

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

DÉPARTEMENT D'ÉLECTRONIQUE

Mémoire de Master

En vue de l'obtention du Master en Electronique

Thème :

**Etude comparative entre les différentes
topologies et les commandes des onduleurs**

Encadré par :

LARBES Chérif

Réalisé par :

BOUCHEKOUK Oussama

Soutenu publiquement le **16 Juin 2015** devant le jury composé de :

M.HADDADI

Professeur ENP

Président

C.LARBES

Professeur ENP

Rapporteur

A.GUELLAL

CDER

Rapporteur

I.SAADAOU

Maitre de conférences

Examineur

ENP 2015

ملخص:

الغرض من هذا العمل هو إجراء دراسة مقارنة بين أنواع مختلفة من المموجات باستخدام استراتيجيات التحكم المختلفة. أجريت هذه الدراسة عن طريق تفسير نتائج المحاكاة من برنامج «PSIM». تشمل المحاكاة التوترات المحصل عليها من المموجات والتحليلات الطيفية الخاصة بها. كلمات مفتاحية: المموجات, اللاتوافقيت, الطيفة, PWM .

Résumé :

Le but de ce travail est de faire une étude comparative entre les différents types d'onduleurs en utilisant des différentes stratégies de commande. Cette étude est faite par interprétation des résultats de simulation réalisée le logiciel « Psim ». La simulation comporte les tensions de sortie des phases des onduleurs et leurs analyses spectrales.

Mots clés : Onduleur, harmonique, spectre, MLI, élimination sélective des harmoniques.

Abstract:

The purpose of this work is to make a comparative study between different types of inverters using different control strategies. This study is made by interpretation of simulation results performed the "Psim" software. The simulation includes the phases of the output voltages of the inverters and spectral analyzes.

Keywords: inverters, harmonic spectrum, PWM, Selective Harmonic Elimination

Dédicace

Je dédie ce travail à :

Mes chers parents

Mes frères et ma sœur

Toute ma famille

Ainsi qu'à tous mes amis.

Oussama

Remerciement

Je tiens à remercier dieu de m'avoir donné la patience de terminer ce travail.

Mes remerciements les plus particuliers vont à mon promoteur monsieur C. LARBES pour son suivi, son aide et son soutien matériel, ses précieux conseils et sa disponibilité.

Mes remerciements vont également à monsieur A.GUELLAL pour son aide précieuse, son suivi et sa disponibilité.

J'adresse mes sincères remerciements aux membres de jury :

Mr : M. HADDADI, Mr : I. SAADAoui d'avoir accepté de juger ce travail.

Je voudrais exprimer mes profonds respects à tous les Enseignants qui m'ont encadré durant mon étude.

Liste des figures :

Figure 1.1 : schéma de l'onduleur monophasé.

Figure 1.2 Schéma de principe d'un onduleur triphasé de tension.

Figure 1.3 Onduleur à niveaux multiples à deux (a), à trois (b) et à m niveaux (c)

Figure 1.4 les topologies des onduleurs

Figure 1.5 Onduleur NPC à trois (a) et à cinq niveaux (b)

Figure 1.6 Onduleur à condensateur flotteurs à trois (a) et à cinq niveaux (b)

Figure 1.7 : structure d'un convertisseur N niveaux en cascade

Figure 1.8 : Schéma synoptique de la loi de modulation triangulo-sinusoidale

Figure 1.9 : La création des signaux des impulsions et des tensions

Figure 1.10 : Schéma de principe du contrôle par hystérésis d'un bras de l'onduleur.

Figure 2.1 : Signal de commande

Figure 2.3 Spectre de la tension de sortie d'une phase

Figure 2.4 Une tension entre deux phases en son spectre.

Figure 2.5 : La tension d'une phase et entre deux phases

Figure 2.6 : spectre de la tension d'une phase en rouge et de la tension entre deux phases en bleu.

Figure 2.6 : La tension d'une phase en rouge et entre deux phases en bleu

Figure 2.8 : Spectre de la tension d'une phase en rouge et de la tension entre deux phases en bleu

Figure 2.9 : La tension d'une phase en rouge et entre phase en bleu

Figure 2.10 : le spectre tension d'une phase en rouge et entre phase en bleu

Figure 2.11 : La tension d'une phase en rouge et entre phase en bleu.

Figure 2.12: le spectre tension d'une phase en rouge et entre phase en bleu

Figure 2.13 : La tension d'une phase en rouge et entre phase en bleu

Table des matières

Introduction	2
I. Partie théorique	2
1.1. Introduction	2
1.2. Modélisation de l'onduleur de tension	2
1.2.1. Classification des onduleurs par les types et les topologies	2
1.2.1.1. Onduleur autonome	2
1.2.1.2. Onduleur non autonome	2
1.2.1.3 Les onduleurs monophasés	3
1.2.1.4 Les onduleurs triphasés	3
1.2.1.5 Onduleur multi-niveaux	4
1.2.2. Les différentes topologies des onduleurs multiniveaux	4
1.2.2.1 Onduleur de tension à diodes de bouclage	5
1.2.2.2. Onduleur de tension à condensateurs flotteurs.....	5
1.2.2.3. Onduleurs multiniveaux en cascade	6
1.3. Stratégies de commande des onduleurs	7
1.3.1. Commande en pleine onde	8
1.3.2. Modulation de Largeur d'Impulsion Sinus-Triangle	8
Modulation Par MLI programmée	10
II. Partie de Simulation	11
2.1. Introduction	11
2.2.1. L'onduleur triphasé à deux niveaux commandé par un sinus triangle	11
2.2.2. Un onduleur triphasé à trois niveaux commandé par un sinus triangle	13
2.2.3. Un onduleur triphasé à deux niveaux commandé par une MLI programmée	14
2.2.4. Un onduleur de courant triphasé à deux niveaux commandé par une sinus triangle	15
Conclusion	18
Bibliographie	19
Annexe.....	20

Introduction :

Cette étude comporte une comparaison entre les techniques de commande des onduleurs ainsi qu'une description comparative entre les différentes topologies et structures des onduleurs.

Cette étude est divisée en deux parties : partie théorique et partie simulation

La première partie s'agit d'une présentation de quelques généralisations sur les onduleurs, leurs topologies, les différents types existants et les stratégies de commande consacrées pour ce type de convertisseur de puissance.

La deuxième partie contient des résultats de simulations obtenues en variant des différents

Paramètres liés aux onduleurs (commande, type, topologie)

I. Partie théorique :

1.1. Introduction :

L'onduleur de tension est un convertisseur statique qui permet de fournir une tension alternative d'amplitude et de fréquence réglable à partir d'une source de tension continue.

1.2. Modélisation de l'onduleur de tension :

L'onduleur de tension est constitué de cellule de commutation généralement à transistor ou thyristor pour les grandes puissances [1].

1.2.1. Classification des onduleurs par les types et les topologies :

Il existe plusieurs centaines de schémas d'onduleurs, chacun correspondant à un type d'application déterminé ou permettant des performances recherchées. Les onduleurs sont en général classés selon les modes de commutation de leurs interrupteurs.

1.2.1.1. Onduleur autonome :

C'est un système qui nécessite des composants commandés à la fois à la fermeture et à l'ouverture, de fréquence variable, dont les instants de commutations sont imposés par des circuits externes la charge est quelconque cet onduleur n'est pas réversible [1].

1.2.1.2. Onduleur non autonome :

Dans ce cas, les composants utilisés peuvent être de simples thyristors commandés uniquement à la fermeture et la commutation est « naturelle » contrairement à l'onduleur autonome. L'application principale de ce type d'onduleur se trouve dans les variateurs pour

moteurs synchrones de très forte puissance où les thyristors sont souvent les seuls composants utilisables [1]

1.2.1.3 Les onduleurs monophasés :

Ce type d'onduleurs (Figure 1.1) est destiné à alimenter des charges alternatives monophasées, ce sont utilisés pour des applications de faible puissance. On distingue deux configurations de base: en demi-pont ou en pont complet [2].

