

Développement d'une maquette expérimentale à but pédagogique pour la commande d'une machine asynchrone

M-W.Naouar¹, I.Slama-Belkhouja², E.Monmasson³

^{1,2} L.S.E-ENIT BP 37-1002 Tunis Belvédère, Tunisie, email : Wissem_naouar@yahoo.fr¹, Ilhem.slama@enit.rnu.tn³

³ SATIE-IUP GEIL, rue d'Eragny, 95031 Cergy-Pontoise, France, email : Eric.monmasson@iupge.u-cergy.fr

RESUME Ce travail porte sur le développement d'une maquette expérimentale à but pédagogique pour la commande d'une machine asynchrone. Cette maquette utilise les composants programmables de type FPGA (Field Programmable Gate Array) comme support pour l'implantation des algorithmes de commande. Le module proposé est un Bureau d'Etudes intitulé 'Commande de machines électriques' de 15 séances de 1h30mn chacune. Il s'adresse à des élèves ingénieurs en année terminale (3^{ème} année) Génie Electrique, option Systèmes Electriques de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT). Son contenu consiste en la conception à l'aide de MALAB-SIMULINK de techniques de modulation, (modulation de largeur d'impulsion (MLI) vectorielle, et fourchette de courant) et des lois de commande associées, puis en leur mise en œuvre et implantation sur FPGA avec le logiciel FOUNDATION ISE 4.1 de Xilinx, et enfin en l'analyse des performances des algorithmes implantés et des résultats prélevés sur la maquette expérimentale. La plateforme expérimentale développée sert de support pour tester différents algorithmes de commande aussi bien dans le cadre du Bureau d'Etudes que pour des travaux de recherches.

Mots clés : Systèmes Electriques, Machine asynchrone, FPGA, Commande.

1 INTRODUCTION

Un système électrique peut être considéré comme étant une combinaison d'éléments réunis formant un ensemble dont le but est d'assurer une conversion d'énergie électro/mécanique. Afin de schématiser au mieux la structure d'un système électrique commandé, nous avons choisi de le regrouper en blocs caractéristiques d'éléments les plus communément rencontrés dans une telle structure. L'organisation entre ces blocs est décrite sur la figure 1.

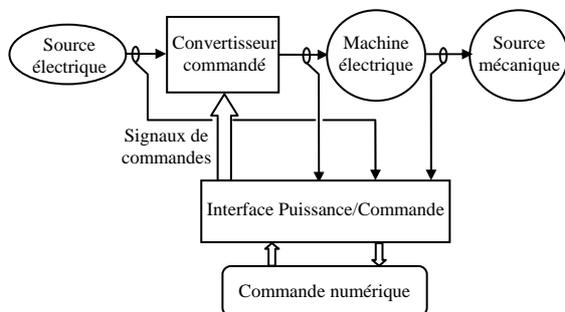


fig 1 : Structure générale d'un système électrique commandé

L'alimentation électrique regroupe l'ensemble des éléments susceptibles d'alimenter en énergie le convertisseur commandé du système électrique. Ce dernier permet par la suite de convertir l'énergie électrique d'une forme en une autre (DC/AC, DC/DC, AC/AC...) à travers la commande d'interrupteurs de puissance (IGBT, thyristor,...). Le tout forme un dispositif d'électronique de puissance qui alimente une machine électrique qui à son tour transforme l'énergie électrique qui lui est transmise en une énergie mécanique. Le traitement électronique des signaux électriques échangés entre la partie puissance et la commande du système électrique est assuré par une partie interface comportant des éléments tels que les capteurs (courant, tension, ...), l'électronique de

conversion analogique numérique CAN, l'électronique de pilotage des interrupteurs de puissance,... La partie commande permet dans un sens de traiter des signaux électriques générés par la partie interface et dans un autre d'envoyer des signaux de commande vers le convertisseur commandé. La commande consiste à exécuter en temps réel un algorithme numérique qui est implanté sur une cible matérielle ou logicielle. Le contenu algorithmique dépend du type d'application et du niveau de performance souhaité.

