

COMMANDE D'UN ONDULEUR DE TENSION A L'AIDE D'UN PROCESSEUR DE SIGNAL ET D'UN F.P.G.A.

Ph. DEGOBERT, X. GUILLAUD et D. LORIOU
Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille (L2EP)
Groupe E.N.S.A.M.
8, Boulevard Louis XIV - 59046 LILLE Cedex (France)

TEL : 03-20-62-22-29 FAX : 03-20-62-27-50
e-mail : degobert@lille.ensam.fr

Résumé

La majorité des techniques de Modulation de Largeur d'Impulsions (*MLI*) pour onduleurs se distingue par l'utilisation de références ou de fonctions de modulation. L'emploi de **fonctions de modulation non sinusoïdale** permet d'améliorer considérablement les performances du convertisseur de puissance : augmentation du fondamental et réduction des harmoniques contenus dans la tension de sortie. Toutefois, ces méthodes sont difficiles voire impossibles à mettre en oeuvre dans une commande temps réel [10].

L'article rappelle d'abord l'historique et les intérêts apportés par les techniques de modulation non sinusoïdale. Deux technologies sont appliquées à une technique de modulation adaptée à la commande numérique. La première utilise un système de table gérée par un compteur [1], la seconde utilise un F.P.G.A comme circuit d'interface [11]. L'architecture matérielle est présentée et l'analyse des résultats de simulation et expérimentaux montre la qualité spectrale des signaux obtenus [12].

INTRODUCTION

L'onduleur de tension est un *convertisseur statique* qui permet de transformer un signal continu fixe en un ou plusieurs signaux sinusoïdaux de fréquence variable. Le séquençage imposé aux interrupteurs statiques qui constituent des *cellules de commutation*, réalise une Modulation de Largeur des Impulsions de tension appliquées à la charge. La *figure 1* présente le cas d'un onduleur de tension triphasé qui permet la variation de vitesse d'un moteur asynchrone par un *contrôle fréquentiel* des courants (i_1, i_2, i_3).

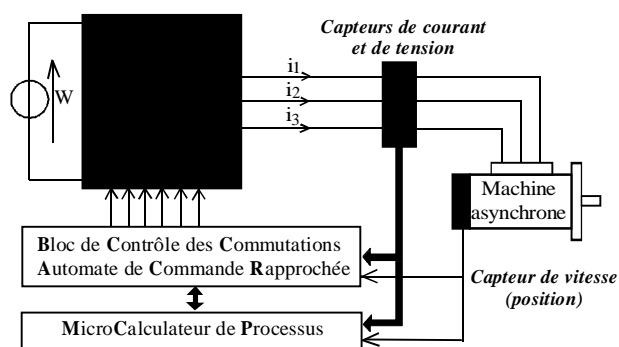


Figure 1 : Architecture globale du système

Les techniques modernes de MLI produisent des instants de commutation qui permettent de **supprimer les harmoniques de rang bas** dans la tension de sortie de l'onduleur.

La plupart de ces méthodes ne peuvent pas être utilisées en temps réel car les instants de commutation sont soit pré programmés dans des tables (*méthode OHS*) [8], soit basés sur le principe de comparaison

entre un signal triangulaire (*porteuse*) et une référence (*modulante*) qui reflète le fondamental de la tension de sortie onduleur que l'on désire (*méthode MF*) [9].

Le concept de la *fonction de modulation non sinusoïdale* ayant pour but de minimiser la distorsion harmonique de la tension de sortie onduleur tout en augmentant son fondamental a été introduit il y a une dizaine d'années [6].

Néanmoins, cette technique n'est pas non plus adaptée à la commande numérique ; en effet, cette méthode consiste à superposer au signal de référence une distorsion par l'addition de 16,7 % d'harmonique trois, ce qui nécessite des calculs importants en temps réel ainsi que la connaissance préalable de la forme d'onde de référence.

Ces dernières années, beaucoup d'efforts ont été déployés pour numériser la méthode MF dans l'objectif de remplacer les circuits analogiques traditionnels. On utilise une approche différente basée sur les principes de l'égalité entre les *valeurs moyennes* de la tension de référence sinusoïdale (*fonction génératrice de conversion*) et la tension de sortie pulsée [7].

Des études menées sur la position des impulsions à l'intérieur de l'intervalle temporel considéré ont conclu que les meilleurs résultats spectraux étaient obtenus pour des *impulsions centrées* et une période d'échantillonnage égale à un sous multiple impair de la période du fondamental de l'onde de sortie [3].

