

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE
N° :ISE-234



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES
FILIERE : GENIE ELECTRIQUE
OPTION : INGENIERIE DES SYSTEME
ELECTOMECANIQUES

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

Par: ELFERD Hamza & ZEGAAR Mourad

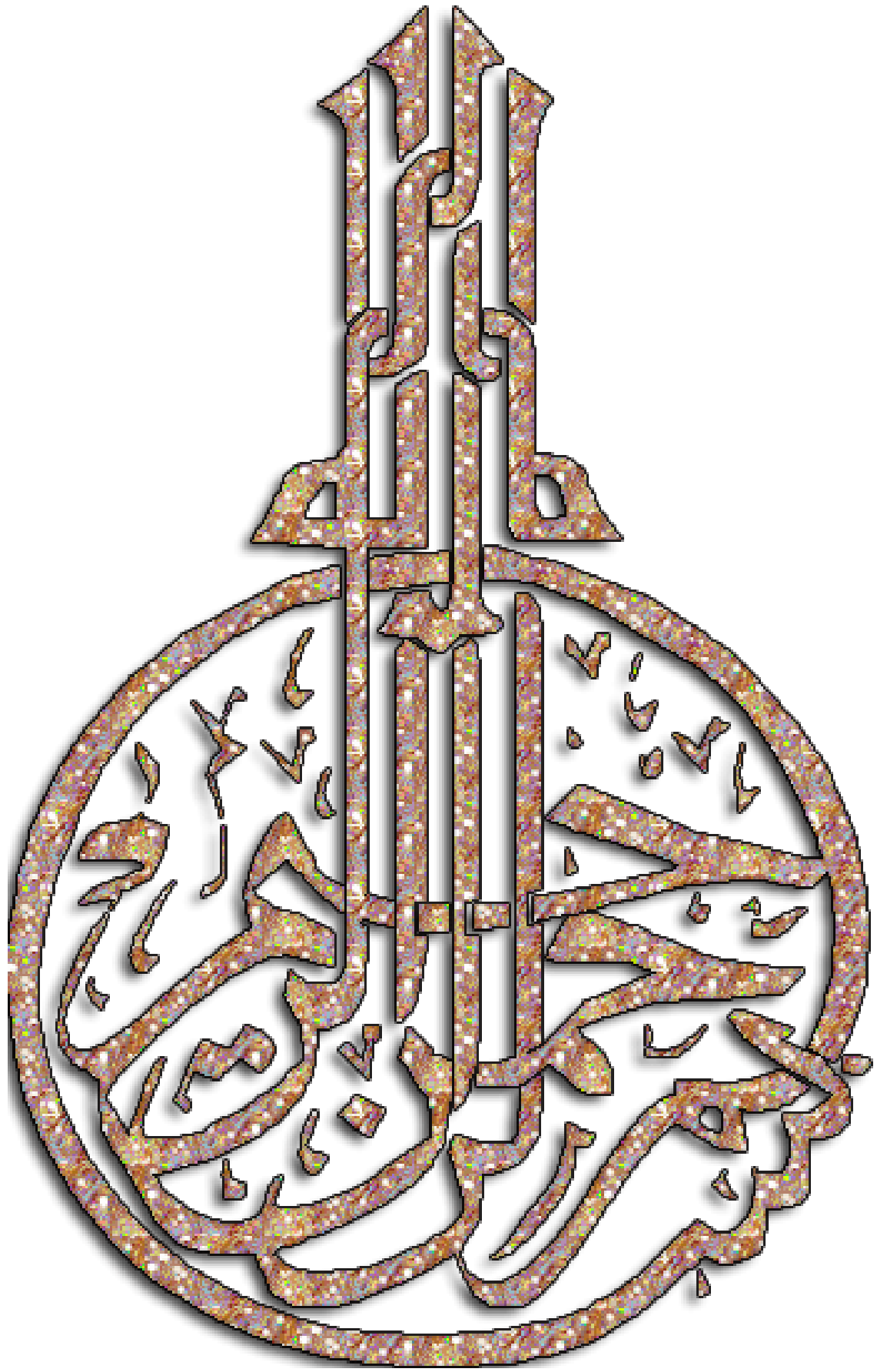
Intitulé

**Fonctionnement en mode dégrade d'un onduleur
multi niveaux application au filtre actif parallèle**

Soutenu devant le jury composé de:

BAHIDDINE Miloud	Université de M'sila	Président
BENYETTOU Loutfi	Université de M'sila	Rapporteur
DJERIOUI Ali	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2016 /2017



Remerciements

Je remercie Allah, le tout puissant, le miséricordieux, de m'avoir appris ce que j'ignorais, de m'avoir donné la santé et tout dont je necessitais pour l'accomplissement de cette mémoire .

Je tiens d'abord à exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance à Monsieur Benyettou Loufti , pour m'avoir encadré et soutenu durant la réalisation de ce travail. Je le remercie aussi pour son aide précieuse, les conseils et les connaissances dont il a su me faire profiter. Il m'est difficile d'exprimer en quelques mots toute l'admiration que je lui porte.

Aussi, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Khalil youcefa pour son aide, ses conseils précieux et ses encouragements incessants durant la préparation de ce travail.

Un gros merci à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation sans exception.

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Enfin, je remercie toute ma famille, mes amis et aussi mes camarades .

Dédicaces

Je dédie mon travail à :

À ma chère mère, en lui exprimant mon amour, mon respect et vive gratitude pour sa patience, pour ses sacrifices tout les longs des années, qu' Allah la protège.

Ma famille, mes frères et soeurs

Mes chères amis et collègues

A la mémoire de mon père, qui a quitté la vie et laissant ses souvenir

Je Demande à Dieu d'avoir pitié et de pardonner mon cher père qui attendait ce moment pour partager ma joie .

Elferd .H

Je dédie ce modeste travail

A mes chères parents que j'aime beaucoup, dont l'aide, le soutien et les encouragements permanents m'ont permis de poursuivre mes études dans Les meilleures conditions.

A mes frères et mes soeurs.

A tous ceux qui me connaissent de près ou de loin.

Zegaar.M

Table des matières

Remerciment

Dédicaces

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste de nomenclature

Introduction générale

Chapitre I: Introduction aux convertisseurs multiniveaux

I.1 Introduction.....	13
I.2 Définition des onduleurs :	13
I.3 Les différents types d'onduleur	14
I.3.1 Onduleur autonome:	14
I.3.1.1 Onduleur de courant :	14
I.3.1.2 Onduleur de tension :.....	14
I.3.2 Onduleur non autonome:	14
I.4 Principe de l'onduleur multi niveaux.....	15
I.5 Les différentes topologies des onduleurs multi niveaux.....	15
I.5.1 Onduleur de tension à diodes de bouclage	15
I.5.1.1 Principes de base	16
I.5.1.2 Avantages et inconvénients	20
I.5.2 Onduleur de tension à condensateurs flottants :.....	20
I.5.2.1 Principes de base :	20
I.5.2.2 Avantages et inconvénients	22
I.5.3 Onduleurs multi niveaux en cascade	22
I.5.3.1 Principes de base	22
I.5.3.2 Avantages et inconvénients	24
I.5.4 Autres topologies.....	25
I.5.4.1 Convertisseur multiniveaux en cascades	25
I.5.4.2 Le convertisseur à commutation douce :	25
I.5.4.3 Convertisseurs multi niveaux généralisés.....	25
I.6 Applications des convertisseurs multi-niveaux	26
I.6.1 Application dans le domaine de l'alimentation des machines électriques	26
I.6.1.1 Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone :	26
I.6.1.2Alimentation de secours	27

Table des matières

I.6.2 Application dans le domaine des réseaux électriques :	27
I.6.2.1 Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes :	27
I.7. Conclusion	27

Chapitre II. Filtre actif parallèle

II.1 Introduction :	29
II.2 Les filtres passifs :	29
II.2.1 Classification des filtres passifs:	29
II.2.1.1 Filtre passif série :	29
II.2.1.2 Filtre passif parallèle :	30
II.2.1.3 Filtre passif amorti :	30
II.2.1.4 Filtre résonant :	31
II.2.2 Les avantages et les inconvénients des filtres passifs:	31
II.3 Les filtres actifs:	31
II.3.1 Avantages et inconvénients des filtres actifs :	32
II.4 Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèles	33
II.4.1. Introduction :	33
II.4.2. Principe du filtre actif parallèle :	34
II.4.3 Structure général du filtre active parallèle :	35
II.4.4. Etude de partie puissance :	36
II.4.4.1 Onduleur :	36
II.4.4.2 Filtre de sortie :	37
II.4.4.3 Système de stockage de l'énergie :	37
II.4.5 Etude de partie commande :	38
II.4.5.1. Commande de l'onduleur :	38
II.4.5.2 Commande par hystérésis :	38
II.4.5.3 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) :	39
II.5 Conclusion	41

Chapitre III. Etude du filtre actif parallèle à cinq niveaux en mode de fonctionnement sain

III.1. Introduction :	43
III.2. Intérêt des onduleurs multi-niveaux :	43
III.3. Structure de FAP à base d'un onduleur de tension à cinq niveaux de type ponts en cascade :	43
III.3.1. Onduleur de tension à cinq niveaux de type ponts en cascade :	44
III.3.1.1. Structure générale :	44
III.3.1.2. Principe de fonctionnement :	45
III.3.1.3. Modélisation en tension de l'onduleur en ponts en cascade à 5 niveaux :	47
a. Modèle équivalent du pont 1 (pont supérieur de la phase 1):	47

Table des matières

b. Modèle équivalent du pont 2 (pont inférieur de la phase 1).....	48
III.3.2. Contrôle par MLI à échantillonnage naturel du FAP à base l'onduleur de tension en ponts en cascade à 5 niveaux.....	48
III.3.3. Résultats de simulation en mode sain du FAP à base d'onduleur de tension en ponts en cascade à 5 niveaux :.....	49
III.6. Conclusion :.....	63
 Chapitre IV. Etude du filtre actif parallèle à cinq niveaux en mode de fonctionnement dégradé	
IV.1. Introduction :.....	65
IV.2. Analyse du comportement d'onduleur à 5 niveaux en mode dégradé :.....	65
IV.3. Résultats de simulation :	
IV.3.1 Résultats de simulation pour transistor du haut du bras 1 du pont 11 de la phase 1 maintenu ouvert (T11 maintenu ouvert).....	66
IV.3.2. Résultats de simulation pour transistor du haut du bras 2 du pont 11 de la phase 1 maintenu ouvert (T13 maintenu ouvert)	74
IV.3.3. Résultats de simulation pour transistor du bas du bras 1 du pont 11 de la phase 1 maintenu ouvert (T14 maintenu ouvert) :.....	75
IV.3.4. Résultats de simulation pour transistor du haut du bras 1 du pont 12 de la phase 1 maintenu ouvert (T15 maintenu ouvert) :.....	76
IV.3.5. Résultats de simulation pour transistor du haut du bras 1 du pont 21 de la phase 2 maintenu ouvert (T21 maintenu ouvert) :	77
IV.4. Analyse des résultats de simulation en mode dégradé du FAP à base d'onduleur de tension en ponts en cascade à 5 niveaux :.....	78
IV.5. Conclusion.....	82
Conclusion générale	83
Références bibliographiques.....	84

Liste des figures

Liste des figures

- Figure I.1 : Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC AC)
- Figure I.2 : Onduleur à niveaux multiples
- Figure I.3 : Onduleur NPC 3 Niveaux
- Figure I.4 : Circuit d'une phase d'un convertisseur NPC.
- Figure I.5 : Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC trois niveaux
- Figure I.6 : : les séquences de commande d'un bras de l'onduleur et les tensions de phases V_{a0} , V_{b0} et la tension entre phases V_{ab} le cas d'un onduleur monophasé
- Figure I.7 : Principe de commande MLI pour un onduleur NPC à trois niveaux.
- Figure I.8 : Résultats de simulation de la commande en MLI de l'onduleur NPC.
- Figure I.9 : Circuit d'une phase d'un convertisseur à condensateur flottant
- Figure I.10 : Résultats de simulation de la commande en MLI de l'onduleur à condensateurs
- Figure I.11 : Structure d'un bras d'onduleur multi-niveaux de type cascade
- Figure I.12 : Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur trois niveaux en Cascade
- Figure I.13 : Résultats de simulation de la commande en MLI de l'onduleur en cascade
- Figure I.14 : :Convertisseur à neuf niveaux par association en cascade de convertisseurs à condensateurs flottants.
- Figure I.15 : Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone
- Figure I.16 : Alimentation de secours
- Figure I.17 : Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes
- Figure II.1 : Filtre passif série
- Figure II.2 : Filtre passif parallèle
- Figure II.3 : Montage du filtre amorti
- Figure II.4 : Structure du filtre résonant
- Figure II.5 : Filtre actif parallèle
- Figure II.6 : Structure générale d'un filtre actif parallèle
- Figure II.7 : Onduleur de tension triphasé
- Figure II.10 : Principe de commande des courants par MLI
- Figure II.11 : Répartition des commutations sur un bras d'un onduleur
- Figure (III-1): Circuit de puissance du filtre actif parallèle à base d'onduleur de tension à cinq niveaux en ponts en cascade
- Figure (III-2): Schéma d'un onduleur triphasé de tension en ponts en cascade à 5 niveaux.
- Figure (III-3): Pont H 5 niveaux : Principe et exemples de mécanisme de commutation
- Figure (III-4): Principe de commande par MLI intersective à échantillonnage naturel du courant de la phase 1 du FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux en pont en cascade.
- Figure (III-5) : Tension triphasée du réseau électrique
- Figure (III-6) : Courant triphasé de la charge polluante
- Figure (III-7) : Analyse spectrale du courant de la phase 1 de la charge polluante
- Figure (III-8) : Evolution du taux de distorsion harmonique (THD) du courant de la phase 1 de la charge polluante
- Figure (III-9) : Courant harmonique triphasé identifié par la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées et courant triphasé injecté par le FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux de type ponts en cascade en mode de fonctionnement sain

Liste des figures

Figure (III-10) : Courant triphasé du réseau électrique après filtrage par un FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux en mode de fonctionnement sain .

Figure (III-11) : Analyse spectrale du courant de la phase 1 du réseau électrique après filtrage par un FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux en mode de fonctionnement sain.

Figure (III-12) : Evolution du taux de distorsion harmonique (THD) du courant de la phase 1 du réseau électrique après filtrage par un FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux en mode de fonctionnement sain

Figure (III-13) : Valeurs moyennes des courants de phase injectés par le FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux en mode de fonctionnement sain

Figure (III-14) : Tensions de référence et porteuse de la commande MLI du FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux en mode de fonctionnement sain

Figure (III-15) : Tensions de sortie des deux ponts de la phase 1 du FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux en mode de fonctionnement sain .

Figure (III-16) : Tensions de sortie des deux ponts de la phase 2 du FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux en mode de fonctionnement sain

Figure (III-17) : Tensions de sortie des deux ponts de la phase 3 du FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux en mode de fonctionnement sain

Figure (III-18) : Valeurs moyennes des tensions de sortie des 6 ponts du FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux en mode de fonctionnement sain .

Figure (III-19) : Tensions simples de sortie du FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux en mode de fonctionnement sain et leurs valeurs moyennes

Figure (IV-1) : Configuration d'onduleur à tension à 5 niveaux de type ponts en cascade en mode de fonctionnement sain et en mode dégradé (transistor T11 maintenu ouvert)

Figure (IV-2) : Courants harmoniques identifiés par la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées et courants injectés par le FAP à base d'onduleur de tension à 5niveaux et leurs valeurs moyennes pour T11 maintenu ouvert

Figure (IV-3) : Courant triphasé du réseau électrique après filtrage par un FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux et THD du courant de la phase 1 pour T11 maintenu ouvert

Figure (IV-4) : Tensions de référence et porteuse de la commande MLI du FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux pour T11 maintenu ouvert

Figure (IV-5) : Tensions de sortie des ponts de la phase1 du FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux pour T11 maintenu ouvert

Figure (IV-6) : Tensions de sortie des ponts de la phase 2 du FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux pour T11 maintenu ouvert

Figure (IV-7) : Tensions de sortie des ponts de la phase 3 du FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux pour T11 maintenu ouvert

Figure (IV-8) : Valeurs moyennes des tensions de sortie des 6 ponts du FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux pour T11 maintenu ouvert

Figure (IV-9) : Tensions simples de sortie du FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux et leurs valeurs moyennes pour T11 maintenu ouvert

Figure (IV-10) : Valeur moyenne des tensions de sortie des 6 ponts du FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux pour T13 maintenu ouvert

Figure (IV-11) : Valeur moyenne des tensions de sortie des 6 ponts du FAP

Liste des figures

à base d'onduleur de tension à 5 niveaux pour T14 maintenu ouvert

Figure (IV-12) : Valeur moyenne des tensions de sortie des 6 ponts du FAP

à base d'onduleur de tension à 5 niveaux pour T15 maintenu ouvert

Figure (IV-13) : Valeur moyenne des tensions de sortie des 6 ponts du FAP

à base d'onduleur de tension à 5 niveaux pour T21 maintenu ouvert

Figure (IV-14) : Arbre de défaillance proposé pour la détection et la localisation des défauts de transistor maintenu ouvert d'un FAP non-autonome à base d'onduleur de tension à 5 niveaux de type ponts en cascade

Liste de Tableau :

Tableau I.1 : Etats possibles de l'onduleur NPC à trois niveaux.

Tableau I.2 : Etats possibles de l'onduleur à condensateurs flottants à trois niveaux.

Tableau I.3 : Etats possibles de l'onduleur cascade à trois niveaux.

Tableau (III-1): Etats possibles de l'onduleur ponts en cascade à 5 niveaux.

Tableau (III-2): Paramètres de simulation d'un filtre actif parallèle à base d'onduleur de tension en ponts en cascades à 5 niveaux .

Tableau (IV-1) : Caractéristiques des défauts de type transistor maintenu ouvert (composantes continues des tensions de sortie des 6 ponts du FAP) pour un FAP non-autonome à base d'onduleur de tension à 5 niveaux

Table de nomenclature

I_h : le courant harmonique

I_{ch} : courant de charge

I_s : courant de source

MLI : modulation de largeur d'impulsion

F.A.P : Filtre actif parallèle

V_{Sn} : tension au point de raccordement commun

V_{fn}, I_{fn}, L_f : tension, courant et inductance du filtre actif

V_{dc} : tension aux bornes du condensateur de l'onduleur

R_f : Résistance du filtre actif

FAS : Filtre actif série

UPQC : Unified Power Quality Conditionner

W_h : pulsation harmonique

PLL : (Enanglais: Phase locked loop).

IGBT : (Enanglais: Insolated gate bipolar transistor).

GTO: (Enanglais: Gate turn off thyristor)

$R1, R2$: Résistances des charges continues

L_s : Inductance de lissage à l'entrée de la charge non-linéaire

$L1, L2$: Inductances des charges continues

PI : Régulateur Proportionnel Intégral

INTRODUCTION GENERALE

Le diagnostic des convertisseurs statiques s'est fortement développé dans le monde industriel depuis plusieurs années afin d'élaborer des méthodes de diagnostic ayant pour objectif de prévenir les utilisateurs d'un risque possible pouvant apparaître en un point particulier du système car la volonté d'obtenir une chaîne de production de plus en plus sûre devient indispensable pour certaines applications.

Les défauts les plus fréquents sont le défaut d'interrupteur maintenu ouvert/fermé, coupure monophasé [11].

Il existe quatre groupes de méthodes de diagnostic :

- Les méthodes inductives où on cherche à identifier tous les événements ou toute combinaison d'événement qui pourraient entraîner une situation de fonctionnement indésirable ;
- Les méthodes de diagnostic déductives dont la démarche est inversée et qui consiste à rechercher les causes possibles d'une défaillance après avoir constaté l'événement indésirable ;
- Les méthodes externes sont basées sur l'expertise humaine et sur le retour d'expérience ;
- Les méthodes internes nécessitent une connaissance approfondie de modèles mathématiques.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous faisons une description des principales topologies des onduleurs de tension multi-niveaux. Pour chacune d'entre elles, la structure de base est rappelée, ainsi que son principe de fonctionnement.

Dans le deuxième chapitre, nous étudions théoriquement la topologie du filtre actif parallèle et sa stratégie de commande.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude du filtre actif parallèle à cinq niveaux de type ponts en cascade. En fait,

Dans le dernier chapitre, nous étudierons le fonctionnement en mode dégradé du filtre actif parallèle à cinq niveaux et développer une méthode de diagnostic.

Nous terminerons notre travail par une conclusion générale et des perspectives.

**Chapitre I:
Introduction aux convertisseurs multiniveaux**

I.1 Introduction

Grâce aux progrès technologiques réalisés ces dernières années dans le domaine de l'électronique de puissance, les convertisseurs statiques voient progressivement leur champ d'applications s'élargir. Certaines de ces nouvelles applications, telles que le filtrage actif et la dépollution de réseaux électriques, ou l'alimentation de machines à courant alternatif pour des applications particulières, sont très exigeantes en termes de performances dynamiques.

Les applications de l'électronique furent pendant longtemps limité à la technique des hautes fréquences. Les possibilités d'application étaient limitées par le manque de fiabilité des éléments électroniques alors disponibles. Cette fiabilité était insuffisante pour répondre aux hautes exigences requises par les nouvelles applications dans le domaine industriel. Ce ne fut qu'à la suite du développement des composants électroniques spéciaux de fiabilité plus élevée et de tolérance plus restreintes, que les nouvelles techniques peuvent être envisagées, ainsi naissse une nouvelle branche de l'électronique appelée l'électronique de puissance. A` la base de l'électronique de puissance se trouvent les éléments de puissances, qui peuvent être subdivisés en éléments redresseurs non contrôlables (diodes) et éléments redresseurs contrôlables (thyristors, triacs, transistors ...).

Les éléments de puissance, associés à des dispositifs auxiliaires appropriés (commande de gâchettes, radiateurs de dissipation, circuit RC de protection), composent des modules standard permettant la conversion de puissance, tel que les redresseurs, les onduleurs, les cycloconvertisseur ... etc.

I.2 Définition des onduleurs :

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC). En fait, cette conversion d'énergie est satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (semi-conducteurs). Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande. Figure 1 représente schéma de principe de l'onduleur [1].

Cette tension peut comporter un ou plusieurs créneaux par alternance suivant qu'il s'agit d'une commande à un créneau par alternance ou d'une commande par Modulation de Largeur d'Impulsions (Pulse Width Modulation).

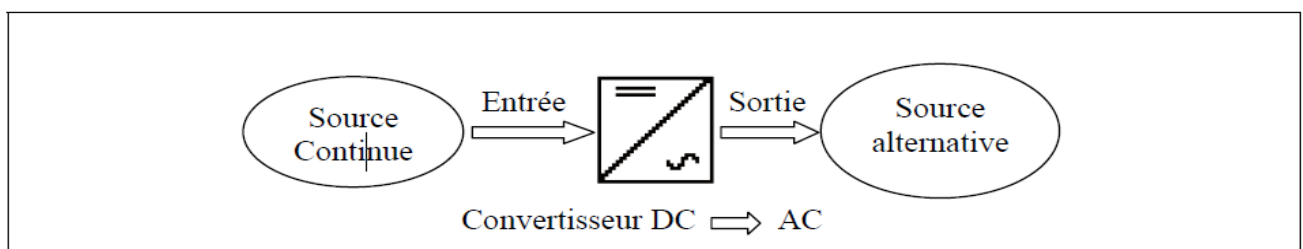


Figure I.1 : Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC)

I.3 Les différents types d'onduleur

Les onduleurs sont classés en deux grandes catégories :

I.3.1 Onduleur autonome:

Un onduleur est dit autonome s'il utilise l'énergie d'un circuit auxiliaire propre à lui pour la commutation des thyristors ou l'autre semi conducteurs dans ce cas nous commandons la fréquence la forme d'onde de la tension de sortie. On distingue deux types d'onduleurs autonomes [2] :

- Les onduleurs de tension alimentée par une source de tension continue.
- Les onduleurs de courant alimentés par une source de courant continue.

I.3.1.1 Onduleur de courant :

L'onduleur de courant transforme un courant continu en courants triphasés dans les enroulements de la machine. Il peut fonctionner en commutation naturelle, c'est le cas des machines synchrones. La commutation forcée est réalisée pour toutes les autres machines. Ce type d'onduleur ne permet que le réglage de la fréquence des grandeurs de sortie, l'amplitude de celle-ci doit être réalisée par ajustement de la grandeur d'entrée.

I.3.1.2 Onduleur de tension :

Les onduleurs de tension constituent une fonction incontournable de l'électronique de puissance. Les deux grands domaines d'application classiques des onduleurs de tension sont les alimentations de secours et les entraînements à vitesse variable , la forte évolution des onduleurs de tension s'est appuyée, d'une part, sur le développement des composants semi-conducteurs contrôlables, puissants, robustes, et rapides, et d'autre part, sur l'utilisation quasi généralisée des techniques dites de modulation de largeur d'impulsion.

I.3.2 Onduleur non autonome:

C'est le nom donné au montage redresseur tous les thyristors (pont de Graëtz) qui, en commutation naturelle assistée par le réseau auquel il est raccordé, permet un fonctionnement en onduleur (par exemple par récupération de l'énergie lors des périodes de freinage dans les entraînements à moteurs électriques). À la base du développement des entraînements statiques à vitesse variable pour moteurs à courant continu et alternatif, cycloconvertisseurs, onduleurs de courant pour machines synchrones et asynchrones, jusqu'à des puissances de plusieurs MW, ce type de montage est progressivement supplanté, au profit de convertisseurs à IGBT ou GTO[2].

I.4 Principe de l'onduleur multi niveaux :

Ce paragraphe a pour but d'introduire le principe général du comportement multiniveaux. La figure (I.2) l'aide à comprendre comment travaillent les convertisseurs multiniveaux. Un convertisseur à deux niveaux est représenté à la figure (I.2.a), 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 E. Sur la figure (I.2.b), la tension de sortie de trois niveaux peut prendre trois valeurs: 0, E ou 2E[1]. Dans la figure (I.2.c) le cas général de n niveaux est présenté.

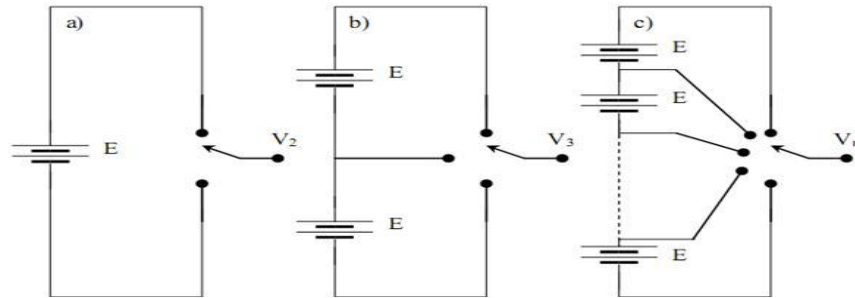


Figure I.2 : Onduleur à niveaux multiples
a) à deux niveaux.
b) à trois niveaux.
c) à N niveaux.

L'augmentation de nombre de niveau permet d'améliorer les formes d'ondes en sortie de convertisseur, notamment en termes de contenu harmonique, mais cela nécessite une commande beaucoup plus complexe et un nombre important des semi-conducteurs utilisés. Cela rend le système global plus coûteux et surtout plus complexe.

I.5 Les différentes topologies des onduleurs multi niveaux :

Cette section est consacrée à la présentation du fonctionnement des principales structures des onduleurs multi niveaux : l'onduleur en cascade, l'onduleur à diode de bouclage, l'onduleur à capacités flottantes. La figure I.3 représente les topologies des onduleurs multi niveaux les plus récentes[1][3]

I.5.1 Onduleur de tension à diodes de bouclage :

La première topologie, de l'onduleur de tension multi niveaux est la structure NPC (Neutral-Point-Clamped). Elle a été proposée, la première fois en 1981, par Nabae et al. En ce moment, c'est la topologie la plus utilisée dans l'industrie[4].

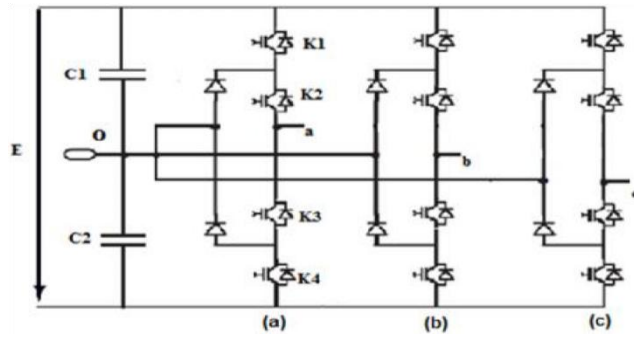


Figure I.3 Onduleur NPC 3 Niveaux

I.5.1.1 Principes de base

Pour des raisons de simplicité, nous limiterons l'étude à un bras d'onduleur NPC de trois niveaux, l'objectif visé est de déterminer les valeurs que peut prendre la tension V_{ao} pour les différents états possibles des interrupteurs statiques, de montrer les séquences de conductions des interrupteurs.

Dans sa version la plus simple, chaque branche de cet onduleur comporte quatre : interrupteurs contrôlables et six diodes, et deux condensateurs branchés en parallèle avec la tension d'entrée V_{dc} comme représenté à la Figure I.4

Pour assurer les niveaux de tension. Les interrupteurs T_{11} , T'_{11} et T_{12} , T'_{12} présentes deux cellules de commutations ou les deux interrupteurs de chaque cellule sont complémentaires.

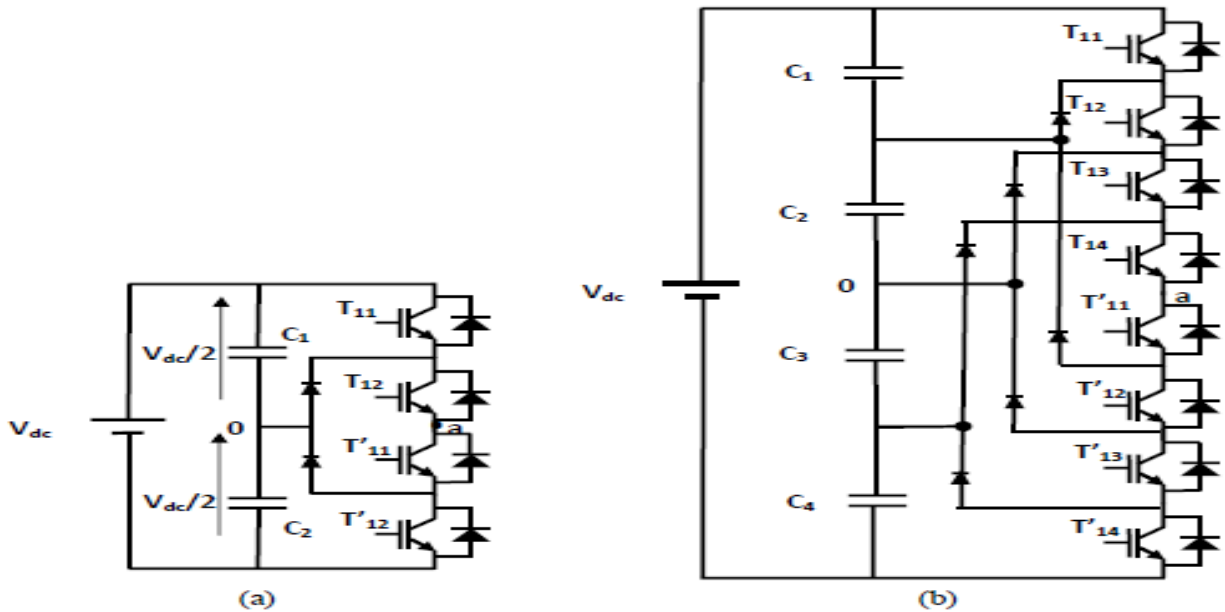


Figure I.4 : Circuit d'une phase d'un convertisseur NPC.

a) à trois niveaux.

b) à cinq niveaux.