Afin de mettre en évidence la commande d'un système électrique, nous nous sommes intéressés dans le cadre de ce travail à la réalisation d'une maquette expérimentale pour la commande d'une machine asynchrone. Le support utilisé pour l'implantation des algorithmes de commande est un support matériel basé sur les composants programmables de type FPGA (Field Programmable Gate Array). Les algorithmes testés sur la maquette reposent sur la méthode de la modulation de largeur d'impulsion (MLI) vectorielle [1] et de correction par hystérésis [2]. La démarche suivie pour l'implantation de ces algorithmes s'est voulue progressive tout en ayant comme objectif d'atteindre une solution algorithmique facile à implanter. Notons aussi que cette démarche repose sur une approche méthodique de conception d'architectures à implanter sur cible FPGA [3].

Dans une première partie, nous présentons tout d'abord le principe de la MLI vectorielle avec adjonction d'homopolaire. Par la suite, nous présentons dans une deuxième partie le principe de la commande en courant d'un onduleur de tension à travers une commande par hystérésis. Finalement, dans une troisième partie, nous décrivons les différentes parties constituant la maquette expérimentale ainsi que les différentes étapes de sa manipulation lors des séances de bureau d'études. Une comparaison entre résultats de simulation et résultats expérimentaux est aussi présentée dans cette partie.

2 PRESENTATION DE LA MLI VECTORIELLE

2.1 Présentation du fonctionnement d'un onduleur

L'onduleur de tension est un convertisseur continu alternatif permettant d'imposer aux bornes d'une charge triphasée des tensions de phase via une commande logique. La figure 2 montre le schéma de principe de l'onduleur de tension.

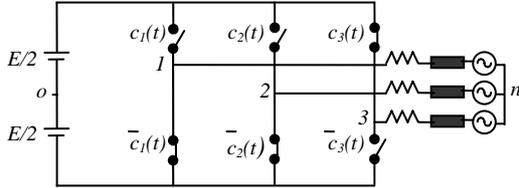


fig 2 : Schéma de principe d'un onduleur de tension triphasé

Où E est la tension continue en entrée de l'onduleur. Le point milieu o de la source, n'étant pas relié, est fictif. La fonction $c_i(t)$ est binaire et représente l'état du $i^{\text{ème}}$ bras. Cette fonction est suffisante pour caractériser un bras entier. En effet les interrupteurs d'un même bras sont commandés de façon complémentaire afin d'éviter un court circuit de la source de tension d'entrée E .

Pour une charge triphasée équilibrée, la relation liant les vecteurs tension aux bornes de la charge $V_{1n}(t)$, $V_{2n}(t)$ et $V_{3n}(t)$ aux signaux de commande $c_1(t)$, $c_2(t)$ et $c_3(t)$ est donnée par le système suivant :

$$\begin{bmatrix} V_{1n}(t) \\ V_{2n}(t) \\ V_{3n}(t) \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1(t) \\ c_2(t) \\ c_3(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.2 Modulation de Largeur d'Impulsion MLI

Une loi de modulation de type MLI consiste non plus à imposer les vecteurs $V_{1n}(t)$, $V_{2n}(t)$ et $V_{3n}(t)$ à tout instant, mais à imposer leurs valeurs moyennes sur une période de hachage (En pratique cette période est de 100 μ s). Le système (1) devient donc :

$$\begin{bmatrix} V_{1n}(k) \\ V_{2n}(k) \\ V_{3n}(k) \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1(k) \\ a_2(k) \\ a_3(k) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Où $V_{in}(k)$ et $a_i(k)$ sont respectivement la valeur moyenne de la tension $V_{in}(t)$ et le rapport cyclique du $i^{\text{ème}}$ bras pour la $k^{\text{ème}}$ période de hachage ($i=1,2,3$).

L'objectif de la MLI est de retrouver les rapports cycliques $a_i(k)$ tels que :

$$\begin{bmatrix} V_{1n}(k) \\ V_{2n}(k) \\ V_{3n}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{1nref}(k) \\ V_{2nref}(k) \\ V_{3nref}(k) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Où $V_{inref}(k)$ est la tension de référence de la $i^{\text{ème}}$ phase que l'on souhaite imposer, lors de la $k^{\text{ème}}$ période de hachage ($i=1,2,3$).

