

Un simulateur de convertisseur d'électronique de puissance appliqué dans le transport d'énergie électrique HVDC

Power Electronic Converter Simulator Applied in Electric Power Transmission HVDC

Radia Boumilek*

Université Badji-Mokhtar Annaba, Département Electrotechnique,
Laboratoire Electrotechnique, B.P 12, Annaba, 23000, Algérie.

Soumis le : 18/10/2016

Révisé le : 08/05/2017

Accepté le : 13/06/2017

ملخص

في هذا المقال قمنا بإنشاء مجسم مخبري الذي سيتم استعماله في التحويل المتناوب-المستمر لنظام نقل الطاقة الكهربائية عالية الجهد بالتيار المستمر. التعديلات المحدثة على هذا الموحد المحكوم تكمن بالتحديد في تغيير زاوية الإشعال وتأثيرها على نوعية الجهد الموحد لا سيما استقرار النظام. التحكم يكون بواسطة المتحكم الدقيق من نوع PIC18F4550 الذي يضمن مراقبة الموحد. الفائدة من استعمال هذا النوع من المجسمات المخبرية هو التحقق من صحة النموذج المقترح عن طريق نتائج مخبرية. النتائج المحصلة عليها مقدمة و محللة حتى نبين فاعلية هذا المجسم.

الكلمات المفتاحية: HVDC-المتحكم الدقيق-الموحد-زاوية الإشعال-PIC18F4550-الاستقرار.

Résumé

Dans cet article un simulateur de laboratoire est conçu pour la conversion alternative-continue destinée pour le transport de l'énergie électrique (HVDC). Les améliorations apportées à ce redresseur commandé se situent essentiellement au niveau de la variation de l'angle d'amorçage et son impact sur la qualité de la tension redressée ainsi que la stabilité du système. La commande est réalisée par un microcontrôleur (PIC18F4550) assurant le contrôle et la surveillance du redresseur. L'intérêt de l'utilisation de ce genre d'émulateur de laboratoire est la validation du schéma proposé par des tests expérimentaux. Les résultats obtenus sont présentés et analysés pour montrer l'efficacité de ce simulateur.

Mots clés- HVDC-Microcontrôleur PIC18F4550-Redresseur-Angle d'amorçage-Stabilité.

Abstract

This paper presents a laboratory simulator designed to be used in the AC-DC conversion of a HVDC transmission system. The improvements of the controlled rectifier are mainly on the variation of the firing angle to show its effect on the rectified voltage quality and the system stability. The control scheme is based on a microcontroller PIC 18F4550 which ensures the control and the monitoring of the rectifier. The purpose of using this type of laboratory emulator is to validate the proposed scheme by experimental tests. The obtained results are presented, analyzed and discussed.

Keywords: HVDC-Microcontroller-PIC18F4550-Rectifier- Control- Voltage-firing angle-stability.

* Auteur correspondant : boumilekrad@yahoo.fr

1. INTRODUCTION

Les systèmes électriques de très haute tension ont besoins d'être développés pour faciliter les échanges, maintenir la stabilité et la sûreté de fonctionnement. Certaines limites des réseaux alternatifs apparaissent alors, les réseaux à courant continu HVDC (High voltage direct current) peuvent être une alternative sous réserve de trouver des solutions aux barrières scientifiques et technologiques existantes [1,2].

Depuis plusieurs années, la technologie HVDC a évolué et s'est intégrée à de multiples réseaux électriques partout dans le monde. Ses diverses applications et avantages lui ont donné une place de choix dans le domaine du transport de l'énergie électrique [3]. Une liaison HVDC est constituée d'une ligne à courant continu reliant deux stations de conversions AC vers DC et DC vers AC. Elle peut être configurée en plusieurs modes : Dos à Dos, ligne monopolaire, ligne bipolaire et systèmes muti-terminaux [4].

La puissance électrique est convertie en DC dans une station de conversion (le redresseur) et transmise à une autre station de conversion (l'onduleur) par des lignes ou des câbles électriques de hautes tensions. Deux principales technologies de convertisseurs existent pour une liaison HVDC : un convertisseur à thyristor (Line-Commutated Converter, LCC-HVDC ou Current Source Converter, CSC-HVDC) ou un convertisseur à interrupteurs entièrement commandables type IGBT (Voltage Source Converter, VSC-HVDC) [5-6].