Plusieurs solutions sont envisageables dans le cadre d'application au contrôle des machines électriques triphasées. Nous présentons ici deux possibilités l'une basée sur la gestion de motifs stockés en E.P.R.O.M., l'autre utilisant des F.P.G.A..

PRINCIPES DE COMMANDE [3]

Le processus à commander est constitué de la machine électrique pilotée par l'onduleur. La nature discontinue du fonctionnement du convertisseur est masquée par une modélisation en valeur moyenne sur la période de commutation (T_c).

On appelle fonction de connexion f_{ci} , l'état de l'interrupteur K_{ci} . On associe à cette fonction de connexion, un grandeur continue f_{cig} , appelée fonction génératrice de connexion telle que :

$$f_{cig} = \frac{1}{T_c} \int_k^{(k+1)T_c} f_{ci}(t) dt$$

Ainsi la commande 'bas niveau' d'un convertisseur statique se résume à la modulation de cette grandeur pour obtenir l'état de la commande assimilée, dans ce contexte, à l'état de l'interrupteur.

DECOMPOSITION FONCTIONNELLE DE LA COMMANDE RAPPROCHEE

La *figure 2* représente le schéma fonctionnel de la commande rapprochée qu'il faut mettre en oeuvre pour réaliser une *commande numérique de moteur asynchrone*. Le Micro Calculateur du Processus fournit les références de flux et de couple nécessaires au contrôle vectoriel de la machine.

L'Automate de Commande Rapprochée peut se décomposer en trois blocs ayant chacun une fonction distincte :

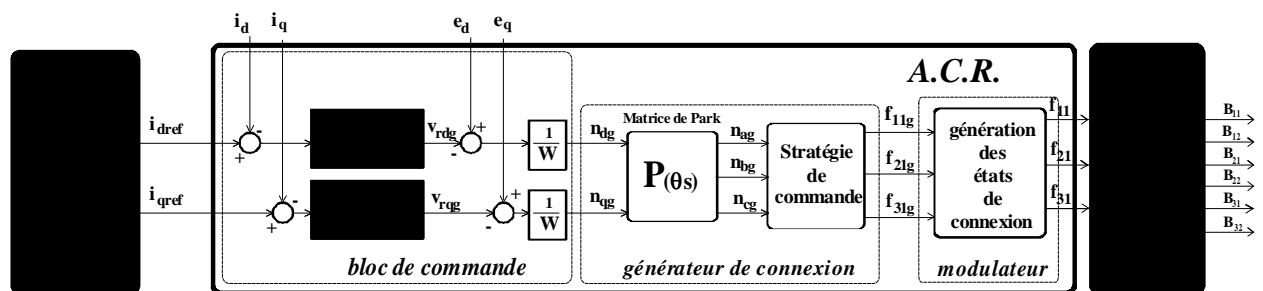


Figure 2 : Schéma fonctionnel de la Commande Rapprochée

ORGANISATION MATERIELLE [4]

Dans un système de conversion, le convertisseur statique se trouve être l'articulation de deux axes :

- l'axe de contrôle-commande qui intègre les fonctions suivantes : Micro-Calculateur de Processus, Automate de Commande Rapprochée, Bloc de Contrôle des Commutations et acquisition des mesures,

Le bloc de commande

Le *bloc de commande algorithmique* définit les grandeurs de réglage du convertisseur qui ne sont autres que l'image des fonctions génératrices de conversion. Cette partie intégrante du système n'est pas détaillée dans cet article, mais elle a fait l'objet d'une publication approfondie dans le cadre d'une journée d'étude du Groupement De Recherche CNRS groupe commande des convertisseurs statiques [4].

Le générateur de connexions

Le *générateur de connexions* traduit les fonctions génératrices de connexion à partir de celles de conversion. La relation (7) n'étant pas inversible, il existe une infinité de solutions qu'il faut analyser car, le choix réalisé à ce niveau à une grande importance technologique et conditionne la bonne utilisation du convertisseur.

Les solutions qui sont proposées par la suite sont justifiées par une interprétation fréquentielle des résultats de simulation, et expérimentaux.

Le modulateur

Le *modulateur* transforme chaque fonction génératrice f_{c1g} en une image des fonctions de connexion $f_{c1}(t)$ et $f_{c2}(t)$ d'un même cellule de commutation. Dans le cas présent, les deux ordres logiques sont complémentaires.

- l'axe de puissance constitué de l'association source convertisseur charge.