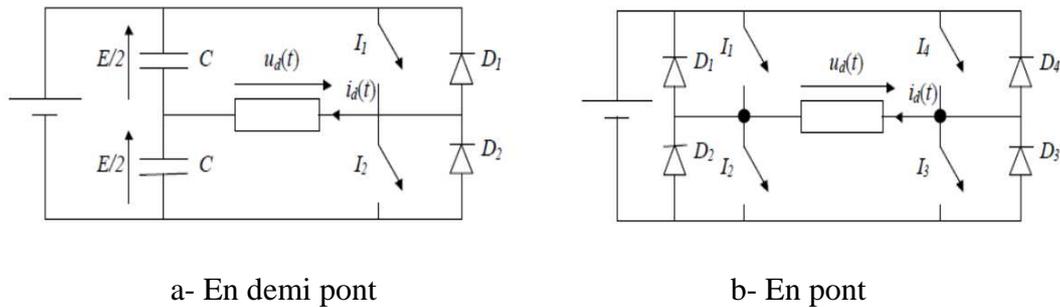


Figure 1.1 : schéma de l'onduleur monophasé.

1.2.1.4 Les onduleurs triphasés

Les onduleurs triphasés (Figure 1.2) couvrent la gamme des moyennes et des fortes puissances. L'objectif de cette topologie est de fournir une source de tension triphasée, dont l'amplitude, la phase et la fréquence sont contrôlables [3].

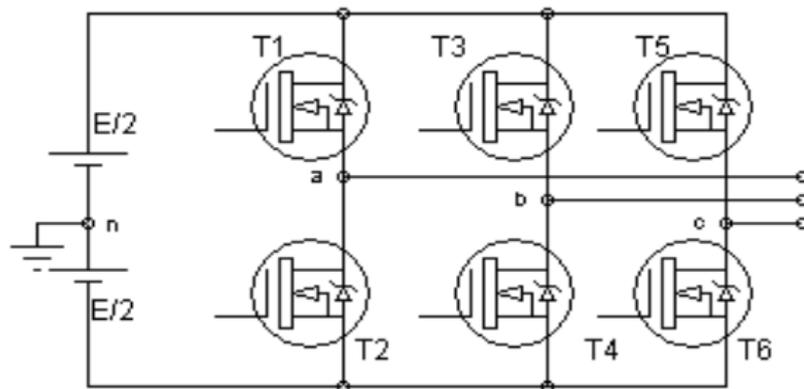


Figure 1.2 Schéma de principe d'un onduleur triphasé de tension.

1.2.1.5 Onduleur multi-niveaux :

Ce paragraphe a pour but d'introduire le principe général du comportement multiniveaux. La figure 3.1 aide à comprendre comment travaillent les convertisseurs multiniveaux [2, 3]. Un convertisseur à deux niveaux est représenté à la figure 1.3a, dans laquelle les commutateurs semi-conducteurs ont été remplacés par un interrupteur idéal. La tension de sortie ne peut prendre que deux valeurs: 0 ou V_{dc1} . Sur la figure 1.3b, la tension de sortie de trois niveaux peut prendre trois valeurs: 0, V_{dc1} ou $V_{dc1} + V_{dc2}$. Dans la 1.3c le cas général de m niveaux est présenté [4]

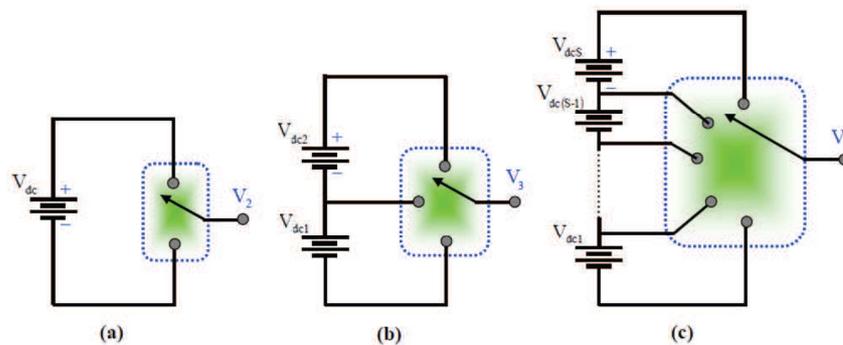


Figure 1.3 Onduleur à niveaux multiples à deux (a), à trois (b) et à m niveaux (c)

1.2.2. Les différentes topologies des onduleurs multiniveaux [1]

La figure 1.4 représente les topologies des onduleurs multiniveaux existant

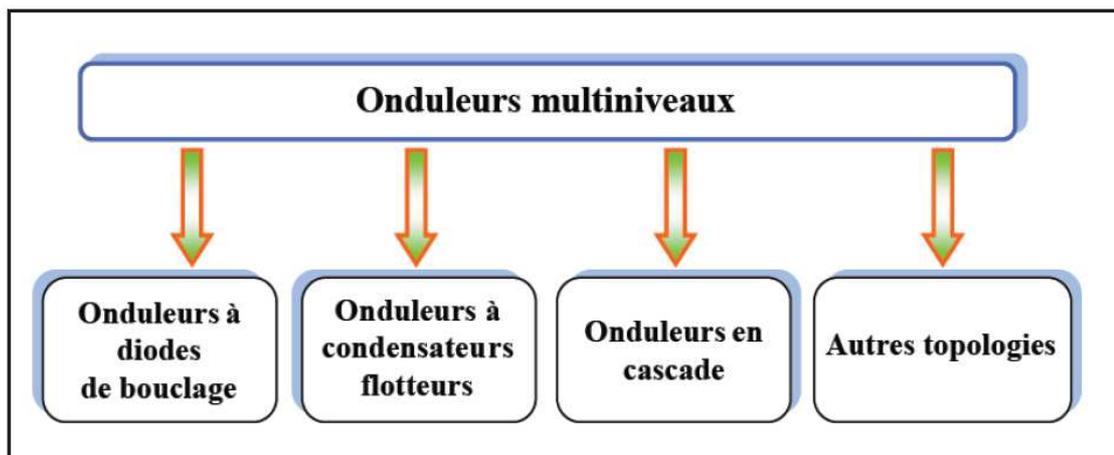


Figure 1.4 les topologies des onduleurs

1.2.2.1 Onduleur de tension à diodes de bouclage :

La première topologie, et la plus pratique, de l'onduleur de tension multiniveaux est la structure NPC (Neutral-Point-Clamped). Elle a été proposée, la première fois, par Nabae et al. en 1981. L'onduleur NPC à trois et à cinq niveaux est donné par la figure 1.5. Les diodes sont utilisées pour réaliser la connexion avec le point de référence o . Pour l'obtention d'une tension de m niveaux, $m-1$ capacités sont nécessaires. Les tensions aux bornes des condensateurs sont toutes égales à $V_{dc} / m-1$, V_{dc} étant la tension totale appliquée. Les deux interrupteurs dans un même bras sont commandés de façon complémentaire.

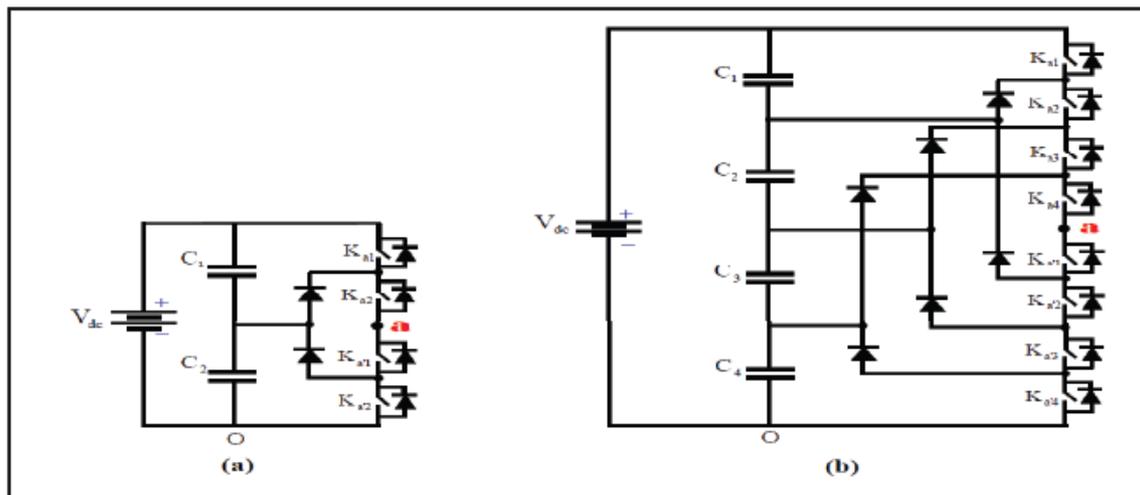


Figure 1.5 Onduleur NPC à trois (a) et à cinq niveaux (b)

1.2.2.2. Onduleur de tension à condensateurs flotteurs

La topologie de l'onduleur multiniveaux à condensateur flotteur (Flying Capacitor Multilevel Inverter), donnée par la figure 1.6 a été proposée par T. Meynard et H. Foch en 1992. Cette structure est proposée pour résoudre d'une part le problème de l'équilibre des tensions, et d'autre part pour réduire le nombre excessif de diodes. Dans cette topologie, les capacités remplacent les diodes, d'où l'appellation « onduleur à condensateur flotteurs » ; malheureusement dans cette variante un grand nombre de capacités est exigé, contrairement au premier cas qui ne nécessite que $(m-1)$ capacités seulement.