La caractéristique importante du transport HVDC est le contrôle rapide de la puissance transmise atteint par le contrôle de courant aux deux extrémités (redresseur et onduleur), le contrôle de l'angle d'amorçage à l'extrémité du redresseur et le contrôle d'extinction à l'extrémité de l'onduleur [6]. Les recherches dans ce domaine visent entre autres l'amélioration de la qualité de la puissance fournie et de la stabilité des réseaux interconnectés.

L'électronique de puissance connaît un développement considérable ; on trouve de plus en plus des connectés sur le réseau électrique qui deviennent une solution optimale pour résoudre des problèmes spécifiques [7]. La mise en point des nouvelles stratégies de commandes sophistiquées a permis une amélioration importante sur la performance des redresseurs de grandes puissances ainsi que le développement du transport d'énergie électrique à courant continu [8-9].

L'étude des liaisons en HVDC peut se faire autrement par l'utilisation d'outils de simulation. L'amélioration de ces derniers permet de développer de nouveaux modèles de composants retrouvés sur les réseaux électriques, en outre, La simulation numérique permet de créer de nouveaux types de circuit ainsi que de tester l'efficacité et la fiabilité de nouvelles commandes de façon très rapide.

La réalisation des circuits de commande des redresseurs est compliquée de nature, divers techniques de commande ont été proposées où les algorithmes nécessitent une implémentation sur des prototypes de haute performance basés sur des processeurs puissants tel que DSP, PLC et FPGA. Ceci rend le système d'implémentation très coûteux bien que la topologie et le principe de fonctionnement des redresseurs sont simple. L'utilisation des systèmes de commande à base de microcontrôleurs 8 bits à faible coût pour étudier les redresseurs triphasés est devenue attractive et concurrente [10-11-12-13-14].

Dans ce travail un émulateur de laboratoire est conçu et réalisé basé sur un redresseur triphasé commandé à 6 interrupteurs. Cet émulateur sera employé pour l'étude de la conversion alternative-continue dans le transport de l'énergie électrique (HVDC).

Les améliorations apportées à ce redresseur commandé se situent essentiellement au niveau de la variation de l'angle d'amorçage en boucle ouverte afin d'étudier son impact sur la qualité de l'énergie convertie ainsi que la stabilité du système. La commande est implémentée sur un microcontrôleur (PIC18F4550) assurant le contrôle et la surveillance en temps réel du redresseur.

Les résultats expérimentaux sont présentés, analysés et comparés avec les résultats de simulation des modèles théoriques développés.

2. MODELISATION ET SIMULATION DES CONVERTISSEURS ELECTRONIQUES DE PUISSANCE

En général, les stations de conversion de puissance sont constituées par :

- Partie Puissance : alimentation réseau, charge et composant de commutation.

➤ Partie Contrôle : Chargée du traitement, la surveillance et la conduite de puissance à partir d'une logique implantée sur un microcontrôleur, DSP, PLC ou FPGA.

2.1. Valeur moyenne et efficace de la tension redressée

La valeur moyenne et la valeur efficace de la tension redressée sont déterminées par les équations suivantes :

$$\begin{aligned}
 U_{dmoy} &= \frac{1}{T} \int_0^T V_{ab} \cdot d\omega t \\
 &= \frac{1}{2\pi} \times 6 \int_{(\pi/6)+\alpha}^{(\pi/2)+\alpha} \sqrt{3}V_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) \cdot d\omega t \\
 U_{dmoy} &= \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \times \cos \alpha
 \end{aligned}$$

La valeur moyenne maximale est pour $\alpha = 0$:

$$\begin{aligned}
 U_{dmoy} &= \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \\
 U_{deff} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_{ab}^2 \cdot d\omega t} \\
 U_{deff} &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \times 6 \int_{(\pi/6)+\alpha}^{(\pi/2)+\alpha} V_{ab}^2 \cdot d\omega t} \\
 &= \frac{1}{2\pi} \times 6 \int_{(\pi/6)+\alpha}^{(\pi/2)+\alpha} 3V_m^2 \sin^2\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) \cdot d\omega t \\
 U_{deff} &= \sqrt{6}V_m \left(\frac{1}{4} + \frac{3\sqrt{3}}{8\pi} \cos 2\alpha \right)
 \end{aligned}$$

Avec :

U_{dmoy} : Valeur moyenne de la tension redressée

U_{deff} : Valeur efficace de la tension redressée

T : Période

V_m : Tension maximale

ω : Pulsation

V_{ab} : Tension composée

α : Angle d'amorçage

2.2. Commutation naturelle des Thyristors

L'ouverture automatique des thyristors utilisés dans les stations de conversion AC-DC est appelée commutation naturelle'', elle est causée par la caractéristique naturelle de la tension de la source alternative, l'instant d'ouverture arrive quand le courant à travers le thyristor passe par zéro, et sa tension inverse.

