qassim University KSA)
Pr. PK. MD. MOTIUR RAHMAN (University of Dhaka Bangladesh)
Pr. MAHMOOD GHAZAW Yousry (Al Qassim University KSA)
Pr. KHENOUS Houari Boumediene (King Khalid University KSA)
Pr. RAOUS Michel (Laboratory of Mechanic and Acoustic France)
Pr. RATAN Y. Borse (M S G College Malegaon Camp India)
Pr. LEBON Frédéric (University of Aix-Marseille 1 France)
Pr. MONGI Ben Ouédou (National Engineering School of Tunis)
Pr. BOUKELIF Aoued (University of Sidi Bel Abbes Algeria)
Pr. DJORDJEVICH Alexander (University of Hong Kong)
Pr. BENABBASSI Abdelhakem (University of Bechar Algeria)
Pr. BOULARD Thierry (National Institute of Agronomic Research France)
Pr. LUCA Varani (University of Montpellier France)
Pr. NEBBOU Mohamed (University of Bechar Algeria)
Dr. FELLAH Zine El Abidine Laboratory of Mechanic and Acoustic France)
Dr. ZHEN Gao (University of Ontario Institute of Technology Canada)
Dr. OUERDACHI Lahbassi (University of Annaba Algeria)
Dr. HADJ ABDELKADER Hicham (IBISC – University of Evry France)
Dr. KARRAY M'HAMED ALI (National Engineering School of Tunis)
Dr. ALLAL Mohammed Amine (University of Tlemcen Algeria)
Dr. FOUCHAL Fazia (GEMH - University of Limoges France)
Dr. TORRES Jeremi (University of Montpellier 2 France)
Dr. CHANDRAKANT Govindrao Dighavka (L. V. H. College of Panchavati India)
Dr. ABID Chérifa (Polytech' University of Aix-Marseille France)
Dr. HAMMADI Fodil (University of Bechar Algeria)
Dr. LABBACI Boudjema (University of Bechar Algeria)
Dr. DJERMANE Mohammed (University of Bechar Algeria)
Dr. BENSFAI Abd-El-Hamid (University of Tlemcen)
Dr. BENBACHIR Maamar (University of Bechar Algeria)

Pr. BALBINOT Alexandre (Federal University of Rio Grande do Sul Brazil)
Pr. TEHIRICHI Mohamed (University of Bechar Algeria)
Pr. JAIN GOTAN (Materials Research Lab., A.C.S. College, Nandgaon India)
Pr. SAIDANE Abdelkader (ENSET Oran Algeria)
Pr. DI GIAMBERARDINO Paolo (University of Rome « La Sapienza » Italy)
Pr. SENGOUGA Nouredine (University of Biskra Algeria)
Pr. CHERITI Abdelkarim (University of Bechar Algeria)
Pr. MEDALE Marc (University of Aix-Marseille France)
Pr. HELMAOUI Abderrachid (University of Bechar Algeria)
Pr. HAMOUINE Abdelmadjid (University of Bechar Algeria)
Pr. DRAOUI Belkacem (University of Bechar Algeria)
Pr. BELGHACHI Abderrahmane (University of Bechar Algeria)
Pr. SHAILENDHRA Karthikeyan (AMRITA School of Engineering India)
Pr. BURAK Barutcu (University of Istanbul Turkey)
Pr. LAOUFI Abdallah (University of Bechar Algeria)
Dr. SELLAM Mebrouk (University of Bechar Algeria)
Dr. ABDUL RAHIM Ruzairi (University Technology of Malaysia)
Dr. BELBOUKHARI Nasser (University of Bechar Algeria)
Dr. CHIKR EL MEZOUAR Zouaoui (University of Bechar Algeria)
Dr. BENACHAIBA Chellali (University of Bechar Algeria)
Dr. KAMECHE Mohamed (Centre des Techniques Spatiales, Oran Algeria)
Dr. MERAD Lotfi (Ecole Préparatoire en Sciences et Techniques Tlemcen Algeria)
Dr. BASSOU Abdesselam (University of Bechar Algeria)
Dr. ABOU-BEKR Nabil (University of Tlemcen Algeria)
Dr. BOUNOUA Abdennacer (University of Sidi bel abbes Algeria)
Dr. TAMALI Mohamed (University of Bechar Algeria)
Dr. FAZALUL RAHIMAN Mohd Hafiz (University of Malaysia)
Dr. ABDELAZIZ Yazid (University of Bechar Algeria)
Dr. BERGA Abdelmadjid (University of Bechar Algeria)
Dr. Rachid KHALFAOUI (University of Bechar Algeria)
Dr. SANJAY KHER Sanjay (Raja Ramanna Centre for Advanced Technology INDIA)