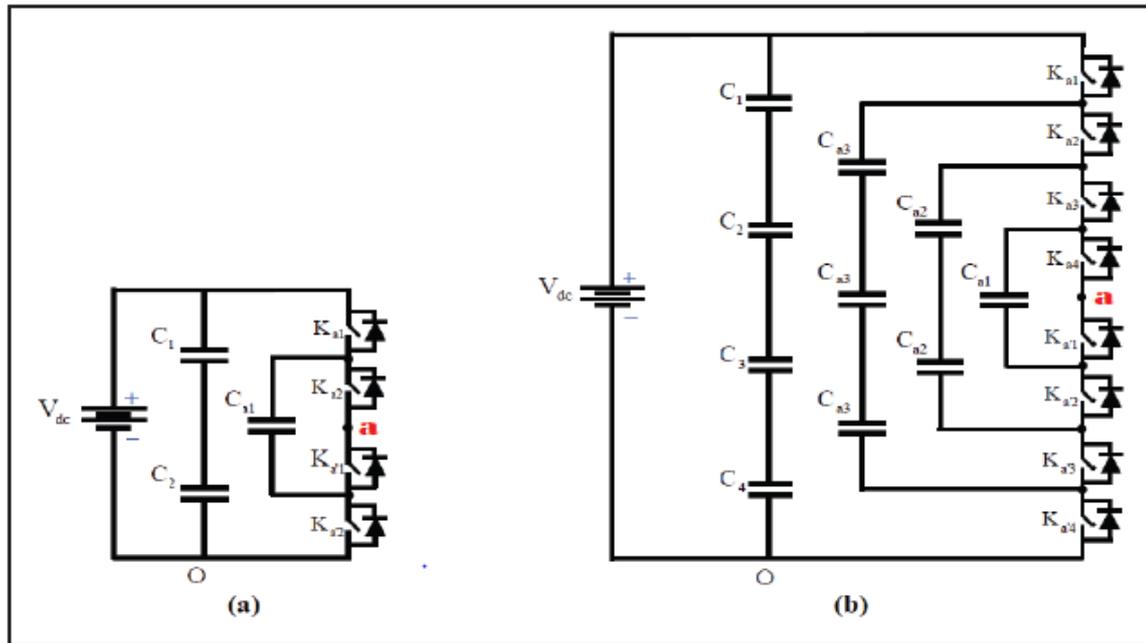


Figure 1.6 Onduleur à condensateur flotteurs à trois (a) et à cinq niveaux (b)

1.2.2.3. Onduleurs multiniveaux en cascade :

En 1975, dans les auteurs ont proposé un convertisseur multiniveaux en cascade qui consistait en la mise en série de plusieurs ponts à deux niveaux monophasé ; ces ponts étant connectés à des sources de tension continues séparées. La figure 1.7 Montre le schéma de base d'un convertisseur N niveaux en cascade formé par l'association en série de $N-1/2$ ponts à deux niveaux. La tension V_s en sortie d'une telle structure est donnée par la somme des $N-1/2$ tensions en sortie de ces ponts. Une autre alternative consiste à envisage de mettre en série plusieurs ponts monophasé alimentés par une même source de tension continue E_c (figure 1.7). Cette structure est appelée polygonale et l'utilisation d'un transformateur d'isolement à la sortie de chaque pont est obligatoire pour connecter les sortie alternative de chaque pont. Il est à noter cependant que pour ces deux structure, l'encombrement (et par conséquent l'augmentation du cout) de l'installation reste des handicapes pénalisants. En effet, pour l'obtention d'une tension de sortie à N niveaux, il faudra disposer de $(N-1)/2$ pont monophasé par bras. Chaque à la valeur doit être dimensionné pour le courant de charge et pour une tension continue égale à la valeur maximal de la tension en sortie du bras divisée par N '(ceci est valable dans le cas des onduleurs polygonaux pour un rapport de transformation unitaire).

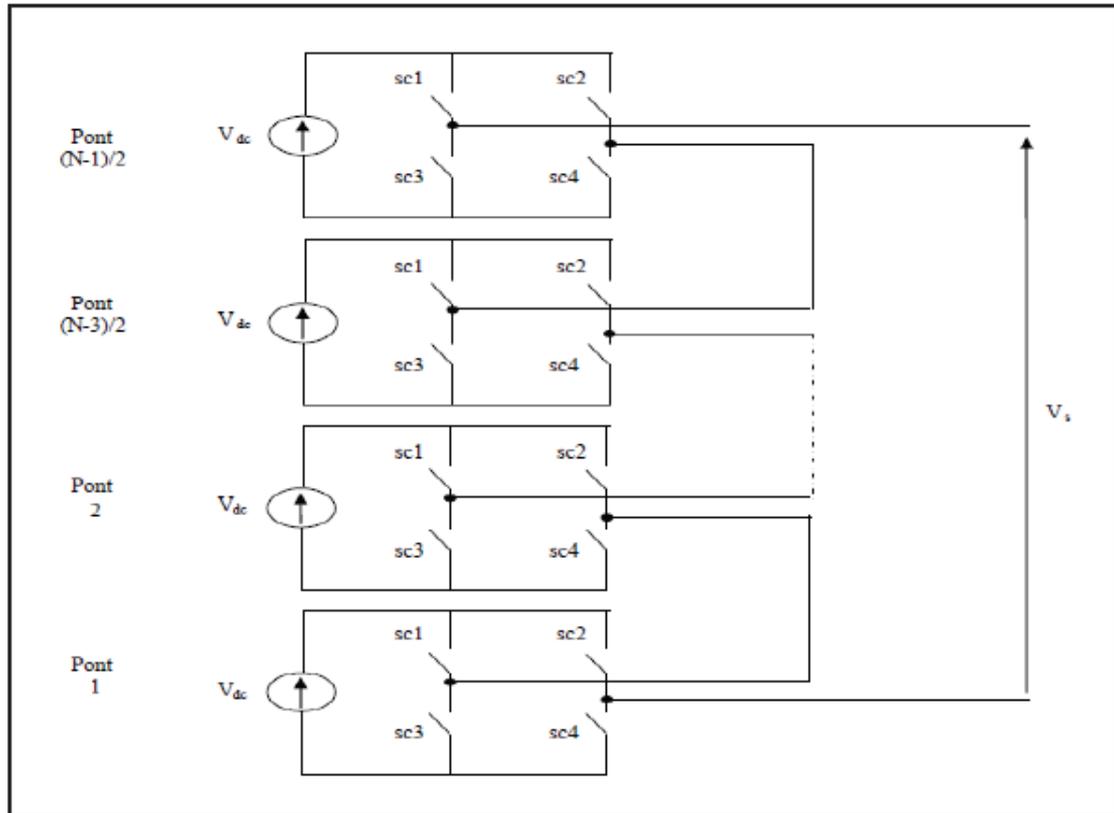


Figure 1.7 : structure d'un convertisseur N niveaux en cascade

1.3. Stratégies de commande des onduleurs :

Les onduleurs de tension peuvent être pilotés suivants plusieurs stratégies. A faible fréquence, ils sont pilotés en pleine onde, le signal de commande sera a la fréquence de la tension désiré à la sortie, et la source continu doit être réglable .A fréquence élevée, ils sont pilotés en modulation de largeur d'impulsion .Cette dernière stratégie permet de régler à la fois l'amplitude et la fréquence en gardent la source continu constante

A fine de produire de tension de sortie proche de la sinusoïde, différentes stratégies de commande ont été proposées par des différents auteurs pour l'ondeur de tension. Nous étudians les stratégies suivantes :

- Commande en pleine onde.
- Commande sinus triangle.
- Commande par hystérésis.
- Commande à MLI programmée.

1.3.1. Commande en pleine onde

Pour illustrer le fonctionnement de l'onduleur, il est intéressant d'étudier le comportement en pleine onde (180°). Ce fonctionnement nous permet de mieux comprendre les autres stratégies de commandes. Cette commande est appelée aussi la commande à six étapes.

Dans ce type de commande chaque transistor conduit pendant (180°).