Chapitre I: Introduction aux convertisseurs multiniveaux

Pour un convertisseur NPC à N-niveaux de tensions, nous avons N séquences de fonctionnement possible permettant de générer les N niveaux de tensions Et en particulier pour le NPC à trois niveaux on a trois séquences de fonctionnement:

-Séquences 1 : Génération du niveau maximum

Dans ce cas, les interrupteurs T11, T12 sont passants et T'11, T'12 sont bloqués comme le montre la figure (I.5.a). Et la tension de sortie V_{ao} est: $V_{ao} = +V_{dc}/2$.

La tension appliquée aux interrupteurs T'11, T'12 vaut: $+V_{dc}/2$.

-Séquences 2 : Génération du niveau intermédiaire

Les interrupteurs T12, T'11 sont passants et T11, T'12 sont bloqués, dans ce cas le point a est relié directement au point 0 à travers l'une des diodes de maintien, comme le montre la figure (I.5.b). Et la tension de sortie V_{ao} est donc nulle, $V_{ao} = 0$.

La tension appliquée aux interrupteurs T11, T'12 vaut: $-V_{dc}/2$.

-Séquences 3 : Génération du niveau minimum

Dans ce cas, les interrupteurs T11, T12 sont bloqués et T'11, T'12 sont passants comme le montre la figure(I.5.c). Et la tension de sortie V_{ao} est: $V_{ao} = -V_{dc}/2$. La tension appliquée aux interrupteurs T11, T12 vaut: $-V_{dc}/2$.

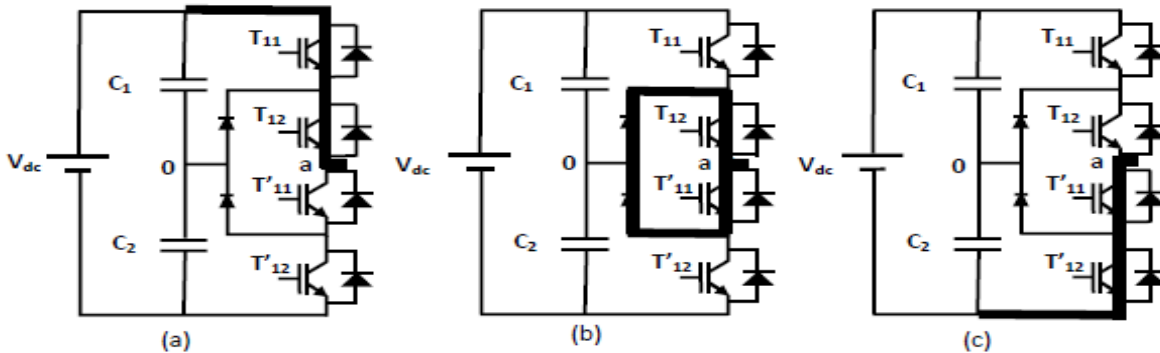


Figure I.5 : Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC trois niveaux.

Les trois états de commutation possibles sont résumés au Tableau (I.1), L'état 1 représente l'interrupteur fermé et l'état 0 représente l'interrupteur ouvert.

T ₁₁	T ₁₂	T' ₁₁	T' ₁₂	V _{ao}
1	1	0	0	V_{dc}/2
0	0	1	1	-V_{dc}/2
0	1	1	0	0

Tableau I.1 : Etats possibles de l'onduleur NPC à trois niveaux.

La figure (I.6) illustre les séquences de commande d'un bras de l'onduleur et les tensions de phases V_{a0} , V_{b0} (tension de sortie du 2ème bras) et la tension entre phases V_{ab} .

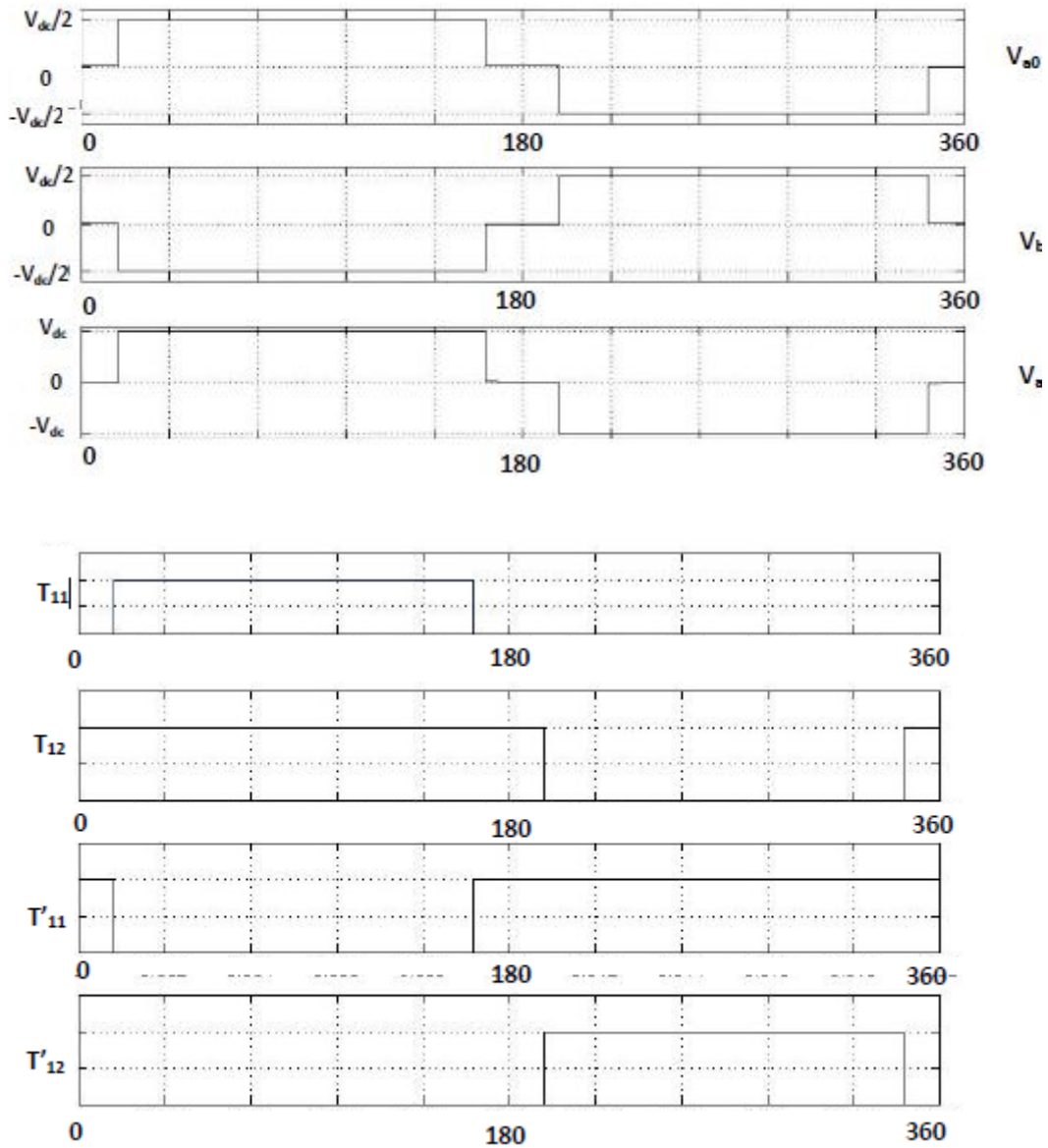


Figure I.6: les séquences de commande d'un bras de l'onduleur et les tensions de phases V_{a0}, V_{b0} et la tension entre phases V_{ab} le cas d'un onduleur monophasé

Pour générer les impulsions de commande MLI de cet convertisseur deux porteuses triangulaires sont nécessaires. Ces porteuses ont la même fréquence f_p et la même amplitude A_p (figure I.7). Ils sont ensuite comparés au signal de référence (sinus) d' amplitude A_m et de fréquence f_m . Chaque comparaison donne 1 si une porteuse est supérieure ou égale à la référence, et 0 dans le cas contraire.

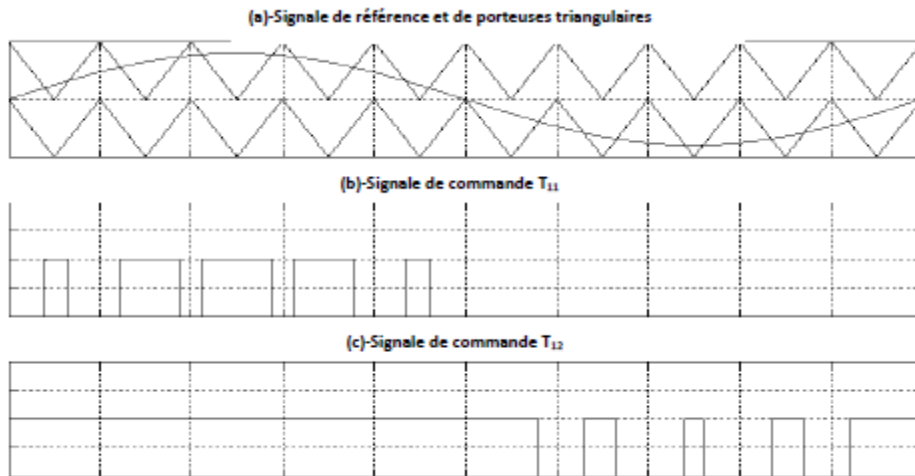


Figure I.7: Principe de commande MLI pour un onduleur NPC à trois niveaux.
 a) Signale de référence et de porteuses triangulaires.
 b) Signal de commande T11.
 c) Signal de commande T12.

Les interrupteurs T'11 et T'12 sont commandés de manière complémentaire aux T11 et T12 respectivement.

La Figure (I.8) présente les résultats de simulation des tensions de sortie de l'onduleur NPC commandé par la technique MLI. Pour un bus continu $V_{dc}=100$, une charge composée d'une résistance $R=1\Omega$ en série avec une inductance $L=15\text{ mH}$, un coefficient de réglage $r=0.8$ et on a varié l'indice de modulation en fréquence mf pour les valeurs de 8 et 16

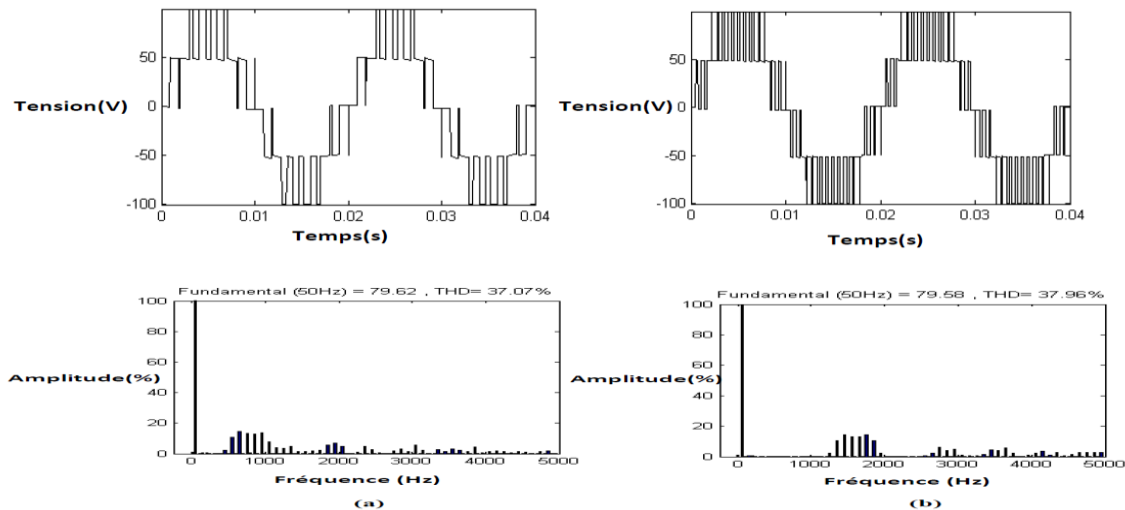


Figure I.8 : Résultats de simulation de la commande en MLI de l'onduleur NPC.
 a) V_{ab} pour $r=0.8$, $mf=8$.
 b) V_{ab} pour $r=0.8$, $mf=16$.

Nous remarquons à partir de la figure (I.8), cette structure permet d'avoir 3 niveaux de tension distincts ; et que les premiers harmoniques dus au découpage sont autour de deux fois la fréquence de découpage. Cette propriété est assez intéressante en termes de filtrage car elle permet d'avoir une réduction du volume des composants du filtre de sortie.

I.5.1.2 Avantages et inconvénients[5]

Les topologies NPC présentent plusieurs avantages dont quelques uns sont énumérés cidessous

- Toutes les phases partagent le même bus continu.
- La méthode de contrôle est relativement simple.
- N'utilise pas des transformateurs.

Par contre l'inconvénient de cette structure est[5][6]

- Déséquilibre de la tension des condensateurs. Dans certaines conditions de fonctionnement, la tension du point milieu capacitif peut avoir des variations très importantes. Afin d'assurer le bon fonctionnement, il faut prévoir une stratégie de commande pour assurer la stabilité de cette tension. Ce problème devient plus complexe lorsque le nombre de niveaux est plus important.

- L'exigence des diodes à fréquence de commutations élevée et qui doivent supporter le courant maximale circulent dans le circuit.

- L'inégalité des tensions inverses supportées par les diodes .

I.5.2 Onduleur de tension à condensateurs flottants :

La topologie de l'onduleur multi niveau à cellule imbriquées ou à condensateurs flottant (flying capacitor multilevel inverter), a été proposé par Meynard et Foch en 1992[6][7][8].

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 de bouclage, d'où l'appellation « onduleur à condensateur flottants ».

I.5.2.1 Principes de base :

Dans cette topologie, chaque branche de cet onduleur, dans le cas d'un onduleur à onduleur à trois niveaux, comporte quatre interrupteurs contrôlables et quatre diodes, et trois condensateurs ; deux sont branchés en parallèle avec la tension d'entrée V_{dc} et la troisième capacité remplace les deux diodes de blocage. Comme représenté à la Figure (I.9).

Pour un convertisseur à condensateurs flottants à N-niveaux de tensions, nous avons 2^{N+1} séquences de fonctionnement possible permettant de générer les N niveaux de tensions.

Et en particulier pour un convertisseur à condensateurs flottants à trois niveaux on a quatre séquences de fonctionnement:

Le tableau (I.2) montre la tension de sortie (V_{ao}) et les états de commutations possibles pour trois niveaux.

T_{11}	T_{12}	T'_{11}	T'_{12}	V_{ao}
1	1	0	0	V_{dc}
1	0	0	1	$V_{dc}/2$
0	1	1	0	$V_{dc}/2$
0	0	1	1	0

Tableau I.2 : Etats possibles de l'onduleur à condensateurs flottants à trois niveaux.

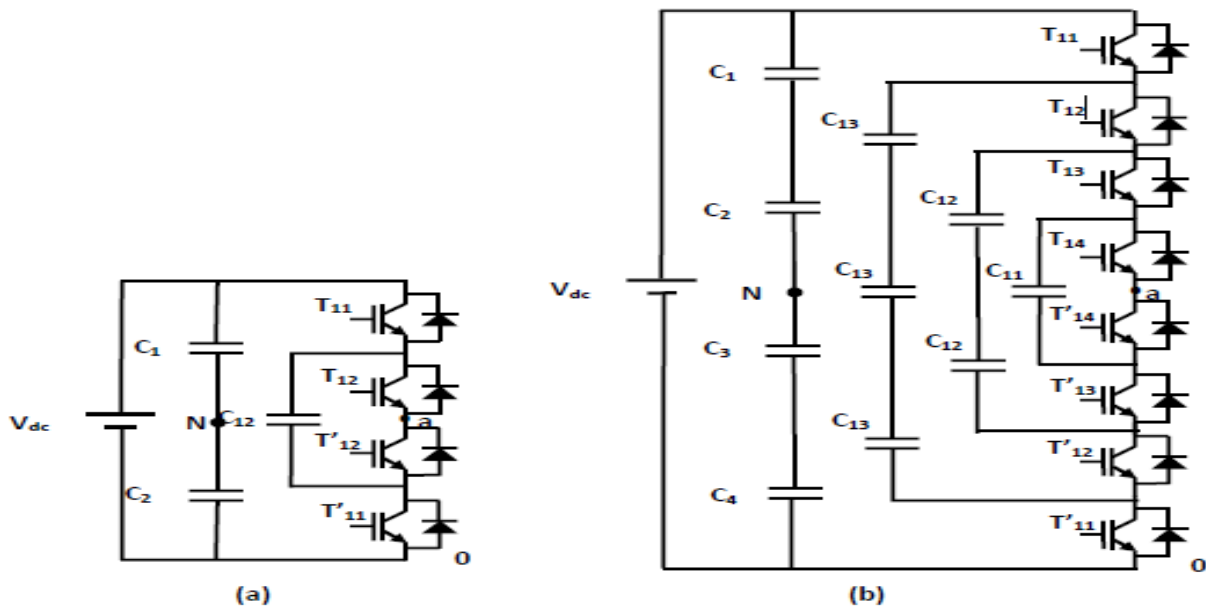


Figure I.9: Circuit d'une phase d'un convertisseur à condensateur flottant.
 a) à trois niveaux.
 b) à cinq niveaux.

La commande MLI pour le cas du convertisseur à condensateurs flottants à trois niveaux se fait de la même manière du convertisseur NPC, ce seulement la position des interrupteurs qui change. La Figure (I.10) présente les résultats de simulation des tensions de sortie de l'onduleur à condensateurs flottants à trois niveaux. Les paramètres de la charge, du bus continu, de coefficient de réglage ainsi que de l'indice de modulation sont identiques à la structure NPC précédente.

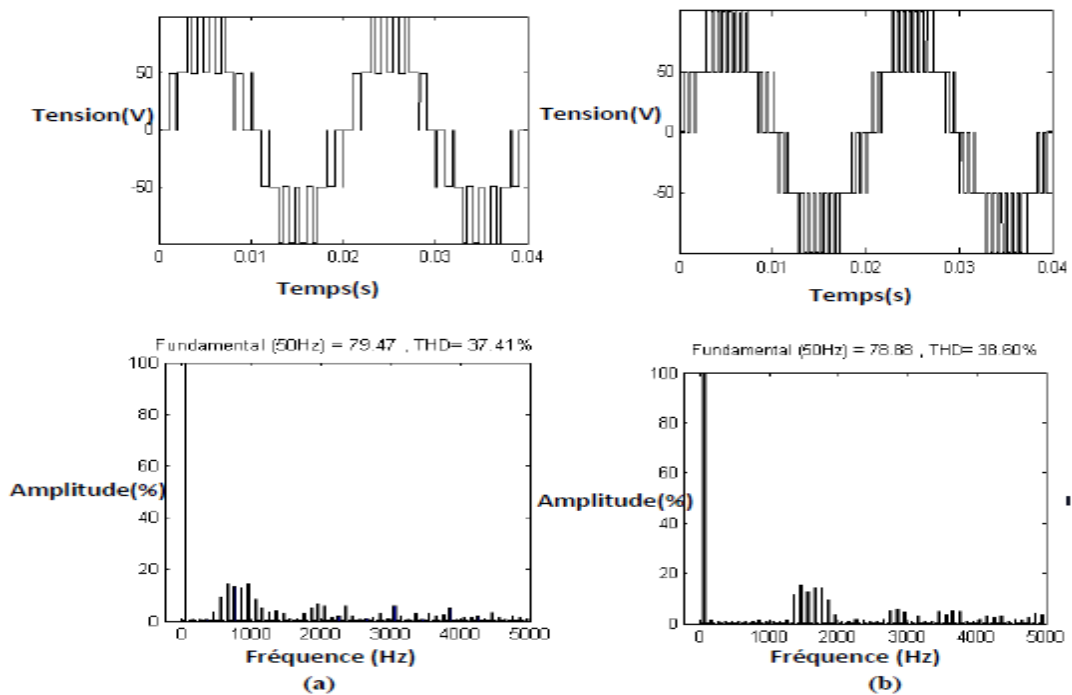


Figure I.10: Résultats de simulation de la commande en MLI de l'onduleur à condensateurs flottants.
 a) V_{ab} pour $r=0.8, mf=8$.
 b) V_{ab} pour $r=0.8, mf=16$.

Chapitre I: Introduction aux convertisseurs multiniveaux

L'objectif visé est donc de déterminer les valeurs que peut prendre la tension V_{ao} pour les différents états possibles des interrupteurs, de montrer les séquences de conductions des interrupteurs.

Comme pour le cas de l'onduleur NPC trois niveaux, nous avons trois séquences de fonctionnement possibles:

Séquences 1 : Génération du niveau maximum

Dans ce cas, les interrupteurs sont bloqués et T'_{11} , T_{12} sont passants comme le montre la figure (I.12.b). Et la tension de sortie V_{ao} est: $V_{ao}=+V_{dc}$.

La tension inverse appliquée aux interrupteurs T_{11} , T'_{12} vaut: $+V_{dc}$

Séquences 2 : Génération du niveau intermédiaire

Dans ce cas, les interrupteurs T_{11} , T_{12} sont bloqués et T'_{11} , T'_{12} sont passants comme le montre la figure (I.12.c). Et la tension de sortie V_{ao} est: $V_{ao}=0$.

La tension inverse appliquée aux interrupteurs T_{11} , T_{12} vaut: $+V_{dc}$.

Séquences 3 : Génération du niveau minimum

Dans ce cas, les interrupteurs T_{11} , T'_{12} sont passants et T'_{11} , T_{12} sont bloqués comme le montre la figure (I.12.a). Et la tension de sortie V_{ao} est: $V_{ao}=-V_{dc}$.

La tension inverse appliquée aux interrupteurs T'_{11} , T_{12} vaut: $+V_{dc}$.

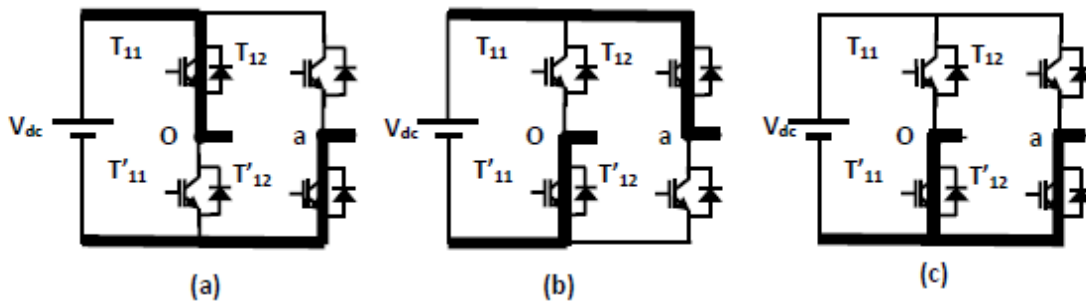


Figure I.12: Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur trois niveaux en Cascade.

Les trois états ou séquences de commutation possibles sont résumés au tableau (I.3)

T_{11}	T_{12}	T'_{11}	T'_{12}	V_{ao}
1	0	0	1	V_{dc}
0	1	1	0	$-V_{dc}$
0	0	1	1	0

Tableau I.3 : Etats possibles de l'onduleur cascade à trois niveaux.

La commande MLI pour le cas du convertisseur en cascade à trois niveaux se fait de la même manière du convertisseur NPC, ce seulement la position des interrupteurs qui change.

La Figure (I.13) présente les résultats de simulation les tensions de sortie de l'onduleur en cascade. Les paramètres de la charge, du bus continue, de coefficient de réglage ainsi que de l'indice de modulation sont identiques à la structure NPC précédente.

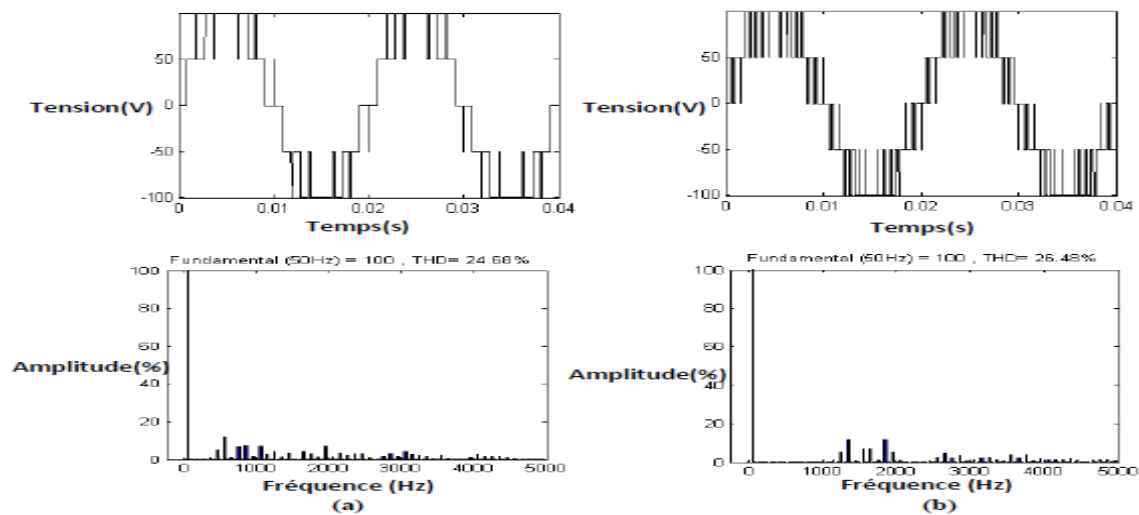


Figure I.13: Résultats de simulation de la commande en MLI de l'onduleur en cascade.

(a)-Vab pour $r=0.8$, $mf=8$.

(b)-Vab pour $r=0.8$, $mf=16$.

On a bien remarqué que la qualité des signaux obtenus est bonne et elle n'est pas identique pour les trois topologies discutées précédemment. On remarque aussi une nette amélioration du spectre d'harmonique par l'augmentation de la fréquence de découpage car les harmoniques sont repoussées vers les fréquences les plus élevées. Cette propriété est assez intéressante en termes de filtrage car elle permet d'avoir une réduction du volume des composants du filtre de sortie.

I.5.3.2 Avantages et inconvénients : [1][5][6]

Les convertisseurs multi niveaux en cascade présentent les avantages suivants :

- La construction de ce type de topologie est modulaire vue qu'elle est formée de circuits redondants ce qui permet d'atteindre des niveaux de tension très élevés.

- Ils ont besoin d'un nombre de composants moins important que les autres topologies multiniveaux pour fournir le même nombre de niveaux. Ils n'utilisent ni diodes de bouclage ni condensateurs flottants.

- Les interrupteurs supportent la même tension de blocage.

- Il devient possible d'alimenter une charge en haute ou moyenne tensions à partir de plusieurs alimentations basse tension (par exemple dans le cas de l'énergie solaire).

- Elle ne présente pas de problèmes liés à l'équilibrage des points de raccordement des tensions d'alimentation.

- Un autre atout de cette topologie est sa capacité à fonctionner même si un onduleur est en court-circuit, avec un nombre de niveaux de tensions générées plus bas.

- En plus la commande est simplifiée car les convertisseurs élémentaires présentent la même structure.

Les limitations de ce type d'onduleur :

- Les sources continues présentes dans le circuit de cette topologie sont obtenues par l'utilisation d'un transformateur à plusieurs secondaires comme première solution, ou bien plusieurs transformateurs distincts. Mais dans tous les cas on se trouve obligé de prévoir un système de correction du facteur de puissance pour remédier aux effets de pollution du réseau électrique causée par les redresseurs.

- Les sources continues nécessaires, limitant ainsi leur utilisation dans certains domaines d'application.

- Cette topologie s'adopte mieux à des systèmes alimentés par panneau solaire .

I.5.4 Autres topologies :

I.5.4.1 Convertisseur multiniveaux en cascades :

En Application de la haute tension il est possible d'exploiter les avantages des topologies décrites ci-dessus. Un convertisseur multi niveaux en cascade est réalisé en remplaçant l'onduleur monophasé formant la topologie *En cascade* par à diode de bouclage ou à condensateurs flottants. La figure(I.14) illustre le circuit de cette nouvelle topologie[7]

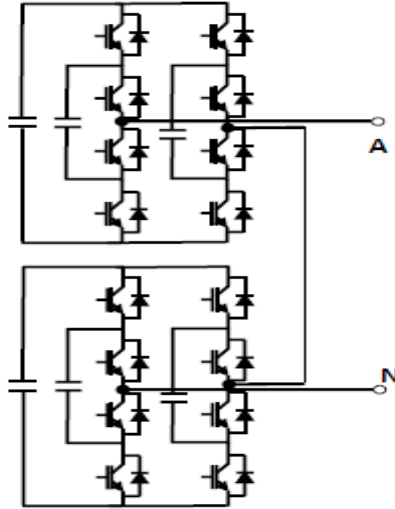


Figure I.14 :Convertisseur à neuf niveaux par association en cascade de convertisseurs à condensateurs flottants.

I.5.4.2 Le convertisseur à commutation douce :

La commutation douce est une méthode qui a pour objectif de diminuer les pertes de commutation et d'augmenter le rendement du convertisseur, cette technique est réalisée des convertisseurs conventionnels[1][8]

I.5.4.3 Convertisseurs multi niveaux généralisés :

Cette topologie fut présentée par Peng en 2001 comme une structure de convertisseur de laquelle les convertisseurs à diode de bouclage et condensateurs flottants peuvent être déduits[1]

Outre ces topologies discutées précédemment, d'autres topologies de convertisseurs multiniveaux ont été proposées, mais la plupart d'entre elles sont à base de circuits "hybrides", combinaisons de deux topologies de base ou de légères variations de celles-ci. Ces topologies sont :

- a) Le convertisseur asymétrique hybride[1].
- b) Le convertisseur avec des ponts en cascade et sources CC/CC avec isolement [9]
- c) Les convertisseurs reliés par transformateur,[10]
- d) Le convertisseur Diode/Capacitor-Clamped : variante de l'onduleur NPC[1],
- e) Le convertisseur New Diode-Clamped : autre variante de l'onduleur NPC[1].

I.6 Applications des convertisseurs multi-niveaux

Parmi les nombreux domaines d'emploi des onduleurs autonomes, on trouve principalement Les onduleurs à fréquence fixe a commutation forcée : Alimentés le plus souvent par une batterie d'accumulateur, ils jouent d'ordinaire le rôle d'alimentation de sécurité, ils constituent à ce titre, le principe déboucle actuel des onduleurs autonomes[2].Les onduleurs à fréquence variable à commutation forces : Alimentés à partir du réseau industriel par l'intermédiaire d'un montage redresseur, ils délivrent une tension de fréquence et de valeur efficace nécessaires pour faire tourner à vitesse variable un moteur à courant alternatif.

I.6.1 Application dans le domaine de l'alimentation des machines électriques

Dans les applications industrielles, les machines électriques de moyenne et forte puissances nécessitent une alimentation à moyenne tension. L'utilisation des convertisseurs multiniveaux dans ce cas est aussi mieux adaptée.

Dans de tels systèmes, les semi-conducteurs ne supportent qu'une faible tension, par rapport à celle exigée par la machine. La qualité de la tension en terme d'harmonique est meilleure, réduisant ainsi les effets néfastes sur la durée de vie de la machine et celle du réseau éventuel qui l'alimente. En plus à partir de cellules de petite tension, il devient possible d'alimenter une machine à moyenne tension.

Dans la traction ferroviaire par exemple, les réseaux de transport fournissent une grande alimentation. On utilise un transformateur afin d'adapter cette tension aux convertisseurs statiques qui sont utilisés.