Journal of Scientific Research

P.O.Box 417 route de Kenadsa
08000 Bechar - ALGERIA
Tel: +213 (0) 49 81 90 24
Fax: +213 (0) 49 81 52 44

Editorial mail: jrs.bechar@gmail.com
Submission mail: submission.bechar@gmail.com
Web: <http://www2.univ-bechar.dz/jrs/>



Réalisation d'une commande d'un onduleur triphasé à cinq niveaux avec vérification expérimentale

FZ ZERHOUNI¹, M. ZEGRAR²,

¹ Département d'électronique, faculté du génie électrique, USTOMB
Bp 1505, Oran El M'naouer
Email : zerhouni_fz@yahoo.fr

³ Département d'électronique, faculté du génie électrique, USTOMB
Bp 1505, Oran El M'naouer
Email : zegrar2@yahoo.fr

Abstract – Our work is to study and realize a three-phase inverter with five levels to be coupled to a photovoltaic generator for feeding an induction motor, or to provide an independent power supply. Practical tests have focused on the quality of the output in terms of harmonic order. The structure produced can be used to test any type of control. Implementation support is a PIC microcontroller to provide commutations. The use of a microcontroller, is for the management of successive times in real time. For the realization of the inverter, we used the MOSFETs. Their grid control must be particularly suited to their specific characteristics. We took the practical results of the calculated spectrum and THD, both quantities necessary to judge the quality of the output voltage of the inverter.

Keywords: convertisseur multi niveaux, harmoniques, MOSFET, spectre.

I. Introduction

Les onduleurs de tension multi-niveaux constituent une fonction incontournable de l'électronique de puissance. La tension de sortie de l'onduleur peut être de type pleine onde (basse fréquence) ou de type PWM (haute fréquences). L'onduleur que nous avons réalisé est à cinq niveaux. Une commande pleine onde correspond à deux angles de commutation par quart de période. Cela nous laisse deux degrés de liberté pour agir sur la tension de sortie. Un degré de liberté peut être dédié au contrôle de l'amplitude du fondamental quant au second il peut être exploité pour éliminer un harmonique de faible rang. Le support informatique de notre réalisation est un microcontrôleur du type pic 16F877. Notre étude consiste à étudier l'apport de nouvelles techniques de commande (PWM) dans le domaine des onduleurs multi niveaux. Pour y parvenir un onduleur cinq niveaux à sources de tension séparées sera réalisé [1-2]. La commande, quant à elle sera étudiée avant d'être implémentée sur un microcontrôleur du type 16F877. Des tests pratiques permettront d'appuyer les résultats prédits théoriquement puis simulés

II. Synoptique général

La figure (1) illustre le schéma synoptique de notre réalisation. Il est constitué essentiellement de trois blocs. Le premier bloc consiste à générer à travers le microcontrôleur les signaux de commande de notre onduleur. Le deuxième bloc regroupe les douze interfaces de puissance avec des masses isolées. Dans ce bloc les signaux de commande sont isolés galvaniquement de la partie puissance avant d'être mis en forme et amplifiés pour attaquer les grilles des MOSFETs constituant l'onduleur [2].



Figure.1. synoptique général de la maquette.

Pour la réalisation de l'onduleur multi-niveaux alimentant un moteur asynchrone MAS, nous avons associé trois bras ; chaque bras de l'onduleur est

constitué de quatre interrupteurs en série. Des MOSFETs, montés en antiparallèle avec des diodes de roue libre, assureront les rôles d'interrupteurs bidirectionnels [3-6].