Dans ce travail nous allons simuler les différents types de redresseurs dans l'environnement PSPICE pour montrer l'effet de l'angle d'amorçage sur la tension redressée.

2.3. Redresseur triphasé commandé PD3

Le redresseur parallèle double PD3 étudié présenté sur la Figure 1 est un redresseur en pont de Graetz triphasé. Le secondaire du transformateur est couplé en étoile et connecté à deux groupes de thyristors.

- Un commutateur à cathode commune (SCR1, SCR3, SCR5)
- Un commutateur à anode commune (SCR4, SCR6, SCR2)

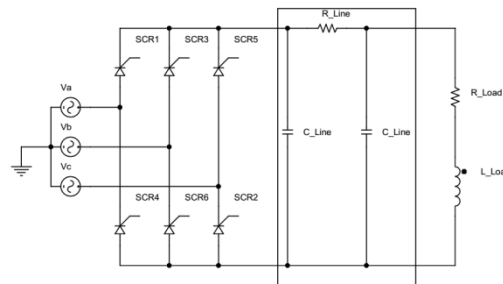


Figure 1. Modèle du redresseur PD3

Les essais de simulation ont été effectués sur le logiciel Pspice avec les paramètres suivants :

Table1 les paramètres de Simulation d'un redresseur PD3 et S3

$v_{composée}$ (V)	R (Ω)	C (μF)	L (mH)
400	10	0.4	65

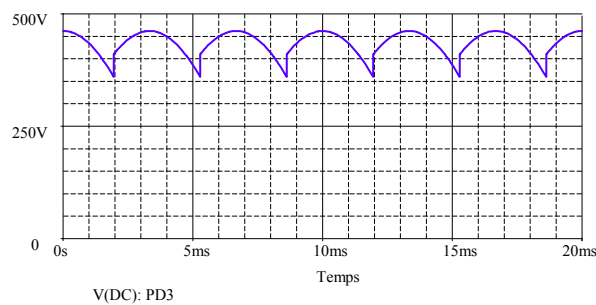


Figure 2. Forme d'ondes de la tension redressée (PD3)

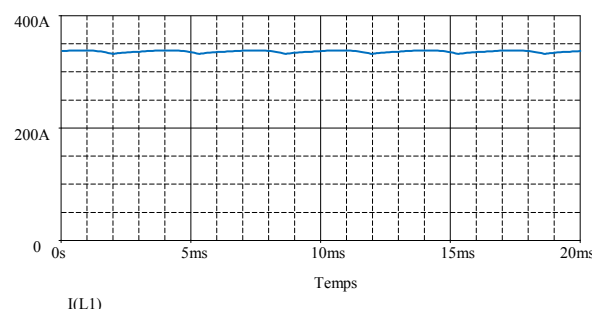


Figure 3. Forme d'onde du courant redressée (PD3)

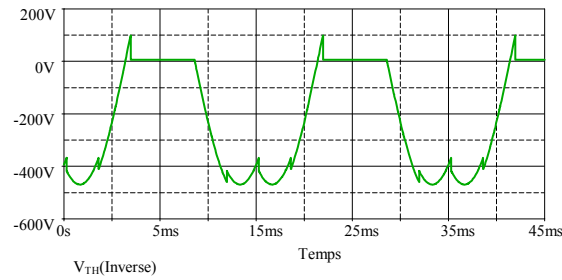


Figure 4. Forme d'onde de la Tension inverse du thyristor

2.4. Redresseur triphasé S3

Pour ce modèle de redresseur (Fig.5), le secondaire du transformateur est couplé en Δ pour avoir un décalage de (30°), et connecté à deux groupes de thyristors.