Cependant la recherche des rapports cycliques doit tenir compte des limitations suivantes :

$$\forall (i \in \{1,2,3\}, k) \quad 0 \leq a_i(k) \leq 1 \quad (4)$$

Afin de déterminer les rapports cycliques de telle sorte que le système (3) soit vérifié, on considère le système suivant :

$$\begin{bmatrix} V_{1o}(t) \\ V_{2o}(t) \\ V_{3o}(t) \end{bmatrix} = E \begin{bmatrix} c_1(t) \\ c_2(t) \\ c_3(t) \end{bmatrix} - \frac{E}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Dans sa forme en valeurs moyennes, le système (5) devient :

$$\begin{bmatrix} V_{1o}(k) \\ V_{2o}(k) \\ V_{3o}(k) \end{bmatrix} = E \begin{bmatrix} a_1(k) \\ a_2(k) \\ a_3(k) \end{bmatrix} - \frac{E}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Partant d'un système $[V_{1oref}(k), V_{2oref}(k), V_{3oref}(k)]^T$ de référence, il est facile d'inverser le système (6) à condition de respecter les contraintes données par la relation (4).

$$\begin{bmatrix} a_1(k) \\ a_2(k) \\ a_3(k) \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} V_{1oref}(k) \\ V_{2oref}(k) \\ V_{3oref}(k) \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

En écrivant le système (7) en fonction du système $[V_{1nref}(k), V_{2nref}(k), V_{3nref}(k)]^T$, il devient :

$$\begin{bmatrix} a_1(k) \\ a_2(k) \\ a_3(k) \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} V_{1nref}(k) \\ V_{2nref}(k) \\ V_{3nref}(k) \end{bmatrix} + V_{noref}(k) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Où $V_{noref}(k)$ est la composante homopolaire pour la $k^{\text{ème}}$ période de hachage.

Ainsi, déterminer les rapports cycliques qui permettent d'imposer aux bornes de la charge le système $[V_{1nref}(k), V_{2nref}(k), V_{3nref}(k)]^T$ tout en respectant les contraintes sur les rapports cycliques revient à déterminer la composante $V_{noref}(k)$ à rajouter.

2.3 MLI Vectorielle avec adjonction d'homopolaire

D'après la figure 2, le dispositif de l'onduleur de tension n'accepte pas une tension entre phases $U_{ij}(k)$ supérieure à E . Ainsi, si le système de tension entre phases est sinusoidal, l'amplitude maximale est encore égale à E . Or, le rapport entre l'amplitude de la tension entre phases et l'amplitude de la tension entre phase et neutre est égale à $\sqrt{3}$. Par suite, l'amplitude maximale que peut prendre dans ce cas le système de référence $[V_{1nref}(k), V_{2nref}(k), V_{3nref}(k)]^T$ est égale à :

$$V_{\max} = \frac{E}{\sqrt{3}} \quad (9)$$

D'après [1], la composante homopolaire de référence $V_{\text{noref}}(k)$ à rajouter permettant d'atteindre une amplitude maximale donnée par le système (9) pour un système sinusoïdal triphasé équilibré de référence $[V_{1\text{nref}}(k), V_{2\text{nref}}(k), V_{3\text{nref}}(k)]^T$, tout en respectant les contraintes inhérentes des rapports cycliques, est donnée par la relation suivante :

$$\forall k \left\{ \begin{array}{l} V_{\text{noref}}(k) = \frac{1}{2} V_{\text{ho}}(k) \\ \text{tel que} \\ |V_{\text{ho}}(k)| = \min(|V_{1\text{nref}}(k)|, |V_{2\text{nref}}(k)|, |V_{3\text{nref}}(k)|) \end{array} \right. \quad (10)$$

La figure 3 montre la forme de la tension continue $V_{\text{noref}}(t)$ résultante. Cette tension est une composante homopolaire quasi triangulaire d'harmonique 3. Notons que cette composante est déterminée à partir d'un passage intermédiaire par une structure de commande de type *Space Vector* [4].