III. Implémentation d'un programme pour l'élimination des harmoniques

La tension de sortie de l'onduleur peut être de type pleine onde (basse fréquence) ou de type PWM (haute fréquences). Chaque technique présente des avantages et des inconvénients. Mais dans ce genre d'onduleurs (multi niveaux), la commande pleine onde est plus avantageuse. En effet plus le nombre de niveaux augmente plus on se rapproche de la forme sinusoïdale donc avec un minimum d'harmoniques. L'onduleur que nous avons réalisé est à cinq niveaux. Une commande pleine onde correspond à deux angles de commutation par quart de période. Cela nous laisse deux degrés de liberté pour agir sur la tension de sortie. Un degré de liberté peut être dédié au contrôle de l'amplitude du fondamental quant au second il peut être exploité pour éliminer un harmonique de faible rang.

La figure (2) ci-dessus présente la forme d'onde de la tension de sortie de l'onduleur triphasé à cinq niveaux :

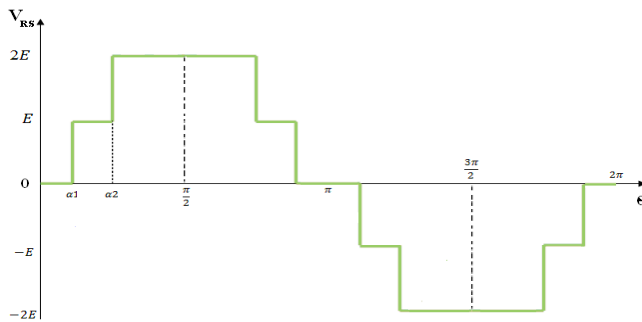


Figure 2. Forme de tension de sortie de l'onduleur triphasé à cinq niveaux.

A cause de la caractéristique de la courbe, qui est symétrique par rapport au quart et à la demi-période, la série de Fourier est simplifiée et l'étude se limitera seulement au quart de période de cette courbe.

La décomposition en série de Fourier, montre l'existence d'harmoniques d'ordre impairs seulement [1-4].

La composante continue est calculée par :

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{RS} d\theta = 0 \quad (1)$$

On déduira facilement qu'après calcul que la composante continue est nulle.

Le calcul du coefficient a_n est donnée par :

$$a_n = \frac{2}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{RS} \cos(n\theta) d\theta \quad (2)$$

Puisque V_{RS} est une fonction impaire, alors ($a_n = 0$). L'expression du coefficient b_n est :

$$b_n = \frac{2}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{RS} \sin(n\theta) d\theta \quad (3)$$

Après intégration, et moyennement quelques calculs, on aboutit au système algébrique d'équations non linéaire suivant.

$$b_n = 4E/n\pi (\cos n\alpha_1 + \cos n\alpha_2 + \dots + \cos n\alpha_n) \quad (4)$$

Pour notre système triphasé équilibré, les harmoniques multiples de 3 vont s'annuler et avec deux angles de commutation α_1 et α_2 on peut éliminer les harmoniques (5, 7).

Pour cela, il faut résoudre le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \cos 5\alpha_1 + \cos 5\alpha_2 = 0. \\ \cos 7\alpha_1 + \cos 7\alpha_2 = 0. \end{cases} \quad (5)$$

On peut aussi reformuler le système d'équation de manière à ce qu'avec la première équation, on fixe l'amplitude du fondamentale et avec l'autre on élimine un harmonique.

Mais, dans le cas d'un onduleur triphasé équilibré, il nous faut un déphasage de 120° entre une phase par rapport à l'autre.

Donc, il faut que :

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 60^\circ. \quad (6)$$

La figure (3) démontre cette 3^{ème} condition pour avoir un déphasage de 120° entre les trois tensions de phases d'un onduleur triphasé équilibré.

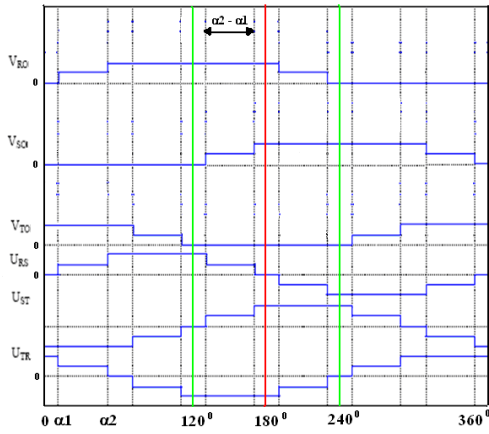


Figure 3. Déphasage de 120° entre les trois phases d'un onduleur triphasé équilibré.