- Un commutateur à cathode commune (SCR1, SCR3, SCR5)
- Un commutateur à anode commune (SCR4, SCR6, SCR2)

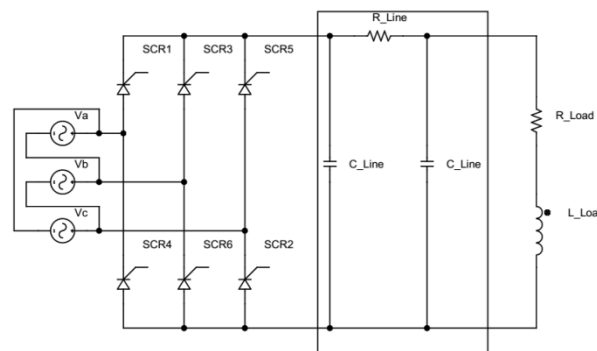


Figure.5. Modèle du redresseur S3

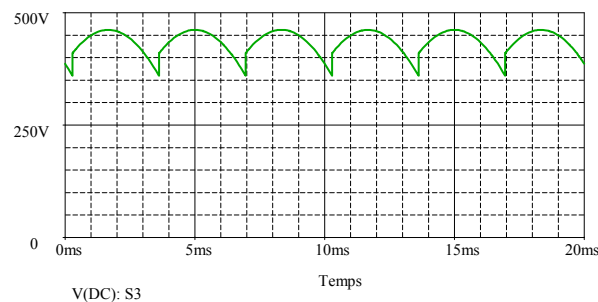


Figure.6. Forme d'ondes de la tension redressée (S3)

2.5. Redresseur dodécaphasé

Pour obtenir un convertisseur à 12 pulsations, il faut connecter deux ponts de Graetz en série. Le premier aura un transformateur en Y-Y et le deuxième transformateur en Y- Δ . Si on veut que les deux ponts en série possèdent les mêmes valeurs de tension, il faut que les tensions des secondaires des transformateurs soient égales. En conséquence, il est nécessaire de définir le rapport entre les

enroulements du secondaire et les enroulements du primaire du transformateur (Fig.7). Le tableau 2 résume les paramètres de simulation d'un redresseur P12.

Tableau 2 : paramètres de simulation d'un redresseur P12

$v_{comops\ée}$ (V)	R (Ω)	C (μ F)	L (mH)
400	10	0.4	100

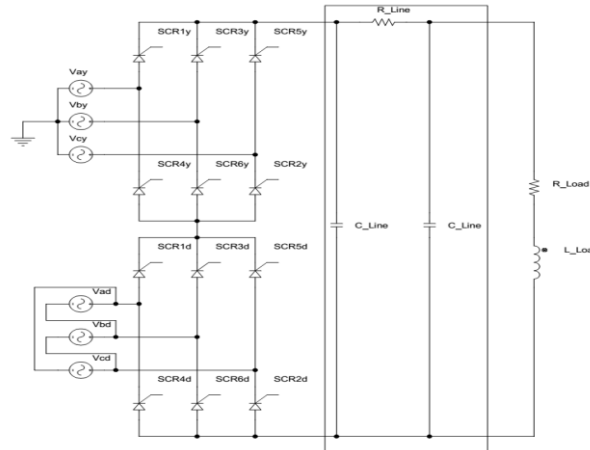


Figure.7. Modèle du redresseur P12

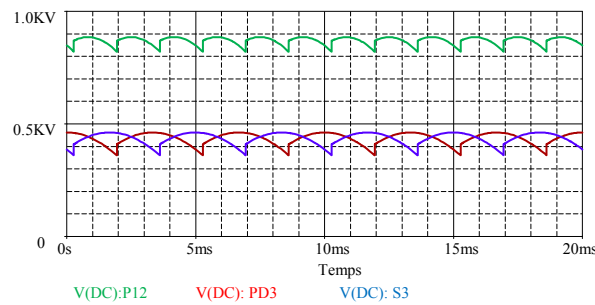


Figure.8. Tension redressée pour un redresseur dodécaphasé

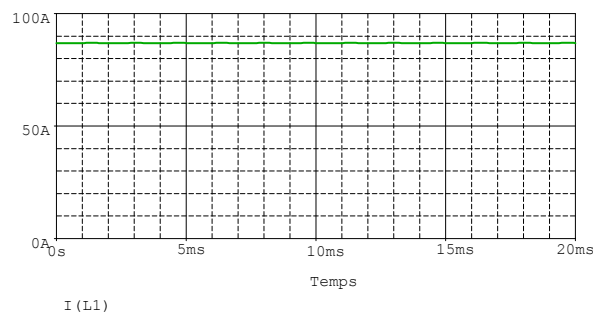


Figure.9. Forme d'onde du courant redressée (P12)