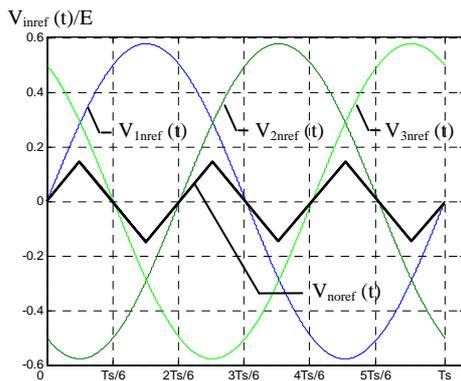


fig 3 : Tension $V_{\text{noref}}(t)$

La figure 4 montre l'allure du système de référence $[V_{1\text{oref}}(t), V_{2\text{oref}}(t), V_{3\text{oref}}(t)]^T$ résultant de l'ajout de la composante homopolaire $V_{\text{noref}}(t)$ au système $[V_{1\text{nref}}(t), V_{2\text{nref}}(t), V_{3\text{nref}}(t)]^T$.

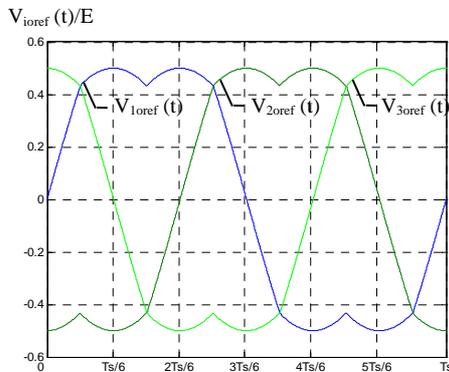


fig 4 : Allure des tensions de référence $V_{i\text{oref}}(t)$

La figure 5 résume le principe de la stratégie de commande se basant sur la MLI vectorielle avec adjonction d'homopolaire.

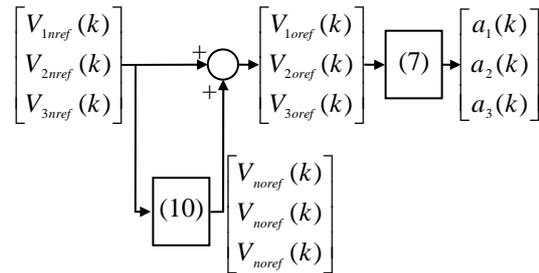


fig 5 : Schéma de principe de la MLI Vectorielle avec adjonction d'homopolaire

3 FOURCHETTE DE COURANT

La structure de contrôle des systèmes électriques comporte souvent une boucle interne de retour de courants. Par conséquent, la performance de ce type de structure dépend largement de la qualité de la stratégie de contrôle des courants. Le moyen le plus simple, avec un onduleur triphasé de tension, pour assurer un bon contrôle des courants est la commande en fourchette connue aussi sous le nom de commande par hystérésis [2]. Les principaux avantages de ce type de commande sont les suivants :

- Contrôle instantané des trajectoires de courant.
- Protection contre les pics de courants.
- Très bonne dynamique du système.
- Compensation des effets de changement des paramètres.
- Compensation des temps morts.
- Compensation des fluctuations de tension du bus continu et des sources alternatives.

La figure 6 donne le schéma de principe de cette commande : Si le courant mesuré i est inférieur à la référence i_{ref} augmentée d'une fourchette F (connue aussi sous le nom de demi-largeur de bande), la tension de sortie est forcée à sa valeur maximale pour que le courant croisse le plus vite possible et s'il est supérieur à cette même référence diminuée de la fourchette, alors la tension de sortie est forcée à sa valeur minimale pour que le courant décroisse le plus vite possible. La figure 7 présente le schéma fonctionnel d'une commande en fourchette triphasée.