La *figure 3* montre l'architecture matérielle qui a été choisie pour réaliser la commande numérique. Dans les deux cas, le cœur de la commande est constitué d'un Processeur de Signal Numérique (DSP).

Le processeur de signal

Le processeur utilisé est un composant Analog Devices (ADSP 21020). C'est un **PSN 32 bits à virgule flottante** qui effectue ses opérations avec une précision étendue. C'est l'un des processeurs de signal les plus performant du marché. Fabriqué en technologie CMOS basse puissance, il a un **temps d'exécution d'instruction** de 40 ns.

Le PSN joue le rôle d'Automate de Contrôle Rapproché (ACR) ; il intègre les fonctions de **commande algorithmique** et de **générateur de connexions**.

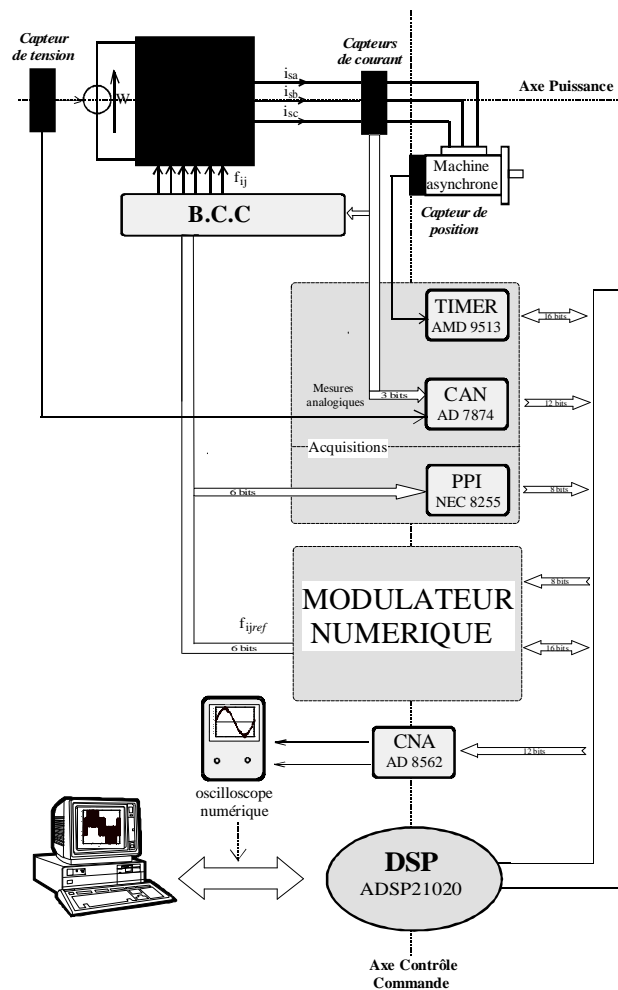


Figure 3 : Architecture matérielle de notre application

Les circuits d'interface

Plusieurs cartes d'interface ont été réalisées pour fournir une liaison entre l'environnement extérieur et le PSN. L'**acquisition des grandeurs analogiques** (courants et tensions) s'effectue à l'aide d'un convertisseur analogique-numérique AD7874 (CAN 12 bits Analog Devices).

La **gestion du temps** se fait à l'aide d'un temporisateur programmable Am9513A (Advanced MicroDevices) qui intègre 5 compteurs indépendants de 16 bits. Le premier timer sert au comptage des impulsions provenant du codeur incrémental pour la mesure de vitesse ; le second timer génère un signal d'horloge qui est utilisé par un compteur pour élaborer le balayage de la **Modulation de Largeur d'Impulsions**.

Utilisation d'EPROM pour le modulateur numérique

Le modulateur réalisé permet de générer simultanément les ordres de connexion relatifs à chaque bras de l'onduleur. Il fonctionne sur le principe de la **modélisation aux valeurs moyennes**. Ainsi les impulsions générées sont centrées sur la période d'échantillonnage, ce qui donne de meilleurs résultats spectraux.

La génération des connexions calculées à chaque période d'échantillonnage par le processeur transite vers le **Bloc de Contrôle des Commutations** par l'intermédiaire d'un périphérique d'entrée-sortie PPI8255.

A chaque période d'échantillonnage, une **table pré programmée** (Eprom) assure directement le passage des fonctions génératrices $f_{cig}(k,t)$ aux fonctions de connexions $f_{ciREF}(t)$. La mémoire est partitionnée en 2^n pages correspondant à 2^n valeurs de $f_{cig}(k,t)$ comprises entre 0 et 1 par pas de $1/2^n$.

