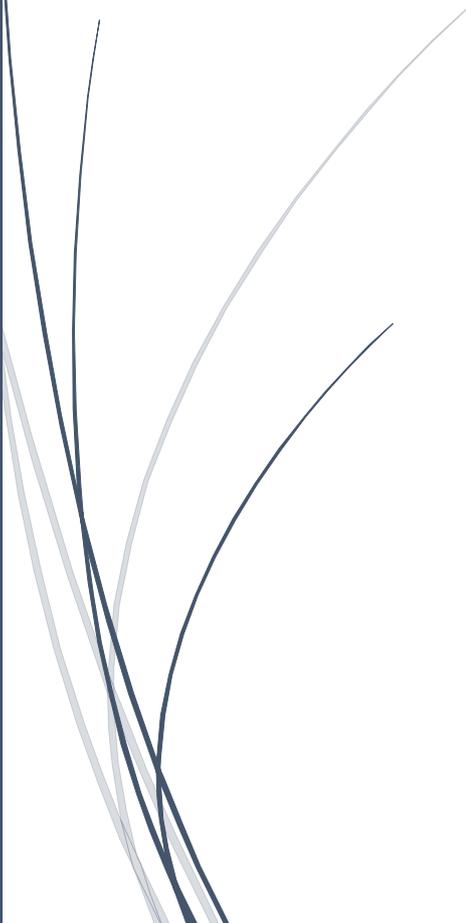




18 Décembre 2014

Commande DPC sur un convertisseur matriciel

Projet de fin d'étude, IMA 5



Quentin Pesqueux, Nicolas Alexandre
POLYTECH LILLE, IMA 5 SA

SOMMAIRE

| | |
|---|-----------|
| SOMMAIRE..... | 1 |
| INTRODUCTION | 2 |
| CAHIER DES CHARGES | 3 |
| I PRINCIPE DE LA COMMANDE DPC | 3 |
| II CARACTERISTIQUES D'UN CONVERTISSEUR MATRICIEL..... | 7 |
| III MODELE SIMULINK DE LA COMMANDE DPC SUR UN CONVERTISSEUR MLI..... | 9 |
| IV OBJECTIFS POUR LA SUITE DU PROJET | 10 |
| BIBLIOGRAPHIE..... | 11 |
| ANNEXE..... | 12 |
| MODÈLE SIMULINK D'UN CONVERTISSEUR MLI AVEC UNE COMMANDE DPC..... | 12 |

Introduction

L'application la plus répandue actuellement, dans l'industrie, pour la commande de moteurs électriques, est le variateur de vitesse du type MLI (Modulation de largeur d'impulsion) afin d'asservir le couple et la vitesse des moteurs. Ce système est composé de deux étages, conversion AC/DC et DC/AC, avec un bus continu formé d'une capacité de stockage, qui a une durée de vie limitée et coûte assez cher pour remplacer.

Les recherches de l'électronique de puissance tendent vers un nouveau convertisseur de type AC/AC qui n'utilise plus ce condensateur. Datant des années 80, le convertisseur matriciel propose ce type de conversion avec de nombreux avantages par rapport aux systèmes actuels. En effet, celui-ci n'utilise plus le condensateur afin de filtrer le signal donc réduit le coût. Le facteur de puissance de l'installation est réglable et peut être proche de un, ce qui est bénéfique pour les industriels car les distributeurs d'électricité facturent le courant réactif lorsque le $\cos(\varphi)$ est inférieur à 0,8. De plus, il est bidirectionnel en tension et en courant ce qui permet de récupérer l'énergie venant de la charge (pendant les périodes de freinage par exemple), c'est un enjeu majeur dans la lutte contre le réchauffement climatique.

Il existe deux types de convertisseurs AC/AC, le cycloconvertisseur et le convertisseur matriciel. Le premier a un faible coût mais une mauvaise qualité des formes d'ondes, ce qui le rend inutile pour les moteurs industriels, il sera donc retenu seulement pour les applications de très fortes puissances (supérieures à 10 Méga Watts).