Il existe six modes de fonctionnement dans chaque cycle, et chaque mode duré (60°) les transistors sont numérotés de la manière dans laquelle ils reçoivent les séquences de déphase l'un de l'autre de (60°) [5].

1.3.2. Modulation de Largeur d'Impulsion Sinus-Triangle

La modulation de largeur d'impulsion est réalisée par la comparaison d'une onde modulée basse fréquence (tension de référence) avec une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire (Figure 1.8). Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersections entre la porteuse et la modulante, la fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse [5].

En triphasé, trois références sinusoïdales déphasés de $2\pi/3$ à la même fréquence f .

Comme à la sortie de l'onduleur, la tension n'est pas purement sinusoïdale, donc elle comporte des harmoniques, seules responsables des parasites ce qui engendre des pertes supplémentaires. Cette MLI sert à remédier ces problèmes et elle a les avantages suivantes :

- Variation de la fréquence de la tension de sortie.
- Elimination de certaines harmoniques de tension.

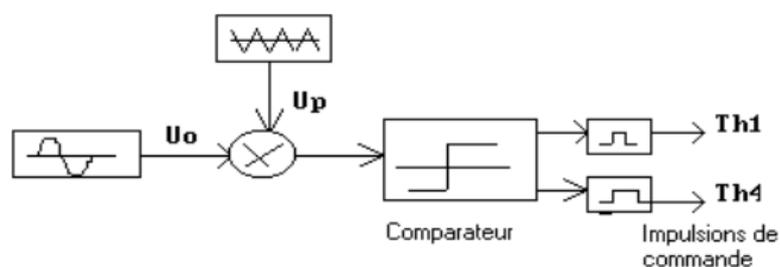


Figure 1.8 : Schéma synoptique de la loi de modulation triangulo-sinusoidale

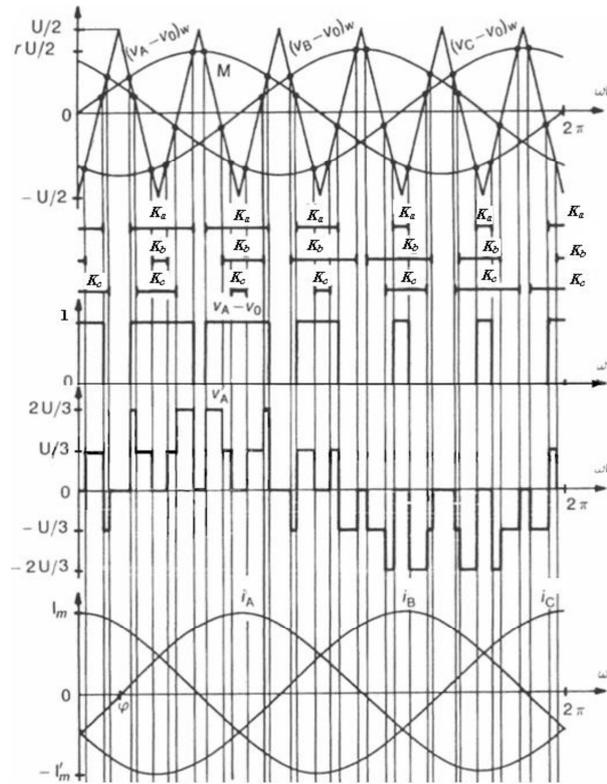


Figure 1.9 : La création des signaux des impulsions et des tensions

1.3.3. Commande par hystérésis :

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existante entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur, cette erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis.

L'approche la plus simple utilisée pour cette fin, est la stratégie de contrôle qui réalise la comparaison entre le courant de phase mesuré et le courant de référence (Figure 1.9), à l'aide d'un comparateur à hystérésis. Celui-ci, produit des impulsions d'amorçage et de blocage des interrupteurs de l'onduleur, de façon à limiter le courant de phase dans une bande d'hystérésis autour du courant de référence (Figure 1.10).

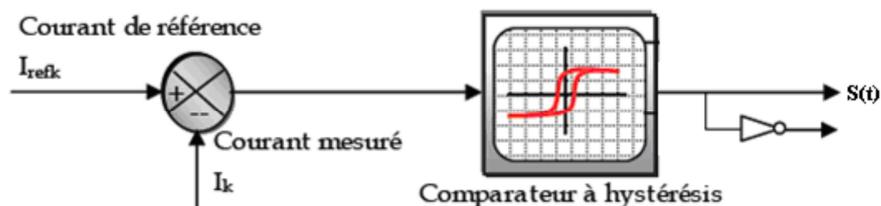


Figure 1.10 : Schéma de principe du contrôle par hystérésis d'un bras de l'onduleur.

Modulation Par MLI programmée :

Cette technique consiste à calculer les instants de commutation des interrupteurs de manière à répondre à certains critères portant sur le spectre fréquentiel de l'onde délivrée par l'onduleur. Ces séquences de fonctionnement sont alors mémorisées et restituées cycliquement pour assurer la commande des interrupteurs. Les critères usuellement retenus sont : l'élimination d'harmoniques de rangs spécifiés ou l'élimination des harmoniques dans une bande de fréquences spécifiée [6]

La technique MLI « programmée » est basée sur l'algorithme de Patel et Hoft. Dans cette technique, il est possible d'asservir le fondamental de la tension MLI et d'annuler les amplitudes des (m-1) premiers harmoniques.

La tension MLI « programmée » est définie en fonction des angles exacts de commutation $\alpha_1, \dots, \alpha_m$ qui correspondent aux instants de commutation de la tension MLI « programmée » d'une valeur positive $+E/2$ à une valeur négative $-E/2$ ou inversement.

Un circuit numérique génère alors la tension MLI « programmée » en fonction du temps. En conclusion, on peut dire que la technique MLI « programmée » présente de nombreux avantages :

- Asservissement de la tension V du fondamental
- Variation de la fréquence f du fondamental en utilisant la relation de conversion d'une valeur angulaire en valeur temporelle : $\alpha = 2\pi ft$
- Elimination des (m-1) premiers harmoniques

Ces avantages permettent de remplacer l'alimentation sinusoïdale idéale avec une alimentation pratique ayant un taux d'harmoniques que l'on peut réduire à volonté [7].

II. Partie de Simulation

2.1. Introduction :

Dans cette partie nous allons voir les signaux de sorties des différents types et topologies des onduleurs. Pour cela nous avons utilisé le simulateur PSIM. Les signaux seront accompagnés de leurs analyses fréquentielle pour visualiser les harmoniques qui existe dans chaque structure d'onduleur.