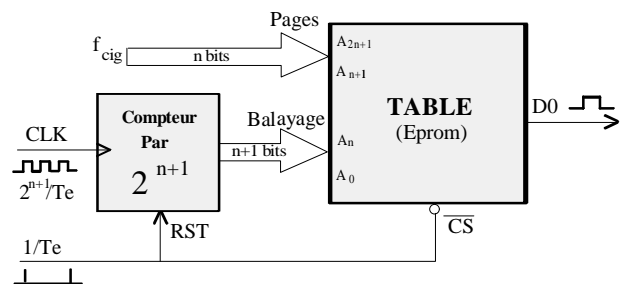


Figure 4 : Schéma de principe du modulateur

Dans chaque page, il y a 2^{n+1} lignes définissant l'état de la connexion sur la période de commutation (ici d'échantillonnage).

L'exemple ci-dessous représente la table pré programmée (EPROM), ainsi que les motifs de MLI correspondants pour $n=2$ (soit 4 combinaisons de signaux MLI).

A4 - A3
(pages) f_{cig}

1	1	0,75	0	1	1	1	1	1	1	0	0
1	0	0,5	0	0	1	1	1	1	0	0	0
0	1	0,25	0	0	0	1	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Compteur par 8			0	1	2	3	4	5	6	7	0
A2 - A1 - A0 (balayage)			000	001	010	011	100	101	110	111	000
			0	Te/4	Te/2	3Te/4	Te				

Figure 5 : Motifs de MLI et programmation de la table pour $n=2$

Pour des raisons pratiques, on choisit de définir les fonctions génératrices de connexion f_{ijg} avec une précision de 1% ; ce qui signifie que l'on doit avoir 100 combinaisons possibles (soit 100 pages mémoire).

Utilisation des F.P.G.A. pour le modulateur

Les F.P.G.A. constituent une deuxième solution pour réaliser la modulation de la fonction génératrice de connexion. La **figure 6** montre la description comportementale implémentée dans le composant.

Les deux chaînes parallèles permettent de définir, à partir de f_{cig} les instants de commutation t_0 et t_1 définis sur la figure. Le nombre de bits est paramétrable en fonction de la précision requise par l'application.

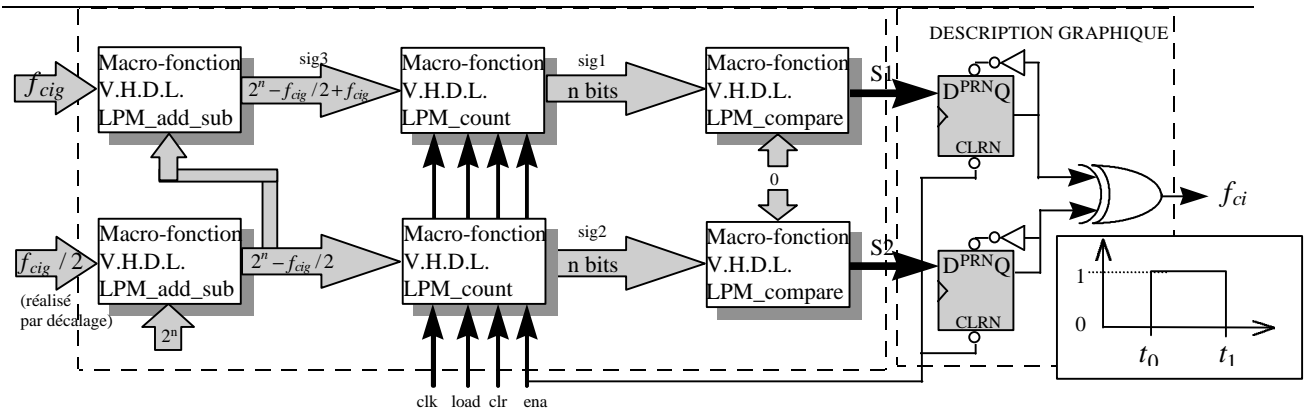


Figure 6 : Création du modulateur par F.P.G.A.

PERFORMANCES

Les **figures 7 et 8** montrent les signaux mis en jeu ainsi que leur analyse spectrale dans le cadre d'une simulation numérique d'une part, et d'une expérimentation d'autre part.

On constate que la tension appliquée à la charge possède très peu d'harmonique de faible fréquence malgré une injection implicite d'harmoniques de rang 3 dans les connexions.