Donc, on doit ajouter une 3^{ème} équation pour respecter ce déphasage de 120° et on résout ce nouveau système d'équations :

$$\begin{cases} \cos 5\alpha_1 + \cos 5\alpha_2 = 0. \\ \cos 7\alpha_1 + \cos 7\alpha_2 = 0. \\ \alpha_1 + \alpha_2 = 60^\circ. \end{cases} \quad (7) \quad (\text{pour que le déphasage soit } 120^\circ \text{ entre les 3 phases})$$

La résolution de ce nouveau système d'équations est **impossible**. Partant de la condition (3), seule une équation peut être résolue à la fois soit(2) soit(1).

Pour le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} \cos 5\alpha_1 + \cos 5\alpha_2 = 0. \\ \alpha_1 + \alpha_2 = 60^\circ. \end{cases} \quad (8)$$

$$\alpha_1 = 12^\circ. \quad \alpha_2 = 48^\circ.$$

Avec les valeurs de ces deux angles de commutations α_1 et α_2 , on peut éliminer le 5^{ème} harmonique et fixer l'amplitude du fondamentale.

IV. Stratégie de commande à pleine onde

Pour un convertisseur à deux états, un seul point de fonctionnement est possible en pleine onde ; la durée de conduction du couple G_i - diode est égale à une demi-période [1-5]. La structure à cinq états nous offre un degré de fonctionnement supplémentaire illustré à la figure (4). Dans ce cas, il est possible de faire varier le taux de conduction résultant ; ce mode de fonctionnement est parfois appelé « quasi pleine onde ». La figure (5) montre

l'allure théorique des tensions ainsi que le diagramme de conduction des différents semi-conducteurs dans le cas d'un fonctionnement en pleine onde. Le taux de conduction étant inférieur à 1, les potentiels des bornes R, S, T sont référencés au point O et ils se caractérisent par trois états (2E, E, 0).

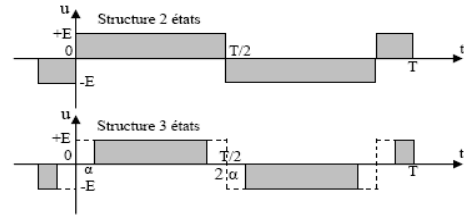


Figure 4. Allure des potentiels de phase lors d'un fonctionnement en pleine onde pour les deux types de structures.

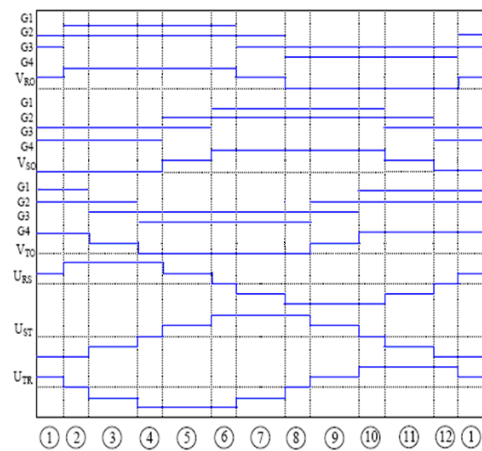


Figure 5. Séquences de fonctionnement de l'onduleur triphasé cinq états en pleine onde et formes d'ondes des tensions simples et entre phases.

La description du fonctionnement présentée à la figure (6) est décomposée en plusieurs configurations. Chaque configuration correspond à un schéma sur lequel l'état de conduction des semi-conducteurs est mis en évidence. Pour décrire les différentes configurations de fonctionnement du convertisseur, regardons d'abord les valeurs que peut prendre une tension simple V_{RO} , par exemple. La tension simple V_{RO} est entièrement définie par l'état des quatre interrupteurs du premier bras de l'onduleur, constitués chacun par un interrupteur qui peut être un transistor, un GTO ou bien un IGBT et une diode en antiparallèle : $K_1 = [G1-D1]$, $K_2 = [G2-D2]$, $K_3 = [G3-D3]$, $K_4 = [G4-D4]$. Les configurations possibles d'un seul bras d'interrupteur est de $2^4 = 16$ états que l'on peut représenter par un quadruplet de 0 ou de 1 suivant l'état des interrupteurs K_1, K_2, K_3 et K_4 [1-6].