Dans les véhicules électriques, l'utilisation des convertisseurs multi-niveaux est également possible. L'exploitation de la topologie basée sur la mise en série d'onduleurs partiels devient relativement aisée, puisque chaque onduleur est alimenté par une batterie de 48 V, assurant ainsi l'isolation galvanique requise entre toutes les sources .Ces onduleurs permettent d'augmenter la puissance nécessaire et d'assurer la continuité de fonctionnement du système lors d'une défaillance d'une source de tension (mode dégradé).

I.6.1.1 Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone :

La vitesse d'un moteur synchrone est fixée par la pulsation des courants statiques. Pour changer de vitesse il faut donc changer la fréquence des tensions d'alimentation. Il faut donc redresser la tension du réseau puis l'onduler à la fréquence désirée.

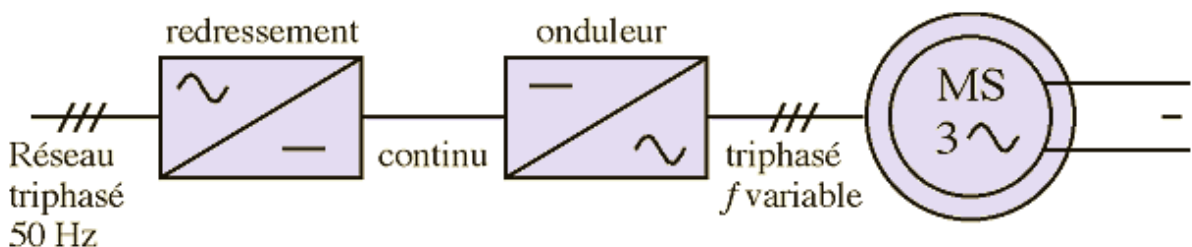


Figure I.15 : Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone

I.6.1.2Alimentation de secours :

Lors d'une panne d'électricité, un onduleur assure la continuité de l'alimentation des machines à partir de batteries. En informatique professionnelle, un onduleur est indispensable pour éviter la perte d'informations en cas de panne du secteur .[1]

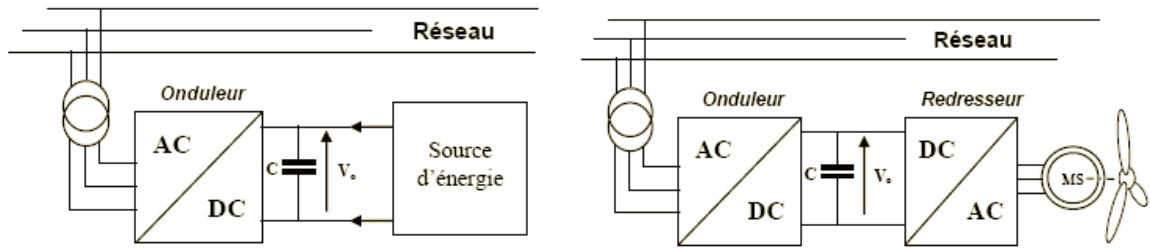


Figure I.16 : Alimentation de secours

I.6.2 Application dans le domaine des réseaux électriques :

Les convertisseurs multi-niveaux sont aussi adaptés pour l'amélioration de la qualité de la tension des réseaux électriques parce qu'ils peuvent fournir une moyenne ou une haute tension. Notamment sur les lignes de transmission de longue distance, il est souvent nécessaire de compenser la puissance réactive. Lorsqu'ils sont contrôlés de façon adéquate, ils offrent dans ce cas, la possibilité de régler l'amplitude de la tension et son déphasage. Ils peuvent donc jouer le rôle de compensateurs statiques[12].

I.6.2.1 Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes :

La France fournit de l'énergie électrique à la Grande-Bretagne, mais la fréquence du réseau anglais est 60 Hz. Il faut donc adapter la fréquence.

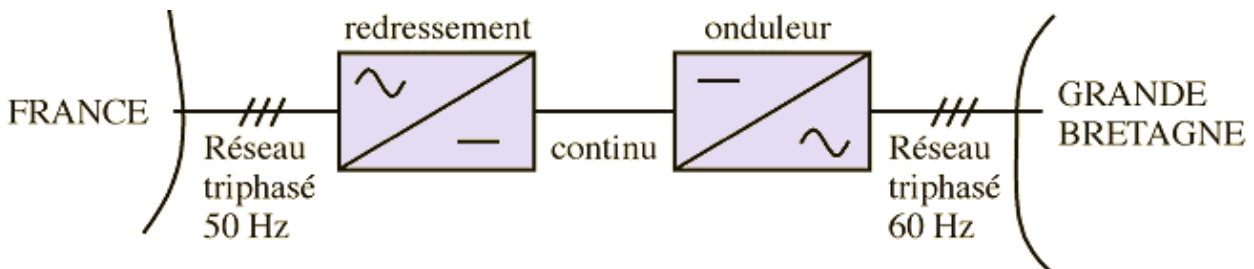


Figure I.17 : Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la théorie sur les onduleurs, ses types, les topologies, son fonctionnement et nous avons présenté leurs principales applications.

Nous avons consacré notre étude aux techniques de filtrage et principalement le filtre active parallèle et leurs différentes stratégies de commande.

Chapitre II :Filtre actif parallèle

II.1 Introduction :

L'utilisation croissant dans l'industrie des charges non-linéaires et à base de l'électronique de puissance engendre des problèmes sérieux de perturbation au niveau du réseau de distribution de l'énergie électrique. Ainsi, on voit une augmentation régulière des taux d'harmoniques et déséquilibres des courants ainsi qu'une importante consommation de l'énergie réactive. La circulation de ces courants provoque également des harmoniques et des déséquilibres de tension. Ces perturbations ont des conséquences nocives sur les équipements électriques. Une des solutions utilisée est le filtrage passif. Il consiste à piéger les courants harmoniques dans des circuits LC calculés en concordance avec les rangs harmoniques à filtrer. Cependant, cette solution est d'une efficacité moyenne. Le développement remarquable dans le domaine des dispositifs d'électronique de puissance a permis le recours à des filtres actifs de puissance.

L'objectif de ces derniers est de compenser les courants harmoniques injectés dans le réseau, et parfois l'énergie réactive consommée par les charges non-linéaires .

II.2 Les filtres passifs :

II.2.1 Classification des filtres passifs:

Les solutions conventionnelles aux problèmes de distorsion harmonique existent depuis longtemps. Le filtrage passif est la plus simple solution conventionnelle pour atténuer la distorsion harmonique[13] Les filtres passifs sont des éléments à base d'inductance, capacité et résistance configurés et réglés pour contrôler les harmoniques. On peut classer les filtres passifs suivant leur fréquence de résonance, leur mode de connexion et leur emplacement sur le réseau. Cela permet de définir deux grands modes de filtres passifs: les filtres séries utilisés pour les charges génératrices de tensions harmoniques et les filtres parallèles utilisés dans le cas des charges génératrices de courants harmoniques et suivant le modèle choisi, les harmoniques peuvent être : précisément bloqués par une grande impédance série entre le convertisseur, déviés par une faible impédance en parallèle ou une combinaison des deux.

II.2.1.1 Filtre passif série :

Une façon d'atténuer les harmoniques générées par les charges non linéaires est d'introduire un filtre passif série (Figure II.1), dans l'alimentation d'entrée ligne de sorte que le filtre offre une impédance élevée à la circulation des harmoniques à partir de la source à la charge non-linéaire. Depuis le filtre passif série est accordé sur une fréquence particulière, il offre une impédance élevée à sa seule fréquence d'accord. Selon la propriété physique de L et C choisie, il existe généralement une bande étroite autour de la fréquence d'accord lorsque l'impédance reste élevée .[13]

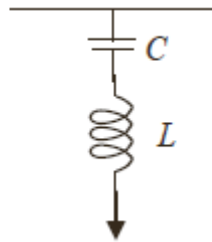


Figure II.1: Filtre passif série

II.2.1.2 Filtre passif parallèle :

Le filtre passif parallèle est montré sur la Figure (II.2). Il est constitué d'une inductance en parallèle avec un condensateur. Il présente une impédance faible pour tous les harmoniques et une impédance suffisamment importante par rapport au fondamental, ce qui empêche les courants harmoniques de se propager vers le réseau. Le filtre passif parallèle à un comportement inductif pour les fréquences inférieures à la fréquence fondamentale et un comportement capacitif pour les fréquences supérieures à la fréquence fondamentale, ce qui est un avantage majeur pour le contrôle du courant dans l'inductance.

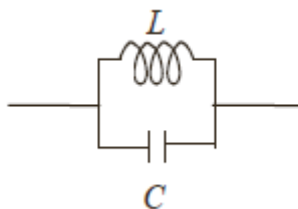


Figure II.2: Filtre passif parallèle

En général dans l'usage, on rencontre deux types de filtres passifs parallèles : le filtre passif amorti et le filtre passif résonant.

II.2.1.3 Filtre passif amorti :

Le filtre amorti peut réduire le risque de résonance non souhaitée, et permet de réduire considérablement la taille du filtre passif, en fonctionnant sur une large gamme de fréquence. On distingue trois types de filtre amorti : le filtre de premier ordre est très peu utilisé car il exige une grande capacité et provoque des pertes de puissance élevées. Les filtres de deuxième et troisième ordres sont plus performants[14].

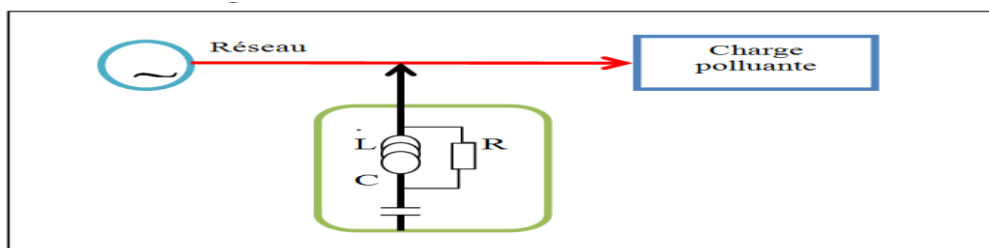


Figure II.3 : Montage du filtre amorti

II.2.1.4 Filtre résonant :

Le filtre passif résonnant est constitué d'un circuit résonnant composé d'un condensateur et d'une inductance en série accordés sur la fréquence de l'harmonique que l'on veut éliminer. Ce filtre possède une impédance faible pour l'harmonique concerné et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Lorsque l'on souhaite réaliser le filtrage d'un signal déformé entaché par plusieurs courants harmoniques, il est nécessaire de prévoir un ensemble de filtres ou chacun d'entre eux agit sur le rang harmonique à éliminer voir la figure (II.4)[15]

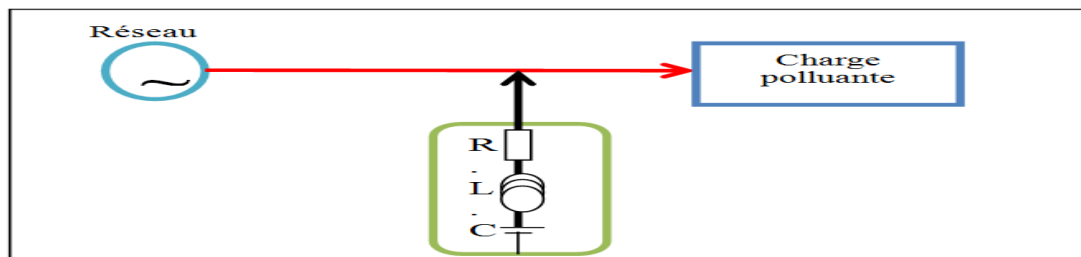


Figure II.4: Structure du filtre résonant

II.2.2 Les avantages et les inconvénients des filtres passifs:

Le filtrage passif a déjà largement fait ses preuves dans le milieu industriel grâce à son coût faible, son efficacité et son adaptation pour des réseaux de forte puissance[13].

Cependant il présente les inconvénients suivants:

L'impédance du réseau en présence des filtres passifs peut faire apparaître des résonances.

Le filtrage passif peut absorber les courants harmoniques d'autres charges non linéaires et dans ce cas, le filtre passif peut être surchargé.

Le filtrage passif est peu flexible et en cas de modifications dans le réseau, il peut avoir du mal à s'adapter aux nouveaux besoins du filtrage.

La conception des filtres passifs doit considérer la tolérance de fabrication et les dérives paramétriques qui apparaissent à l'usage. Ainsi, avant d'installer un filtre de ce type, une étude détaillée doit être menée afin d'analyser, cas par cas, les risques de résonance et de surcharge

II.3 Les filtres actifs:

Les premiers principes du filtrage actif ont été présentés dès le début des années 1970. Les premières familles de filtres actifs parallèles et série (solution adaptée à la compensation des tensions) apparaissent en 1976 et sont réalisées avec des onduleurs à transistors contrôlés en MLI[16]

Ces solutions sont proposées comme des solutions efficaces de dépollution des réseaux électriques afin de traiter les inconvénients inhérents aux solutions traditionnelles comme les filtres passifs (non adaptatifs aux variations de la charge et du réseau, phénomènes de résonance). Parmi toutes les solutions modernes, on trouve deux types de structures classiquement utilisées :

Le filtre actif :

- Le filtre actif parallèle (FAP) : conçu pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive.
- le filtre actif série (FAS) : conçu pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension.
- Le filtre actif hybride (série, parallèle).
- La combinaison parallèle-série actifs : solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension.

Le but de ces filtres actifs est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant ou la tension redevienne sinusoïdal.

Pour fournir aux consommateurs une énergie électrique de qualité, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs sont proposés comme des solutions de dépollution des réseaux électriques. Dans la suite, différentes topologies de filtres actifs usuels sont présentées .

II.3.1 Avantages et inconvénients des filtres actifs :

Le filtre actif offre de nombreux avantages:

- Il s'adapte automatiquement à l'évolution des charges et du réseau;
- Il peut compenser plusieurs rangs harmoniques (dans la limite de sa bande passante);
- Il ne passe pas en surcharge lorsque le courant harmonique à compenser dépasse le dimensionnement du filtre actif. Il limite son émission de compensation harmonique au maximum de ses capacités, mais il n' y a aucun risque de destruction;
- Le risque de résonance entre le filtre et l' impédance du réseau ne se présente pas comme dans le cas du filtre passif;
- Il peut protéger des condensateurs de compensation par élimination des courants harmoniques générés par une charge.

Toutefois, le filtrage actif présente quelques inconvénients :

- Le filtrage actif n' est possible que dans le cas des réseaux de faible puissance;
- Il pennet la compensation de l'énergie réactive, mais à un coût très élevé par rapport au filtrage passif;
- Son coût est beaucoup plus élevé que celui du filtrage passif.
- Le filtrage actif est donc plus intéressant sur des charges ne nécessitant pas de compensation de lapuissance réactive. Par contre, le filtrage passif est intéressant sur des charges nécessitant cette compensation.

II.4 Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèles

II.4.1. Introduction :

Les premiers principes de fonctionnement des filtres actifs parallèles ont été présentés dans la littérature dès le début des années 1970. En 1976, une première famille de filtre actif parallèle a été conçue à partir d'onduleurs à transistors de puissance commandés en MLI. Ces premiers dispositifs de puissance étaient alors proposés pour la seule compensation des courants harmoniques. Cependant à cette époque, il était encore difficile de concevoir ce type de système pour des applications industrielles. En effet, dans ces années là, il était presque impossible de trouver, sur le marché, des interrupteurs de puissance capables de fonctionner aux fréquences de commutation et aux niveaux de puissance exigés par la réalité industrielle. Cette barrière technologique sera franchie, dès 1977, lors de la conception d'un premier prototype de filtre actif parallèle à base de thyristors à commutations naturelles pour la compensation de courant harmonique. Cependant, l'application des onduleurs à base de thyristor a tout de suite posé le problème de la génération non désirée de composantes injectées sur le réseau à la fréquence de commutation. La même raison a également empêché l'utilisation de compensateurs statiques parallèles à thyristors, lesquels avaient été conçus pour la compensation conjointe de la puissance réactive et des courants déséquilibrés.

Au cours des années 1980, des progrès importants dans le domaine des semi conducteurs ont permis de développer de nouveaux composants de puissance associant hautes fréquences de commutation et fortes puissances. Profitant de ces avancées, et de l'avènement des interrupteurs de puissance du type GTO et IGBT, de nombreux onduleurs de puissance, commandés en MLI, ont pu être conçus en vue de répondre aux contraintes industrielles de conception des filtres actifs parallèles. Ainsi, ces derniers ont commencé à être commercialisés et installés à travers le monde, et plus spécialement dans les pays les plus industrialisés comme le Japon. Ces premiers prototypes ne compensaient alors que les perturbations harmoniques de courant. Suite à ces premiers développements, d'autres types de filtre actif parallèle ont pu être réalisés pour compenser à la fois la puissance réactive, et/ou les harmoniques et les déséquilibres de courant . Actuellement, les filtres actifs parallèles sont essentiellement installés par les consommateurs industriels. L'évolution future de ces dispositifs de puissance pourrait autoriser le fournisseur d'énergie à prendre un rôle plus important, en lui permettant de les installer lui-même. Cette approche permettrait d'amortir la propagation des harmoniques causées par la résonance, laquelle peut être observée entre les inductances du réseau et les batteries de condensateur installées pour améliorer le facteur de puissance. De même, des filtres actifs parallèles installés par le fournisseur auraient aussi pour objectif de réduire la distorsion harmonique de tension en amont, côté réseau électrique [18].

II.4.2. Principe du filtre actif parallèle :

Le principe du filtrage actif des courants harmoniques consiste à ajouter en parallèle avec la charge polluante un dispositif constitué d'un onduleur de tension à cinq niveaux commandé en temps réel de telle sorte que le courant de source soit sinusoïdal.

Pour ce faire, il faut premièrement identifier le courant de charge pour pouvoir connaître le courant harmonique I_h qu'il faut ajouter pour avoir un courant délivré par le réseau sinusoïdal.

Dans cette étude, on a utilisé deux charges non linéaires de redresseur triphasé à base des thyristors statique et dynamique.

La figure (II.5) peut facilement expliquer le fonctionnement du filtre pour un courant de charge I_c imposé. Le courant harmonique I_h que doit fournir le filtre doit être égal à la différence entre le courant d'entrée I_c de la charge polluante et le courant sinusoïdal I_s fourni par la source (lois des nœuds).

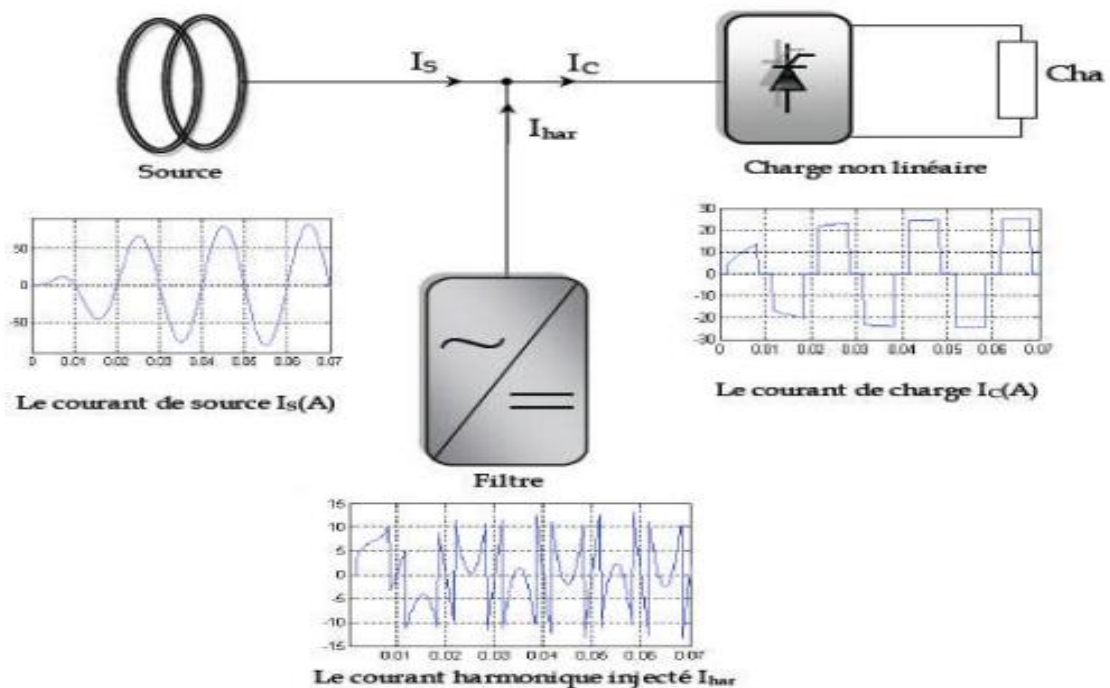


Figure II.5 : Filtre actif parallèle.

II.4.3 Structure général du filtre active parallèle :

La Figure (II.6) donne la structure générale du filtre actif parallèle, laquelle se présente sous la forme de deux blocs : la partie puissance et la partie commande. La partie contrôle partie puissance est constituée :

- d'un onduleur de tension à base d'interrupteurs de puissance, commandables à l'amorçage et au blocage (GTO, IGBT, ...etc.) avec des diodes en antiparallèle,
- d'un circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif,
- d'un filtre de sortie.
- La partie contrôle-commande quant à elle est constituée :
- de la méthode d'identification des courants perturbés,
- du système à base de PLL qui sera intégré dans la méthode d'identification des courants,
- de la régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie,
- de la régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension,
- de la commande de l'onduleur de tension.[17]

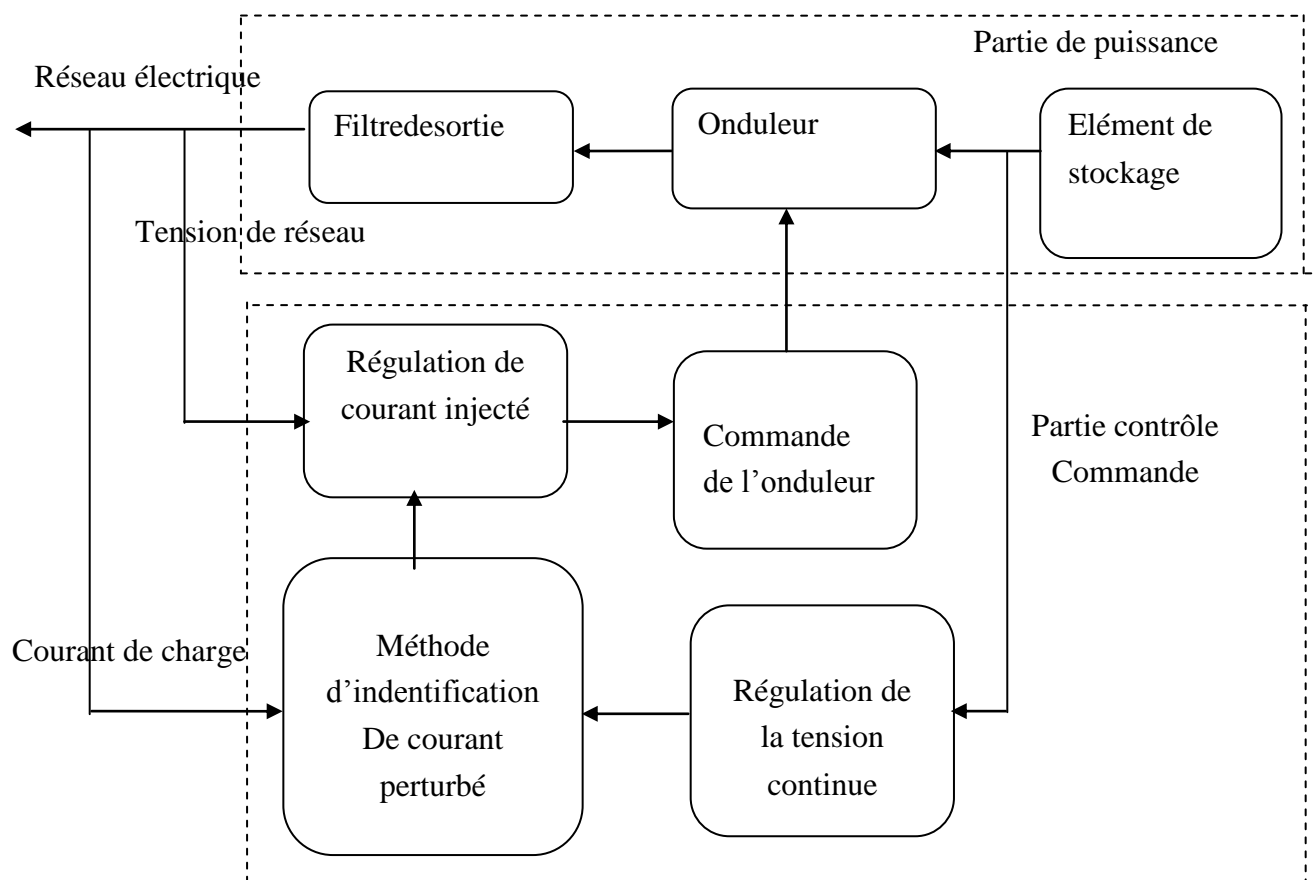


Figure II.6 : Structure générale d'un filtre actif parallèle

II.4.4. Etude de partie puissance :

Le FAP est une structure de tension connectée en parallèle au réseau ,Le filtre entre l'onduleur et le réseau est un filtre de premier ordre qui est en réalité une simple inductance mais avec des spécificités au niveau de son circuit magnétique (introduction de noyaux en ferrites). Il a deux objectifs générer des courants harmoniques à partir de la différence des tensions entre la sortie du pont onduleur et le réseau. A ce titre, l'inductance (L_f) intervient dans la commandabilité du courant du filtre. Réduire au point de raccordement au réseau (PCC), l'amplitude des créneaux de tension générés.

Les interrupteurs sont bidirectionnels en courant. Ils sont formés par des composants semi-conducteurs commandés à la fermeture et à l'ouverture (IGBT, thyristors GTO), en antiparallèle avec une diode. Dans ce cas également, l'onduleur de tension est raccordé entre deux types de sources : source de courant côté alternatif et source de tension côté continu.

La présence de ces deux types de sources impose les conditions suivantes :

- Un seul interrupteur d'un bras doit conduire pour éviter des court-circuités de la source de tension.
- Le courant de ligne doit toujours trouver un chemin libre d'où la mise en antiparallèle des diodes avec les interrupteurs pour éviter l'ouverture du circuit de la source de courant

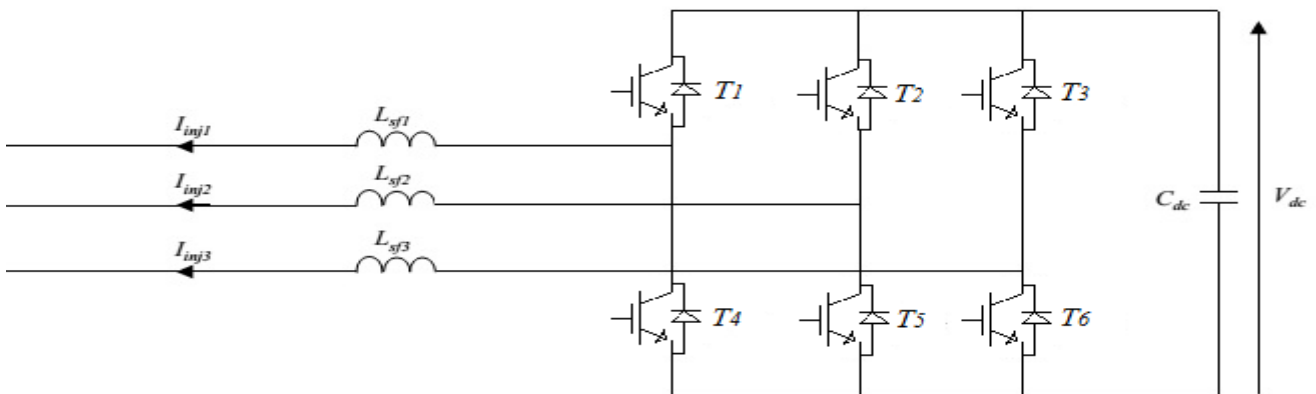
I_{Sn} , courant de la source d'alimentation

V_{Sn} , tension au point de raccordement commun

V_{fn} , I_{fn} , L_f , tension, courant et inductance du filtre actif .[17]

II.4.4.1 Onduleur :

La Figure(II.7) présente un onduleur triphasé à structure de tension. Il se compose de trois bras à interrupteurs réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture, réalisés à partir d'un transistor (GTO ou IGBT) et d'une diode en antiparallèle. Le stockage de l'énergie du côté continu se fait par l'intermédiaire d'un condensateur C_{dc} de tension V_{dc} . Le filtre de sortie est un filtre passif habituellement du premier ordre (L_f) employé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique.[17]



FigureII.7 : Onduleur de tension triphasé

Cette structure du filtre actif parallèle ne permet pas la fermeture simultanée des semiconducteurs d'un même bras sous peine de court-circuiter le condensateur de stockage. Par contre, ils peuvent être tous les deux ouverts (pendant un temps mort). La continuité des courants est alors assurée par la mise en conduction d'une des diodes d'un même bras. En pratique, nous commandons les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire :

la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. En réalité, le mode, où les semi-conducteurs d'un même bras sont tous les deux fermés, n'existe que durant les commutations. Afin d'éviter un court-circuit à cause du délai de blocage des interrupteurs, il faut insérer sur un même bras, un temps d'attente, également appelé temps mort, entre la commande de blocage d'un interrupteur et la commande d'amorçage de l'autre. Avec l'hypothèse des commutations instantanées, ce mode de fonctionnement ne sera pas pris en compte et par conséquent, aucun risque de court-circuiter le condensateur n'est à craindre .

II.4.4.2 Filtre de sortie :

Le filtre de sortie est un filtre passif utilisé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique.

Un filtre de sortie du premier ordre est le plus souvent utilisé dans la littérature. Il est composé d'une inductance L_f comportant une résistance interne R_f . Une valeur relativement faible de L_f permet d'obtenir une bonne dynamique du FAP en satisfaisant l'égalité . Cependant, une faible valeur de L_f permet à la majorité des harmoniques, induits par les commutations, de passer du côté réseau et d'affecter ainsi les installations et les équipements électriques. Inversement, une valeur relativement élevée de L_f empêche ces harmoniques de se propager sur le réseau électrique mais nécessite une tension V_{dc} plus élevée afin de garantir les performances du filtre actif. Pour limiter la propagation de ces harmoniques, un filtre passif auxiliaire peut être ajouté à la sortie de l'onduleur ou en amont (côté réseau) pour absorber ces harmoniques liés au découpage .[18]

II.4.4.3 Système de stockage de l'énergie :

Le choix de la tension v_{dc} et de la capacité de condensateur C_{dc} affecte la dynamique et la qualité de compensation du filtre actif parallèle. En effet, une tension v_{dc} élevée améliore la dynamique du filtre actif. De plus, les ondulations de la tension continue v_{dc} causées par les courants engendrés par le filtre actif et limitées par le choix de C_{dc} peuvent dégrader la qualité de compensation du filtre actif parallèle. Ces fluctuations sont d'autant plus importantes que l'amplitude du courant du filtre est grande et que sa fréquence est faible. Pour cette raison, nous pouvons estimer que seuls les premiers harmoniques sont pris en compte dans le choix des paramètres du système de stockage.[17]

Le stockage de l'énergie est réalisé côté continu à l'aide d'un système de stockage capacitif, représenté par un condensateur (C_{dc}) jouant le rôle d'une source de tension continue. Le choix des paramètres du système de stockage (V_{dc-ref} et C_{dc}) a une influence directe sur la dynamique du FAP et sur ses performances de compensation. D'une part, une tension (V_{dc-ref}) élevée améliore la dynamique du FAP. D'autre part, les ondulations de la tension continue (V_{dc}), causées par les courants engendrés par le FAP et limitées par le choix de la valeur de (C_{dc}), peuvent dégrader la qualité de compensation du FAP. Une valeur élevée de (C_{dc}) réduit les ondulations de (V_{dc}) mais augmente le coût et la taille du FAP.