2.2.1. L'onduleur triphasé à deux niveaux commandé par un sinus triangle :

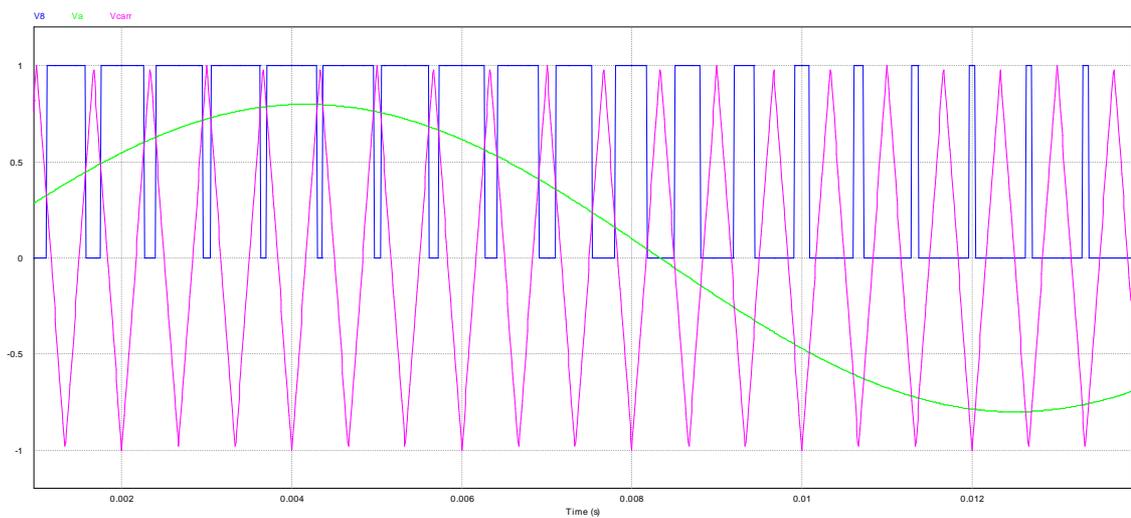


Figure 2.1 : Signal de commande

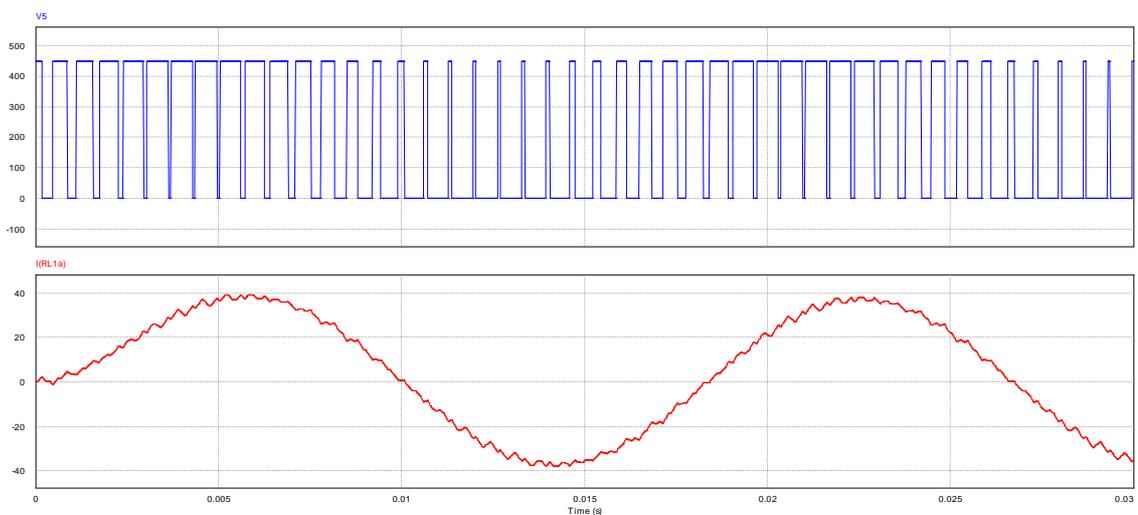


Figure 2.2 : La tension de sortie et la forme d'one de courant d'une phase

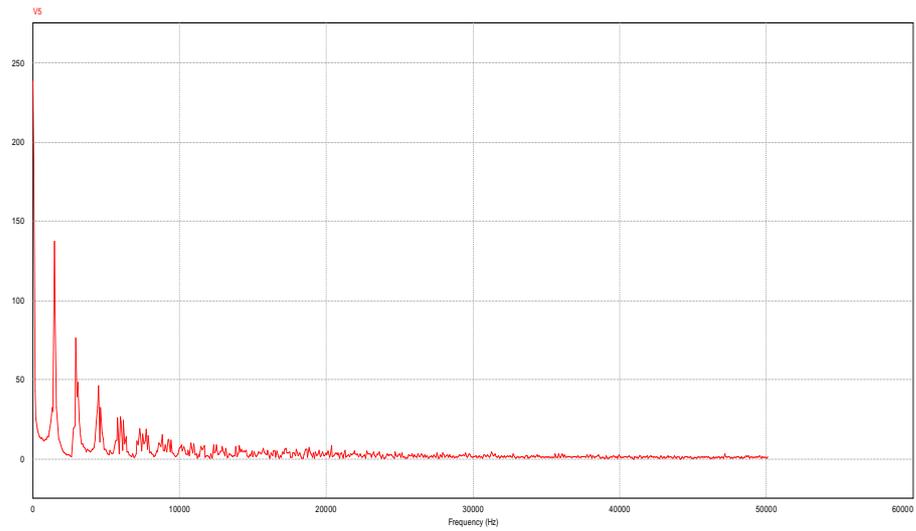


Figure 2.3 Spectre de la tension de sortie d'une phase

D'après la figure 2.3 on voit que le spectre de la tension de sortie d'une phase est plein d'harmonique.

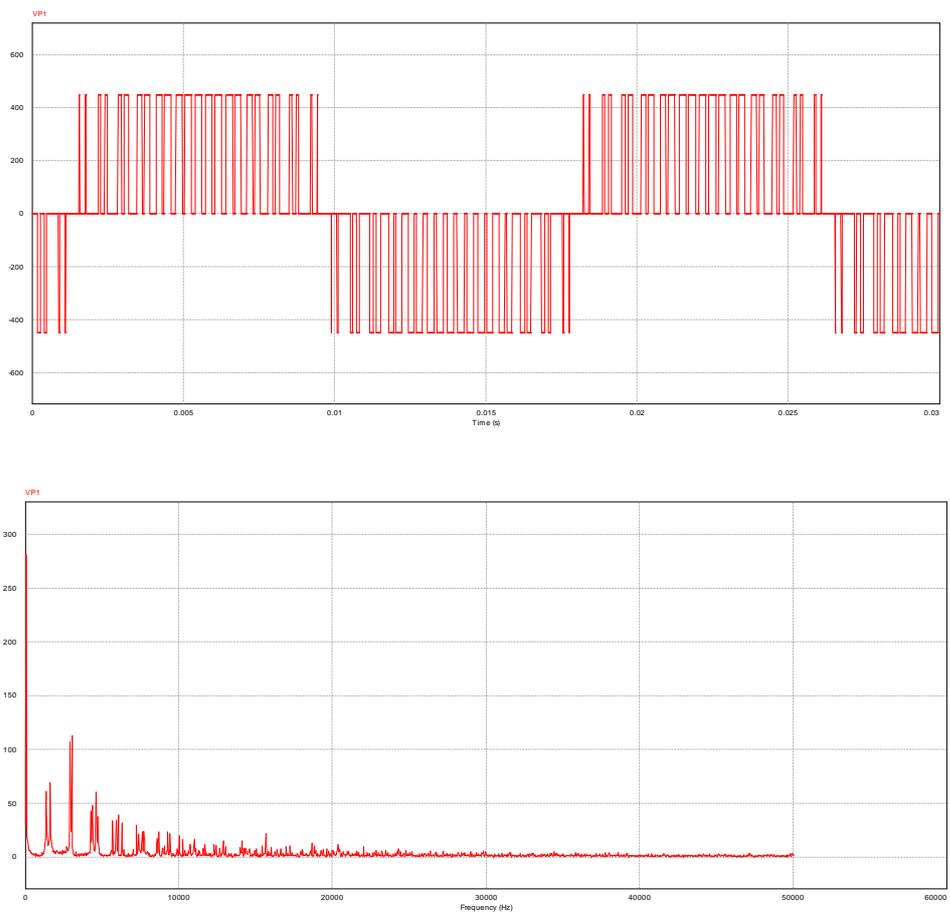


Figure 2.4 Une tension entre deux phases en son spectre.

On voit que certains harmoniques ont été éliminés à cause de la combinaison de deux phases (Les harmoniques d'ordre multiple de trois). Mais le spectre reste malgré sa plein des harmonique non désirables.