Le convertisseur matriciel est en pleine expansion, notamment dans le domaine de l'aéronautique du fait de la compacité du montage. Malgré ses avantages, il n'est pas encore utilisé dans les industries car la commande est trop complexe. En effet, il existe plusieurs commandes avec des algorithmes assez poussés et des correcteurs qui impliquent un certain coût et qui ne sont pas adaptés à toutes les applications, ce qui repousse les industriels.

Nous allons donc étudier dans un premier temps une commande du convertisseur MLI, appelée commande DPC (control direct de puissance). Puis nous allons étudier le convertisseur matriciel et adapter la commande DPC à celui-ci afin de proposer une solution simple aux industriels.

Cahier des charges

Le cahier des charges a été donné dans le sujet du projet, l'objectif est d'élaborer une commande DPC pour un convertisseur matriciel.

On distingue donc plusieurs sous-objectifs :

- Dans un premier temps, il s'agit d'une étude bibliographique concernant la commande par contrôle de puissance.
- Prise en main du contrôle direct sur un convertisseur MLI (sur Matlab).
- Prise en main du convertisseur matriciel et des fonctions associées (sur Matlab).
- Elaboration de la commande DPC pour un convertisseur matriciel.
- Implantation sur Matlab de la commande élaborée.
- Analyse des résultats et rédaction du rapport final.

I Principe de la commande DPC

Afin de prendre en main le sujet, il a tout d'abord fallu comprendre ce qu'était une commande DPC. Notre travail a donc commencé par la recherche de documents traitant de ce sujet, la commande DPC n'étant qu'au stade de la recherche il n'existe pas encore d'application industrielle mettant en œuvre cette commande.

Nous avons donc récupéré plusieurs articles de chercheurs à partir du site IEEE (***Institute of Electrical and Electronics Engineers***), auquel nous avons accès au sein de l'école, qui traitent du sujet.

L'utilisation d'une commande DPC, permet en premier lieu de se passer des correcteurs utilisés couramment afin d'asservir un convertisseur. Cette commande élimine les blocs de modulation et les boucles internes, il n'utilise que les puissances instantanées comme variable de contrôle, plus précisément les erreurs déterminées entre les valeurs mesurées des puissances instantanées actives et réactives et leurs valeurs de référence. Elle détermine ensuite, en fonction de ces valeurs et d'une table de commutation le réglage du convertisseur à appliquer.

Nous allons maintenant expliquer le fonctionnement de la commande DPC, pour cela nous partirons de l'exemple suivant :