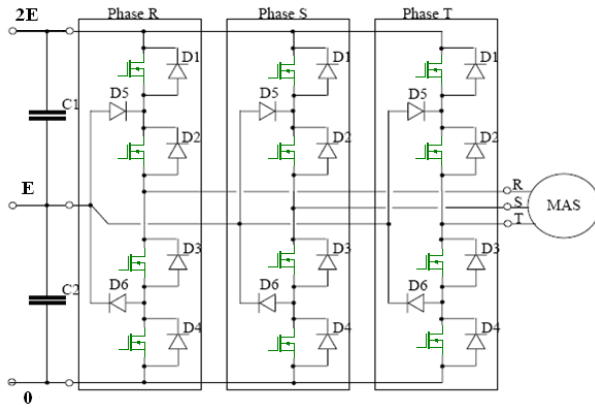


Figure 6. structure de l'onduleur triphasé à cinq niveaux

V. Tests et Résultats Pratiques

Afin de vérifier le bon fonctionnement de l'onduleur réalisé, les tests suivants ont été effectués : Ce test a été effectué en utilisant la technique pleine onde pour voir la qualité du signal aux bornes de l'onduleur triphasé, consistant à l'élimination des harmoniques multiples de 3 et le 5^{ème} harmonique ou l'élimination des harmoniques multiples de 3 et le 7^{ème} harmonique. On a utilisé deux générateurs photovoltaïques GPV séparés de tensions continues E=60 V (chacun) pour l'alimentation de l'onduleur et un capteur pour visualiser le courant qui traverse le moteur asynchrone triphasé MAS. Les figures (7) et (8) montrent respectivement des signaux complémentaires et le temps mort écoulé avant chaque transition d'un niveau bas à un niveau haut. On vérifie bien que les signaux de commandes complémentaires qui sortent de pic présentent bien un retard à l'amorçage (temps mort) comme on le souhaite pour éviter tout court-circuit des alimentations.

En figure (9), on vérifie le déphasage de 120° entre les trois phases.

Un exemple relevé sur l'oscilloscope est représenté sur la figure (10). On vérifie si les tensions (VR0, VS0, VT0) générées entre chaque phase et la référence négative de l'alimentation sont conformes à ceux qu'on a programmés et vérifier les tensions entre phase qui en résulte.

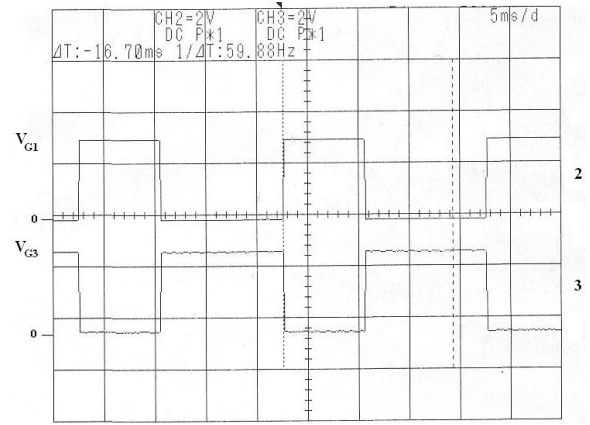


Figure 7. Deux signaux de commandes d'un bras complémentaires.

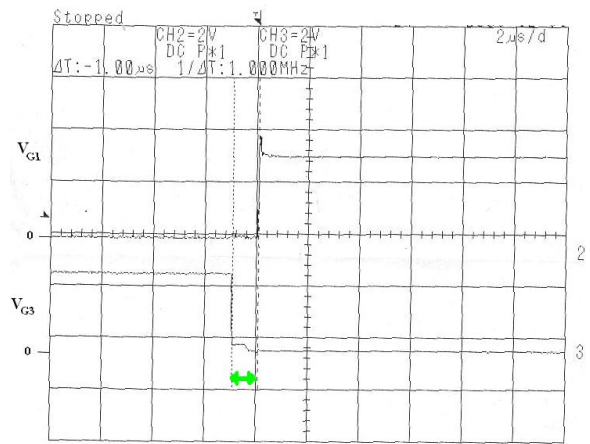


Figure 8. Retard de 1 µs entre deux commutations.