3. REALISATION DE L'EMULATEUR DE LABORATOIRE

3.1. Description de l'émulateur

L'émulateur réalisé est un redresseur commandé triphasé PD3 basé sur microcontrôleur, qui fonctionne sous une tension simple nominale de 230V AC, utilisé pour obtenir des résultats

expérimentaux. Le schéma synoptique de la carte du redresseur est montré sur la figure 10. Les éléments constituant cette carte sont montrés sur les Figures 11 et 12 :

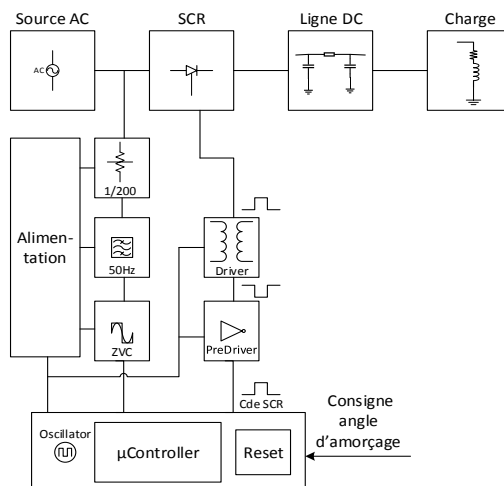


Figure.10. Schéma Synoptique de la carte du redresseur

Il est constitué de deux modules :

Module de contrôle (Fig. 11) : ce module surveille le signal de puissance, calcule la temporisation selon la valeur consigne de l'angle d'amorçage et commande les gâchettes du thyristor, il se compose des circuits suivants :

Microcontrôleur PIC18F4550 et ses circuits annexes: Reset et Oscillateur.

Pré-Driver : l'interface entre le PIC et les Drivers des gâchettes, utilisé pour fournir la puissance nécessaire à la commande des Drivers.

Interface Homme Machine : un clavier et un afficheur LCD.

Module d'acquisition et de puissance (Fig. 12) : ce module est constitué par les commutateurs de puissance, les interfaces de puissance, les interfaces de mesure et les modules d'acquisition et mise en forme, il se compose des circuits suivants :

Filtre actif passe-bande centré à 50Hz: destiné pour éliminer les harmoniques du réseau à l'entrée de la commande pour avoir uniquement la fondamentale. Le filtre implanté a la particularité d'introduire un déphasage de $180^\circ (\pi)$ qui sera récupéré au niveau de l'étage de détection de passage par zéro.

Détecteur de passage par zéro (ZVC) : Un comparateur à temps de réponse ultra-rapide (12ns) est utilisé pour obtenir avec précision l'instant du passage par zéro de la tension de chaque phase (détection du passage par zéro de l'alternance négative du signal filtré afin de récupérer l'inversion entraînée par le filtre), ce moment représente la référence (le début) de l'angle d'amorçage (α). (Cet instant représente l'origine du calcul de l'angle d'amorçage α).

Driver: consiste en un transformateur de puissance qui commande directement la gâchette du thyristor, et aussi sert pour l'isolation galvanique entre le module de commande et le module de puissance.

Transformateur de tension: un diviseur de tension avec un rapport de 1/200 pour obtenir l'image en basse tension du réseau (AC et DC).

Transformateur de courant: un capteur à effet hall (un transducteur) pour avoir l'image du courant DC.

Module de puissance: consiste principalement du composant de commutation : six (06) thyristors identiques montés en PD3, dont les paramètres sont cités dans le Tableau 3.