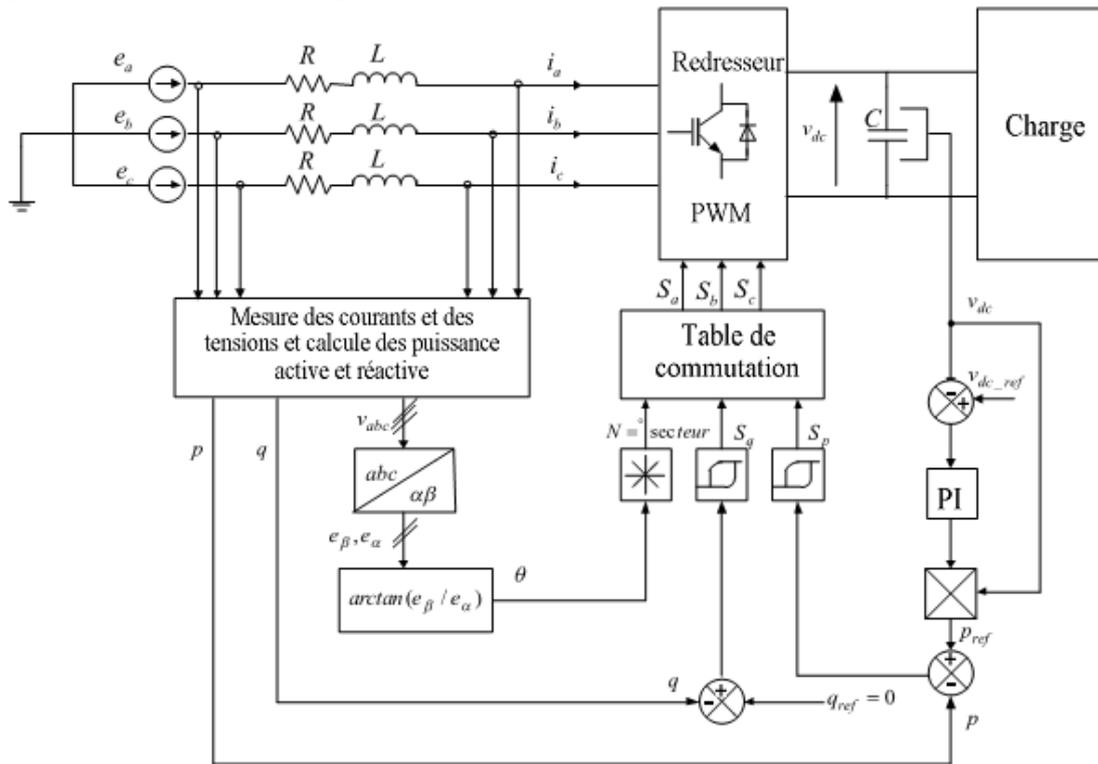


Figure 1. Schéma bloc de contrôle de l'onduleur connecté au réseau avec le DPC classique. (1)

Il s'agit simplement d'un réseau triphasé, d'un convertisseur et d'une charge quelconque.

La commande DPC fonctionne par étape :

1. Mesure des tensions composées v_{13} , v_{32} et des courants i_1 , i_2 , i_3 afin de déterminer grâce à la transformée de Concordia la valeur des courants/tensions directes et de quadratures. Cette transformée de Concordia permet de passer d'un repère triphasé fixe (déphasé de $\frac{2\pi}{3}$) à un repère diphasé α, β (déphasé de $\frac{\pi}{2}$).

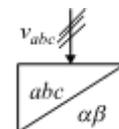
La transformation de Concordia se présente comme tel pour les courants :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix}$$

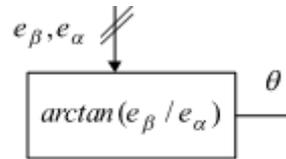
Et pour les tensions :

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix}$$

Cette étape est modélisée sur le schéma principal par le bloc suivant :



- Le θ représentant le secteur dans lequel on se trouve dans notre repère diphasé (α, β) , celui-ci peut être déterminé simplement en appliquant une fonction *arctang* sur notre rapport $\frac{v_\alpha}{v_\beta}$ pour obtenir le θ .



- Une fois le θ trouvé, il faut déterminer dans quel secteur on se trouve sur la tension du réseau. Un cycle est divisé en 12 zones, chaque zone correspondant à un intervalle de $\frac{\pi}{6}$ (12 secteurs équivalent à un cycle de $\frac{\pi}{2}$). En fonction de la valeur du θ on trouve donc facilement dans laquelle des 12 zones nous nous situons.

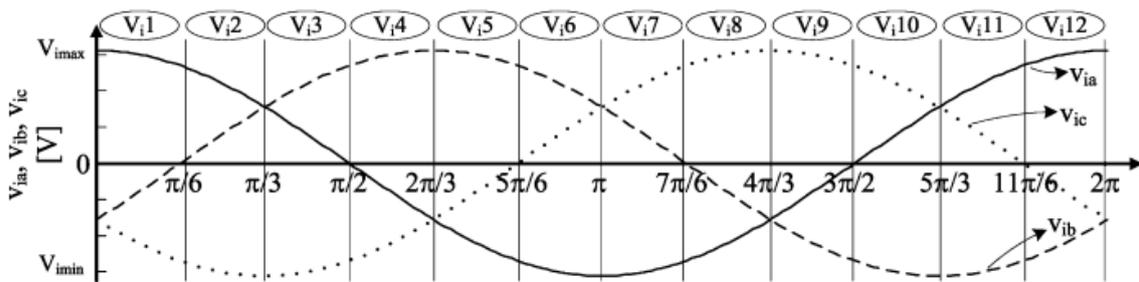
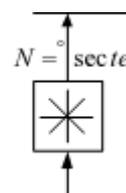