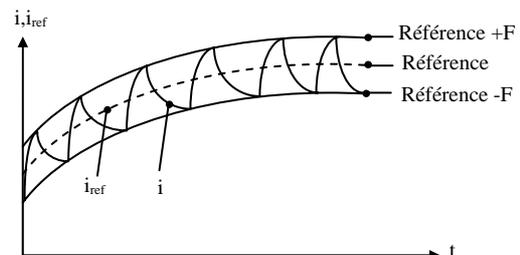


fig 6 : Principe de la commande en fourchette

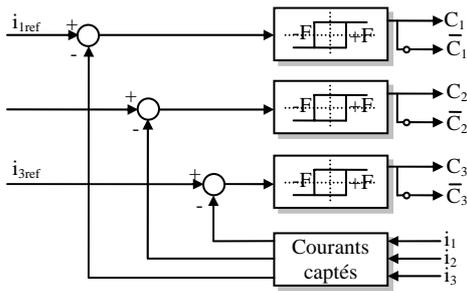


fig 7 : Schéma fonctionnel d'une commande en fourchette

4 PRESENTATION DE LA MAQUETTE

Les figures 8 et 9 présentent le dispositif expérimental mis en œuvre pour le développement de la maquette.

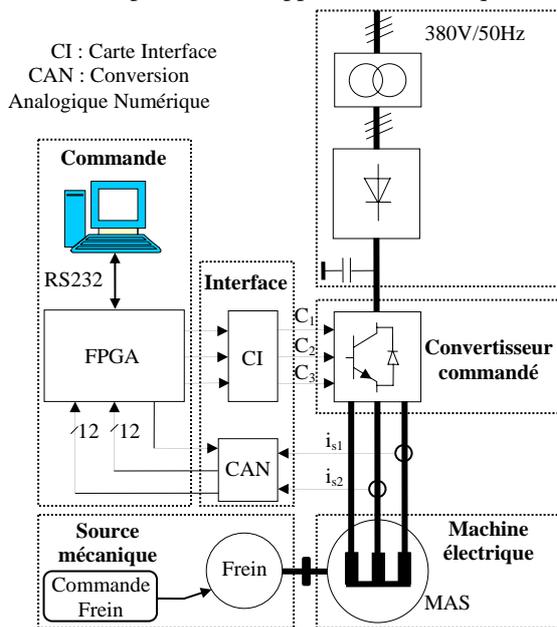


fig 8 : Dispositif expérimental de la maquette



fig 9 : Parties interface et commande

En se référant à la définition d'un système électrique commandé mentionnée dans l'introduction, la maquette peut être divisée en plusieurs parties comme suit :

1. Partie source électrique: Cette partie comporte le réseau triphasé (380V/50Hz), un autotransformateur, un étage redresseur et une capacité de filtrage. Elle permet d'assurer une tension continue aux bornes de la capacité dont la valeur est fixée par le rapport de transformation de l'autotransformateur.

2. Partie convertisseur commandé: Cette partie consiste en un onduleur triphasé à IGBTs. La tension continue aux bornes de la capacité de la partie source électrique joue le rôle de la tension du bus continu à l'entrée de l'onduleur.

3. Partie machine électrique et source mécanique: La machine utilisée est une machine asynchrone de puissance 1.5 KW. Cette machine est couplée en étoile et ses phases sont reliées aux milieux des bras de l'onduleur. Elle est couplée à un frein à poudre commandé qui constitue la source mécanique du système.

4. Partie commande: Dans cette partie, une carte FPGA SPARTAN II de la firme Xilinx est utilisée comme support physique pour l'implantation des algorithmes de commande. Un ordinateur hôte permet la configuration du FPGA via un câble JTAG et aussi d'envoyer les consignes de référence vers la carte FPGA à travers une liaison série RS232.

5. Partie interface: Cette partie comporte une carte interface (CI) permettant une adaptation du niveau de tension des signaux de commande étant donné que les signaux délivrés par la carte FPGA sont de niveau logique 0-3.3V alors que la commande des IGBTs de l'onduleur de tension nécessite des signaux de commande de niveau logique 0-15V. La partie interface comporte aussi une chaîne d'acquisition des courants comportant une carte capteurs de courants et une carte de conversion analogique numérique (CAN). Les convertisseurs analogiques numériques utilisés sont des convertisseurs 12 bits parallèles avec un temps de conversion de 2.4 μ s.