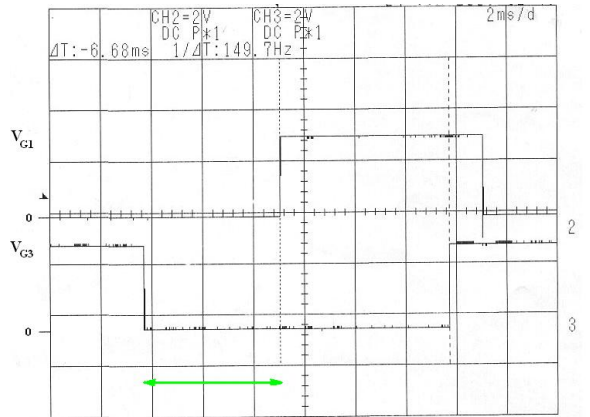


Figure 9. Déphasage de 120° entre deux phases.

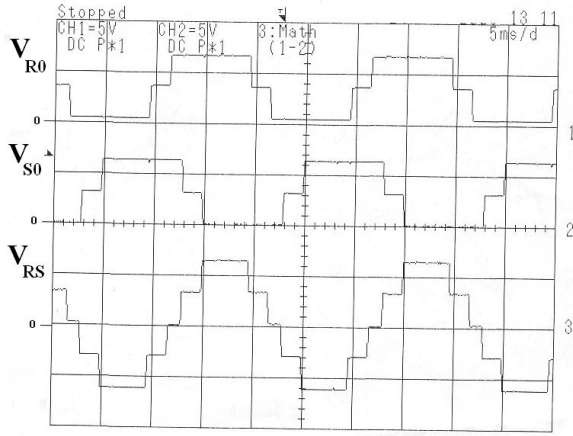


Figure 10. Relation entre la Tension de sortie de l'onduleur triphasé à cinq niveaux VRS et les deux tensions simples VR0 et VS0.

La figure (11) montre la tension composée au niveau de la sortie de l'onduleur triphasé à 5 niveaux.

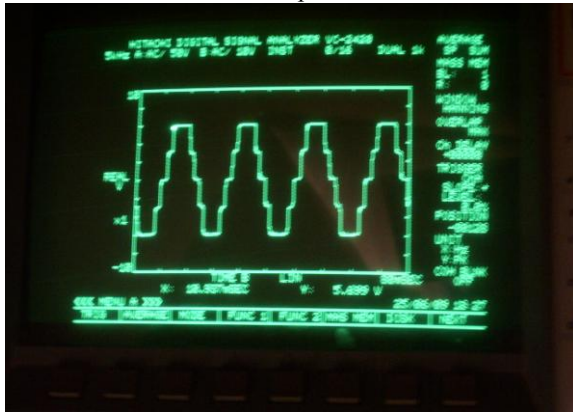


Figure 11. Tension composé au niveau de la sortie de l'onduleur.

La figure (12) montre le spectre de la tension de sortie de l'onduleur triphasé :



Figure 12. Spectre de tension de sortie de l'onduleur.

- La fréquence de la fondamentale = 50.0 Hz.
- L'amplitude de la fondamentale = 61 V ; elle est conforme à la valeur théorique qui est de :

$$V1 = 4E/\pi (\cos \alpha1 + \cos \alpha2) = (4*30/\pi) (\cos 12^\circ + \cos 48^\circ) = 62.95V \quad (10)$$

Les harmoniques multiples de 3 sont éliminées (150, 300, 450Hz, ...). Le 5^{ème} harmonique est éliminé (250 Hz) ; il ne figure pas sur le spectre de la tension de sortie. Le premier harmonique de faible rang est le 7^{ème} harmonique (350Hz), il a une amplitude de 3.5V ; cette valeur pratique est aussi conforme à la valeur théorique qui est de :

$$V7 = (4E/7\pi) (\cos 7\alpha1 + \cos 7\alpha2) = (4*30/7\pi) [\cos 7(12^\circ) + \cos 7(48^\circ)] = 4.55V \quad (11)$$

La figure (13) montre le courant du signal de sortie de l'onduleur avec un moteur asynchrone triphasé sans charge (à vide). On remarque que la courbe de courant est presque sinusoïdale.