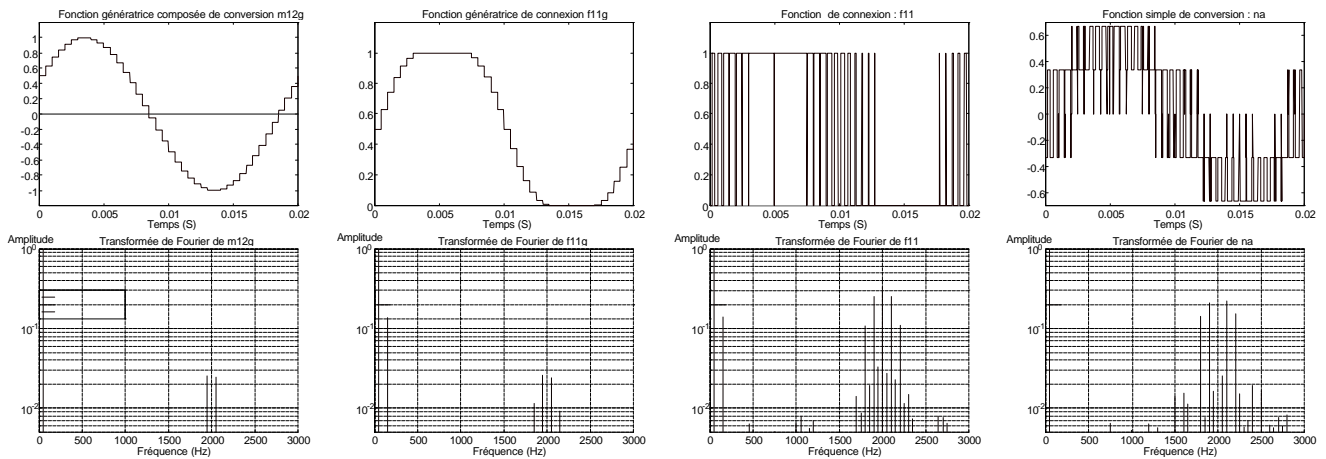


Figure 7 : Procédure d'obtention des ondes modulées (simulations)

**COMMANDE D'UN ONDULEUR DE TENSION
A L'AIDE D'UN PROCESSEUR DE SIGNAL ET D'UN F.P.G.A.**
(Ph. DEGOBERT, X. GUILLAUD D.LORIOU- L2EP)

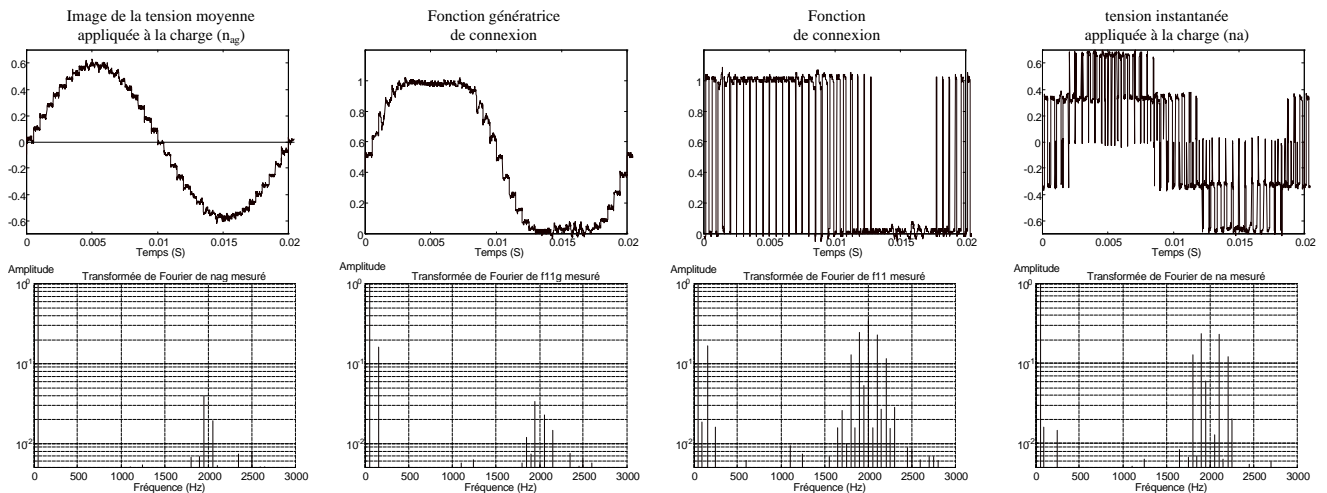


Figure 8 : Procédure d'obtention des ondes modulées (mesures)

CONCLUSIONS

Les deux méthodes présentées donnent pleinement satisfaction.