Sachant que l'augmentation de la valeur de la tension continue améliore la marge de commandabilité du FAP et sachant que le choix de cette tension se répercute en grande partie sur le choix des interrupteurs, la tension continue (V_{dc}) doit être choisie la plus élevée possible tout en respectant les contraintes nominales des semi-conducteurs et la contrainte de commandabilité de l'onduleur.

La première méthode se base sur le calcul de l'énergie fournie par le filtre actif pendant une demi-période de la pulsation de puissance liée aux deux premiers harmoniques (5 et 7 pour un pont redresseur de Graetz). En choisissant un taux d'ondulation acceptable (ϵ), généralement de l'ordre de 5% de (V_{dc}), nous pouvons calculer la capacité (C_{dc}) à partir de la relation suivante

$$C_{dc} = \frac{V_S \sqrt{I_7^2 + I_5^2 - 2I_5 I_7 \cos(5\alpha - 7\alpha)}}{2 \Delta V_{dc} \omega V_{dc}^{ref 2}} \quad (I.1)$$

Avec (V_S) la tension simple du réseau, (I_n) le courant harmonique du rang (n) et (α) l'angle d'allumage des thyristors du pont Graetz.

La deuxième méthode, plus simple, se base sur la mesure du courant harmonique (I_n) du rang le plus faible. La capacité (C_{dc}) se calcule de la façon suivante .

$$C_{dc} = \frac{I_n}{V_{dc} \Delta V_{dc} \omega_n} \quad (I.2)$$

Avec (ω_n) la pulsation la plus faible des harmoniques à compenser.

II.4.5 Etude de partie commande :

II.4.5.1. Commande de l'onduleur :

Pour maintenir le courant à la sortie du filtre actif autour de sa référence calculée par les trois techniques de commande peuvent être utilisées :

- la commande par hystérésis.
- La commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).
- La commande par MLI vectorielle

L'objectif de la commande, que ce soit à MLI, MLI vectorielle ou par hystérésis, est de générer les ordres d'ouverture/fermeture des interrupteurs de manière à ce que le courant du filtre actif soit le plus proche de sa référence.[17]

II.4.5.2 Commande par hystérésis :

La stratégie de commande par hystérésis revient à comparer les courants de référence avec le courant produit par l'onduleur, la différence entre eux est comparée à une bande fixe appelée bande d'hystérésis, dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure un ordre de commande est envoyé afin de diminuer ou augmenter la tension en sortie de l'onduleur, et maintenir l'erreur à l'intérieur de la bande entourant la référence comme le montre la figure (II.8) :

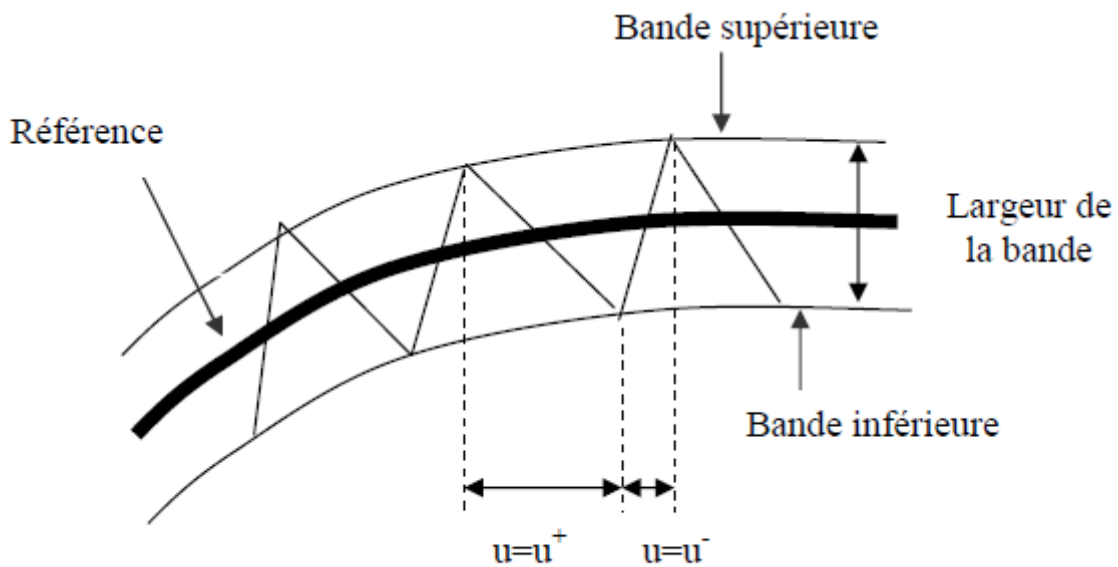


Figure (II.8) : Principe du contrôle par hystérésis

Malgré la simplicité de sa mise en oeuvre comme le montre la figure (II.9), sa robustesse et son excellente dynamique [19], la commande par hystérésis présente certains inconvénients à savoir, l'évolution libre des commutations à l'intérieur de la bande d'hystérésis qui empêche la maîtrise du spectre hautes fréquences dû aux fréquences de commutation. De plus, le fait que la commande soit appliquée séparément sur les trois phases du courant, alors qu'ils sont dépendants, empêche le courant asservi de respecter les limites imposées par la bande.

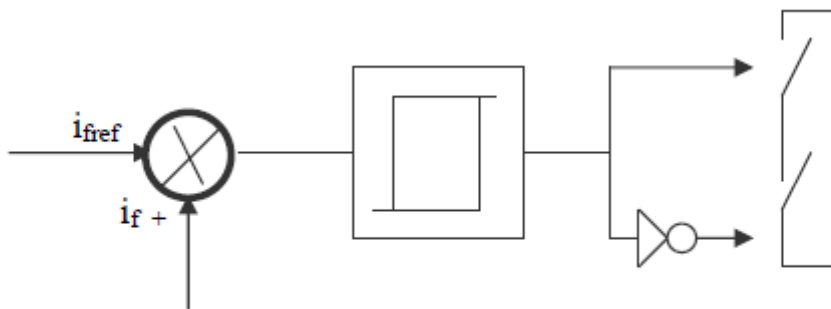


Figure (II.9) : Principe de la commande par hystérésis

II.4.5.3 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) :

Afin de contourner les problèmes précédents, nous introduisons une deuxième famille de commande de l'onduleur : la commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI). La technique de commande par MLI résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur.

La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel, dite MLI intersective. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice) à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. Cette dernière est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Le schéma de principe est donné par la Figure (II.10).[17]

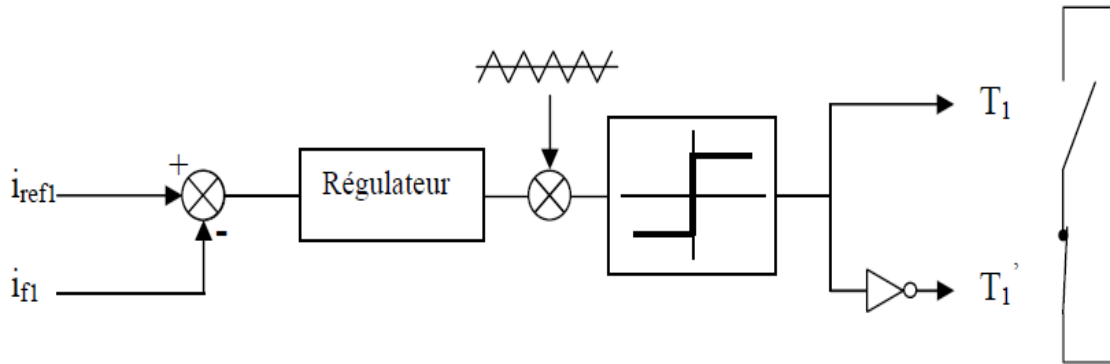


Figure II.10 : Principe de commande des courants par MLI

Les signaux logiques C qui en résultent donnent l'ordre de commutation des interrupteurs du filtre Figure (II.11) :

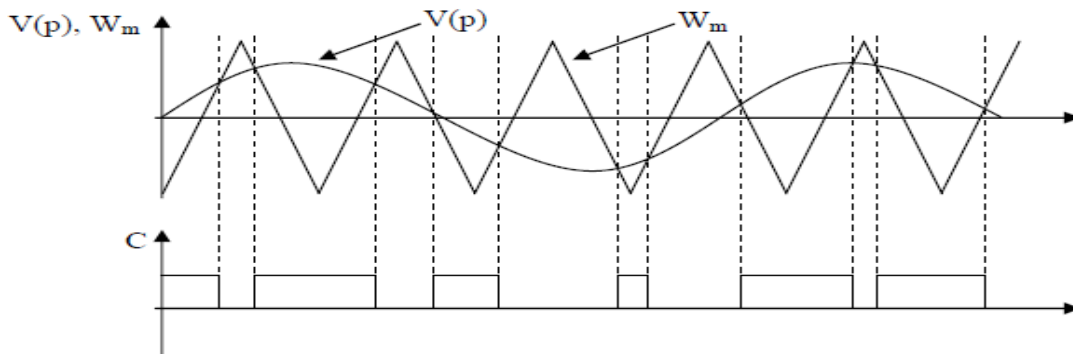


Figure II.11 : Répartition des commutations sur un bras d'un onduleur.

Cette -MLI- sert à remédier ces problèmes et elle a les avantages suivantes :

- 1)- Variation de la fréquence de la tension de sortie.
- 2)- Elimination de certaines harmoniques de tension.
- 3)- Elle repousse les harmoniques vers des fréquences plus élevées .

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord présenté les différentes classifications de filtre passif et actif et leurs avantages et inconvénients. Ensuite nous avons vu les Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèles . Et à la fin nous avons étudié la partie de puissance et partie commande de filtre actif parallèle et la commande d' onduleur par hysteresis et modulation de largeur d'impulsion (MLI)

De ce fait, le troisième chapitre sera consacré à une étude plus approfondie du filtre actif parallèle à cinq niveaux en mode de fonctionnement sain.

Chapitre III. Etude du filtre actif parallèle à cinq niveaux en mode de fonctionnement sain

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous étudierons, en mode sain, la topologie du filtre actif parallèle triphasé basé sur l'onduleur de tension de type ponts en cascade à cinq niveaux pour la compensation des harmoniques générés par la même charge non-linéaire.

III.2. Intérêt des onduleurs multi-niveaux :

La structure de conversion multi-niveaux offre d'énormes avantages relativement à une solution conventionnelle basée sur un convertisseur à deux niveaux, parmi les plus importants on mentionne:

- génération de tensions proches de la forme de signal de référence permet d'améliorer la qualité des formes d'ondes.
- le courant qui circule est lui aussi de meilleure qualité par rapport à sa référence ;
- réduction des tensions du mode homopolaire et par conséquent des contraintes dans les paliers des moteurs électriques. En plus, l'utilisation de techniques de modulations sophistiquées peut totalement annuler ces tensions ;
- réduction des valeurs des composants passifs de filtrage de sortie (capacité ou inductance).

Malgré leurs nombreux avantages, les onduleurs multi-niveaux présentent certains inconvénients tels que :

- l'accroissement du nombre de niveaux de tension, complique plus la structure du convertisseur, et par conséquent sa commande ;
- la complexité de sa commande ainsi que le nombre important de composants d'électronique de puissance utilisés rend son coût élevé et sa fiabilité réduite (augmentation du taux d'exposition au défaut par rapport à l'onduleur à deux niveaux).

III.3. Structure de FAP à base d'un onduleur de tension à cinq niveaux de type ponts en cascade :

La topologie du filtre actif parallèle à cinq niveaux à base d'un onduleur de tension à cinq niveaux de type ponts en cascade est illustrée sur la figure (III-1). Chaque phase du réseau électrique est reliée travers une inductance de lissage L_f à deux ponts en H mis en série dont chacun est alimenté par une source de tension continue V_{dc} . Comme dans le chapitre précédent, la charge non-linéaire est toujours constituée par deux redresseurs PD3 à diode mis en parallèle avec des périodes dont le fonctionnement est décalé, alimentant chacun une charge RL.

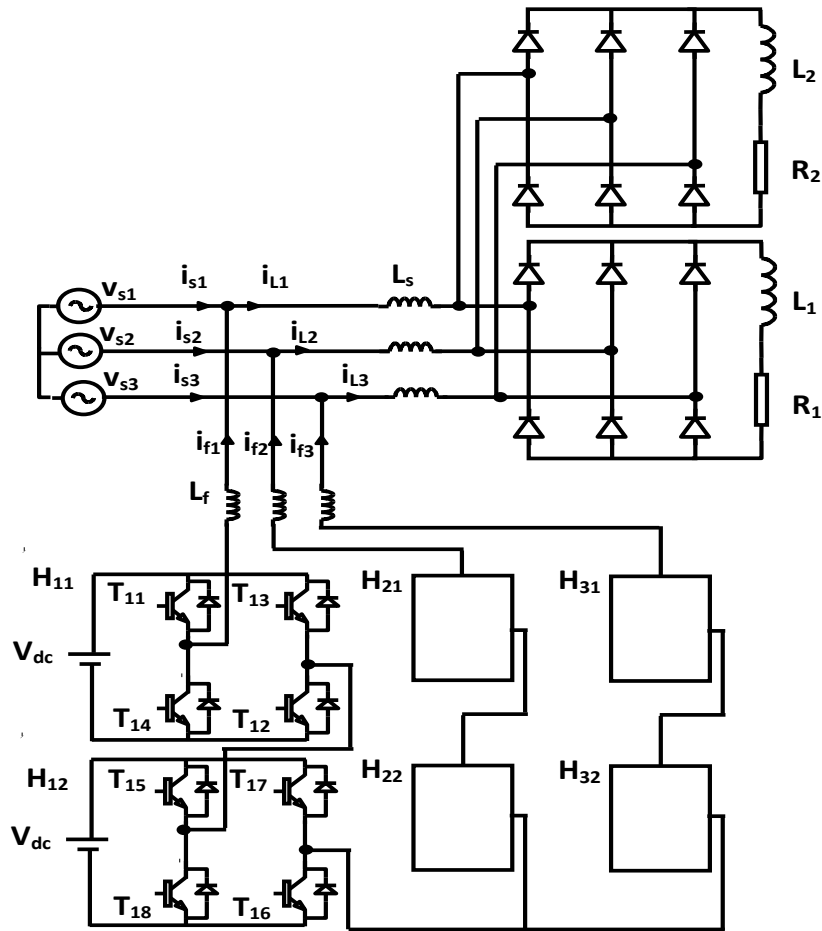


Figure (III-1): Circuit de puissance du filtre actif parallèle à base d'onduleur de tension à cinq niveaux en ponts en cascade .

III.3.1. Onduleur de tension à cinq niveaux de type ponts en cascade :

III.3.1.1. Structure générale :

La structure d'un convertisseur multi-niveaux basée sur la mise en série d'onduleurs monophasés (ou pont en H, ou cellule partielle) est montrée sur la figure (III-2). Pour un onduleur à cinq niveaux, chaque phase d'onduleur multi-niveaux est constituée par la mise en série de deux ponts en H, dont chacun est alimenté par une source de tension continue E . Les phases sont reliés, d'un côté, à une seule extrémité (neutre), et d'autre côté, à la charge triphasée sur laquelle l'onduleur multi-niveaux débite.

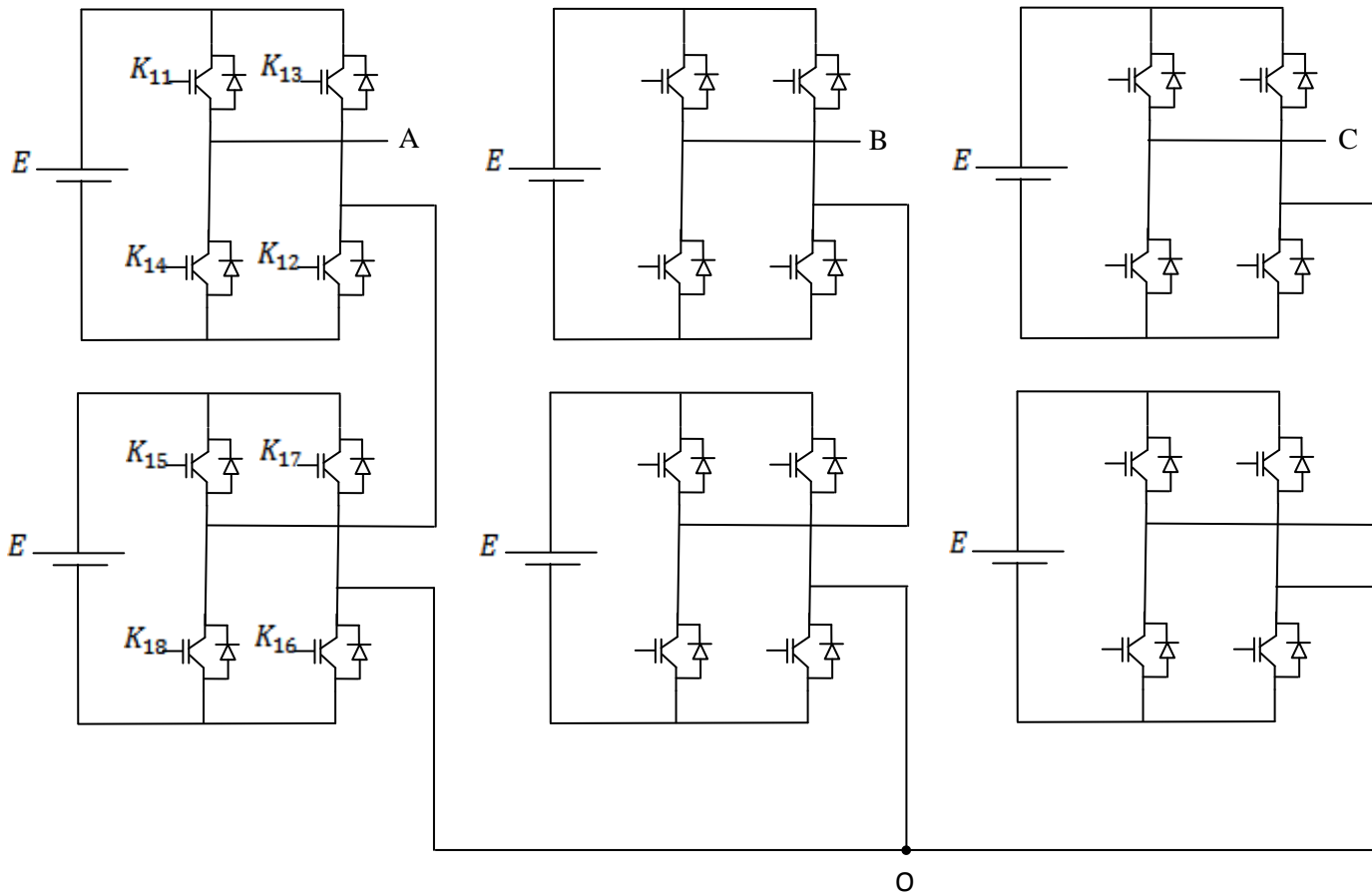


Figure (III-2): Schéma d'un onduleur triphasé de tension en ponts en cascade à 5 niveaux.

III.3.1.2.Principe de fonctionnement :

Le principe de fonctionnement du convertisseur de tension en ponts en cascade à cinq niveaux, est illustré par sa structure monophasée de la figure (III-3).

La structure d'un bras d'onduleur cinq niveaux de type ponts en cascade est l'association en cascade de deux onduleurs classiques monophasés en pont complet, de telle sorte que la tension à la sortie de l'onduleur obtenue est la somme des tensions de sortie des deux onduleurs classiques [11].

Pour le l'onduleur de tension de type ponts en cascade à cinq niveaux, nous avons les cinq séquences de fonctionnement suivantes :

- **Séquence 1:** K₁₁, K₁₂, K₁₅ et K₁₆ sont passants et K₁₃, K₁₄, K₁₇ et K₁₈ sont bloqués. Dans ce cas le premier pont monophasé (celui du haut) donne une tension de sortie E et le second pont monophasé (celui du bas) donne également E comme tension de sortie.

D'où la tension de sortie du convertisseur en cascade H à cinq niveaux de tensions : $V_{AO} = E + E = 2E$.

- **Séquence 2:** K₁₁, K₁₂, K₁₆ et K₁₈ sont passants et K₁₃, K₁₄, K₁₅ et K₁₇ sont bloqués. On a toujours E à la sortie du premier pont, mais cette fois-ci 0 à la sortie du second pont. D'où la tension $V_{AO} = E$.

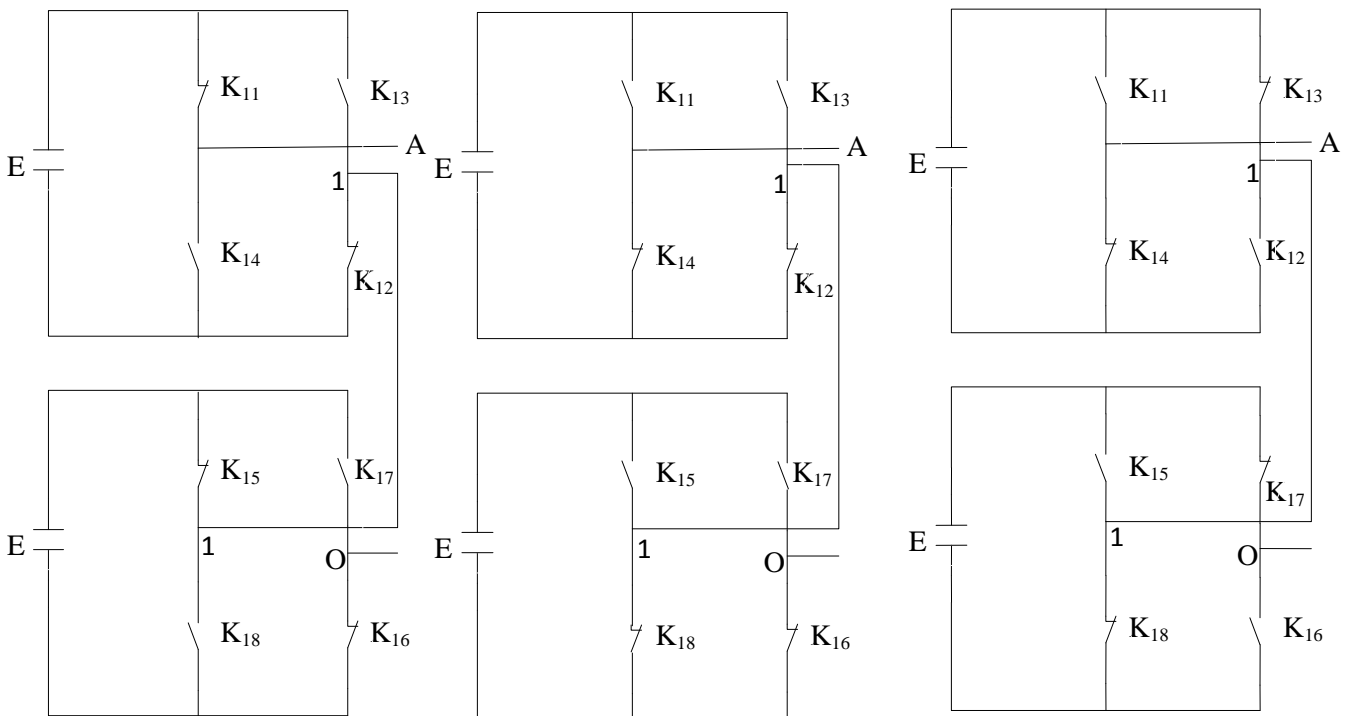
• **Séquence 3:** K_{14} , K_{12} , K_{16} et K_{18} sont passants et K_{11} , K_{13} , K_{15} et K_{17} sont bloqués. On a alors 0 comme tension de sortie dans les deux ponts monophasés montés en cascade. La tension de sortie du pont en H obtenue vaut: $V_{AO} = 0$.

• **Séquence 4:** K_{14} , K_{12} , K_{17} et K_{18} sont passants et K_{11} , K_{13} , K_{15} et K_{16} sont bloqués. On a alors la tension de sortie $V_{AO} = 0 - E = -E$.

• **Séquence 5:** K_{14} , K_{13} , K_{17} et K_{18} sont passants et K_{11} , K_{12} , K_{15} et K_{16} sont bloqués. Dans ce cas, la tension de sortie est : $V_{AO} = -E - E = -2E$.

Remarque:

- Les tensions bloquées par les différents interrupteurs au cours des séquences de fonctionnement valent toutes $V_{Ki} = E$; $i = 1$ à 8.
- Le niveau $V_{AO} = 0$ peut être obtenu en appliquant 4 séquences de commutation, comme montré dans le tableau III.1.



a. Génération de $V_{AO} = 2E$ b. Génération de $V_{AO} = 0$ c. Génération de $V_{AO} = -2E$

Figure (III-3): Pont H 5 niveaux : Principe et exemples de mécanisme de commutation

Les états ou séquences de commutation possibles sont résumés au tableau III.1.

K ₁₁	K ₁₂	K ₁₃	K ₁₄	K ₁₅	K ₁₆	K ₁₇	K ₁₈	V _{AO}
1	1	0	0	1	1	0	0	2E
1	1	0	0	0	1	0	1	E
1	1	0	0	1	0	1	0	E
1	0	1	0	1	1	0	0	E
0	1	0	1	1	1	0	0	E
1	0	1	0	0	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	1	0	0
0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	1	0	1	1	0	1	1	0
0	0	1	1	1	0	1	0	-E
0	0	1	1	0	1	0	1	-E
1	0	1	0	0	0	1	1	-E
0	1	0	1	0	0	1	1	-E
0	1	1	0	0	1	1	0	-2E

Tableau (III-1): Etats possibles de l'onduleur ponts en cascade à 5 niveaux

III.3.1.3. Modélisation en tension de l'onduleur en ponts en cascade à 5 niveaux :

La modélisation par phase de l'onduleur en ponts en cascade à 5 niveaux passe obligatoirement par la modélisation des deux ponts élémentaires de phase.

a. Modèle équivalent du pont 1 (pont supérieur de la phase 1)

K₁₁, K₁₂ sont passants et K₁₃, K₁₄ sont bloqués : $V_{A1} = E = S_{11} \cdot S_{12} \cdot E$

K₁₁, K₁₂ sont bloqués et K₁₃, K₁₄ sont passants : $V_{A1} = -E = -S_{13} \cdot S_{14} \cdot E$

K₁, K₃ sont passants et K₂, K₄ sont bloqués : $V_{A1} = 0$

K₂, K₄ sont passants et K₁, K₃ sont bloqués : $V_{A1} = 0$

Le modèle équivalent en tension du pont 1 de la phase 1 peut être écrit comme suit :

$$V_{A1} = (S_{11} \cdot S_{12} \cdot E - S_{13} \cdot S_{14} \cdot E) = (S_{11} \cdot S_{12} - S_{13} \cdot S_{14}) E \quad (\text{III.1})$$

Sachant qu'en mode sain, les interrupteurs électroniques de chaque bras sont commandés complémentaires, on peut écrire :

$$\begin{aligned} S_{14} &= 1 - S_{11} \\ S_{12} &= 1 - S_{13} \end{aligned} \quad (\text{III.2})$$

En combinant les équations III.1 et III.2, on obtient le modèle équivalent en tension du pont 1 de la phase 1 :

$$\begin{aligned} V_{A1} &= (S_{11} \cdot (1 - S_{13}) - (1 - S_{11}) \cdot S_{13}) E \\ &= (S_{11} - S_{11} \cdot S_{13} - S_{13} + S_{11} \cdot S_{13}) E \\ &= (S_{11} - S_{13}) E \end{aligned} \quad (III.3)$$

b. Modèle équivalent du pont 2 (pont inférieur de la phase 1) :

En adoptant la même approche de modélisation du pont 1 de la phase 1 pour la modélisation du pont 2 (pont inférieur) de la même phase, on obtient :

$$V_{I0} = (S_{15} - S_{17}) E \quad (III.4)$$

Finalement, le modèle équivalent en tension de la phase 1 d'onduleur peut être exprimé comme suit :

$$\begin{aligned} V_{AO} &= V_{A1} - V_{I0} = (S_{11} - S_{13}) E - (S_{15} - S_{17}) E \\ &= (S_{11} - S_{13} - S_{15} + S_{17}) E \end{aligned} \quad (III.5)$$

III.3.2. Contrôle par MLI à échantillonnage naturel du FAP à base l'onduleur de tension en ponts en cascade à 5 niveaux :

Tout d'abord, on doit signaler que les mêmes paramètres du réseau électrique et la charge polluante ainsi que la méthode d'identification des courants harmoniques sont considérés dans cette partie de thèse. On signale aussi que la même méthode de commande par MLI à échantillonnage naturel (MLI triangulo-sinusoïdale) est adoptée pour piloter l'onduleur à cinq niveaux, mais cette fois-ci, on utilise quatre (N-1=5-1=4) porteuses triangulaires bipolaires identiques décalées verticalement l'une par rapport à l'autre d'un quart de période de hachage pour la commande des deux ponts en cascade pour chaque phase d'onduleur à cinq niveaux (fig. (III-4)).

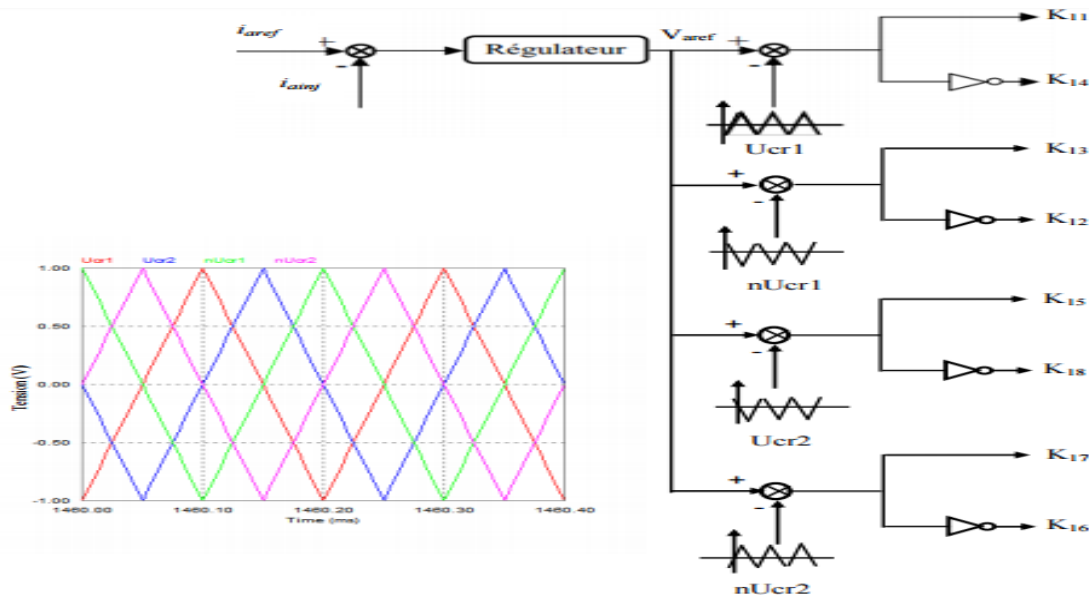


Figure (III-4): Principe de commande par MLI intersective à échantillonnage naturel du courant de la phase 1 du FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux en pont en cascade.