4.1 Manipulation de la maquette

Après une description théorique détaillée de la MLI vectorielle avec adjonction d'homopolaire et de la fourchette de courant et une présentation détaillée du dispositif expérimental, en se référant à la structure d'un système électrique commandé tel décrit dans la figure 1, les élèves ingénieurs sont amenés à effectuer le travail suivant :

-1^{ère} étape : Développement sur Matlab Simulink des modèles fonctionnels continus correspondants aux algorithmes d'une loi V/F [5] utilisant une MLI vectorielle avec adjonction d'homopolaire et d'une fourchette de courants. Les figures 10 et 11 présentent les schémas de principe de ces algorithmes.

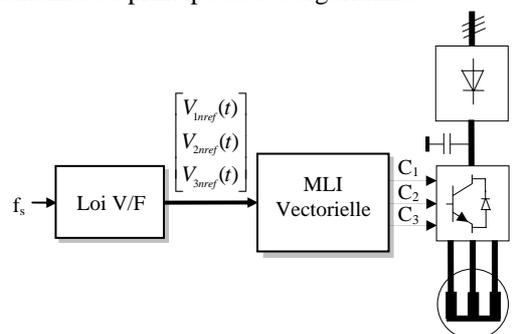


fig 10 : Principe d'une loi V/F avec MLI Vectorielle

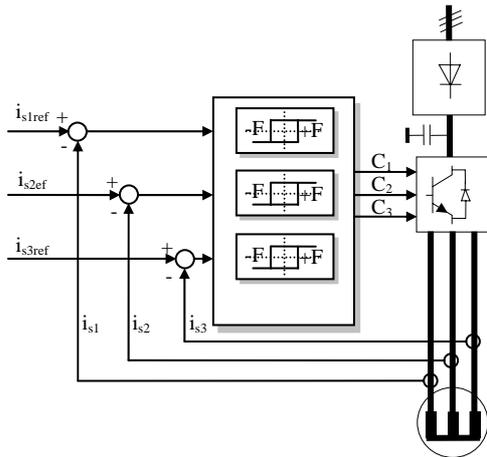


fig 11 : Principe d'une fourchette de courants

-2^{ème} étape : Implantation sur la cible FPGA de la maquette de l'algorithme d'une loi V/F avec MLI vectorielle et utilisation de l'interface graphique présentée par la figure 12 pour contrôler la MAS. Cette interface a été développée sur le logiciel Matlab. Elle permet d'envoyer les consignes à travers la liaison série RS232 et permet de changer la consigne de fréquence f_s , de varier la fréquence de la porteuse, de défluxer la machine lors d'un fonctionnement en survitesse et de changer le sens de rotation. Les élèves doivent ensuite comparer les résultats obtenus par simulation aux résultats expérimentaux et interpréter les phénomènes physiques liés à cette commande. Les figures 13, 14, 15 et 16 présentent une comparaison entre des résultats de simulation et des résultats expérimentaux obtenus.

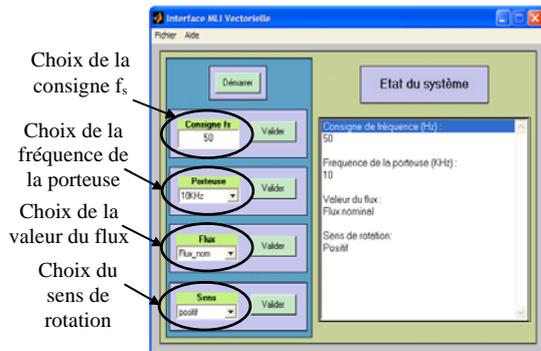


fig 12 : Interface graphique pour le contrôle de la MAS à travers une loi V/F avec MLI vectorielle