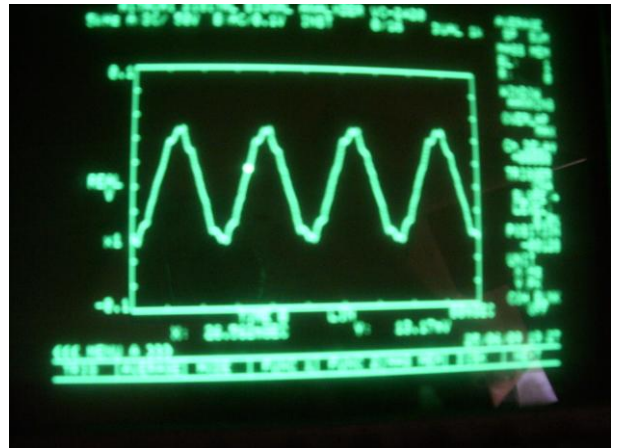


Figure 13. Courant au niveaux de moteur asynchrone triphasé.

La figure (14) montre le spectre de courant de sortie de l'onduleur .



Figure 14 . Spectre de courant de ligne.

On remarque que le spectre de courant présente très peu d'harmoniques. Les harmoniques de faibles rangs sont quasiment négligeables devant la fondamentale.

VI. Conclusion

Dans ce travail, on a étudié puis fait des tests pratiques de technique pleine onde pour visualiser l'allure des tensions et analyser le spectre et relever l'amplitude et la fréquence du fondamental et vérifier les fréquences des harmoniques éliminées. La commande pleine onde de l'élimination des harmoniques a considéré deux angles de commutations, cela peut être facilement étendu à plusieurs angles de commutation c-à-d à une commande MLI. Là, le problème est de se fixer un critère de performance à optimiser et de calculer les angles de commutations correspondants en résolvant un système d'équations transcendentales.

- [1] Zhang, Xiaotian; Spencer, Joseph W., Study of Multisampled Multilevel Inverters to Improve Control Performance, IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS Vol.27 Issue: 11, NOV 2012, pp: 4409-4416.
- [2] Hadj dida , Commande d'un moteur à induction par un onduleur multiniveau, PFE en ELN , encadreur M. zegrar , 2009.
- [3] Boller, Till; Holtz, Joachim; Rathore, Akshay K., Optimal Pulsewidth Modulation of a Dual Three-Level Inverter System Operated From a Single DC Link, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS Vol. 48 Issue: 5, SEP-AUG 2012, pp: 1610-1615.
- [4] Saribulut, Lutfu; Teke, Ahmet; Meral, M. Emin; et al., Computer simulation and experimental implementation of a PIC-controlled hybrid multilevel inverter for undergraduate laboratories, COMPUTER APPLICATIONS IN ENGINEERING EDUCATION Vol.20 Issue: 3, SEP 2012, pp: 445-453.
- [5] Panda, Anup Kumar; Suresh, Yellasiri, Research on cascade multilevel inverter with single DC source by using three-phase transformers, INTERNATIONAL JOURNAL OF ELECTRICAL POWER & ENERGY SYSTEMS Vol.40 Issue: 1 SEP 2012, pp: 9-20.
- [6] Ghazanfari, Amin; Mokhtari, Hossein; Firouzi, Mohsen, Simple Voltage Balancing Approach for CHB Multilevel Inverter Considering Low Harmonic Content Based on a Hybrid Optimal Modulation Strategy, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY Vol. 27 Issue: 4, OCT 2012, pp: 2150-2158.

Références

Journal of Scientific Research

**P.O.Box 417 route de Kenadsa
08000 Bechar - ALGERIA
Tel: +213 (0) 49 81 90 24
Fax: +213 (0) 49 81 52 44
Editorial mail: jrs.bechar@gmail.com
Submission mail: submission.bechar@gmail.com
Web: <http://www2.univ-bechar.dz/jrs/>**