III.3.3. Résultats de simulation en mode sain du FAP à base d'onduleur de tension en ponts en cascade à 5 niveaux :

Pour évaluer les performances, en mode sain, du filtre actif parallèle à base d'un onduleur de tension à cinq et à sept niveaux, nous avons procédé à la simulation de l'association Réseau électrique équilibré-Charge polluante (redresseur PD3 à diodes)-FAP, tout en adoptant la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées pour l'identification des courants harmoniques, ainsi que la commande par des régulateurs à hystérésis pour commander l'onduleur du FAP. La simulation du système global est effectuée sous l'environnement PSIM. Lors des simulations, la charge polluante est constituée par deux ponts redresseurs triphasés PD3 à diodes et le réseau d'alimentation est un réseau triphasé équilibré non-pollué. Le réseau d'alimentation est modélisé par phase par une f.e.m. sinusoïdale en série avec une inductance L_c caractérisant l'impédance de court-circuit du réseau. Les redresseurs débitent dans deux charges RL. L'inductance L_s à l'entrée des redresseurs modélise l'impédance de ligne et les éventuelles inductances additionnelles mises en œuvre pour limiter les variations brusques de courant. Le filtre actif parallèle est composé d'un onduleur de tension à deux niveaux avec une source de tension continue fixe (filtre actif non-autonome) et une inductance de filtrage L_f .

Les paramètres avec lesquels on a simulé le FAP à base d'onduleur à 5 niveaux sont inscrits dans le tableau III.2.

Paramètre	Valeur numérique	
Réseau électrique	E_s	220 V (valeur efficace simple)
	Fréquence f	50 Hz
	Inductance L_s	0.0015 H
Charge perturbatrice (polluante)	Résistance R_1	$R_1 = 10 \Omega$ pour $t \in [0,0.7]$ sec $R_1 = 5 \Omega$ pour $t \in [0.7,1.5]$ sec
	Inductance L_1	0.005 H
	Résistance R_2	$R_2 = 1000 \Omega$ pour $t \in [0,1.1]$ sec $R_2 = 5 \Omega$ pour $t \in [1.1, 1.5]$ sec
	Inductance L_2	0.01 H
Filtre actif parallèle	Inductance L_f	0.004 H
	Tension $V_{dc}(E)$ pour chaque pont	400 V filtre actif non-autonome
Commande MLI	Gain du régulateurs PI des courants du FAP	0.05
	Constante de temps du régulateurs PI des courants du FAP	0.0001
	Fréquence de la porteuse	5000 Hz = 5Khz
Filtre passe-bas du 2 ^{ème} ordre (identification des harmoniques de courant par la méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées)	Gain du filtre passe-bas	1
	Fréquence de coupure du filtre passe-bas	15 Hz
	Coefficient d'amortissement du filtre passe-bas	0.7
Filtre passe-bas du 2 ^{ème} ordre (calcul des valeurs moyennes des courants injectés par le FAP)	Gain du filtre passe-bas	1
	Fréquence de coupure du filtre passe-bas	10 Hz
	Coefficient d'amortissement du filtre passe-bas	0.7
Filtre passe-bas du 2 ^{ème} ordre (calcul des valeurs moyennes des tensions de sortie des ponts du FAP)	Gain du filtre passe-bas	1
	Fréquence de coupure du filtre passe-bas	5 Hz
	Coefficient d'amortissement du filtre passe-bas	0.7

Tableau (III-2): Paramètres de simulation d'un filtre actif parallèle à base d'onduleur de tension en ponts en cascades à 5 niveaux .

La figure (III-5) présente la tension triphasée du réseau électrique. Elle est considérée équilibrée et non-significativement perturbée par le courant de la charge polluante. Ce dernier est montré dans la figure (III-6) alors que son spectre harmonique est présenté par la figure (III-7) pour

deux charges différentes. On constate la présence des composantes harmoniques du rang 5, 7, 11, 13, 17, 19 dont les fréquences sont 250 Hz, 350 Hz, 550 Hz, 650 Hz, 850 Hz, 950 Hz, Le taux de distorsion harmonique du courant de la phase 1 de la charge polluante varie (22.95, 19.1, 14) selon la variation des valeurs des charges continues alimentées par les redresseurs, comme présenté dans la figure (III-8).

La figure (III-9) illustre les formes d'onde des courants harmoniques triphasés identifiés par la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées accompagnés par les courants injectés par le filtre actif parallèle basé sur un onduleur de tension à 5 niveaux. On constate la bonne concordance du courant harmonique identifié et le courant du FAP pour chaque phase. Cela a conduit à avoir un courant de réseau électrique quasiment sinusoïdal (fig. III-10) où les composantes harmoniques d'ordre $h = 6K \pm 1$ sont significativement réduites (fig. III-11) et le THD est réduit à moins de 2 % (fig. III-12).

Il faut aussi noter que les courants injectés par le filtre sont symétriques, (figure III-10), présentant ainsi des valeurs moyennes, calculées sur une période de la tension du réseau, nulles (figure (III-13)).

Les tensions de référence de la commande MLI à échantillonnage naturel ainsi que la porteuse, pour différentes valeurs de la charge à courant continu, sont présentées dans la figure (III-14). Il est clair que ces références changent leurs formes périodiques selon la variation du courant harmonique identifié, mais sont toujours symétriques. Même remarque est constatée pour les tensions de sortie des 6 ponts du FAP qui présentent de très faibles valeurs moyennes comme montre les figures (III-15), (III-16), (III-17) et (III-18). Les tensions simples des trois phases du FAP sont aussi alternatives et symétriques comme illustré dans la figure (III-19).

En comparant ces résultats avec celle du FAP à base d'onduleur de tension à deux niveaux à MLI avec une fréquence de porteuse de 10 kHz, on peut conclure que la qualité du courant injecté par le FAP basé sur un onduleur à 5 niveaux commande MLI avec une fréquence de 5 kHz est meilleure, et par conséquent le courant du réseau électrique est de plus faible THD.

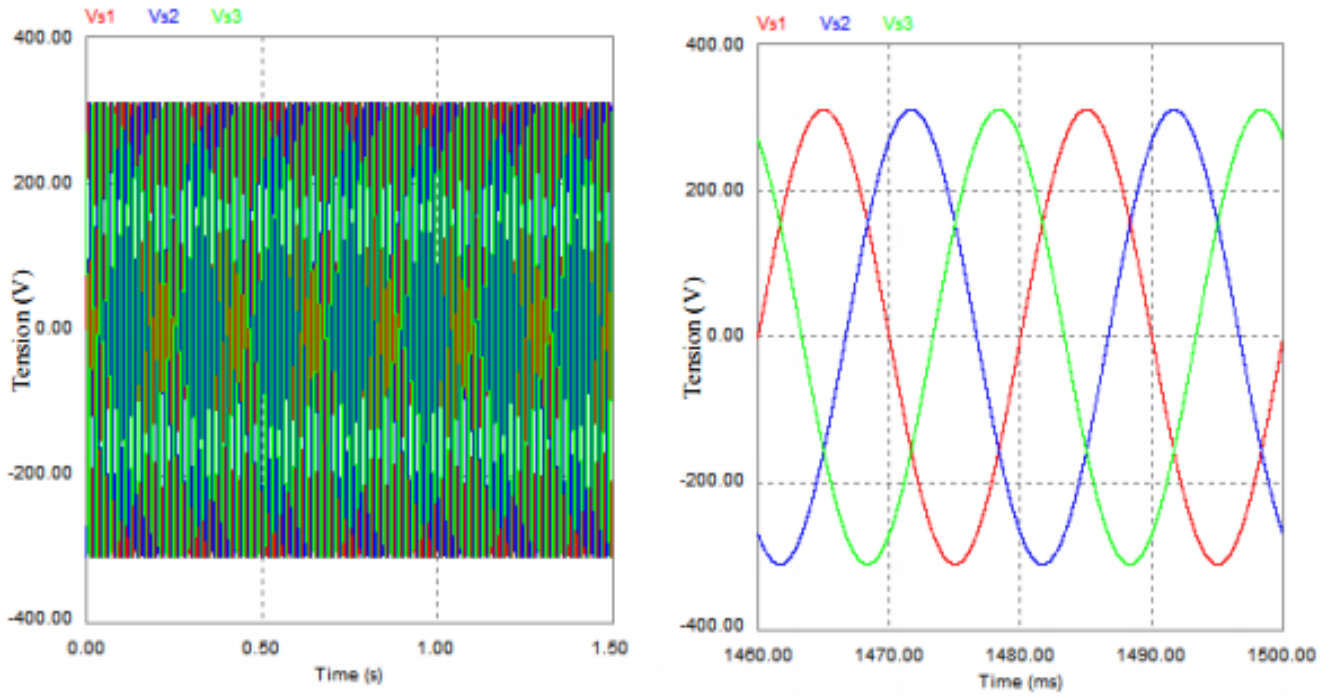


Figure (III-5) : Tension triphasée du réseau électrique

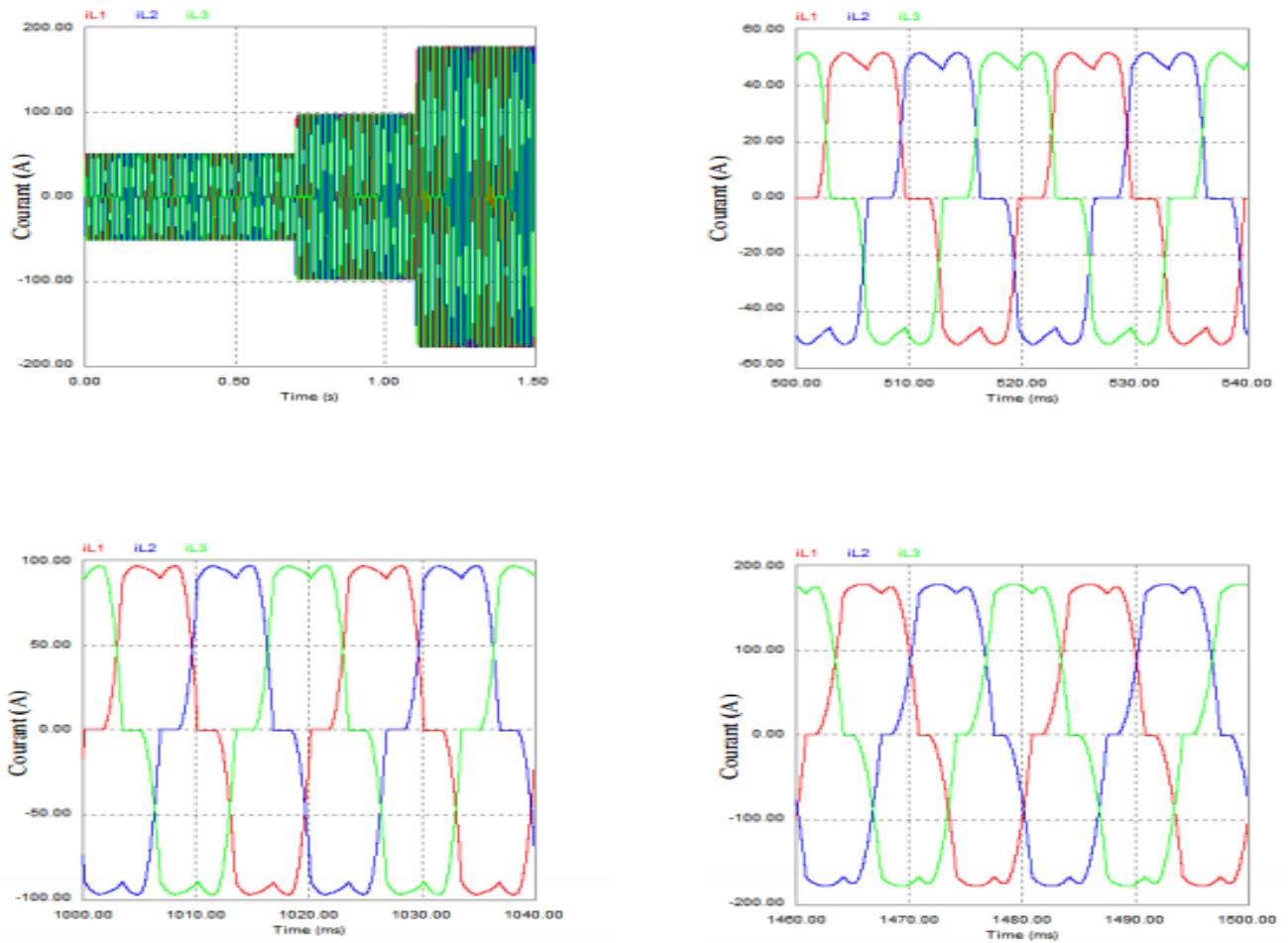
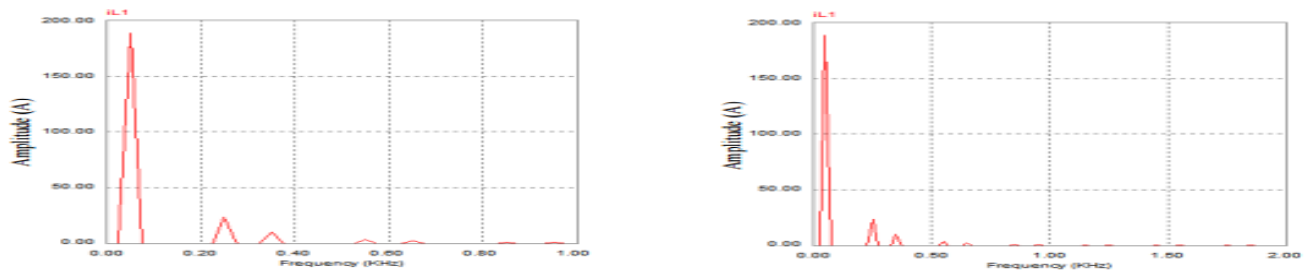


Figure (III-6) : Courant triphasé de la charge polluante

$t \in [1.46, 1.5]$ sec



$t \in [0.5, 0.54]$ sec

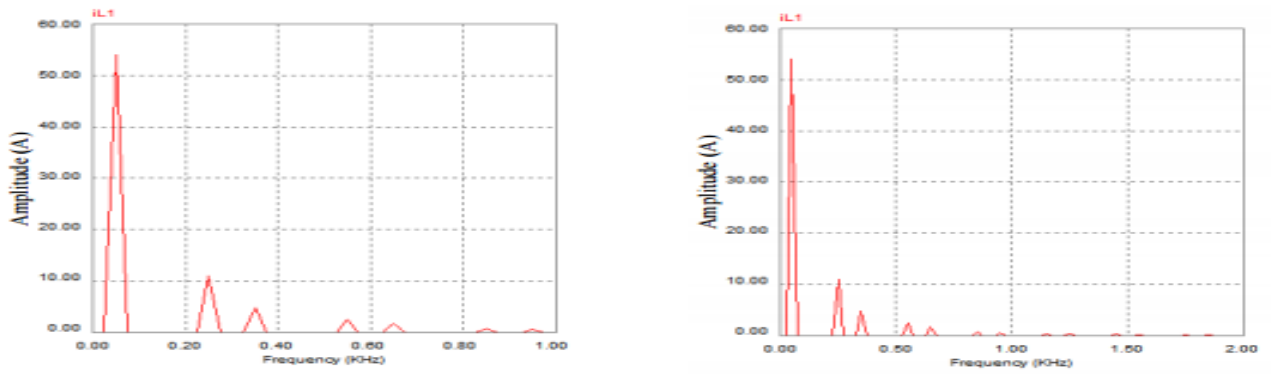


Figure (III-7) : Analyse spectrale du courant de la phase 1 de la charge polluante

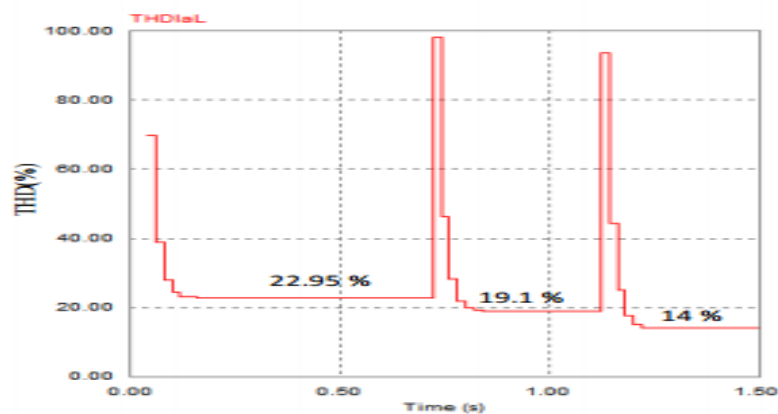


Figure (III-8) : Evolution du taux de distorsion harmonique (THD) du courant de la phase 1 de la charge polluante

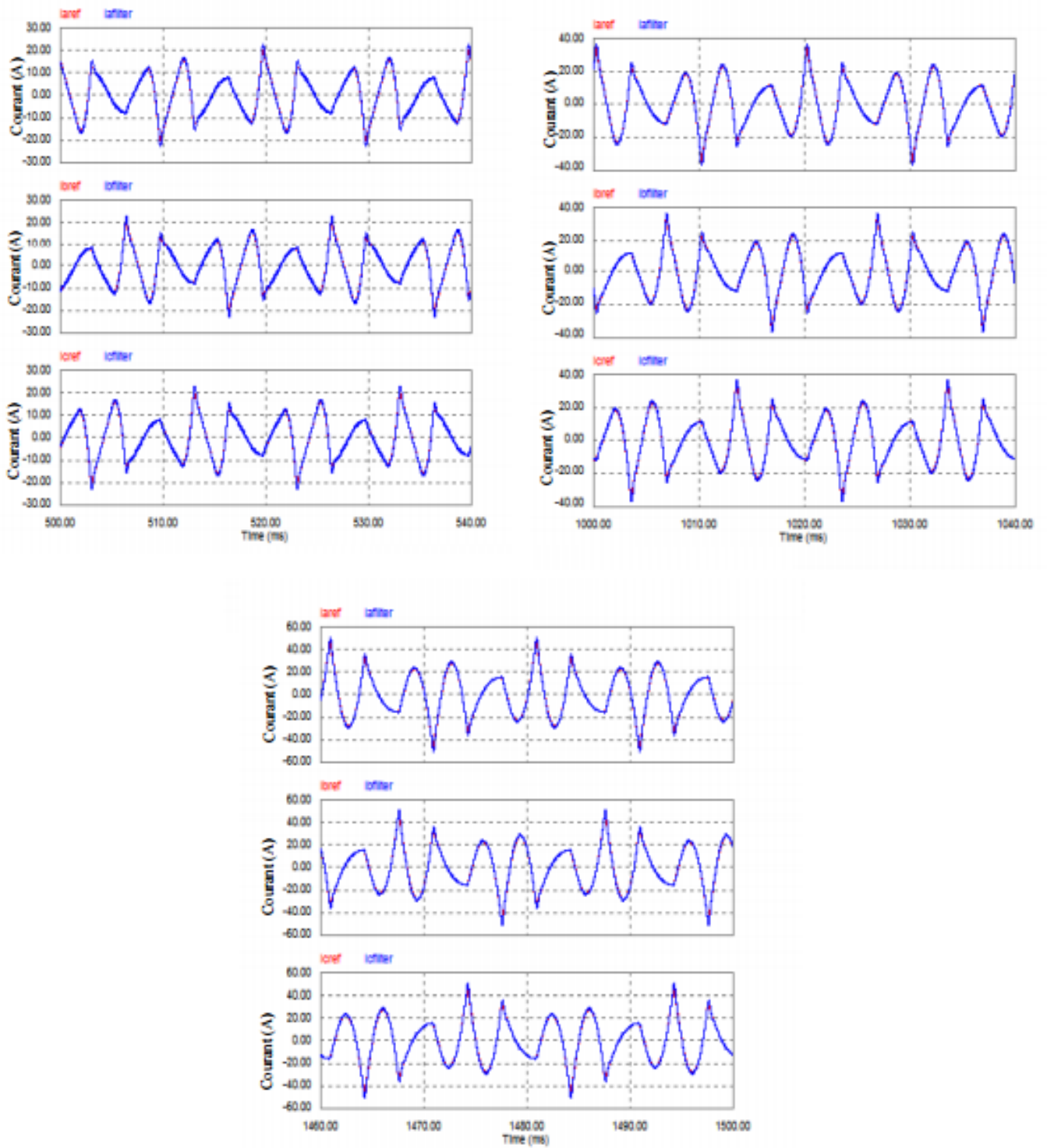


Figure (III-9) : Courant harmonique triphasé identifié par la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées et courant triphasé injecté par le FAPà base d'onduleur de tension à 5 niveaux de type ponts en cascade en mode de fonctionnement sain

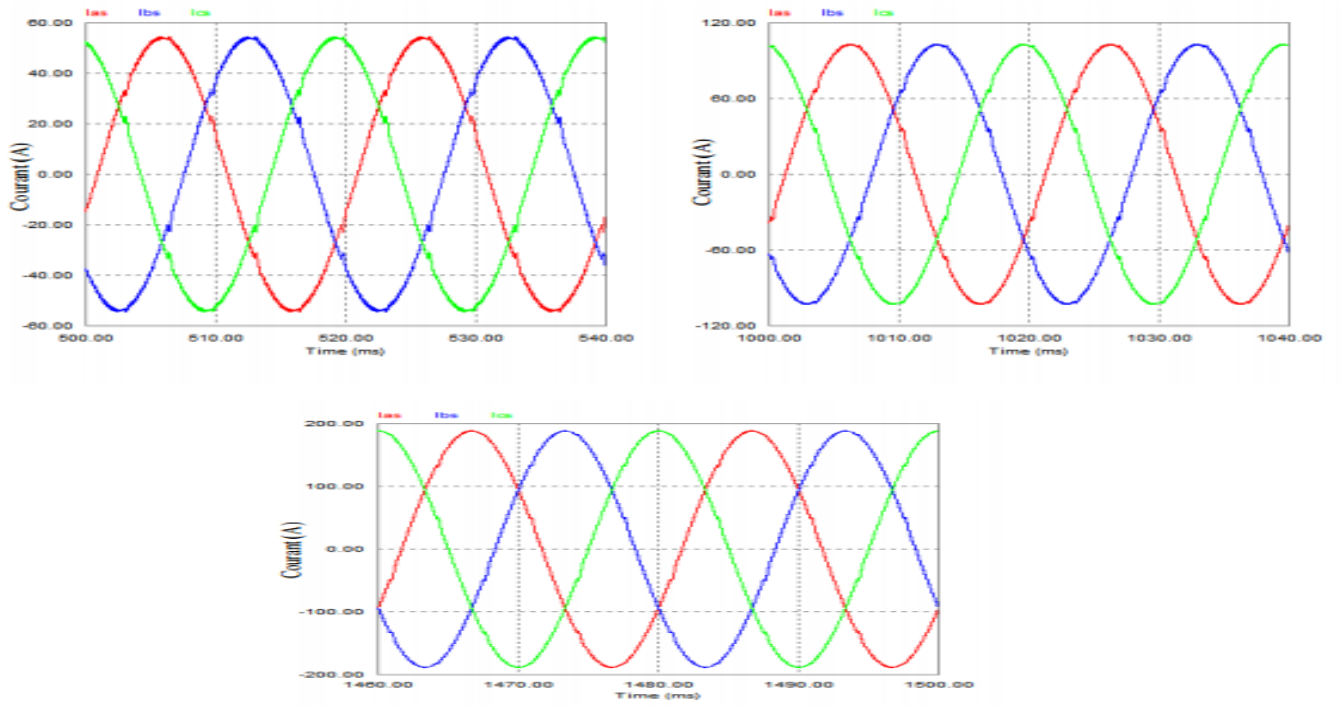
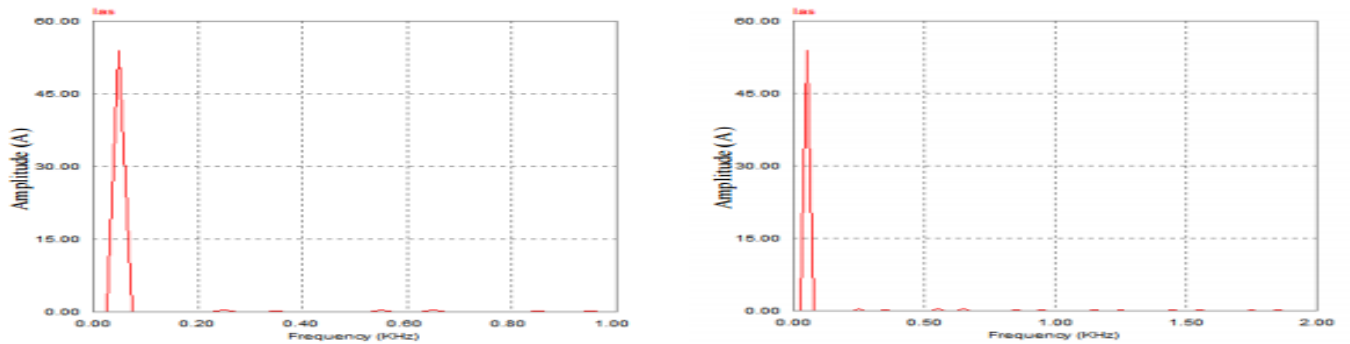


Figure (III-10) : Courant triphasé du réseau électrique après filtrage par un FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux en mode de fonctionnement sain .

$t \in [0.5, 0.54]$ sec



$t \in [1.46, 1.5]$ sec

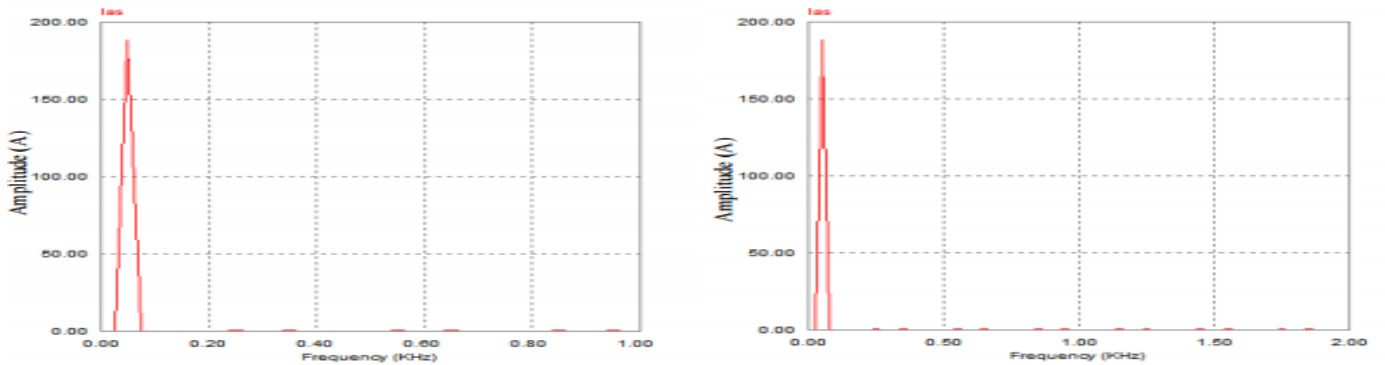


Figure (III-11) : Analyse spectrale du courant de la phase 1 du réseau électrique après filtrage par un FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux en mode de fonctionnement sain.

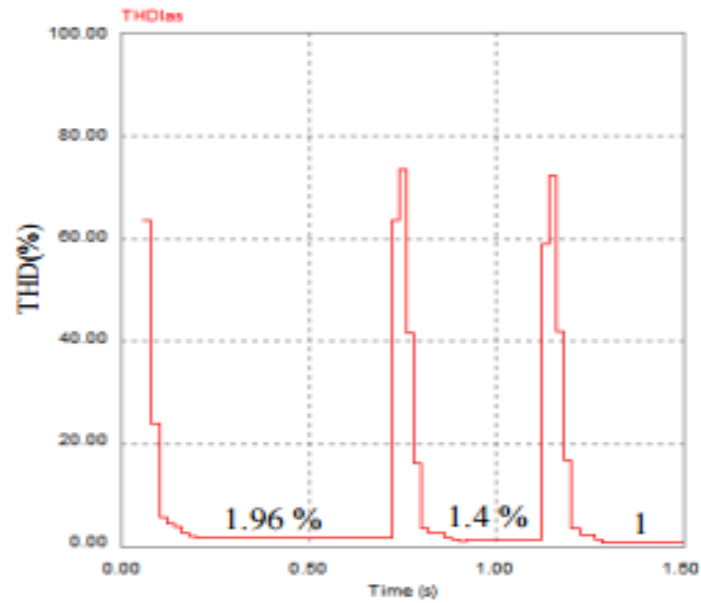


Figure (III-12) : Evolution du taux de distorsion harmonique (THD) du courant de la phase 1 du réseau électrique après filtrage par un FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux en mode de fonctionnement sain

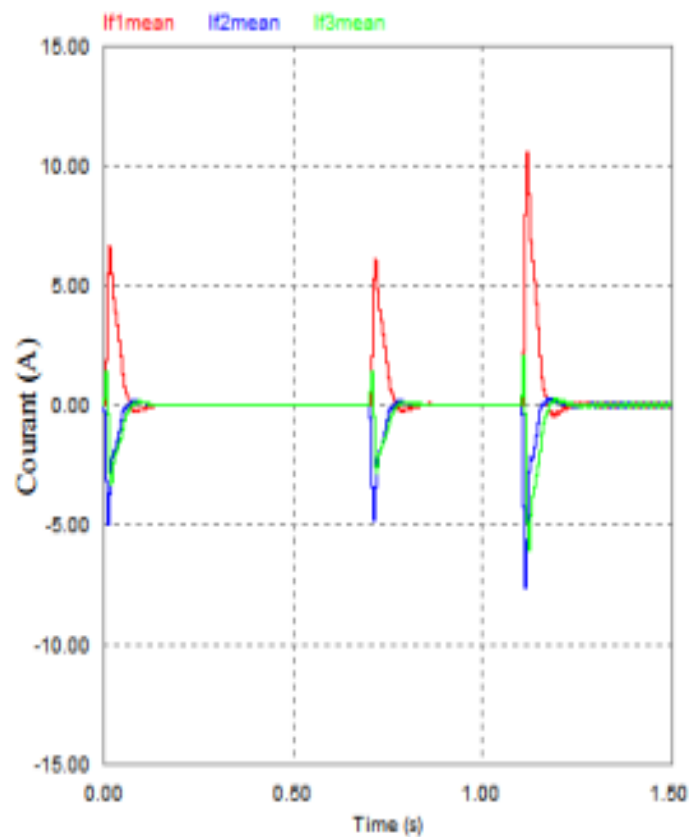


Figure (III-13) : Valeurs moyennes des courants de phase injectés par le FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux en mode de fonctionnement sain