Figure 2. Représentation des 12 secteurs des tensions triphasées

Une autre solution est possible pour déterminer la zone dans laquelle on se trouve sans avoir besoin de calculer le θ , cette solution est plus brute, il suffit en effet de comparer les 3 tensions entre elles et par rapport à la valeur nulle. En connaissant les différentes combinaisons possibles (par rapport à la figure précédente) on détermine la zone associée.



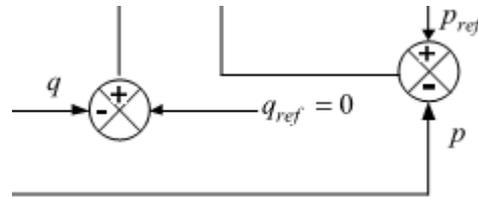
- Il nous faut ensuite calculer les puissances instantanées active et réactive, pour cela nous disposons des courants/tensions directes et de quadratures, il suffit d'appliquer les formules :

$$p = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta$$

$$q = v_\alpha i_\beta + v_\beta i_\alpha$$

On compare ensuite les valeurs des puissances instantanées calculées précédemment :

La puissance réactive instantanée est comparée à une puissance de référence nulle, en effet on cherche à obtenir une puissance réactive nulle, cela permet d'obtenir un facteur de puissance unitaire pour le convertisseur matriciel, si celle-ci est constante on pourra obtenir des tensions triphasés équilibrés.



La puissance active est quant à elle comparée à la puissance active de référence calculée en fonction de la tension continue voulu en sortie du redresseur.

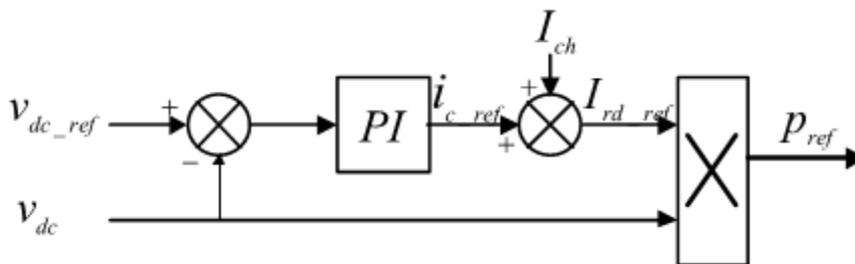
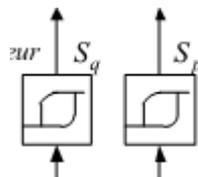


Figure 3. Calcul de la puissance active de référence

La tension Vdc est obtenue en la mesurant aux bornes du condensateur. Le correcteur PI sert à réguler la tension Vdc en suivant la référence Vdc_ref.

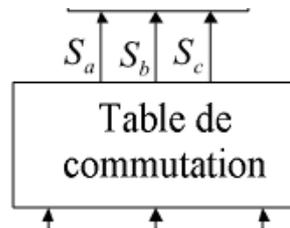
Pour avoir la puissance active de référence est le produit de la tension Vdc avec le courant de référence obtenue lors de la régulation de la tension.

2. L'implémentation de comparateurs à hystérésis est plutôt simple, dans notre cas nous utilisons deux régulateurs à deux niveaux (0 ou 1) afin de comparer l'erreur obtenue auparavant avec un seuil défini. Les sorties du comparateur à hystérésis étant des variables booléennes, leurs valeurs vont dépendre du dépassement de ces erreurs par rapport au seuil. Si celui-ci est inférieur alors la sortie prendra la valeur 0, au contraire si le dépassement est supérieur alors la sortie sera égale à 1.