Tableau 3. Caractéristique du Thyristor

Mark	SEMIKRON
Type	SKKT91/12 ^E
VRRM/VDRM	1200V
ITRMS	150A
IH	250mA

VGT	3V
IGT	150mA

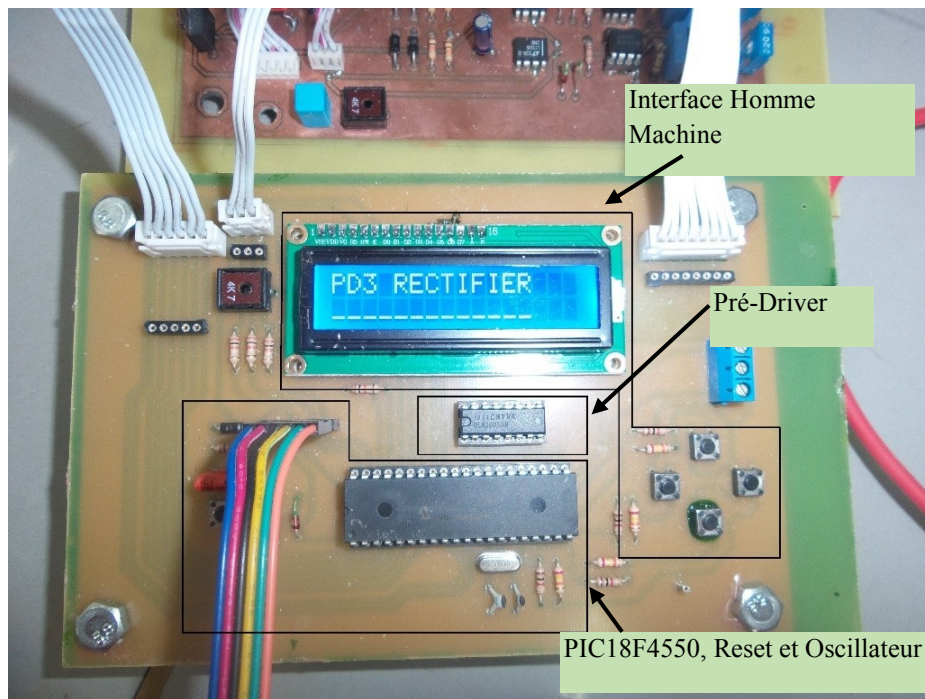


Figure.11. Emulateur de laboratoire : Module de commande

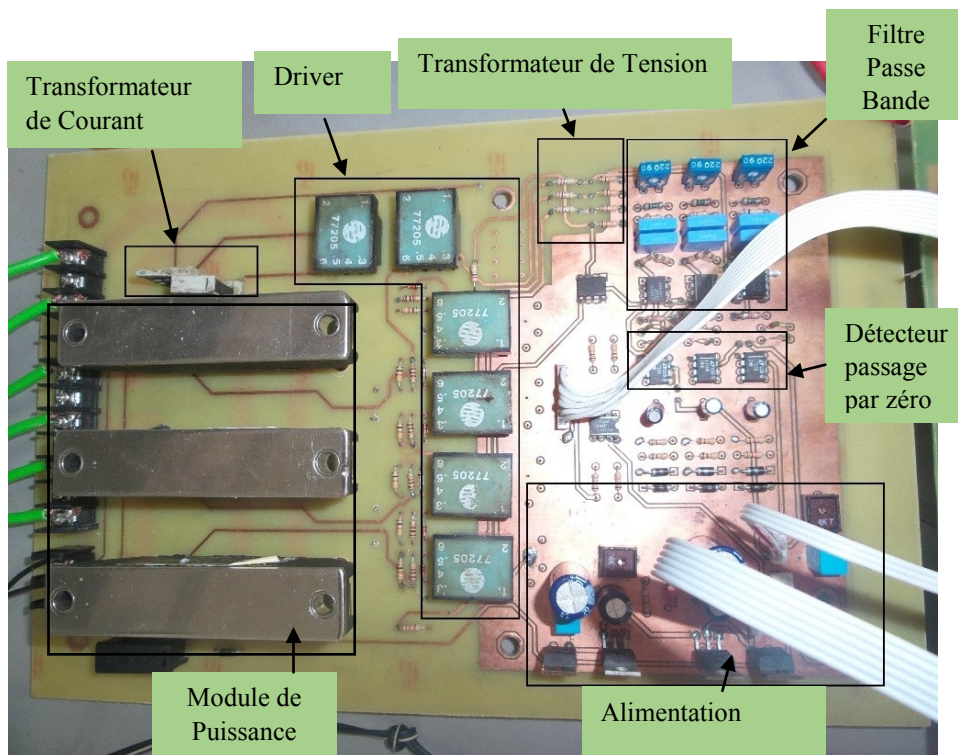


Figure12. Emulateur de laboratoire : Module de d'acquisition et de puissance

3.2. Fonctionnement et organigrammes

La Figure 13 montre les organigrammes de programme principal (a), routine interruption de détection passage par zéro (b), et de routine interruption de débordement de compteur (c).