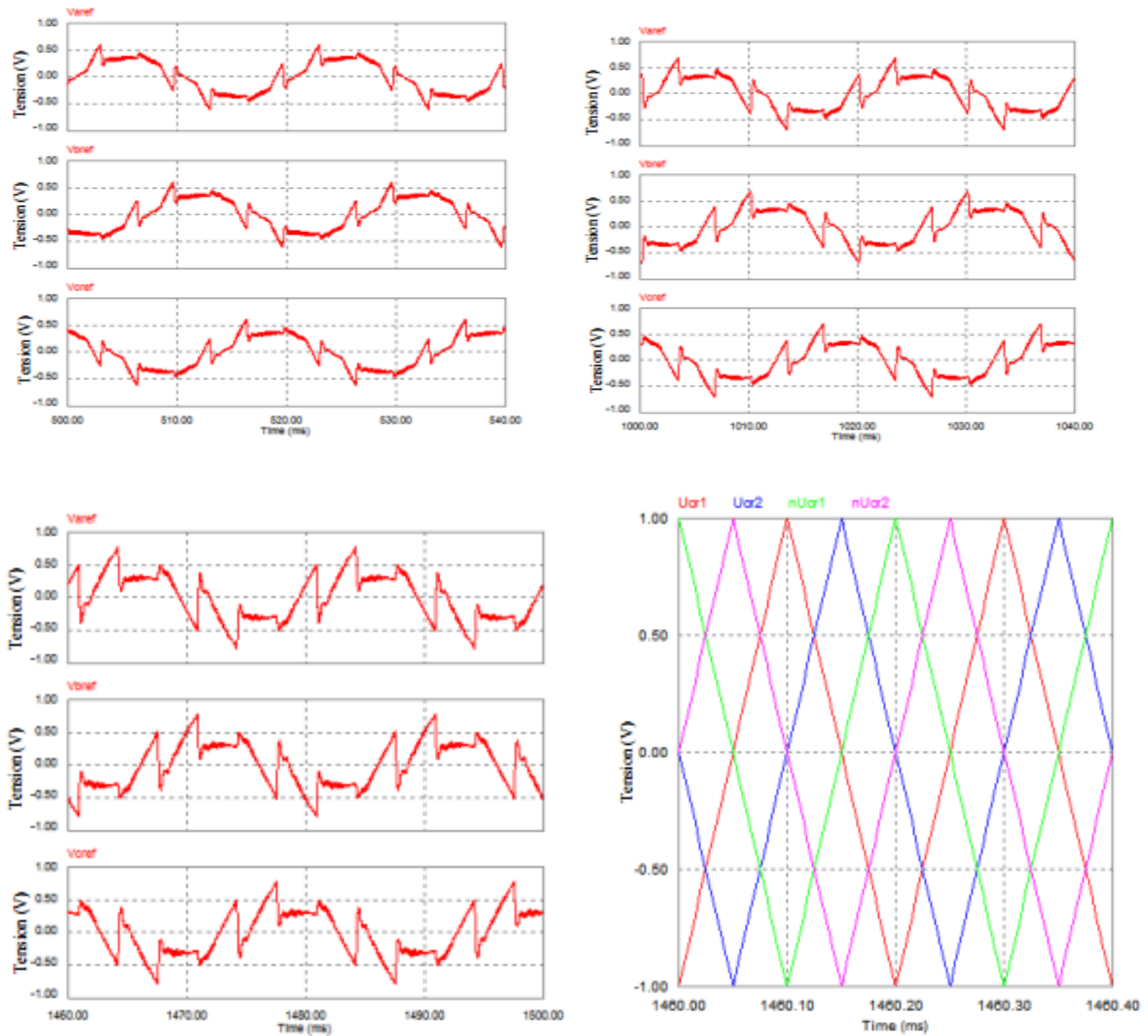


Figure (III-14) : Tensions de référence et porteuse de la commande MLI du FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux en mode de fonctionnement sain

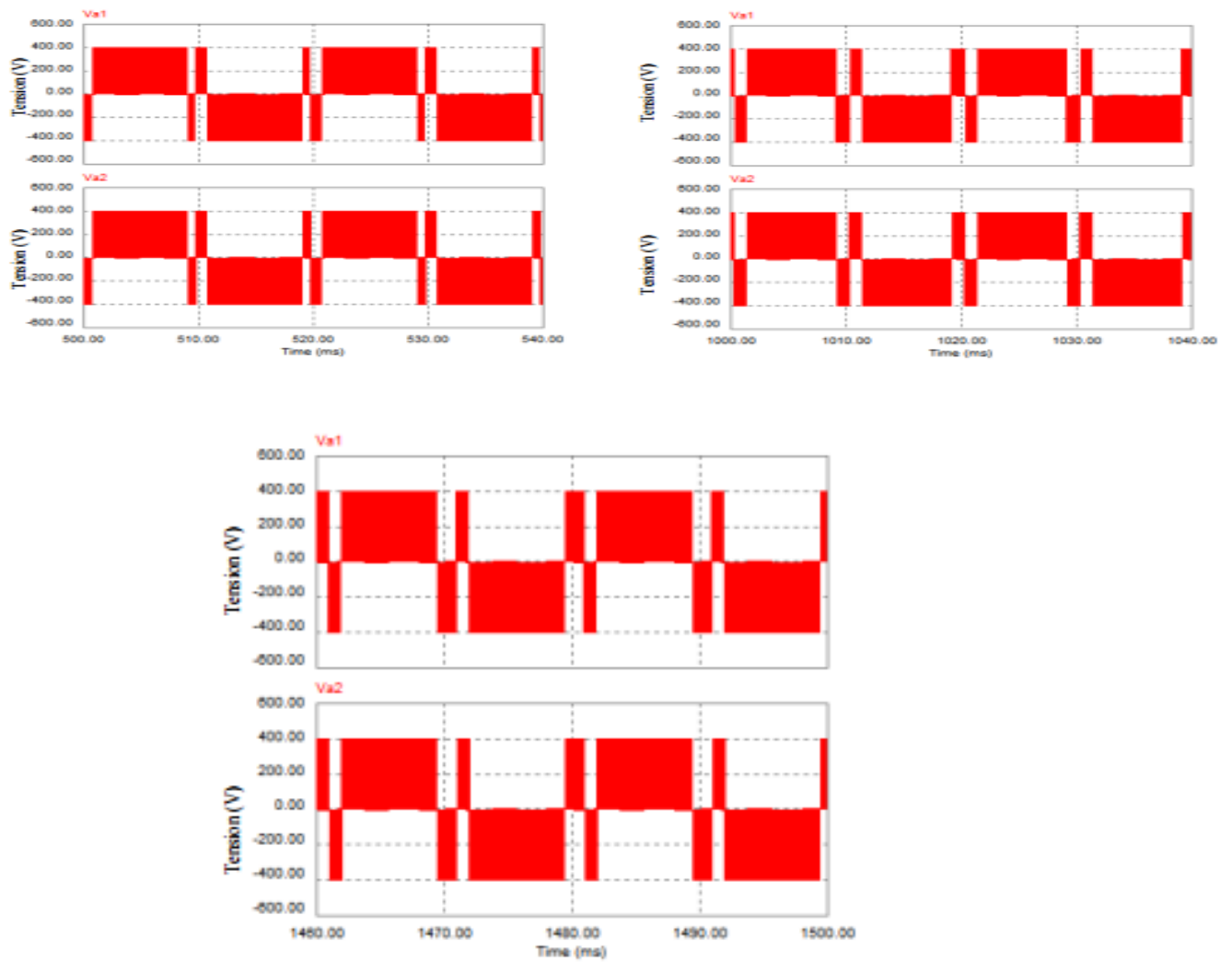


Figure (III-15) : Tensions de sortie des deux ponts de la phase 1 du FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux en mode de fonctionnement sain .

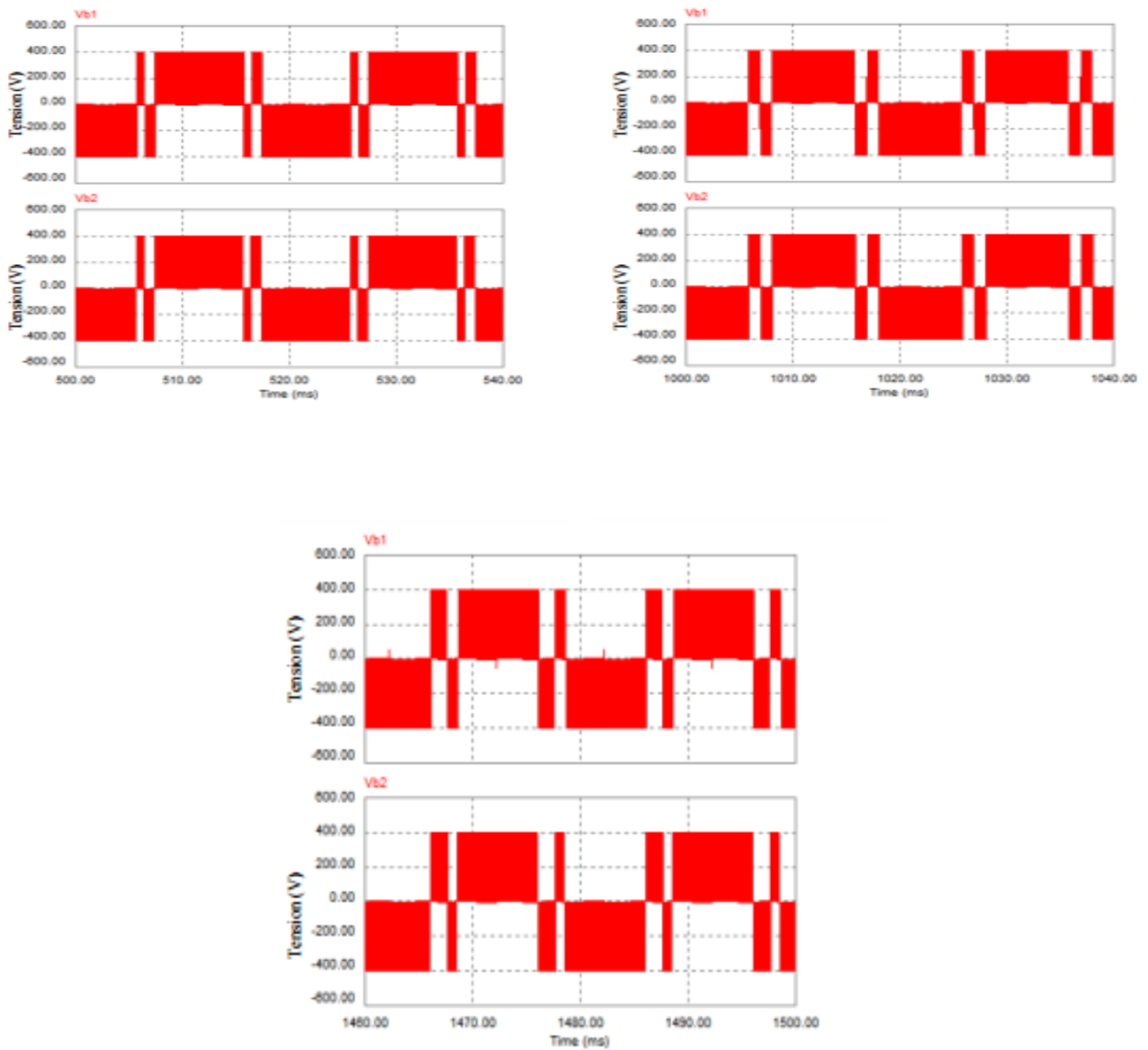


Figure (III-16) : Tensions de sortie des deux ponts de la phase 2 du FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux en mode de fonctionnement sain

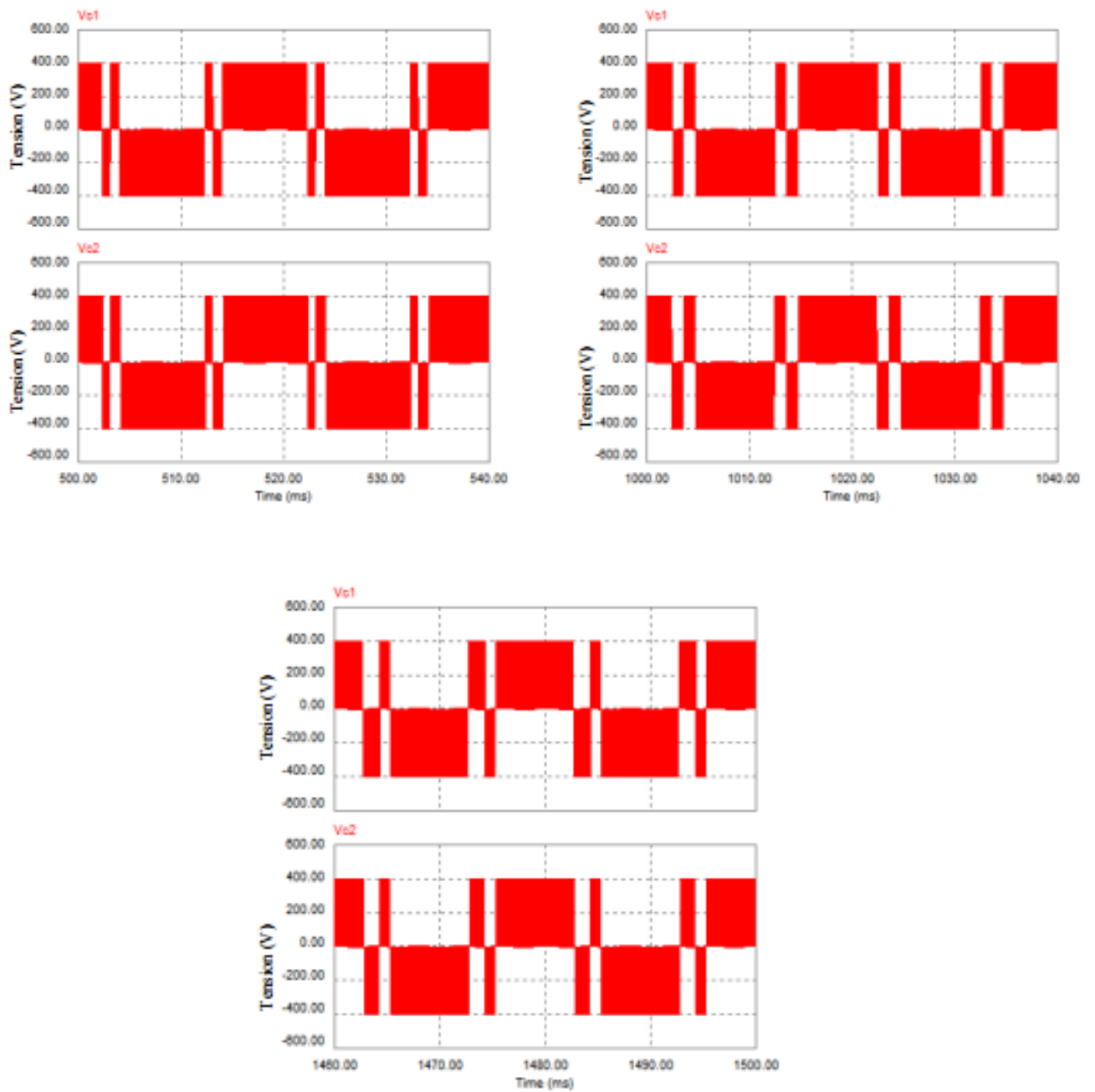


Figure (III-17) : Tensions de sortie des deux ponts de la phase 3 du FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux en mode de fonctionnement sain

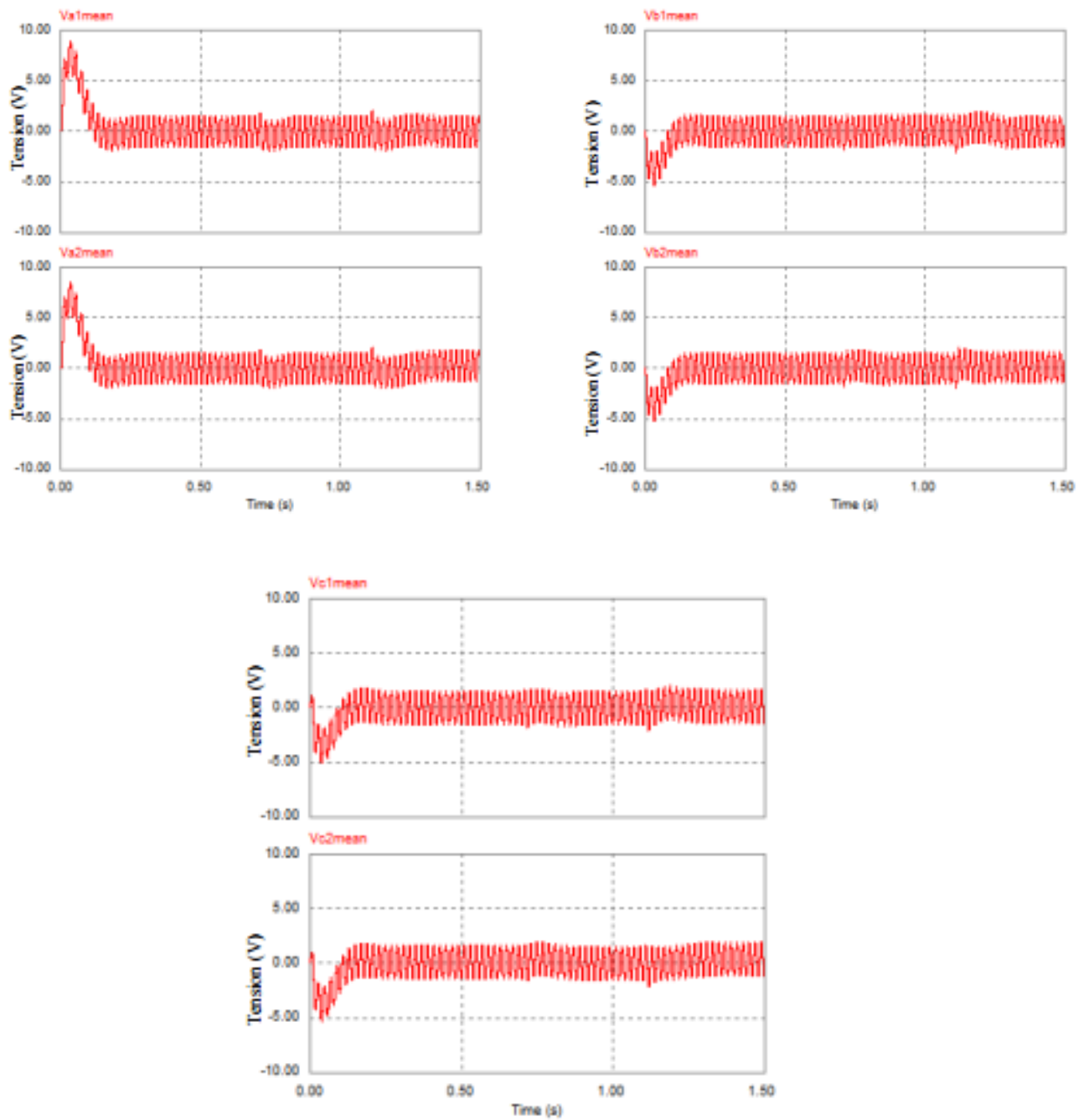


Figure (III-18) : Valeurs moyennes des tensions de sortie des 6 ponts du FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux en mode de fonctionnement sain .

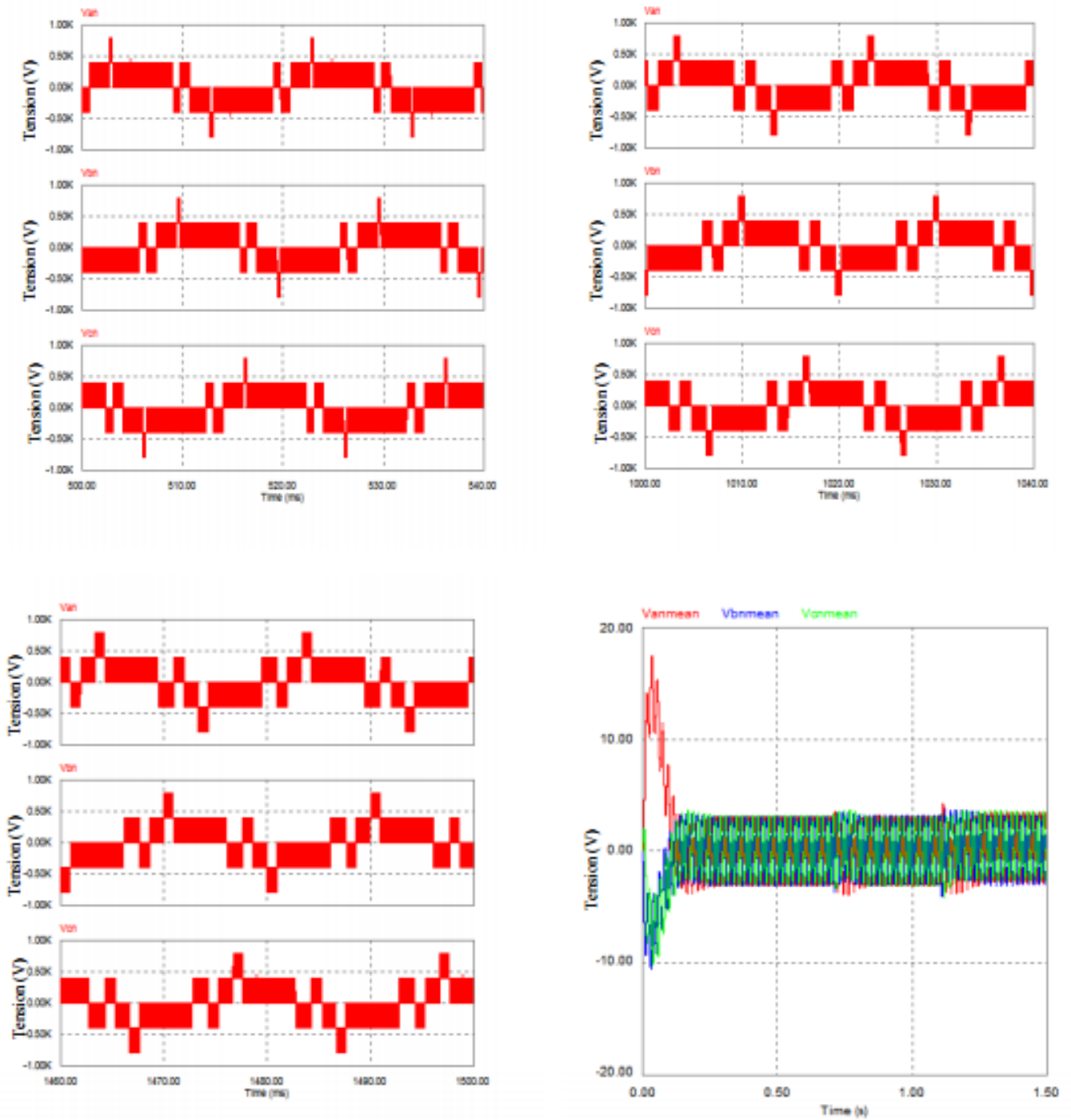


Figure (III-19) : Tensions simples de sortie du FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux en mode de fonctionnement sain et leurs valeurs moyennes

III.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié, en mode de fonctionnement sain, le filtre actif parallèle à base d'onduleur de tension à cinq niveaux du type ponts en cascade pour différentes charges polluantes.

Différentes grandeurs électriques du FAP, en mode sain, sont présentées et commentées telles que : les courants harmoniques identifiés par la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées, les courants injectés par le FAP, les valeurs moyennes des courants injectés par le FAP, les valeurs moyennes des tensions de sortie du FAP et les tensions de référence de la commande MLI du FAP. Dans le chapitre suivant, ces mêmes grandeurs seront observées, dans le mode de fonctionnement dégradé, pour les mêmes conditions de charge polluante et de réseau électrique.

Chapitre IV. Etude du filtre actif parallèle à cinq niveaux en mode de fonctionnement dégradé

IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous allons étudier le cas du filtre actif parallèle en mode dégradé (transistor maintenu ouvert) pour choisir les variables indicateurs de défaut et proposer une méthode de détection et localisation de défaut au niveau du filtre actif parallèle.

IV.2. Analyse du comportement d'onduleur à 5 niveaux en mode dégradé :

Pour un onduleur de tension à 5 niveaux de type ponts en cascade en mode sain, le courant positif de la phase 1 (i_{f1}) dans le pont H11 peut être croissant et conduit par T11 et T12 produisant une tension $V_{A1} = E$ ou décroissant et conduit soit par T12 et D14 ou T11 et D13 produisant une tension $V_{A1} = 0$. Le même courant peut être négatif et croissant de le sens négatif et conduit par T13 et T14 produisant une tension $V_{A1} = -E$ ou décroissant et conduit par soit par T14 et D12 ou D11 et T13 produisant une tension $V_{A1} = 0$ (Figure (IV-3.a)). Lorsque le transistor T11 est maintenu ouvert, les chemins comportant T11 et T12 ou T11 et T13 ne sont plus accessibles (T11 est ouvert). Le seul chemin du courant i_{f1} positif sera celui comportant T12 et D14, or celui-ci est considéré comme un chemin de i_{f1} positif décroissant dans le mode sain ($V_{A1} = 0$). Cependant, dans le cas dégradé (T11 maintenu ouvert), le courant i_{f1} peut prendre le même chemin (T12 et D14), et soit croissant par l'application d'une tension positive à la sortie du pont H12 ($V_{10} = E$), même si la tension de sortie du pont H11 est nulle ($V_{A1} = 0$) (Figure (IV- 3.b)). Ces remarques peuvent être étendues au cas où le courant i_{f1} soit négatif lors du défaut d'un transistor T13. L'analyse du comportement du FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux est détaillée en plus dans la partie réservée à la simulation de ce système.

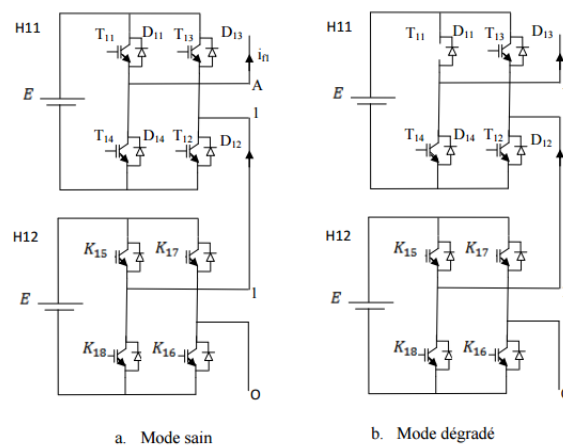


Figure (IV-1) : Configuration d'onduleur à tension à 5 niveaux de type ponts en cascade en mode de fonctionnement sain et en mode dégradé (transistor T11 maintenu ouvert)

IV.3. Résultats de simulation :

IV.3.1. Résultats de simulation pour transistor du haut du bras 1 du pont 11de la phase 1 maintenu ouvert (T11 maintenu ouvert) :

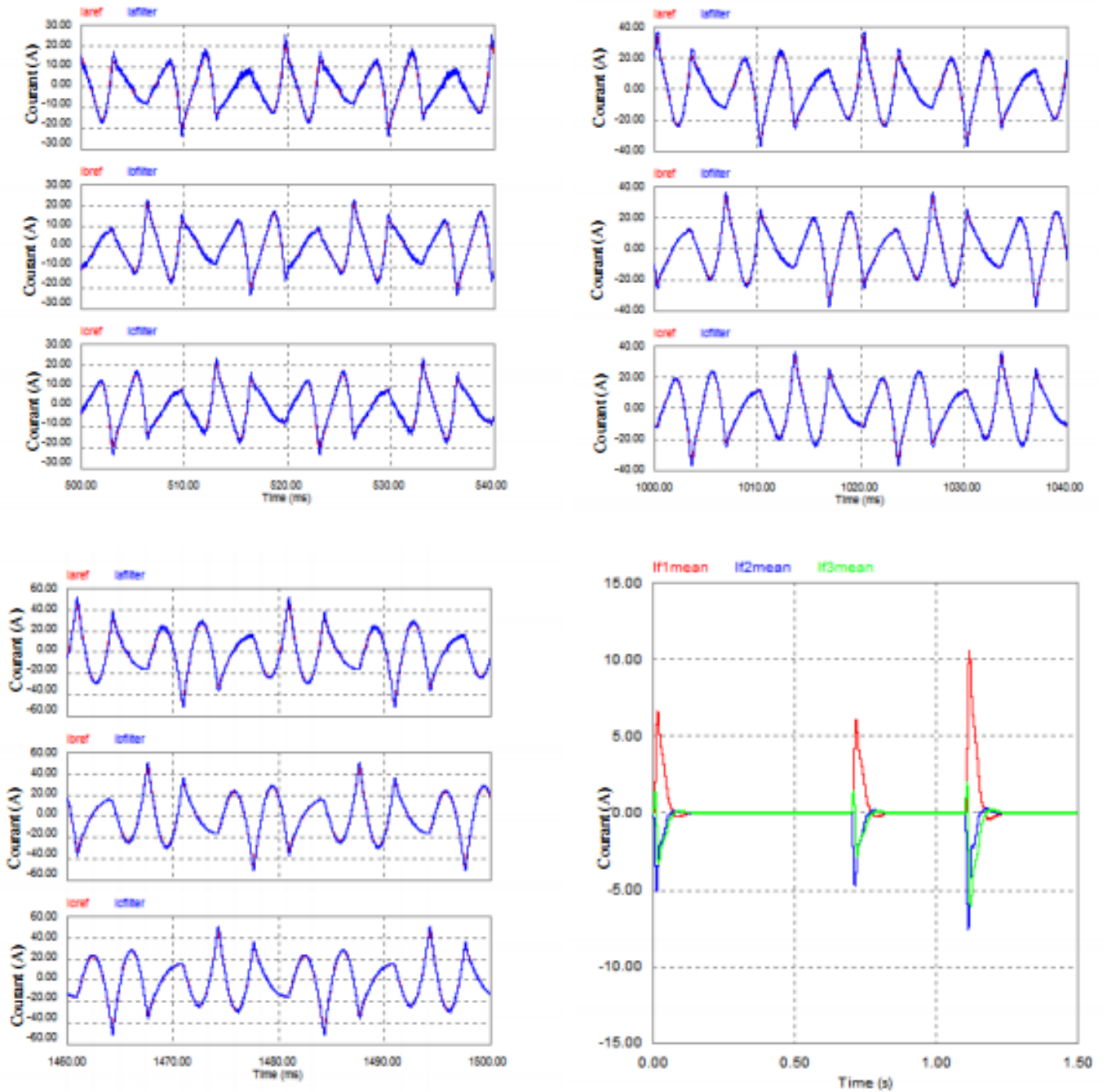


Figure (IV-2) : Courants harmoniques identifiés par la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées et courants injectés par le FAP à base d'onduleur de tension à 5niveaux et leurs valeurs moyennes pour T11 maintenu ouvert

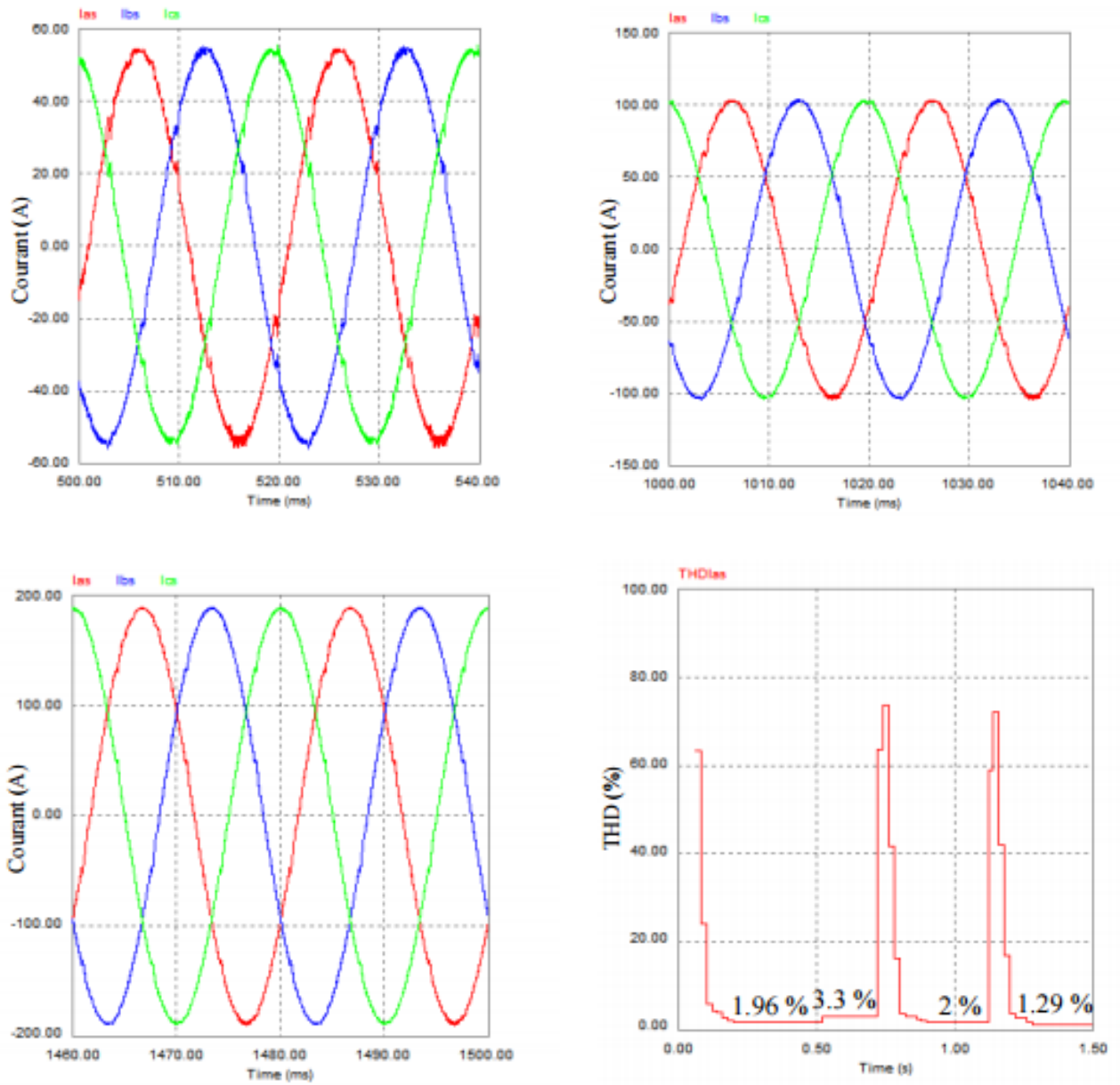


Figure (IV-3) : Courant triphasé du réseau électrique après filtrage par un FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux et THD du courant de la phase 1 pour T11 maintenu ouvert