2.2.2. Un onduleur triphasé à trois niveaux commandé par un sinus triangle :

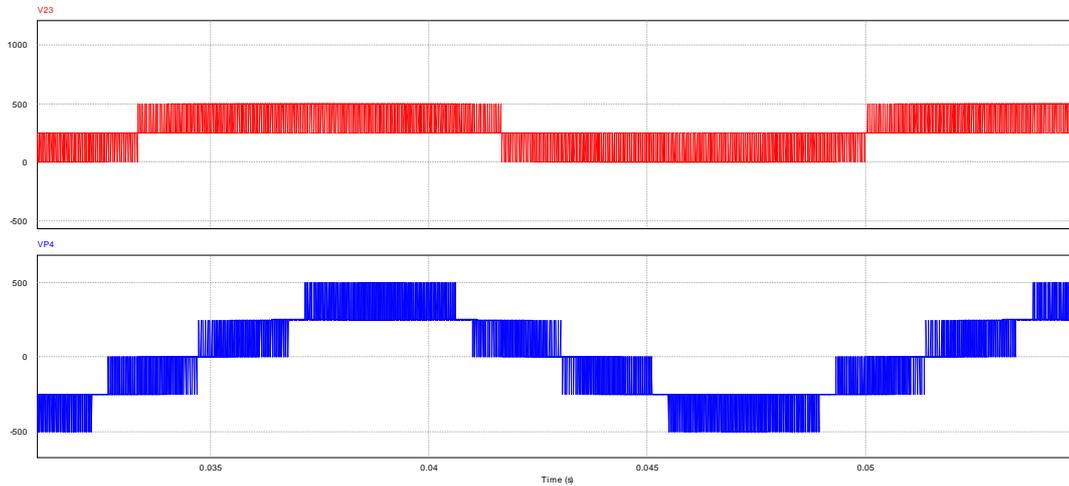


Figure 2.5 : La tension d'une phase et entre deux phases

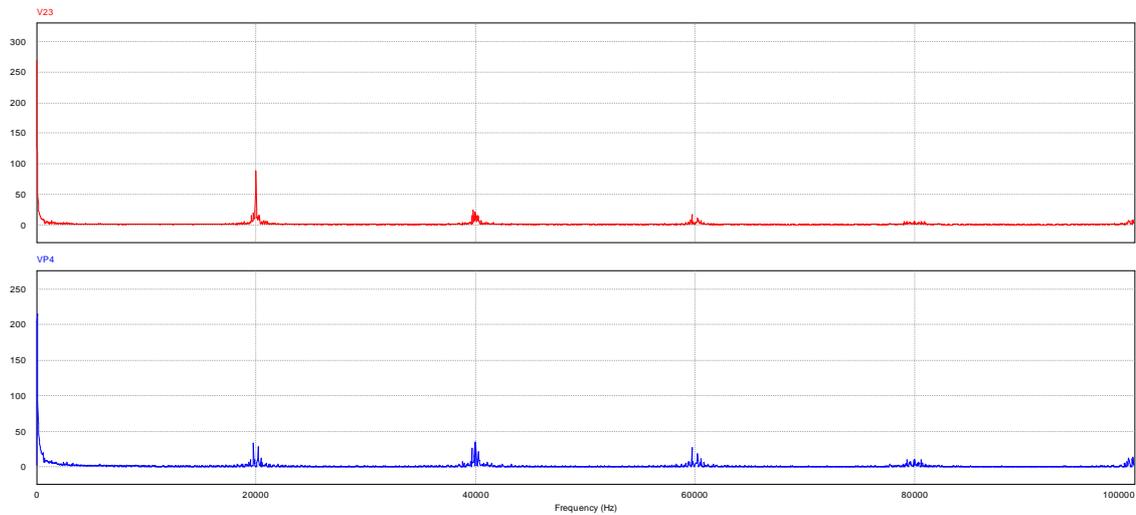


Figure 2.6 : spectre de la tension d'une phase en rouge et de la tension entre deux phases en bleu.

On voit que les harmoniques sont clairement éliminées par rapport à l'onduleur de deux niveaux commandé par la même commande.

2.2.3. Un onduleur triphasé à deux niveaux commandé par une MLI programmée :

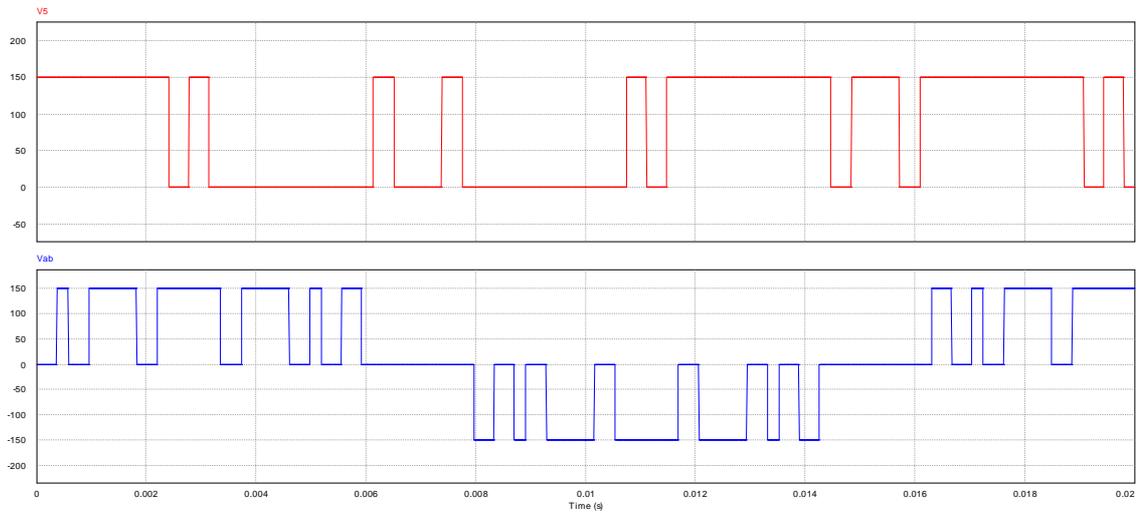


Figure 2.6 : La tension d'une phase en rouge et entre deux phases en bleu

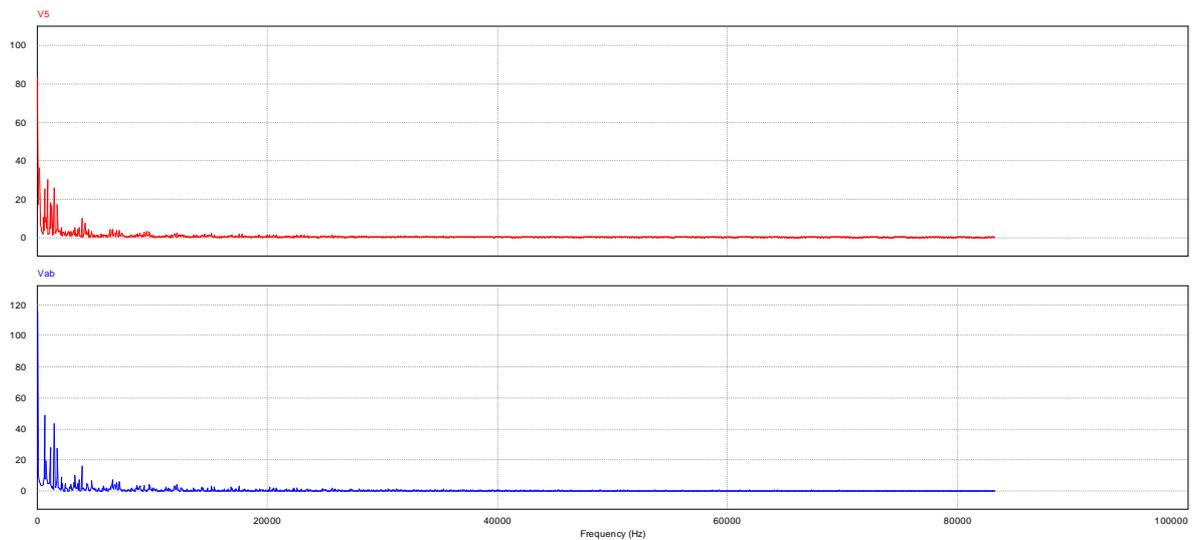


Figure 2.8 : Spectre de la tension d'une phase en rouge et de la tension entre deux phases en bleu

Par rapport au même type d'onduleur commandé par un sinus triangle, l'onduleur commandé par une MLI programéme est bien meilleur vu que l'élimination des harmoniques est plus efficace dans ce type de commande.