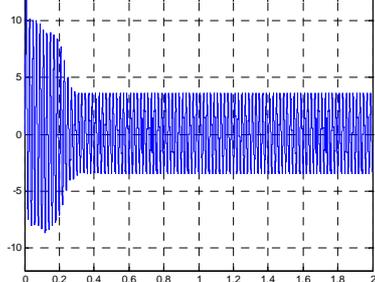


fig 13 : Résultat de simulation de l'allure du courant i_{s1} lors de la phase de démarrage de la MAS

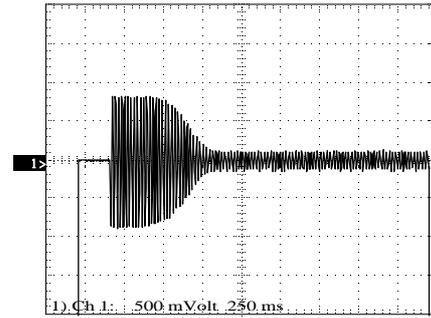


fig 14 : Résultat expérimental de l'allure du courant i_{s1} lors de la phase de démarrage de la MAS

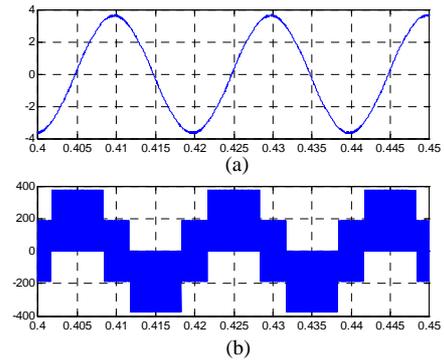


fig 15 : Résultats de simulation en régime permanent (a) du courant i_{s1} (b) de la tension simple V_{In}

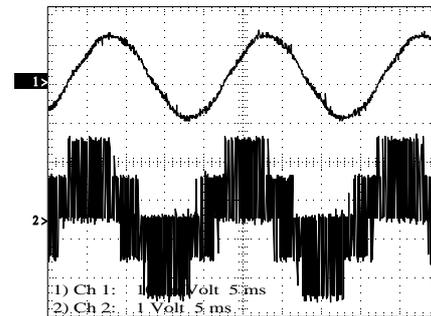


fig 16 : Résultats expérimentaux en régime permanent (Ch1) du courant i_{s1} (Ch2) de la tension simple V_{In}

-3^{ème} étape : Implantation sur la cible FPGA de la maquette de l'algorithme d'une fourchette de courant.

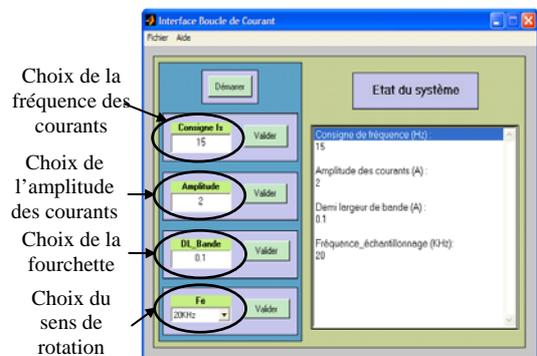


fig 17 : Interface graphique pour le contrôle de la MAS à travers une fourchette de courant

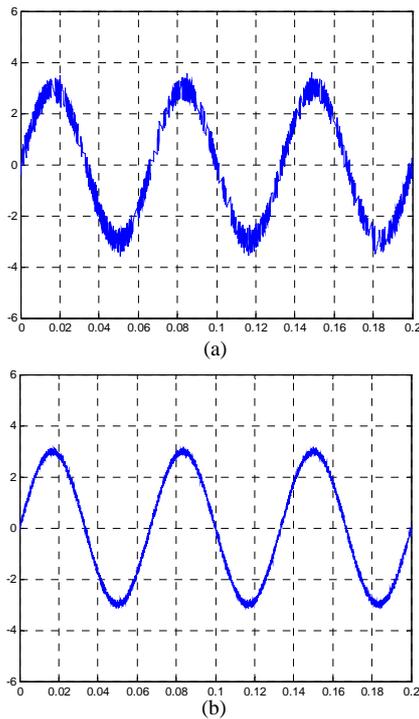


fig 18 : Résultats de simulation du courant i_{s1} pour une fourchette (a) $F=0.3$ A (b) $F=0.1$ A