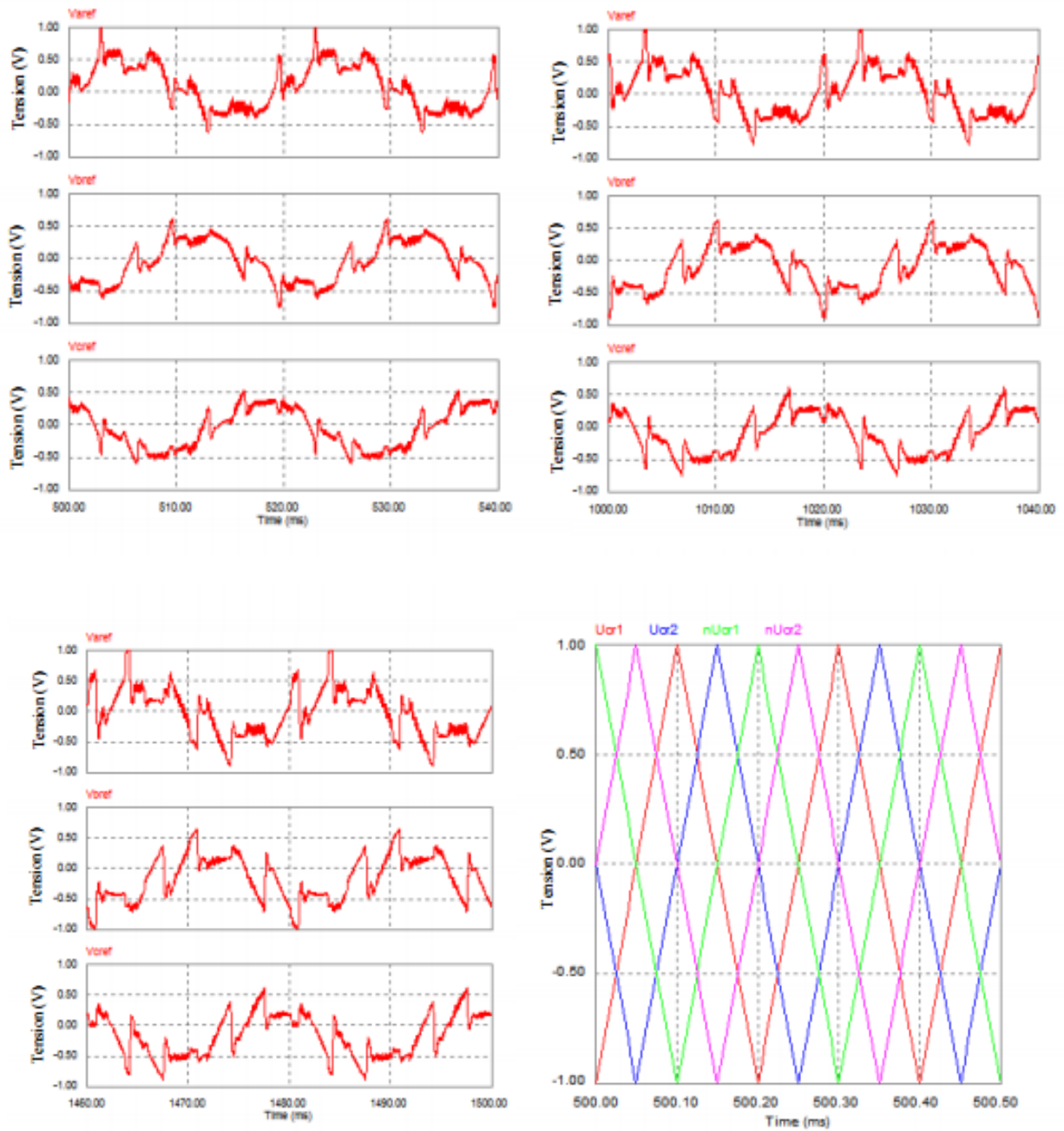


Figure (IV-4) : Tensions de référence et porteuse de la commande MLI du FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux pour T11 maintenu ouvert

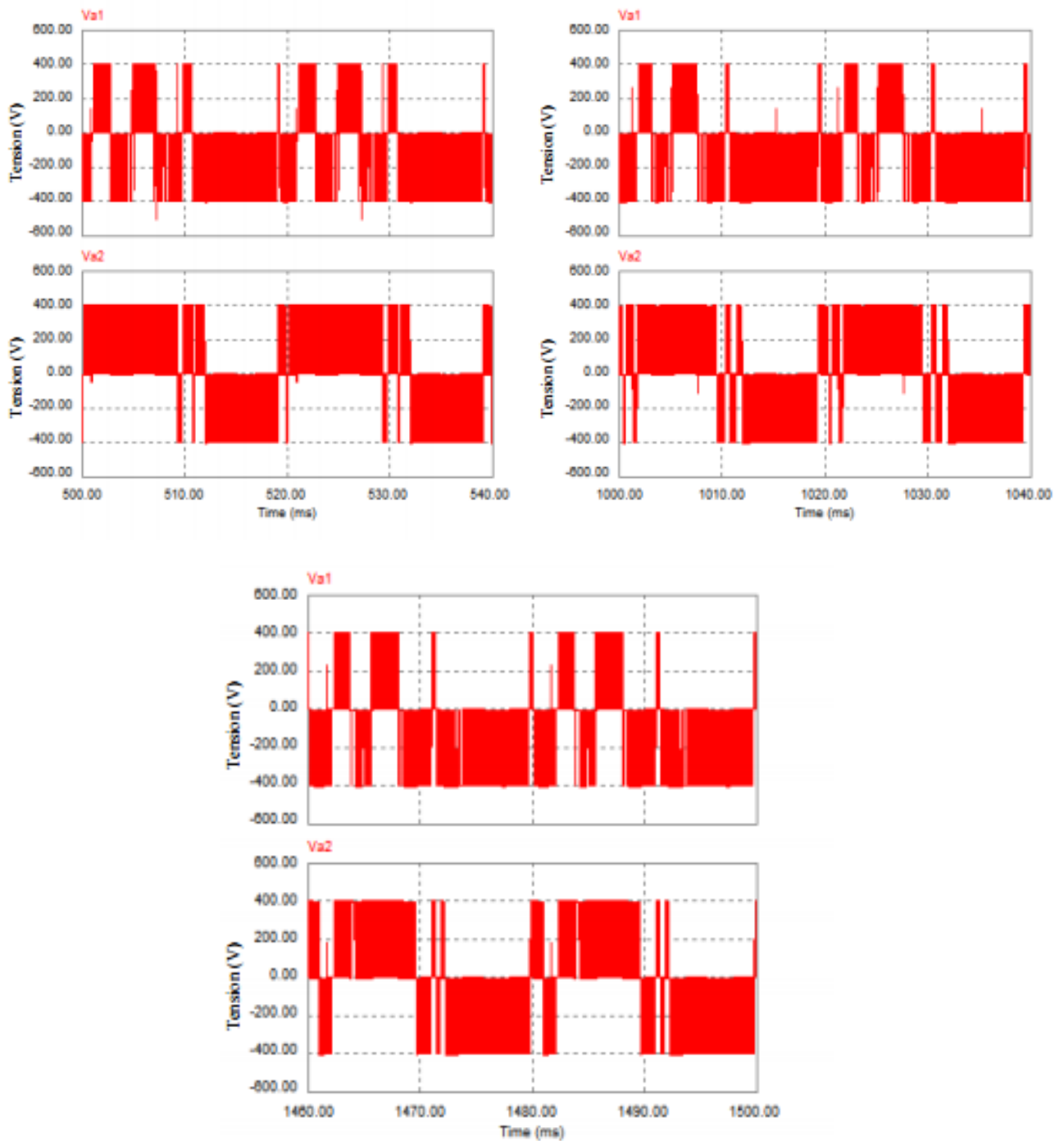


Figure (IV-5) : Tensions de sorties des ponts de la phase1 du FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux pour T11 maintenu ouvert

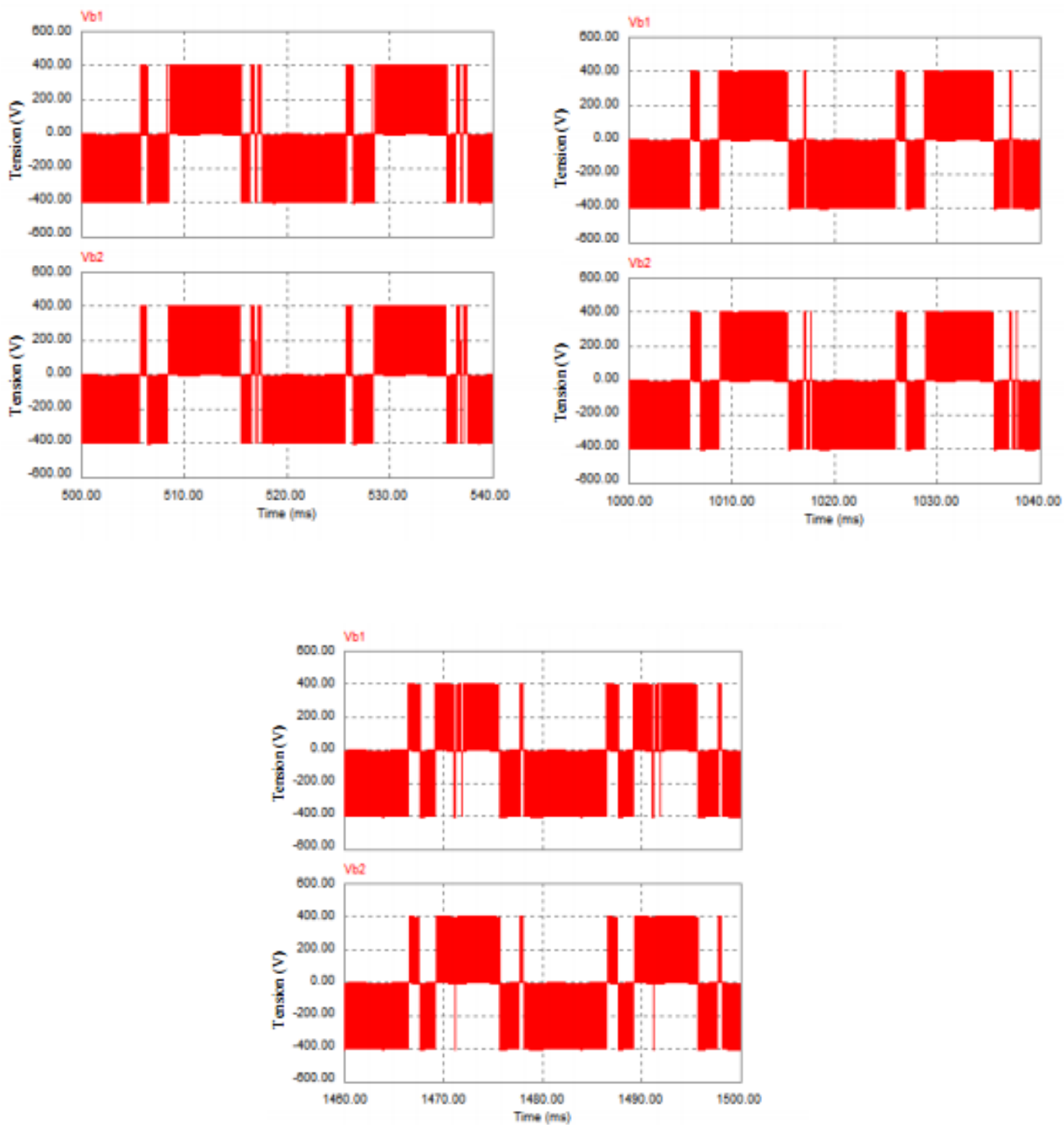


Figure (IV-6) : Tensions de sorties des ponts de la phase 2 du FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux pour T11 maintenu ouvert

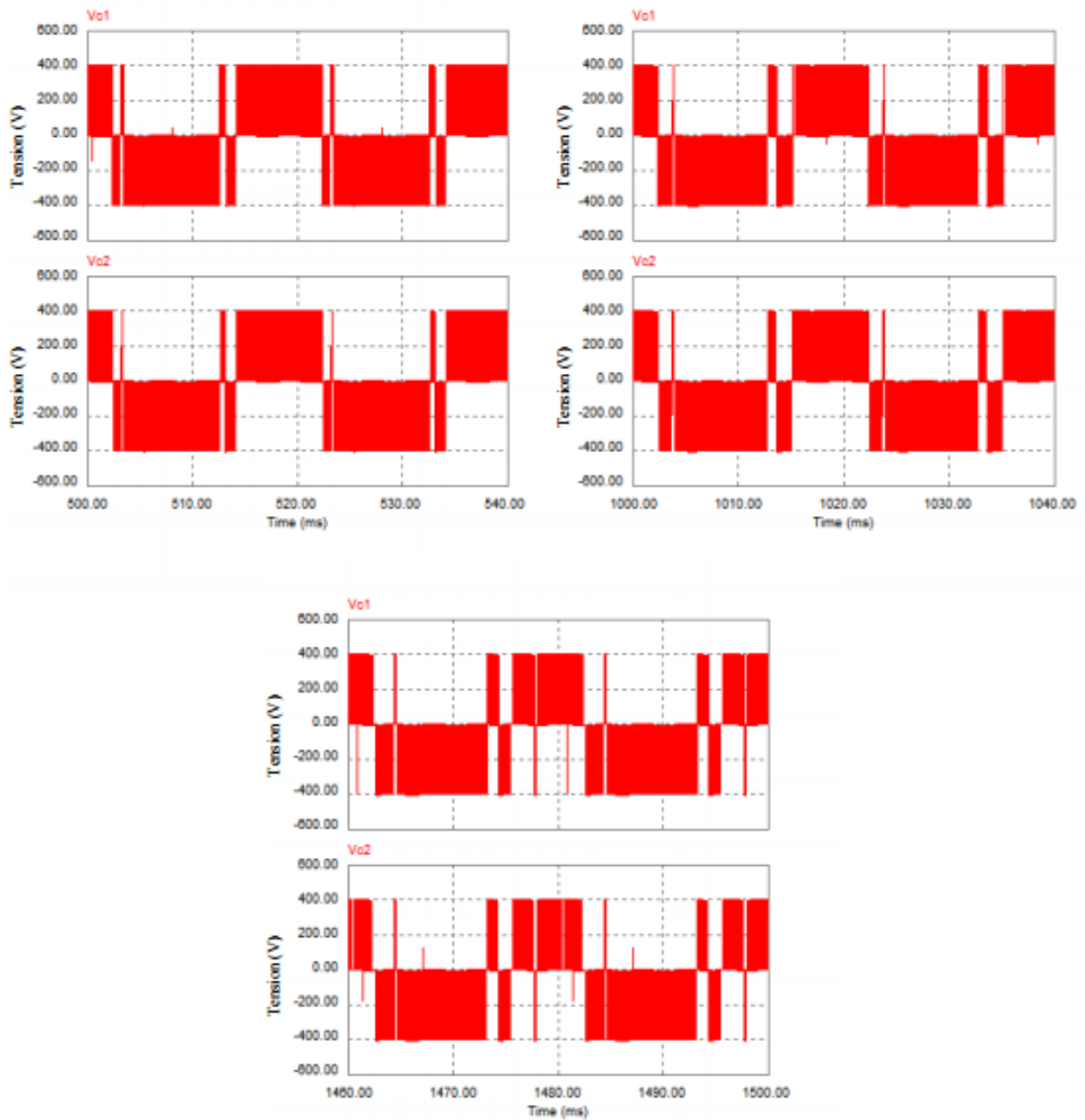


Figure (IV-7) : Tensions de sorties des ponts de la phase 3 du FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux pour T11 maintenu ouvert

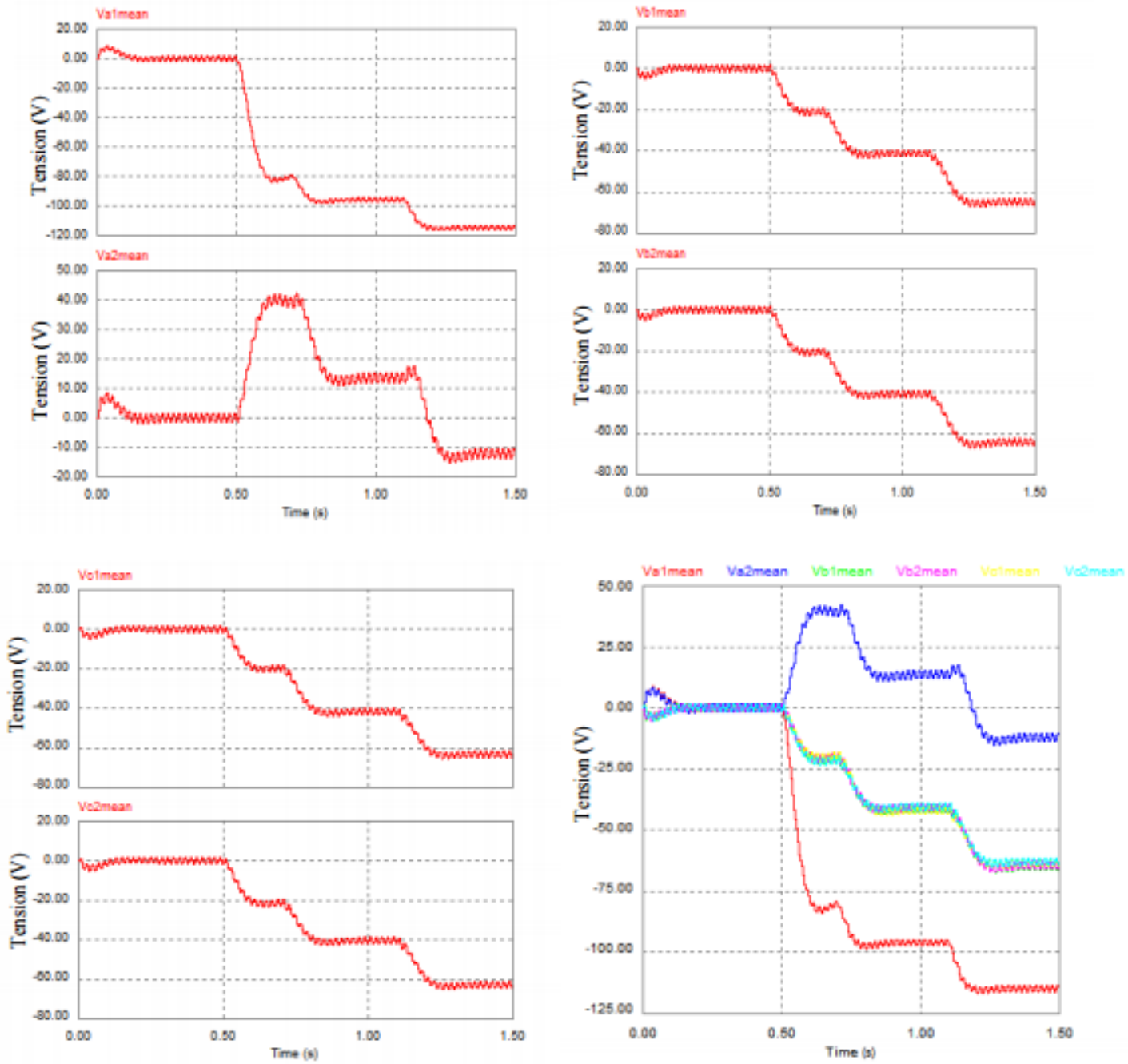


Figure (IV-8) : Valeurs moyennes des tensions de sorties des 6 ponts du FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux pour T11 maintenu ouvert

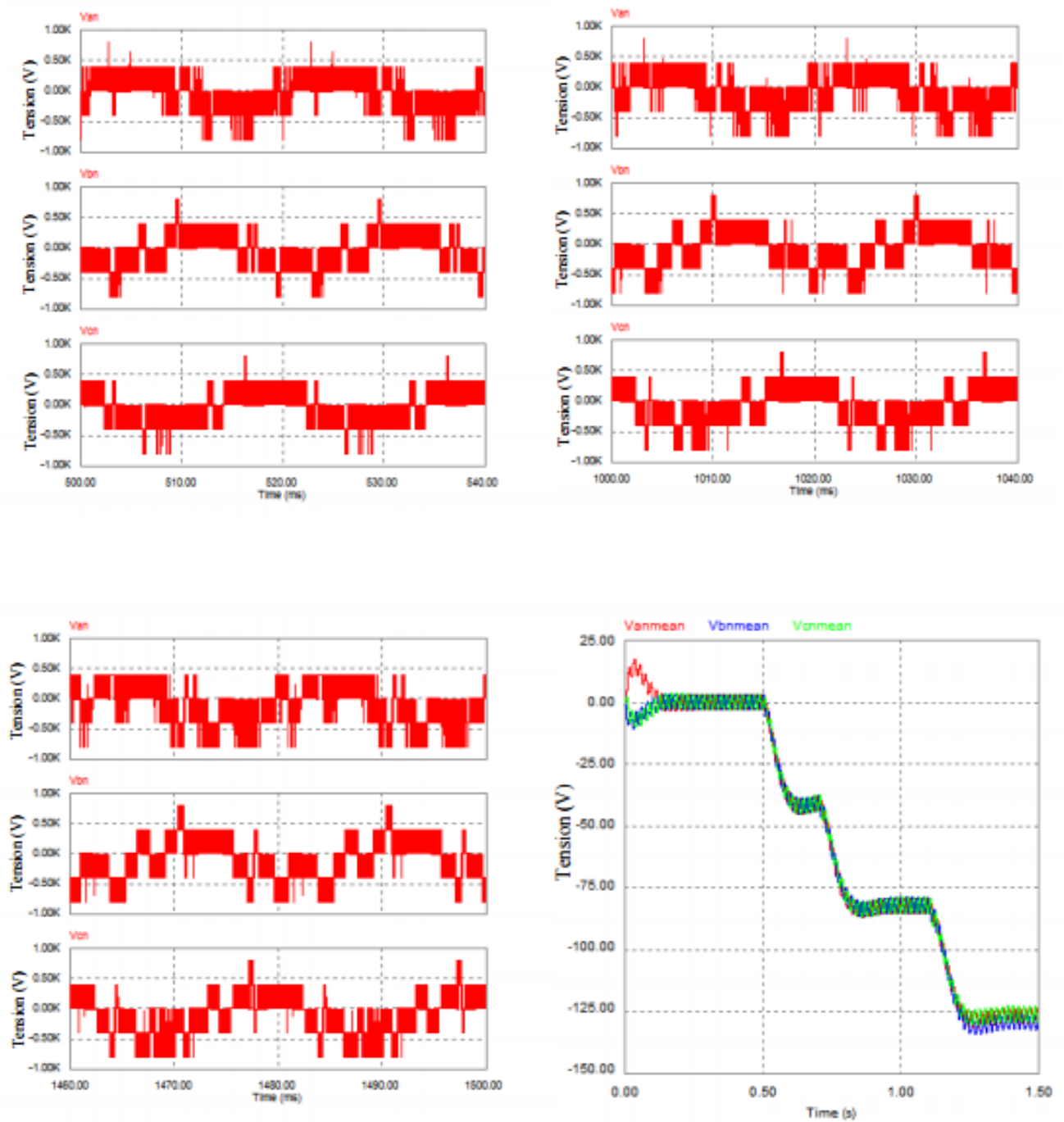


Figure (IV-9) : Tensions simples de sortie du FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux et leurs valeurs moyennes pour T11 maintenu ouvert

IV.3.2. Résultats de simulation pour transistor du haut du bras 2 du pont 11 de la phase 1 maintenu ouvert (T13 maintenu ouvert)

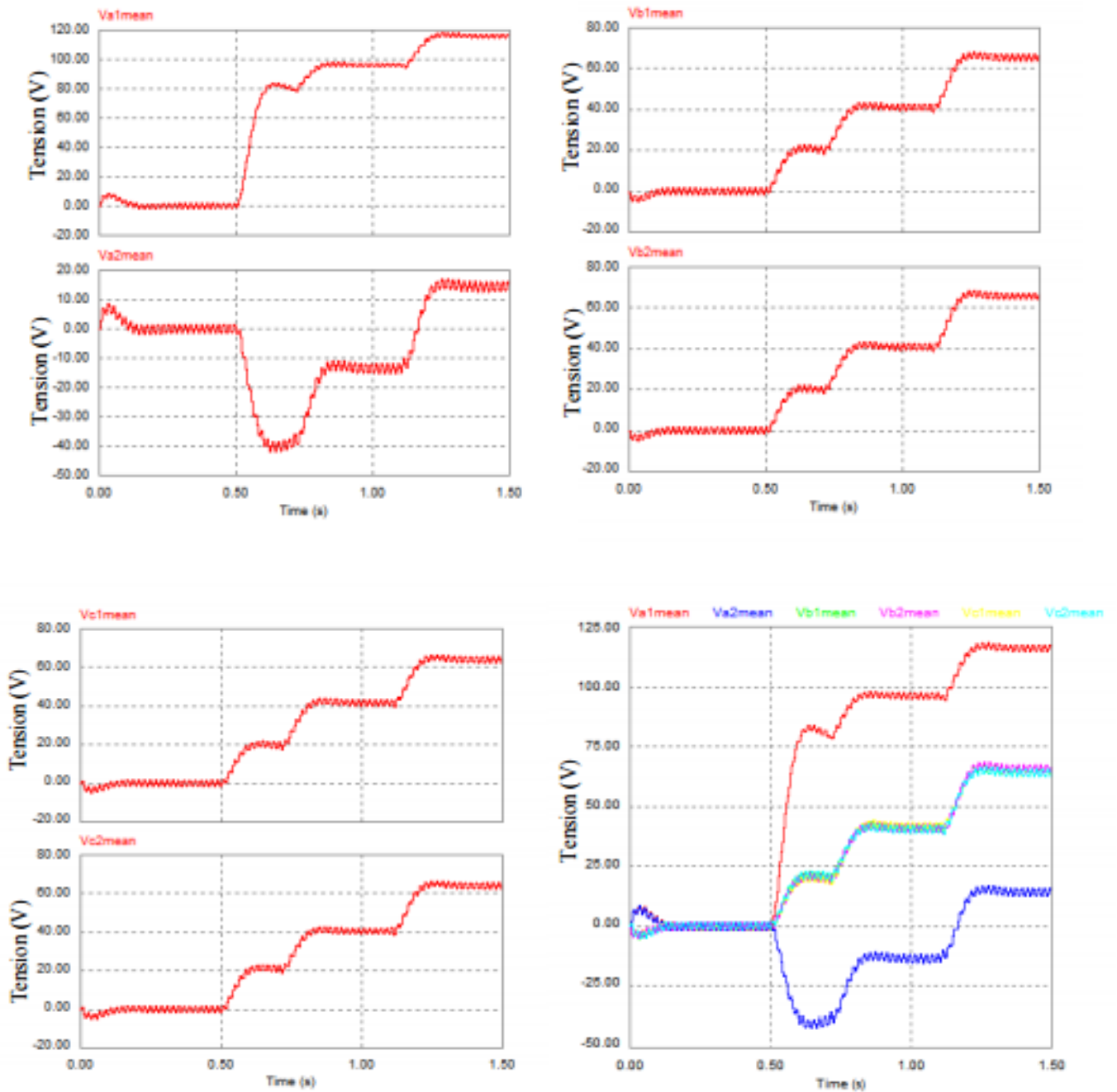


Figure (IV-10) : Valeur moyenne des tensions de sorties des 6 ponts du FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux pour T13 maintenu ouvert

IV.3.3. Résultats de simulation pour transistor du bas du bras 1 du pont 11 de la phase 1 maintenu ouvert (T14 maintenu ouvert) :

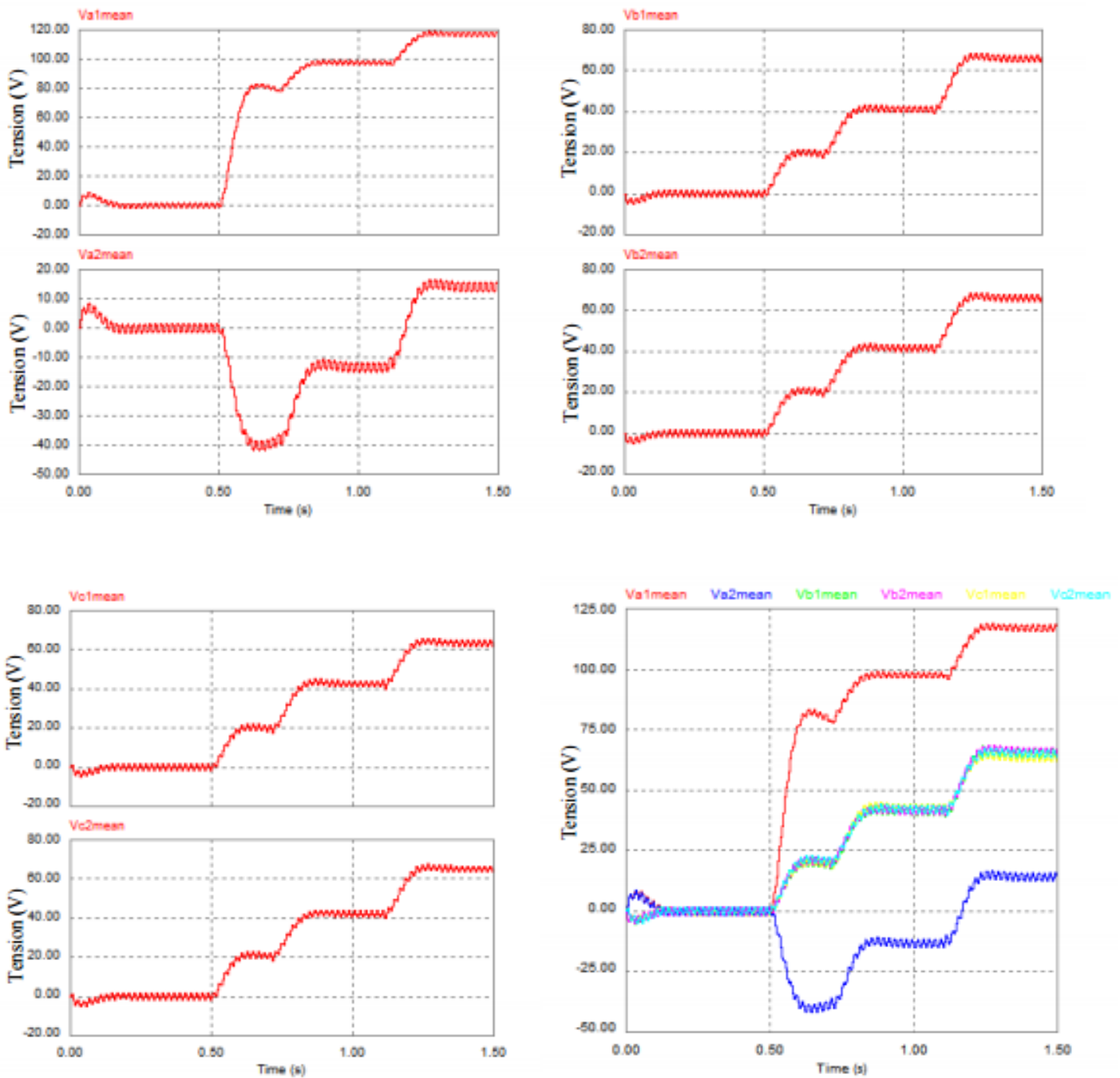


Figure (IV-11) : Valeur moyenne des tensions de sorties des 6 ponts du FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux pour T14 maintenu ouvert