2.2.4. Un onduleur de courant triphasé à deux niveaux commandé par une sinus triangle :

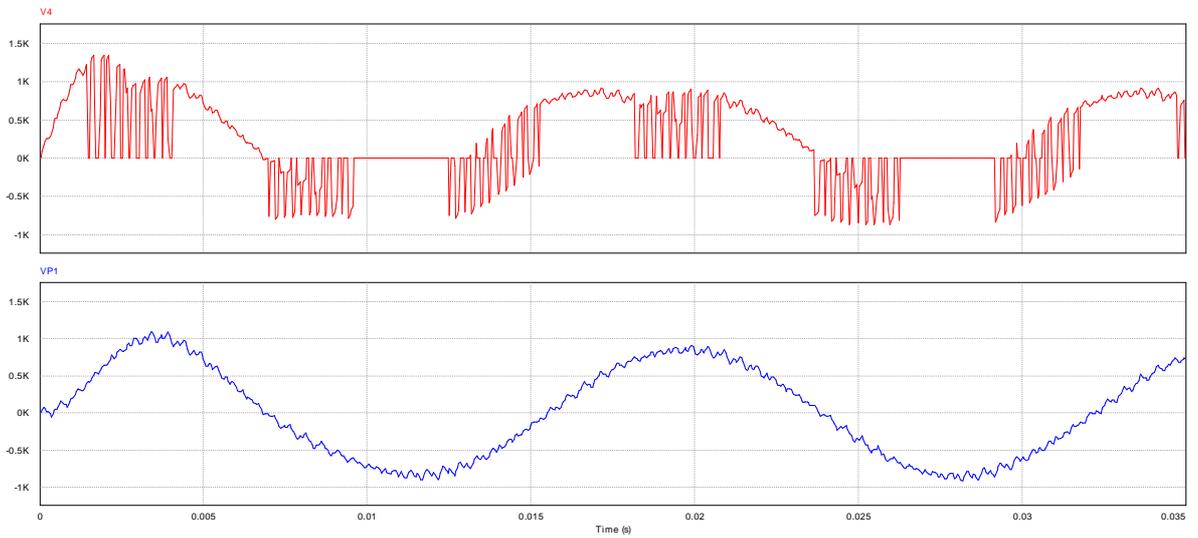


Figure 2.9 : La tension d'une phase en rouge et entre phase en bleu

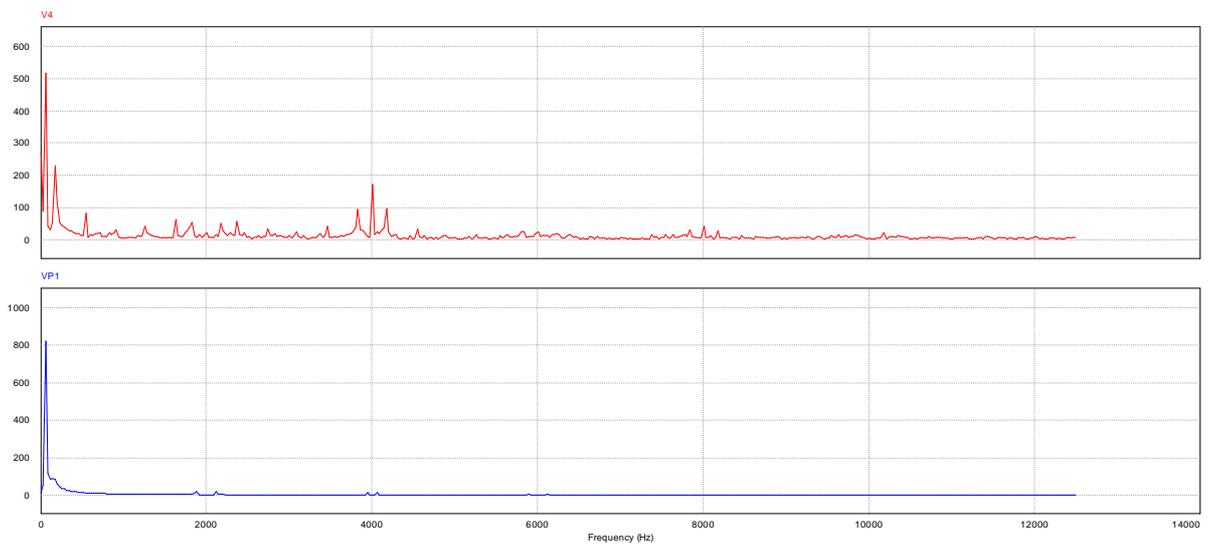


Figure 2.10 : le spectre tension d'une phase en rouge et entre phase en bleu

2.2.5. Un onduleur de tension triphasé à deux niveaux commandé par MLI sinusoidale :

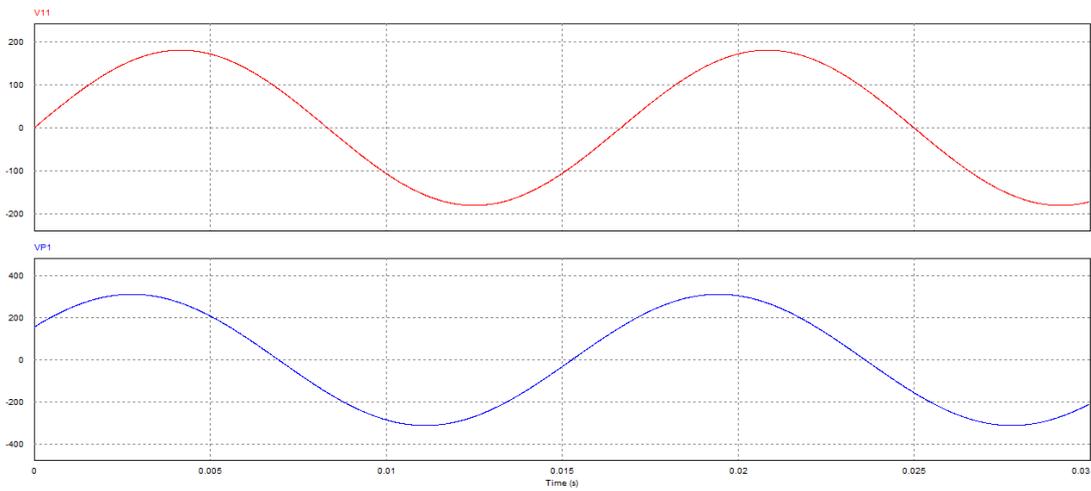


Figure 2.11 : La tension d'une phase en rouge et entre phase en bleu.

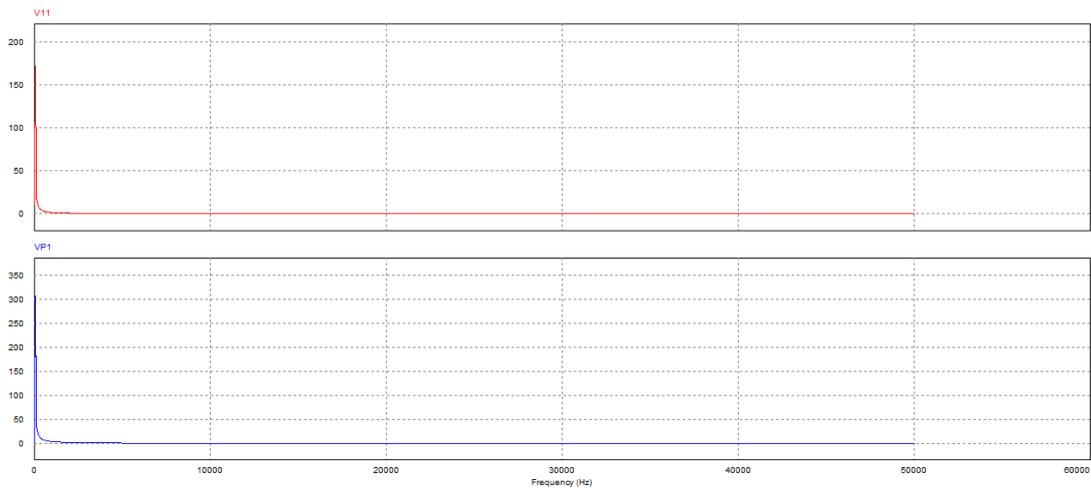


Figure 2.12: le spectre tension d'une phase en rouge et entre phase en bleu

La figure 2.12 montre bien l'élimination totale des harmonique proche du fondamentale. Ceci est due à l'absence des bases fréquences au niveau des signale de commande.