3. La table de commutation prend en entrée les erreurs S_q et S_d ainsi que l'indice du secteur (1 à 12) dans lequel on se trouve. Celle-ci est remplie précédemment avec les opérations à réaliser en fonctions des valeurs des erreurs et de la zone.

En sortie plusieurs Bit sont envoyés afin de contrôler l'état des commutateurs, le nombre de bit dépend du convertisseur choisi, on prendra en effet seulement 3 bits pour réaliser le contrôle d'une MLI et 6 pour un convertisseur matriciel (3x3).



II Caractéristiques d'un Convertisseur matriciel

Le convertisseur matriciel effectue une conversion AC/AC de manière directe, c'est-à-dire sans étage de stockage comme dans un convertisseur MLI, ce qui le rend plus fiable. De plus, il absorbe les courants sinusoïdaux provenant du réseau sans consommer de puissance réactive, ce qui permet de garder un facteur de puissance unitaire. Il permet d'obtenir en sortie des grandeurs sinusoïdales avec une fréquence et une amplitude réglables.

Le convertisseur matriciel est connecté directement au réseau, qui est une source de tension, et sa sortie (V1, V2, V3) est connectée à une source de courant comme un moteur électrique qui est de nature inductive. Il y a ainsi le respect de l'alternance des sources.

La commande électronique du convertisseur doit le protéger contre les court-circuits et les surtensions. Une ou plusieurs sources de tensions peuvent être associée(s) à une ou plusieurs source(s) de courant.

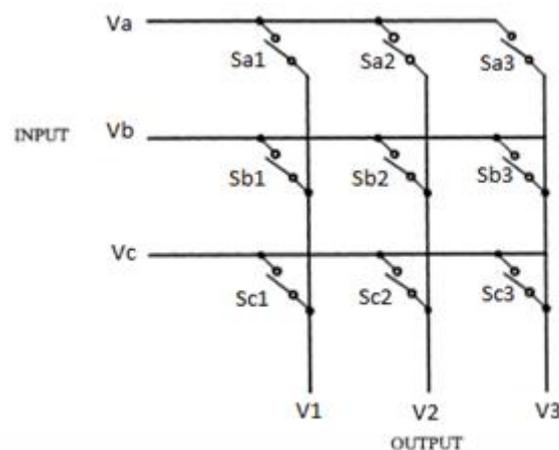


Figure 4. Schéma de principe du convertisseur matriciel

Nous allons mettre en équation la structure en utilisant les lois de Kirchhoff :

$$\begin{bmatrix} V1 \\ V2 \\ V3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Sa1 & Sa2 & Sa3 \\ Sb1 & Sb2 & Sb3 \\ Sc1 & Sc2 & Sc3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i1 \\ i2 \\ i3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Sa1 & Sa2 & Sa3 \\ Sb1 & Sb2 & Sb3 \\ Sc1 & Sc2 & Sc3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ia \\ ib \\ ic \end{bmatrix}$$

Avec $i1, i2, i3$ les courant de sortie de la matrice et ia, ib, ic , les courants en entrée.

Et S_{ij} , la fonction de connexion des neufs interrupteurs,

$$S_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{si interrupteur ouvert} \\ 1 & \text{si interrupteur fermé} \end{cases} \quad \text{pour } i=a,b,c \text{ et } j=1,2,3$$

Composition des interrupteurs :

Il est composé de neufs interrupteurs bidirectionnels en courant et en tension et à commutation forcée. Pour cela, il faut associer des composants tels que des diodes et transistors. Actuellement, plusieurs schémas sont retenus par les chercheurs comme sur la figure 5. L'inconvénient est le nombre élevé d'alimentations isolées nécessaire pour commander ces interrupteurs.