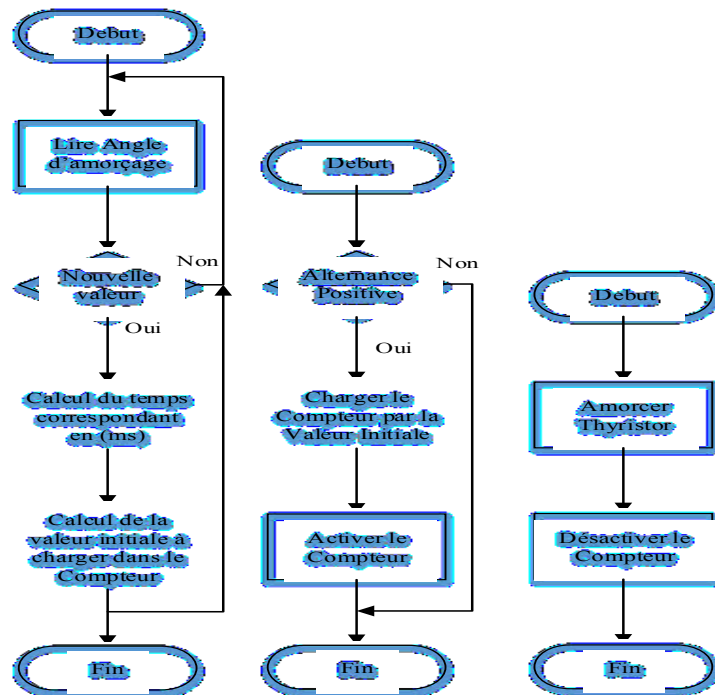


Figure.13. Organigrammes (a) programme principal (b) routine interruption de détection passage par zéro (c) routine interruption de débordement de compteur.

La carte de commande supervise le passage par zéro des tensions d’entrée et commande les gâchettes des thyristors en séquences en temps réel par l’utilisation des sources d’interruption du PIC. Le programme principal calcule en base de temps la valeur correspondante à la consigne de l’angle d’amorçage et la valeur initiale à charger dans le temporisateur.

Résultats expérimentaux

Les tests expérimentaux ont été effectués avec les paramètres suivants résumés dans le tableau 4.

Tableau 4 : paramètres de test de l’émulateur au laboratoire

$v_{composée}$ (V)	R (Ω)	C (μF)	L (mH)
400	10	0.4	65

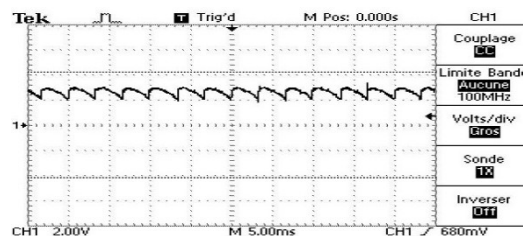


Figure.14. Tension DC (V: 2V/div, H: 5ms/div)

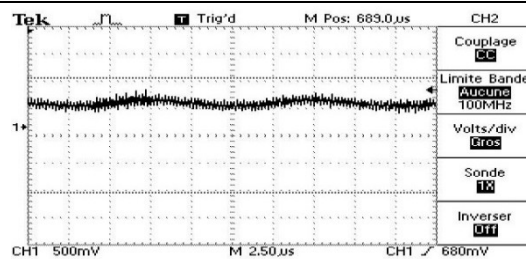


Figure.15. Courant DC(V: 0.5V/div, H: 2.5us/div)

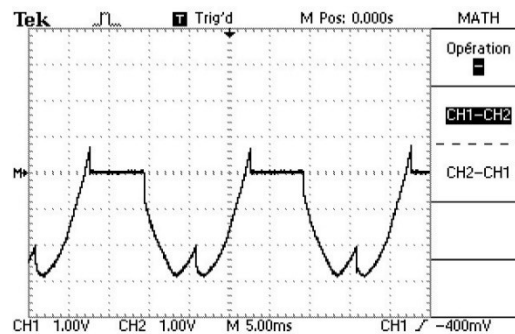


Figure.16. Tension de commutation aux bornes des thyristors (V : 2V/div, H : 5ms/div)

4. RESULTATS ET DISCUSSION

Les résultats de simulation de la tension redressée, le courant redressé et la tension de commutation des redresseurs triphasés PD3, S3 et le redresseur dodécaphasé sont présentées respectivement dans les figures 2, 3, 4, 6, 8 et 9

Il est constaté que les résultats de simulation pour un angle d'amorçage défini sont identiques aux résultats définis par la théorie.