2.2.6. Un onduleur de tension triphasé à deux niveaux commandé par MLI sinus triangle (moyenne) :

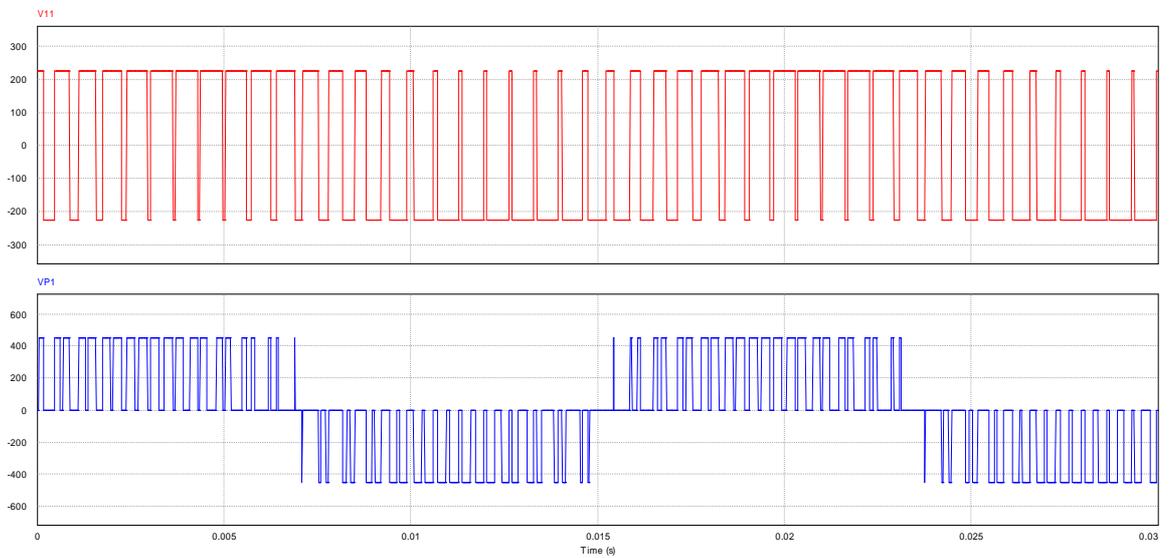


Figure 2.13 : La tension d'une phase en rouge et entre phase en bleu

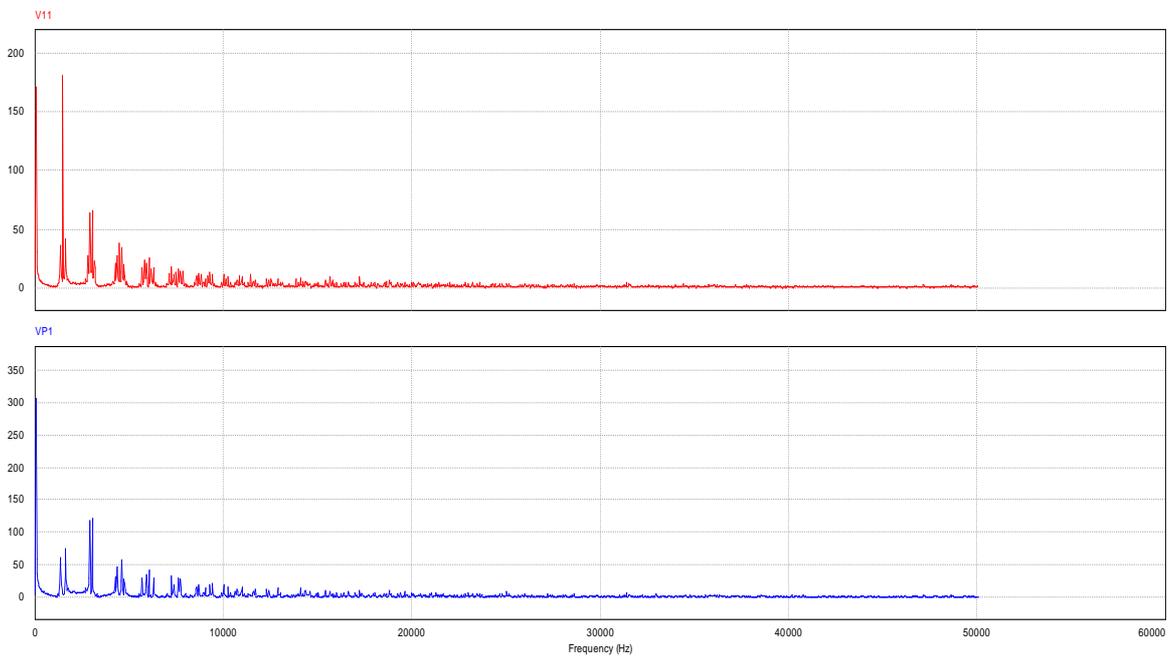


Figure 2.14: le spectre tension d'une phase en rouge et entre phase en bleu

Conclusion :

Nous avons vu les différents résultats de simulation obtenue pour différent type d'onduleurs. Les onduleurs à plusieurs niveaux sont plus efficaces par rapport aux onduleurs à deux niveaux. Ceci est remarquable lors de l'analyse spectrale des tensions de sorties des deux type, l'onduleur à deux niveau produit des harmonique de rang faible et proche du fondamentale, alors que si le niveau augment, ces harmonique sont affaiblies.

La stratégie de commande sinus triangle est la plus simple à réaliser. Par contre, la tension produit par l'onduleur est très riche en harmonique de d'ordre proche du fondamentale. Le filtrage sera donc difficile.

La stratégie de commande MLI calculée (programmée) est la plus adaptée aux onduleurs de tension. Elle permet d'éliminer les harmonique de rang faible proche du fondamentale. Les harmoniques de rang supérieurs sont alors filtrées facilement.

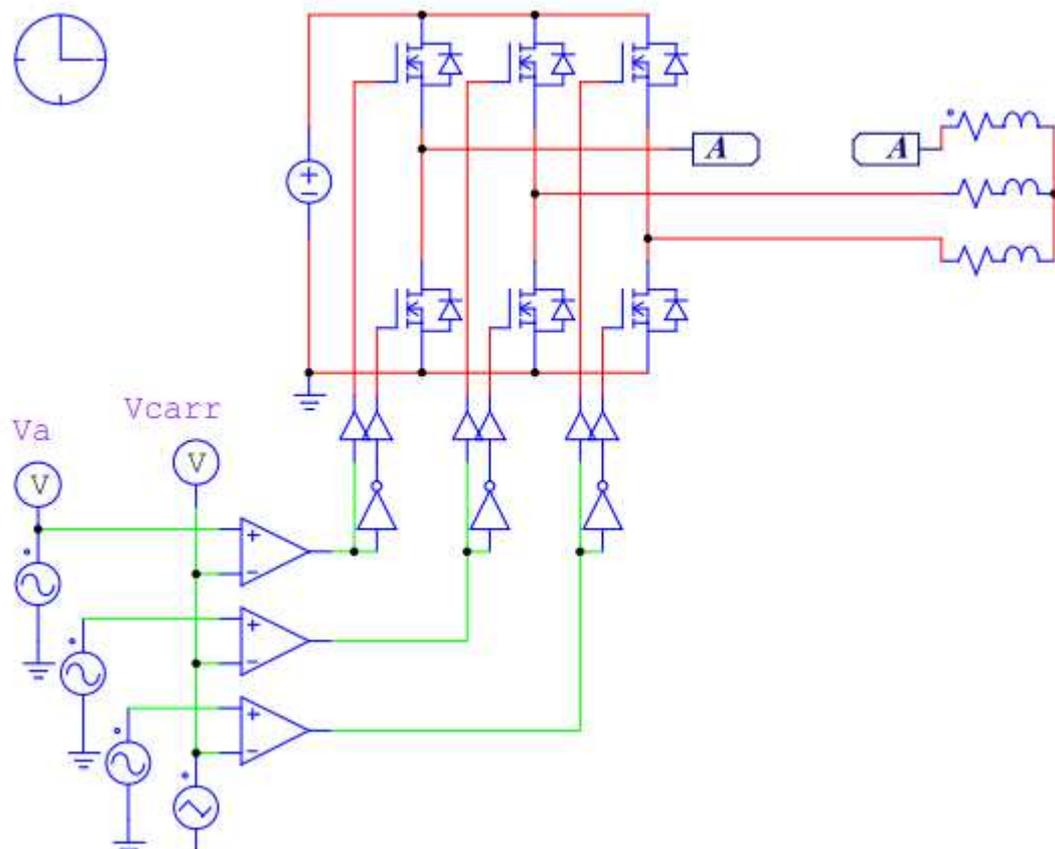
Bibliographie :

- [1] Y. DIAF D. BEN ANTER MODELISATION ET COMMANDE D'UN ONDULEUR TRIPHASE PILOTE PAR MLI A STRUCTRE MULTINIVEAUX Mémoire de Master en Génie électrique Université Kasdi Merbah–Ouargla 2012
- [2] E.Acha, V.G.Agelidis,O.Anaya-Lara,"Power Electronics Control in Electrical Systems" Newnes 2002.
- [3] J.R. Espinoza,"Inveters" In: M.H.Rashid,"Power Electronic Handbook", Academic Press, USA 2001.
- [4] B.KHALIFA ; Réalisation d'un banc d'essai pour la Commande et l'Observation des Convertisseur Multicellulaires Série : Approche Hybride. Grade de docteur Université de cergy-pontoise 2009
- [5] cours master 2 Chap1. Electronique de puissance avancée. Université Hamma Lakhder. Eloued
- [6] R.KABOUCHE,"Etude et élaboration d'une technique MLI à élimination d'harmoniques optimale", Mémoire de Magister en Electronique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2002.
- [7] A.GUELLAL Implémentation sur FPGA d'une commande MLI on-line basée sur le principe des réseaux de neurones, Mémoire de Magister en Electronique. ENP 2009

Annexe :

Schémas de simulation des onduleurs :

L'onduleur triphasé à deux niveaux commandé par un sinus triangle :



Un onduleur triphasé à trois niveaux commandé par un sinus triangle :