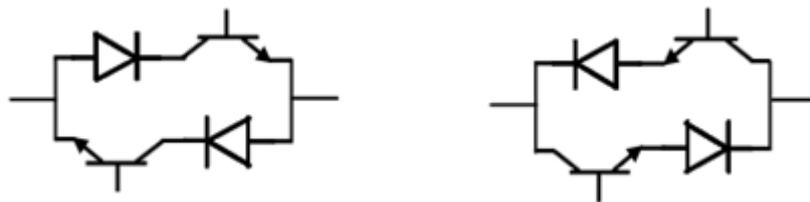


Figure 5. Topologie à transistor et diode en série

Avec la solution récente du RB IGBT, pas encore commercialisé, le convertisseur matriciel peut devenir une solution viable car ce composant n'a plus le problème des pertes de conduction qu'avec les montages associant transistor et diode en série. En effet, le RB IGBT est équivalent à un transistor en série avec une diode avec une chute de tension faible lors de l'état passant.

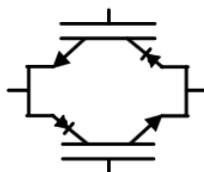


Figure 6. Schéma de l'interrupteur quatre quadrants avec la technologie RB IGBT

Il existe déjà des commandes pour les convertisseurs matriciels mais celles-ci sont compliquées et nécessitent une stratégie de modulation. Avec la sortie récente des semi-conducteurs RB IGBT, le convertisseur matriciel devient très intéressant car ces composants ont très peu de pertes. Avec une commande adaptée et facile à mettre en œuvre comme la commande DPC, les industriels utiliseront ce type de système.

III Modèle Simulink de la commande DPC sur un convertisseur MLI

Une fois la commande DPC comprise, nous avons testé celle-ci sur Matlab Simulink sur un modèle déjà existant. Le système est décomposé en deux parties, la première comporte le convertisseur MLI avec en entrée la tension du réseau délivrant deux tensions composées puis un filtre RL et enfin le convertisseur.

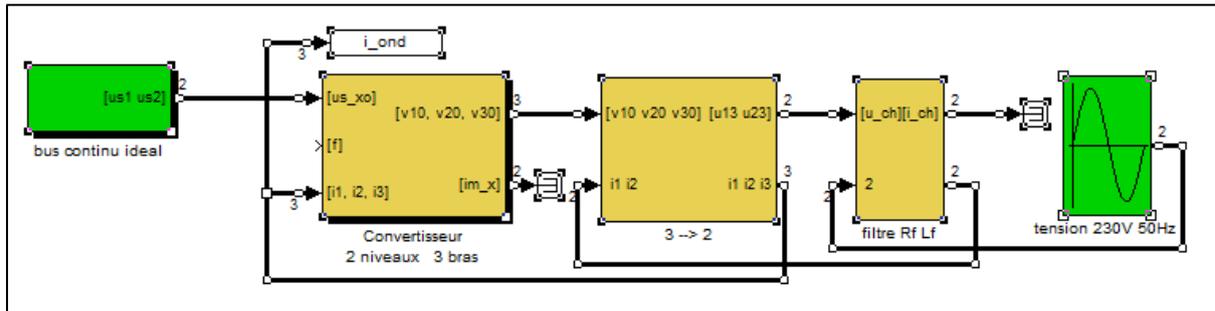


Figure 7. Modèle Simulink d'un convertisseur MLI

La seconde partie est la commande DPC de ce convertisseur, qui prend en entrée les tensions délivrées par la source de tension 230V 50Hz ainsi que les trois courants i_1, i_2, i_3 . Cette commande envoie une matrice 3×2 qui comporte les états ouverts ou fermés des interrupteurs du convertisseur.