IV.3.4. Résultats de simulation pour transistor du haut du bras 1 du pont 12 de la phase 1 maintenu ouvert (T15 maintenu ouvert) :

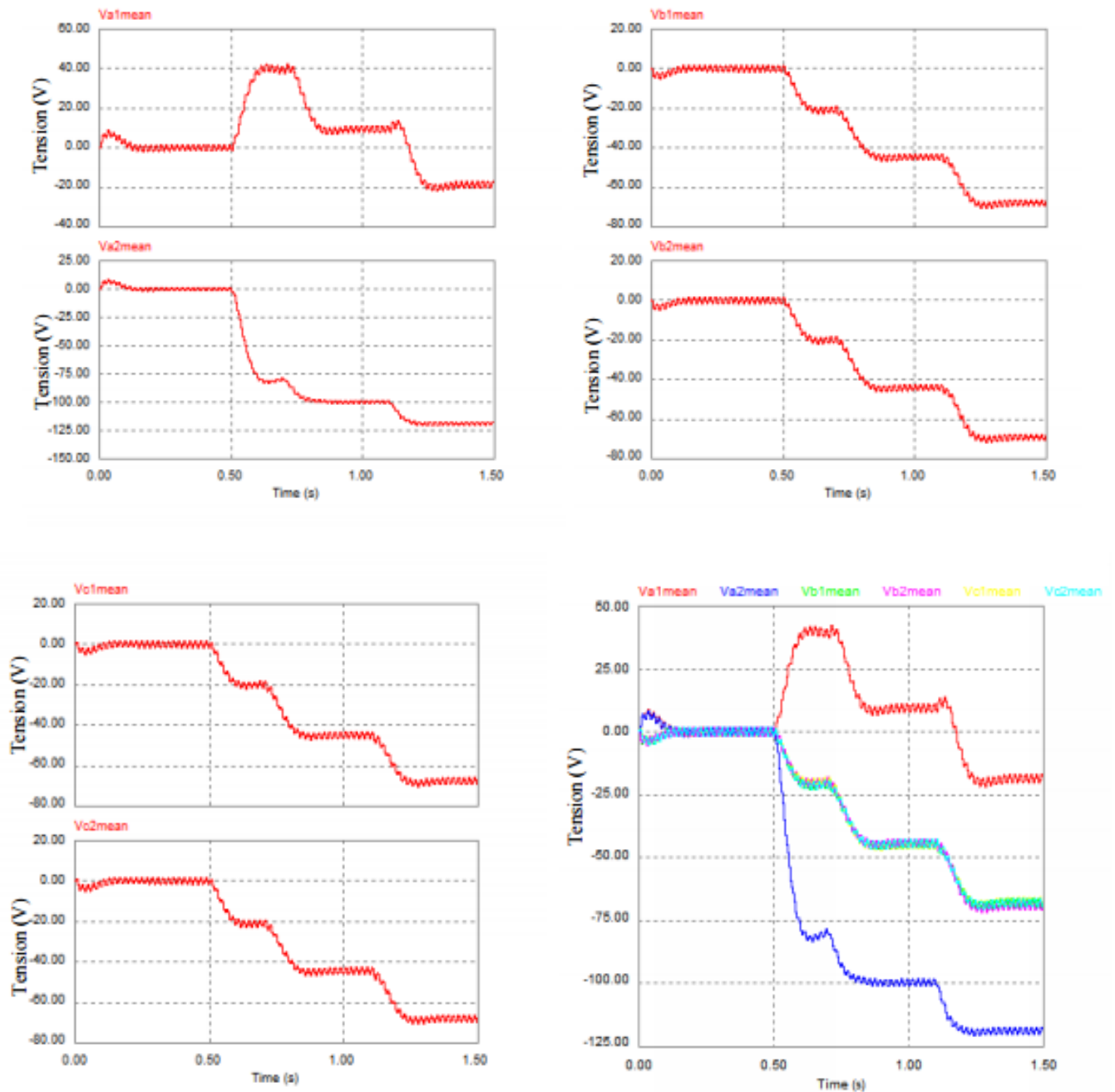


Figure (IV-12) : Valeur moyenne des tensions de sorties des 6 ponts du FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux pour T15 maintenu ouvert

IV.3.5. Résultats de simulation pour transistor du haut du bras 1 du pont 21 de la phase 2 maintenu ouvert (T21 maintenu ouvert) :

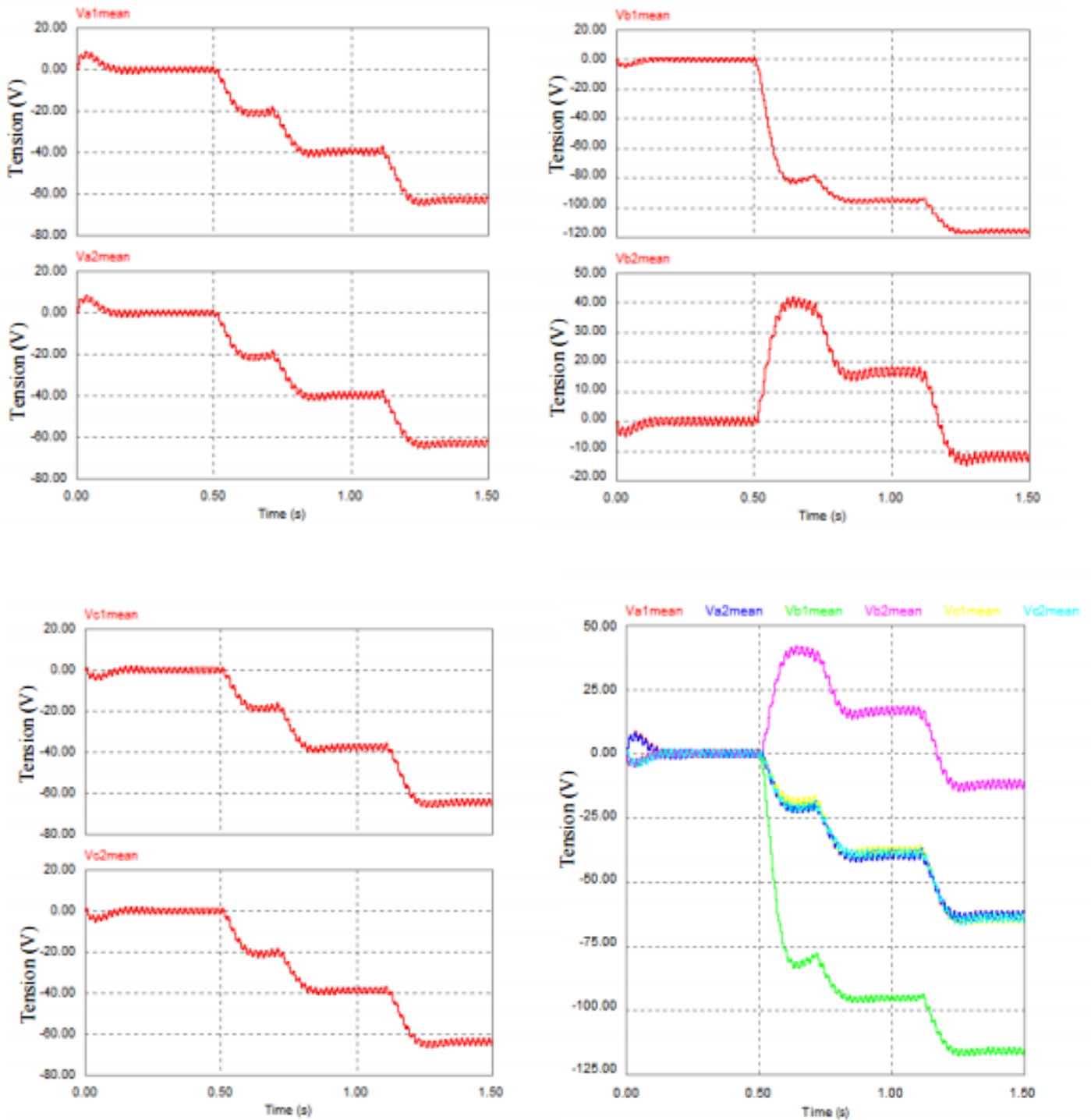


Figure (IV-13) : Valeur moyenne des tensions de sorties des 6 ponts du FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux pour T21 maintenu ouvert

IV.4. Analyse des résultats de simulation en mode dégradé du FAP à base d'onduleur de tension en ponts en cascade à 5 niveaux :

Pour extraire des indicateurs fiables de défauts, on a procédé à l'analyse des résultats de simulation, en mode dégradé (un des transistors de l'onduleur du FAP maintenu ouvert), du FAP à base d'un onduleur de tension 5 niveaux. On a observé l'évolution des différentes grandeurs électriques du FAP. Suite à l'analyse du comportement d'onduleur à 5 niveaux en mode dégradé faite précédemment (paragraphe IV.2.), les simulations menées dans cette partie affirme que pour un FAP non-autonome basé sur un onduleur de tension à 5 niveaux en mode de défaut de type transistor maintenu ouvert:

- Même en présence de défaut, les courants injectés par le FAP suivent leurs références symétriques avec une légère perturbation ((figure (IV-2)). Ces courants ne perdent pas leur symétrie comme dans le cas du FAP à base d'onduleur de tension à 5 niveaux. Cela implique que l'utilisation des valeurs moyennes des courants de phase du FAP n'est plus valable, puisque elles restent presque nulle avec ou sans défaut de transistor maintenu ouvert (figure (IV-2)). Donc on a recours à d'autres indicateurs de défaut qu'il faut chercher.

- La bonne concordance du courant harmonique identifié et le courant du FAP pour chaque phase, même en présence de défaut, a conduit à avoir un courant de réseau électrique quasiment sinusoïdal où le THD est maintenu inférieur à 4 % (fig. IV-2)

- Suite au défaut de transistor T11 maintenu ouvert, dans le pont H11 lié à la phase 1 du FAP, les tensions de référence de la commande MLI changent de formes est deviennent asymétriques (fig. IV-4). Cela a influencé sur la commande de tous les transistors du FAP. Ce changement de forme des références de la commande MLI a permis au deuxième pont H12 de la phase 1 de compenser la perte de contrôle du courant dans le phase 1 engendrée par la défaillance du transistor T11 apparentent au pont 11 de la même phase 1. Autrement dit, l'asymétrie du courant de la phase 1 engendrée par une défaillance de transistor dans le pont H11 est compensée par le pont H12 de la même phase 1. Cela a conduit à la perte de la symétrie des tensions de sortie des deux pont H11 et H12 ainsi que celle des tensions de sortie des ponts des autres phases (Figure (IV-5), Figure (IV-6), Figure (IV-7) et Figure (IV- 8)). En fait, la tension de sortie V_{a1} du pont H11, comportant le transistor T11 du haut du bras 1 en défaillance et qui lié à la phase 1, perd une grande partie de la partie positive de sa forme périodique (Figure (IV-5)), produisant ainsi une composante continue V_{a1mean} négative (Figure (IV-8)). La tension de sortie V_{a2} du deuxième pont H12 de la même phase 1, est forcée à perdre une partie de la partie négative de sa forme périodique (Figure (IV-5)), produisant ainsi une composante continue V_{a2mean} positive (Figure (IV-8)). Les tensions de sorties ($V_{b1}, V_{b2}, V_{c1}, V_{c2}$) des ponts des autres

phases perdent aussi leur symétrie, suite au changement des tensions de référence de la commandé MLI et présentent des composant continues ($V_{b1mean}, V_{b2mean}, V_{c1mean}, V_{c2mean}$) non-nulles (Figure (IV-6), Figure (IV-7) et Figure (IV-8)).

- On constate que lorsque T11 est maintenu ouvert (pont 11, phase 1 ou phase a), la valeur moyenne (V_{a1mean}) de la tension de sortie du pont H11 (V_{a1}) est toujours négative et elle est la plus grande en valeur absolue par rapport à la valeur moyenne (V_{a2mean}) de la tension de sortie du pont H12 (V_{a2}) lié à la même phase 1 et par rapport aux composantes continues ($V_{b1mean}, V_{b2mean}, V_{c1mean}, V_{c2mean}$) des tension de sortie ($V_{b1}, V_{b2}, V_{c1}, V_{c2}$) des ponts des autres phases (2 et 3 ou b et c). On constate aussi que les valeurs moyennes des tensions de sortie des ponts sains de la même phase sont presque égales ($V_{b1mean} \approx V_{b2mean}, V_{c1mean} \approx V_{c2mean}$) (Figure (IV-8)). Cela implique que l'écart entre les valeurs moyennes des tensions de sortie des ponts sains de chaque phase sont nulle sauf pour l'écart entre les valeurs moyennes des tensions de sortie des ponts dont l'un contient un transistor défaillant ($V_{b1mean} - V_{b2mean} \approx 0, V_{c1mean} - V_{c2mean} \approx 0, V_{a1mean} - V_{a2mean} > 0$). Donc, on peut conclure que le défaut de T11 maintenu ouvert est caractérisé par ($|V_{b1mean} - V_{b2mean}| < heca$ et $|V_{c1mean} - V_{c2mean}| < heca$ et $|V_{a1mean} - V_{a2mean}| > heca$ et $|V_{a1mean}| > |V_{a2mean}|$ et $V_{a1mean} < -hv$). Le défaut de T12 maintenu ouvert (pont H11, phase 1 ou phase a) est caractérisé par les mêmes caractéristiques que celles du défaut de T11 maintenu ouvert. Les défauts T13 maintenu ouvert et T14 maintenu ouvert (pont H11, phase 1 ou phase a) sont les deux caractérisés par ($|V_{b1mean} - V_{b2mean}| < heca$ et $|V_{c1mean} - V_{c2mean}| < heca$ et $|V_{a1mean} - V_{a2mean}| > heca$ et $|V_{a1mean}| > |V_{a2mean}|$ et $V_{a1mean} > +hv$) (Figure (IV-10) et Figure (IV-11)). Le défaut T15 maintenu ouvert (pont H12, phase 1 ou phase a) est caractérisé par ($|V_{b1mean} - V_{b2mean}| < heca$ et $|V_{c1mean} - V_{c2mean}| < heca$ et $|V_{a1mean} - V_{a2mean}| > heca$ et $|V_{a2mean}| > |V_{a1mean}|$ et $V_{a2mean} < -hv$) (Figure (IV-12)). Le défaut T21 maintenu ouvert (pont H21, phase 2 ou phase b) est caractérisé par ($|V_{c1mean} - V_{c2mean}| < heca$ et $|V_{a1mean} - V_{a2mean}| < heca$ et ($|V_{b1mean} - V_{b2mean}| > heca$ et $|V_{b1mean}| > |V_{b2mean}|$ et $V_{b1mean} < -hv$) (Figure (IV-13)).

- On note aussi que les tensions simples de sortie du FAP sont asymétriques avec des valeurs moyennes négatives et qui sont presque égales (Figure (IV-9)).

on peut mettre les Caractéristiques des indicateurs (tableau (IV-1)) et l'arbre de défaillance proposé (figure (IV-14)) : pour la détection et la localisation des défauts de transistor maintenu ouvert d'un FAP non-autonome à base d'onduleur de tension à 5 niveaux avec $\pm hv$ comme seuil maximal des composantes continues des tensions de sortie des 6 ponts du FAP en mode sain et heca comme seuil maximal des écarts entre ces composantes continues en mode sain :

Transistor maintenu ouvert	Pont défaillant	Phase défaillante	Caractéristiques de défaut
T ₁₁ ou T ₁₂	H ₁₁	1 ou a	$(V_{b1mean} - V_{b2mean} < h_{eca} \text{ et } V_{c1mean} - V_{c2mean} < h_{eca} \text{ et } V_{a1mean} - V_{a2mean} > h_{eca} \text{ et } V_{a1mean} > V_{a2mean} \text{ et } V_{a1mean} < -h_v)$
T ₁₃ ou T ₁₄	H ₁₁	1 ou a	$(V_{b1mean} - V_{b2mean} < h_{eca} \text{ et } V_{c1mean} - V_{c2mean} < h_{eca} \text{ et } V_{a1mean} - V_{a2mean} > h_{eca} \text{ et } V_{a1mean} > V_{a2mean} \text{ et } V_{a1mean} > +h_v)$
T ₁₅ ou T ₁₆	H ₁₂	1 ou a	$(V_{b1mean} - V_{b2mean} < h_{eca} \text{ et } V_{c1mean} - V_{c2mean} < h_{eca} \text{ et } V_{a1mean} - V_{a2mean} > h_{eca} \text{ et } V_{a2mean} > V_{a1mean} \text{ et } V_{a2mean} < -h_v)$
T ₁₇ ou T ₁₈	H ₁₂	1 ou a	$(V_{b1mean} - V_{b2mean} < h_{eca} \text{ et } V_{c1mean} - V_{c2mean} < h_{eca} \text{ et } V_{a1mean} - V_{a2mean} > h_{eca} \text{ et } V_{a2mean} > V_{a1mean} \text{ et } V_{a2mean} > +h_v)$
T ₂₁ ou T ₂₂	H ₂₁	2 ou b	$(V_{c1mean} - V_{c2mean} < h_{eca} \text{ et } V_{a1mean} - V_{a2mean} < h_{eca} \text{ et } (V_{b1mean} - V_{b2mean} > h_{eca} \text{ et } V_{b1mean} > V_{b2mean} \text{ et } V_{b1mean} < -h_v)$
T ₂₃ ou T ₂₄	H ₂₁	2 ou b	$(V_{c1mean} - V_{c2mean} < h_{eca} \text{ et } V_{a1mean} - V_{a2mean} < h_{eca} \text{ et } (V_{b1mean} - V_{b2mean} > h_{eca} \text{ et } V_{b1mean} > V_{b2mean} \text{ et } V_{b1mean} > +h_v)$
T ₂₅ ou T ₂₆	H ₂₂	2 ou b	$(V_{c1mean} - V_{c2mean} < h_{eca} \text{ et } V_{a1mean} - V_{a2mean} < h_{eca} \text{ et } (V_{b1mean} - V_{b2mean} > h_{eca} \text{ et } V_{b2mean} > V_{b1mean} \text{ et } V_{b2mean} < -h_v)$
T ₂₇ ou T ₂₈	H ₂₂	2 ou b	$(V_{c1mean} - V_{c2mean} < h_{eca} \text{ et } V_{a1mean} - V_{a2mean} < h_{eca} \text{ et } (V_{b1mean} - V_{b2mean} > h_{eca} \text{ et } V_{b2mean} > V_{b1mean} \text{ et } V_{b2mean} > +h_v)$
T ₃₁ ou T ₃₂	H ₃₁	3 ou c	$ V_{a1mean} - V_{a2mean} < h_{eca} \text{ et } (V_{b1mean} - V_{b2mean} < h_{eca} \text{ et } (V_{c1mean} - V_{c2mean} > h_{eca} \text{ et } V_{c1mean} > V_{c2mean} \text{ et } V_{c1mean} < -h_v)$
T ₃₃ ou T ₃₄	H ₃₁	3 ou c	$ V_{a1mean} - V_{a2mean} < h_{eca} \text{ et } (V_{b1mean} - V_{b2mean} < h_{eca} \text{ et } (V_{c1mean} - V_{c2mean} > h_{eca} \text{ et } V_{c1mean} > V_{c2mean} \text{ et } V_{c1mean} > +h_v)$
T ₃₅ ou T ₃₆	H ₃₂	3 ou c	$ V_{a1mean} - V_{a2mean} < h_{eca} \text{ et } (V_{b1mean} - V_{b2mean} < h_{eca} \text{ et } (V_{c1mean} - V_{c2mean} > h_{eca} \text{ et } V_{c2mean} > V_{c1mean} \text{ et } V_{c2mean} < -h_v)$
T ₃₇ ou T ₃₈	H ₃₂	3 ou c	$ V_{a1mean} - V_{a2mean} < h_{eca} \text{ et } (V_{b1mean} - V_{b2mean} < h_{eca} \text{ et } (V_{c1mean} - V_{c2mean} > h_{eca} \text{ et } V_{c2mean} > V_{c1mean} \text{ et } V_{c2mean} > +h_v)$

Tableau (IV-1) : Caractéristiques des défauts de type transistor maintenu ouvert (composantes continues des tensions de sortie des 6 ponts du FAP) pour un FAP non-autonome à base d'onduleur de tension à 5 niveaux

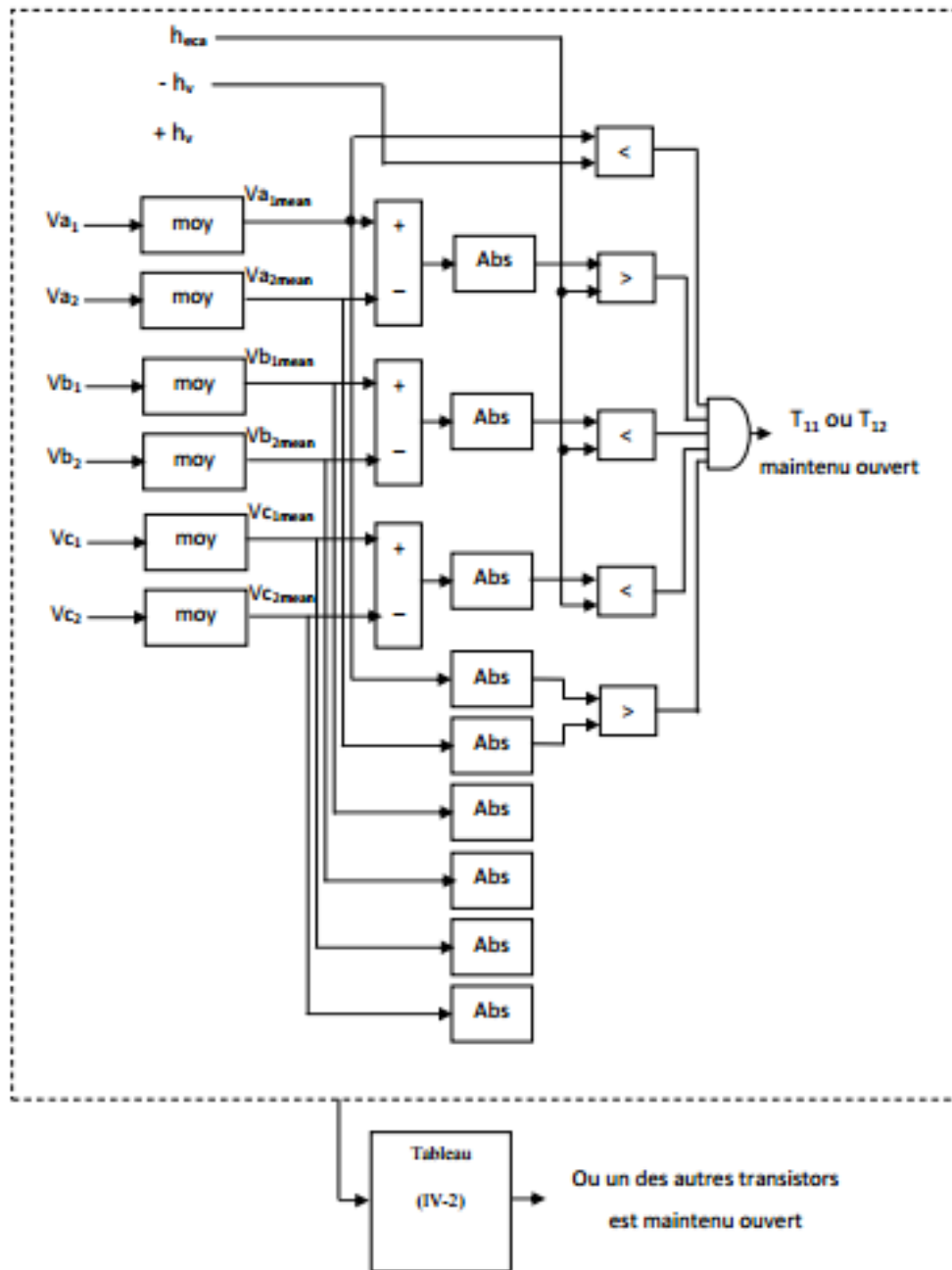


Figure (IV-14) : Arbre de défaillance proposé pour la détection et la localisation des défauts de transistor maintenu ouvert d'un FAP non-autonome à base d'onduleur de tension à 5 niveaux de type ponts en cascade

IV.5. Conclusion

L'étude effectuée dans ce chapitre a été, particulièrement, dédiée à la simulation de fonctionnement en mode dégradé d'un filtre actif parallèle à base d'un onduleur à 5 niveaux en cascade. Après une analyse détaillée d'évolution des différentes grandeurs électriques du filtre actif parallèle lors des différents défauts et pour différentes charges, les grandeurs indicatrices de défaut ont été bien choisies.

Pour filtre actif parallèle à base d'un onduleur à 5 niveaux les valeurs moyennes des tensions de sortie des ponts d'onduleur de type ponts en cascade peuvent être considérées comme des indicateurs fiables pour détection et localisation de défaut.

CONCLUSION GENERALE

L'étude effectuée dans ce mémoire a été, particulièrement, dédiée à la simulation de fonctionnement en mode dégradé d'un filtre actif parallèle à base d'un onduleur à cinq niveaux en cascade. Après une analyse détaillée d'évolution des différentes grandeurs électriques du filtre actif parallèle lors des différents défauts et pour différentes charges, les grandeurs indicatrices de défaut ont été bien choisies.

Pour filtre actif parallèle à base d'un onduleur à cinq niveaux valeurs moyennes des tensions de sortie des ponts d'onduleur de type ponts en cascade peuvent être considérées comme des indicateurs fiables pour détection et localisation de défaut.

Comme perspectives à ce travail, nous préconisons d'approfondir les points suivants :

- Appliquer avec adaptation de la technique de diagnostic proposée sur les FAP à base des onduleurs multiniveaux à structures NPC, capacités flottante, et à structures combinées (hybrides).
- La réalisation expérimentale et le développement du système intégral de diagnostic automatique.

Références bibliographiques :

- [1] REBAOUI Brahim « Etude du déséquilibre de l'alimentation d'un onduleur multi niveaux » magister Mohamed Boudiaf Oran 2014
- [2] Boukaroura Abdelkader « modélisation et diagnostic d'un onduleur triphasé par l'approche bond-graph » magister en électrotechnique université ferhat abbas de setif 2009
- [3] S.A.Menéndez: « Aportación Control Convertido CC/CA de tres Niveles », Thèse de Doctorat de l'Université Polytechnique de Catalunya, Nov. 2004.
- [4] N. Celanovic « Space Vector Modulation And Control Of Multilevel Converters », Thèse de Doctorat de l'Université Polytechnique de Virginia, Sep. 2000.
- [5] K. Benmansour « Réalisation d'un banc d'essai pour la commande et l'observation des convertisseurs multicellulaires série: approche hybride », thèse de doctorat université cergypentoise juin 2009.
- [6] M. Keddar « études des onduleurs multi niveaux dans les applications photovoltaïques » thèse de magister université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf Juillet 2010
- [7] M. Benguanem « Etude et commande numérique d'un STATCOM à base d'onduleurs multi niveaux », thèse de doctorat Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf juillet 2007.
- [8] K. Yakoub « réduction des effets de la tension homopolaire dans les associations onduleurs multi niveaux moteur à induction » thèse de magister Batna. 2005.
- [9] M. Bahlouli, O. Namiri « Réalisation d'un onduleur à trois niveaux » PFE Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf juillet 2007.
-

[10] A. Lega: « Multilevel Converters: Dual Two-Level Inverter Scheme », Thèse de Doctorat de l'Université de Bologne, March 2007

[11] Benyettou Loutfi « Contribution au diagnostic des convertisseurs statiques DC-AC (onduleurs de tension) : application au filtre actif parallèle » these doctorat université tahri mohamed bechar

[12] Nekkar Djamel « contribution à l'étude des stratégies de commande des filtres actifs triphasés » mémoire de magister université mohamed chérif messaadia de souk-ahras 2014

[13] F. Hamoudi « Contribution aux stratégies de commande avancées d'un filtre actif shunt à quatre fils », Thèse Doctorat. Université de Batna 2012.

[14] S.A. Tadjer « Etude d'un système de compensation d'harmonique en utilisant un générateur photovoltaïque 'GPV' », Mémoire de Magister. Université de Boumerdes 2008.

[15] François Defay "commande prédictive directe d'un convertisseur multicellulaire Triphasé pour une application de filtrage actif". Institut national polytechnique de Toulouse, décembre 2008

[16]Y.A. Lamine " Détection de défaut des convertisseurs de puissance « Application au filtre actif parallèle » " mémoire de ingénierie université M'sila 2013 / 2014

[17]M.A.alali, "Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension (Automatisation des systèmes de puissance électriques)", Thèse de doctorat de l'Université Louis Pasteur – Strasbourg I, Strasbourg 12 Septembre 2002.

[18]C. Rabie, B. Mustapha " Modélisation et commande des différentes topologies des filtres actifs parallèles mémoire de ingénierie université M'sila 2010 / 2011

Résumé :

Les convertisseurs statiques de puissance électrique ont connu un développement remarquable au niveau des performances .L'extension de l'utilisation des machines à courant alternatif, les convertisseurs DC-AC (onduleurs) sont devenus les plus répandus.

Le but du travail, proposé dans ce cadre, est la définition d'indicateurs de défaut qui permettent d'identifier le défaut dans un convertisseur statique de tension DCAC dans un filtre actif parallèle pour des charge non-linéaires variables.

Mot-clé: filtre actif parallèle, onduleur multiniveau, transistor ouvert , défaut, MLI.diagnostic

Abstract :

Electric power static converters knew a remarkable development in terms of performance .Due to the extensible use of alternating current machines, DC-AC converters (inverters) became the most used static converters.

The aim of the work, proposed in this frame, is to define faults indicators that allow identifying used as active power filters for varying non-linear loads.

Keyword:Parallel active filter, Multilevel inverter, Open transistor fault ,Diagnostic

ملخص

شهدت المحولات الوسطية للاستطاعة تطورا ملحوظا من ناحية الأداء , نتج عن هذا التطور استعمال المحولات في مجال الآلات التيار المتناوب و أصبحت المحولات الوسطية للاستطاعة الأكثر استعمالا .

الهدف من هذا العمل هو تحديد مؤشرات الخطأ في مموج التوتر متعدد المستوى مدمج داخل مرشح نشيط موازي من اجل حمولات لاختية متغيرة .

الكلمات المفتاحية

مرشح نشيط موازي , مموج التوتر متعدد المستويات , فتح خطأ الترانسسور , الاعطاب , التشخيص