La structure de commande à base d'Eprom est simple à mettre en œuvre et très efficace. L'utilisation des F.P.G.A. dans sa version de base présentée ici est une simple recopie des fonctions timers mais permettra, à terme, d'intégrer des fonctionnalités supplémentaires gestion de temps morts surveillance, sécurité ...

Remarques :

Toutes les simulations ont été effectuées à l'aide de l'outil graphique *SIMULINK* qui est une extension du logiciel *MATLAB™*. Les auteurs remercient tous les auditeurs du CNAM de Lille qui ont participé à ce projet.

Bibliographie :

[1] **DEGOBERT Ph. et HAUTIER J.P.** (1995) : " *Interfaçage d'un onduleur de tension et d'un Processeur de Signal Numérique (DSP) en vue d'une utilisation temps réel optimale* ", Congrès DSP'95 : Journées sur le Traitement de Signal et ses Applications, Palais des congrès Paris décembre 1995.

[2] **GUILLAUD X. et DEGOBERT Ph.** (1996) : " *General control modelling of static converters and optimisation of their conversion function* ", Congrès ELECTRIMACS'96, Saint-Nazaire 17-19 septembre 1996, PP 397-402.

[3] **LORIOU D., FRANCOIS B. et DEGOBERT Ph.** (1996) : " *A DSP device for control algorithms implementation in the scope of power systems* " IMAC'S Multiconference on Computational Engineering in Systems Application, CESA'96 Lille - juillet 1996, Vol 2, pp 712-722.

[4] **DEGOBERT Ph. et HAUTIER J.P.** (1994) : " *Sur une commande numérique de la machine Asynchrone à flux statorique orienté à base de Processeur de Signal* " Journées d'étude du Groupement De Recherche CNRS, groupe commande - CNAM Paris - Décembre 1994

[5] **GUILLAUD X. et HAUTIER J.P.** (1994) : " *Concepts de modélisation pour la commande des convertisseurs statiques* " Journal de Physique III, Avril 1994, pp 805-819

[6] **HOULDSWORTH J.A. et GRANT D.A.** (1984) : " *The use of Harmonic Distortion to Increase the Output Voltage of Three Phase PWM Inverter* ". IEEE Trans.on Industry Application, vol 20 - n°5 pp1224-1227

[7] **MIDDELBROOK R.D. et CUK S.** (1977) : " *A General Unified approach to modelling Switching-Converter Power Stage* ". Int. Journal Electron, vol 42 pp521-550

[8] **PATEL H.S. et HOFT R.G.** (1973) : " *Generalized Technique of Harmonic Elimination and Voltage Control in thyristor Inverter* ". IEEE Trans.on Industry Application, vol 9 - n°3 pp310-317 et vol 10 - n°5 pp666-673

**COMMANDE D'UN ONDULEUR DE TENSION
A L'AIDE D'UN PROCESSEUR DE SIGNAL ET D'UN F.P.G.A.**
(Ph. DEGOBERT, X. GUILLAUD D.LORIOL- L2EP)

[9] SHONUNG A. et STEMMLER H.. (1964) : "*Static Frequency Changers with Subharmonic control in conjunction with reversible variable-speed AC drives*".

Brown Boverly Revue - vol 51 pp 555-557.

[10] TRZYNADLOWSKY A.M. (1989) : "*Nonsinusoidal Modulating Functions for the Three - Phase Inverters*".

IEEE Trans.on Power Electronics, vol 4 - n°3 pp 331-338

[11] ALEXANDRE O. (1998) : "*Contribution à la commande vectorielle de la machine asynchrone. Mise en œuvre de composants numérique programmables*".

Mémoire CNAM - Lille - 1998

[12] DEGOBERT Ph. (1997) : , "*Formalisme pour la commande des machines électriques alimentées par convertisseurs statiques. Application à la commande numérique d'un ensemble onduleur de courant - machine asynchrone*",

Thèse de doctorat de l'U.S.T.L., Lille 4 juin 1997.

Adresse des auteurs :

Ph. Degobert, X. Guillaud et D. Loriol,
L2EP Groupe ENSAM
8 Bv Louis XIV 59046 Lille Cedex - France
TEL : 03-20-62-22-29 FAX : 03-20-62-27-50
e-mail : degobert@lille.ensam.fr