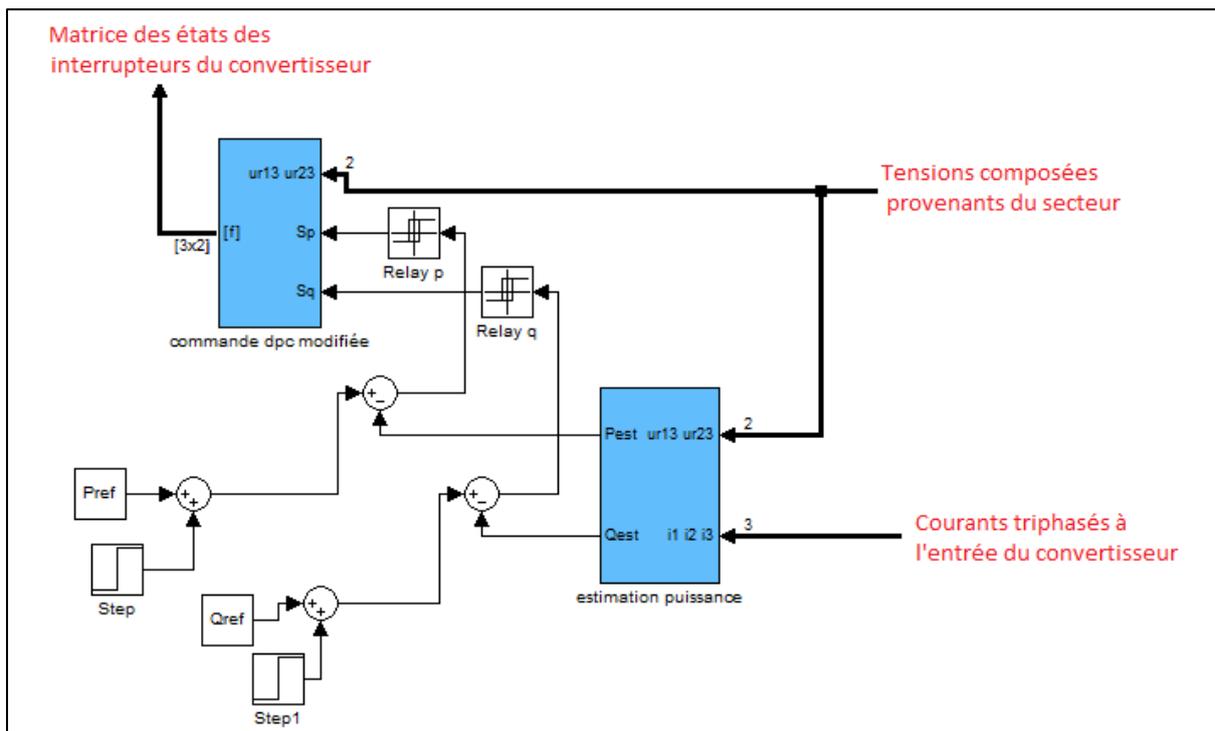


Figure 8. Modèle Simulink de la Commande DPC pour un convertisseur MLI

Dans un premier temps, un bloc estimation de puissance va servir à calculer les puissances actives et réactives instantanées à partir des tensions u_{13}, u_{23} ainsi que des trois courants.

Ces puissances sont comparées avec les puissances de références, ici les consignes sont indiqués dans un fichier d'initialisation, on peut les faire varier à l'aide des blocs Step.

L'erreur entre la puissance de référence et la puissance instantanée est envoyée dans un comparateur hystérésis deux niveaux avec une bande d'hystérésis de 500W.

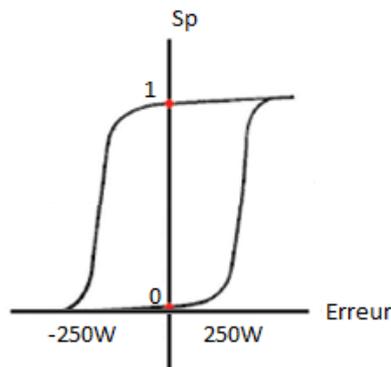


Figure 9. Courbe d'hystérésis

Les variables S_p et S_q , égales à 1 ou 0, sont utilisées dans le bloc « commande DPC ». Dans ce bloc, constitué principalement de comparateurs et de blocs logiques, la valeur de θ est calculée en fonction de S_q et S_p , si la puissance augmente ou diminue. Cet angle permet de savoir dans quelle zone on se situe afin de mettre les états bas ou haut des six interrupteurs dans une matrice. Cette matrice est envoyée au convertisseur qui la multiplie aux courants et tensions afin de simuler l'état bloqué ou passant de ses interrupteurs.