La simulation du redresseur triphasé PD3 a été vérifiée et validée par des tests expérimentaux moyennant l'émulateur pour les mêmes conditions (Tableau 4). Les formes d'ondes de la tension redressée, le courant redressé et la tension de commutation de l'émulateur sont visualisés par oscilloscope numérique et présentés respectivement dans les figures 14, 15 et 16

Les résultats obtenus par l'émulateur sont en concordance avec les résultats de la simulation du point de vu formes d'ondes et amplitudes.

Durant la réalisation expérimentale, on a pu constater une grande stabilité lors de la commutation des thyristors de la phase ON vers OFF et OFF vers ON ainsi que l'exécution en temps réel, qui nous offre la possibilité d'augmenter la fréquence de travail.

5. CONCLUSION

Dans cet article, la conception et la réalisation d'un prototype de laboratoire du redresseur triphasé PD3 basé sur microcontrôleur PIC18F4550 destiné pour le transport de l'énergie électrique (HVDC) est effectuée.

La modélisation et la simulation des différents types de redresseurs triphasé sont présentés et discutés dans ce travail.

Le modèle théorique du redresseur triphasé PD3 est également validé expérimentalement moyennant le prototype réalisé dans un environnement similaire à celui de la simulation. Les résultats sont également analysés et comparés avec les résultats de la simulation, où l'efficacité du prototype est approuvée.

L'émulateur réalisé est doté d'une interface de communication et des routines de régulation de puissance pour l'étendre dans le future vers une association avec un onduleur afin d'étudier les liaisons HVDC.

REFERENCES

- [1] S. Akkari, M. Petit, X. Guillaud et J. Dai, "Modélisation, Simulation et Commande des systèmes VSC-HVDC multi-terminaux", Symposium de Génie Electrique 2014, Cachan, Juillet 2014
- [2] K. Meah, S. Ula, "Comparative Evaluation of HVDC and HVAC Transmission Systems", IEEE, Power Engineering Society General Meeting, 2007
- [3] Muhammad H. Rashid, Power Electronics Handbook 3rd Edition, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2011
- [4] A. M. Eltamaly, Fundamental of Power Electronic, 2010
- [5] S. Casoria(Hydro-Quebec). HVDC Transmission system (Thyristor-based). *imPowerSystems 4.0 Release Notes*. Mathworks
- [6] M. Rajasekaran, M. VenkataKirthiga, "Investigations on Modern Self-defined Extinction Advance Angle Controller for CCC Based HVDC Systems", Springer, Mobile Communication and Power Engineering 2012, pp. 317-323, 2013.
- [7] M. H. Rashid, Power Electronics Circuits, Devices, and Applications, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1993
- [8] R. Kumar, T. Leibfried, "Analytical Modelling of HVDC Transmission System Converter Using Matlab/Simulink", IEEE Systems, Technical Conference on Industrial and Commercial Power pp. 140-146, 2005
- [9] A. Hernadi, Taufik and M. Anwari "Modelling and simulation of 6-pulse and 12-pulse rectifiers underbalanced and unbalanced conditions with impacts to input current harmonics", IEEE, Second Asia International Conference on Modelling & Simulation (AMS), pp.1034-1038, June 2008
- [10] U. Farooq "Microcontroller Based Low Cost Controlled Rectifiers Training Module for Power Electronics Laboratory", IEEE International Conference on Signal Acquisition and Processing, Bangalore, India, February 2010, PP. 220-223
- [11] K.C. Pulido "Simulation and Real-Time Emulation of a three-level and a Seven-level Active Rectifiers", IEEE, International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), 2014, PP. 1-6
- [12] S. Bheesette "A Microcontroller based Control and Monitoring System on an SPI interface for a DC-HVDC Power Supply Module", IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS), 2014, PP. 1-6
- [13] M. B. Ortiz-Moctezuma "A nonlinear control microcontroller implementation for a MPPT algorithm for a small photovoltaic facility", IEEE International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2012, PP. 99-102
- [14] S. A. Zulkifli "Investigation on various Voltage Controllers for 3 phase rectifier using Arduino as a Low Cost Microcontroller", Trans Tech Publications, Switzerland, Applied Mechanics and Materials, Vol. 793, 2015, PP. 257-261
- [15] M. H. Rashid, H. M. Rashid, Spice for Power Electronics and Electric Power 2nd Edition, CRC Taylor & Francis, 2006