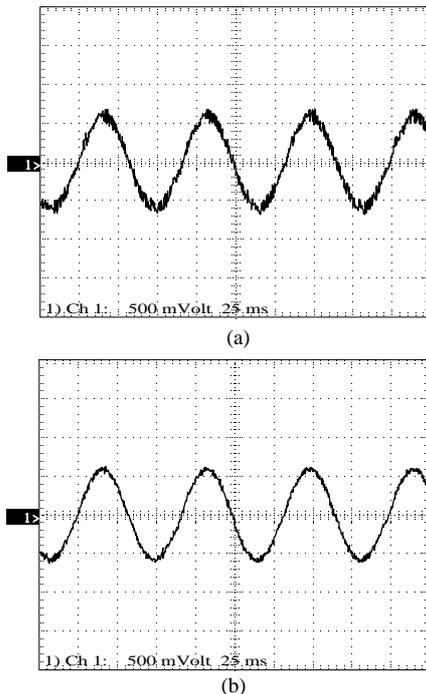


fig 19 : Résultats expérimentaux du courant i_{s1} pour une fourchette (a) $F=0.3$ A (b) $F=0.1$ A

Une interface graphique développée sur le logiciel Matlab est aussi utilisée pour le contrôle de la MAS. Cette interface, donnée par la figure 17, permet d'imposer la fréquence et l'amplitude des courants

statoriques de référence, la valeur de la fourchette F des correcteurs à hystérésis ainsi que la fréquence d'échantillonnage de l'algorithme de commande. Les figures 18 et 19 présentent une comparaison entre des résultats de simulation et des résultats expérimentaux obtenus.

5 CONCLUSION

Dans cet article, nous avons présenté un module pédagogique basé sur une maquette expérimentale pour la commande d'une machine asynchrone. Ce module est un bureau d'études intitulé 'Commande de machines électriques' de 15 séances de 1h30mn chacune. Il a été réalisé pour la première fois durant cette année universitaire. Son contenu consiste en :

- Un cours autour de la commande d'une MAS en utilisant les notions de MLI vectorielle avec adjonction d'homopolaire et de fourchette de courant.
- Une analyse des performances de ces algorithmes de commande au moyen du logiciel Matlab.
- Une manipulation de la maquette expérimentale.

Notons que la réalisation expérimentale de la maquette s'est voulue standard, c'est-à-dire qu'il est possible de tester plusieurs algorithmes de commande avec le même environnement matériel de la maquette. Notons aussi qu'en ajoutant d'autres capteurs et interfaces tels que les capteurs de position ou de tensions par exemple, il est possible d'élargir le principe de standardisation à d'autres algorithmes ayant besoin de ces capteurs. D'autre part, il est possible de tester des algorithmes de commande dédiés à des machines différentes en remplaçant la machine asynchrone par une autre machine telle que la machine synchrone par exemple.

Bibliographie

1. E. Monmasson, J. Faucher, *Projet pédagogique autour de la MLI vectorielle destinée au pilotage d'un onduleur triphasé*. (I) Revue 3EI, n°8, pp23-63, mars 1998.
2. M-P. Kazmierkowski, L. Malesani, *Current control techniques for Three-Phase Voltage-Source PWM Converters : A survey*. IEEE Transactions on industrial electronics, vol.45, n°5, October 1998.
3. T. Riesgo, Y. Torroja, E. De la Torre, *Design Methodologies Based on Hardware description Languages*. IEEE. Trans. On Industrial Electronics, vol.46, n°1, pp3-12, February 1999.
4. J. Holtz, *Pulse Width Modulation for Electronic Power Conversion*. Proceeding of the IEEE, vol.82, n°8, p1194-1214
5. I. Slama-Belkhodja, *Entraînements Electriques à vitesse variable*, Polycoié de cours, édition Mai 2003