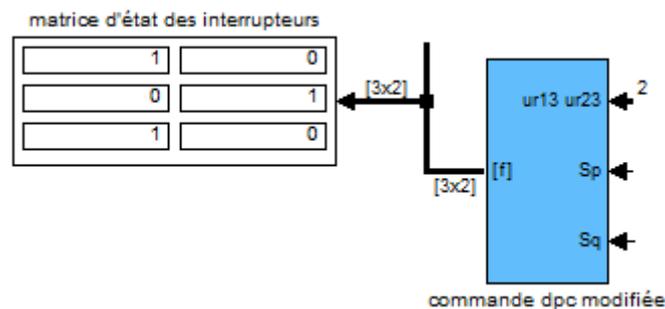


Figure 10. Visualisation de la matrice en sortie de la commande DPC

Sur la simulation, nous visualisons bien que la matrice comporte des 1 ou 0 qui sont envoyés au convertisseur afin de commander l'état bloqué ou passant des interrupteurs.

IV Objectifs pour la suite du projet

Dans un premier temps, il faut réaliser le modèle de la commande DPC sur un convertisseur matriciel. Nous allons donc adapter la commande étudiée avec le convertisseur MLI. Par exemple il va falloir commander six interrupteurs au lieu de trois.

Une fois la modèle validé théoriquement, il faudra l'implémenter sous Matlab Simulink afin de pouvoir simuler et valider le modèle.

Puis une analyse des résultats sera faite afin de rédiger un rapport détaillé sur la commande DPC avec le convertisseur matriciel.

Bibliographie

- [1] **Bengana Sara**, « *Stratégie de Contrôle Directe de Puissance d'un redresseur PWN triphasé* », 2013, mémoire, Ouargla, 82p.
- [2] **Mariusz Malinowski, Member, IEEE, Marek Jasin 'ski, Student Member, IEEE, and Marian P. Kazmierkowski, Fellow, IEEE**, "Simple Direct Power Control of Three-Phase PWM Rectifier Using Space-Vector Modulation (DPC-SVM)", *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, VOL. 51, NO. 2, APRIL 2004.
- [3] **A. Halvaei Niasar, Member, IEEE, H. Moghbelli, Member, IEEE, A. Vahedi, Member, IEE**, "MODELING, SIMULATION AND IMPLEMENTATION OF FOUR-SWITCH, BRUSHLESS DC MOTOR DRIVE BASED ON SWITCHING FUNCTIONS".
- [4] **J. Monteiro, Student Member, IEEE, J. Fernando Silva, Senior Member, IEEE, S. F. Pinto, Member, IEEE, and J. Palma**. "Matrix Converter-Based Unified Power-Flow controllers: Advanced Direct Power Control Method", *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, VOL. 26, NO. 1, JANUARY 2011.
- [5] **J. Monteiro, Member, IEEE, J. Fernando Silva, Senior Member, IEEE, S. F. Pinto, Member, IEEE, and J. Palma**, "Linear and Sliding-Mode Control Design for Matrix Converter-Based Unified Power Flow Controllers", *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, VOL. 29, NO. 7, JULY 2014.
- [6] **LI Ning, WANG Yue, LI su, LI Yufei and WANG Zhao'an**, "Direct Power Control Strategy used in three-level NPC Converters" ,2012 IEEE 7th International Power Electronics and Motion Control Conference - ECCE Asia, Power Electronics and Renewable Energy Research Center, Department of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China.
- [7] **H.Q.S Dang, P. Wheeler, J. Clare**, "A Control Analysis and Implementation of High Voltage, High Frequency Direct Power Converter", 2012.
- [8] **Amaia LOPEZ DE HEREDIA BERMEO**, "COMMANDES AVANCEES DES SYSTEMES DEDIES A L'AMELIORATION DE LA QUALITE DE L'ENERGIE : DE LA BASSE TENSION A LA MONTEE EN TENSION", thèse, grenoble 2006

Annexe

Modèle Simulink d'un convertisseur MLI avec une commande DPC

