

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA de Bejaïa
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Mémoire

Présentée

Pour l'obtention du diplôme de

Master en Génie Electrique

Option : **Energies Renouvelables**

Thème

Etude des différentes stratégies de commande de l'onduleur 5 niveaux à structure NPC

Encadrée par : Mr. GHEDAMSI Kaci

Réalisée par : TAHIR Nassim

Mr. HIMOUR Kamal

MERABTINE Khaled

Année universitaire 2014/2015

Remerciement

Grace à Allah le tout puissant, Ce travail a pu être terminé.

Nous tenons vivement à exprimer nos profondes gratitude à nos deux promoteurs Mr K. GHEDAMSI et Mr K. HIMOUR de nous avoir confié et diriger ce projet.

Nous tenons aussi à remercier particulièrement Mr K. HIMOUR pour ses conseils, ses encouragements et ses constantes disponibilités.

Nos remerciements s'étendent aussi aux membres du jury pour avoir accepté de nous consacrer une partie de leurs temps afin d'examiner et de juger notre travail.

Enfin, que tous les enseignants ayant participé à notre formation tout au long du cycle de nos études voient ici notre profonde reconnaissance. Et tout le groupe d'énergie renouvelable avec lequel on a partagé des très bons moments.

Avant tous, je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie ce modeste travail, avec l'expression de mon profond amour, aux personnes les plus chères du monde.

A mon père, aucun hommage ne pourra être à la mesure de ce qu'il mérite, je prie Dieu qu'il te fasse don de sa miséricorde et sa grâce.

A ma chère mère qui m'a toujours soutenu durant toutes les périodes de vie, que Dieu la protégé inchalah.

Pour moi je serai reconnaissant toute ma vie à mes frères et mes sœurs, et toute ma famille pour leurs encouragements et leurs soutiens inconditionnel.

Je dédie aussi ce travail à tous mes amis surtout ceux qui m'ont apporté un soutien moral, une amitié inoubliable et précieuse et un dévouement qui fut particulièrement indispensable surtout à mon binôme XAVI.

À toute la Famille de MERABTINE particulièrement à mon village Aourir-Djedida.

MERABTINE Khaled

Premièrement, je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie ce modeste travail :

À ma mère que dieu la protège.

A mon père.

À mes chers deux frères et mes chères Trois sœurs qui mon soutenus durant toutes les périodes de vie, que Dieu les protègent inchalah.

À mon binôme XAVI.

À mes copains de chambre.

À tous mes amis.

À tous mes enseignants et enseignantes depuis le primaire.

Mes amis de la promotion 2014/2015.

À toute la Famille de TAHIR particulièrement à mon quartier IMOUDAGH.

TAHIR Nassim

Table des matières

Introduction générale	
1.1	Introduction 3
1.2	Concept multiniveaux 3
1.3	Topologies multiniveaux 4
1.3.1	Convertisseurs multiniveaux à diodes de blocage (DCI : Diode Clamped Inverter) 5
1.3.2	Onduleur multiniveaux à structure NPC 6
1.3.3	Onduleurs multi niveaux à cellules imbriquées..... 9
1.3.4	Onduleurs multiniveaux à diodes flottantes 12
1.3.5	Onduleurs multiniveaux mise en série (en cascade ou en pont H)..... 14
1.4	Onduleurs multiniveaux hybrides 15
1.5	Nouvelles topologies 15
1.5.1	Convertisseur H-NPC à cinq niveaux..... 16
1.5.2	Convertisseur à NPC trois niveaux..... 16
1.5.3	Convertisseur multiniveaux modulaire MMC 17
1.5.4	Convertisseur en pont H asymétrique..... 18
1.6	Comparaison des topologies multiniveaux 18
1.7	Applications et domaines d'intérêt des convertisseurs multiniveaux 20
1.7.1	Les applications des convertisseurs multiniveaux en photovoltaïques domestiques .. 20
1.7.2	Application dans le domaine de l'alimentation des machines électriques 21
1.7.3	Application dans le domaine des réseaux électriques 21
1.7.4	Les réseaux de bord des bâtiments maritimes 21
1.7.5	Générateur à base d'une source d'énergie renouvelable 21
1.8	Conclusion..... 22
CHAPITRE 2 : Modélisation de l'onduleur cinq niveaux à structure NPC	
2.1	Introduction 23
2.2	Modélisation de l'onduleur de tension à cinq niveaux à structure NPC 23
2.2.1	Structure de l'onduleur cinq niveaux NPC..... 23
2.2.3	Différentes configurations d'un bras d'onduleur cinq niveaux NPC 25
2.3	Modélisation en vue de la commande d'onduleur cinq niveaux NPC 29

2.3.1 Fonction de connexion des interrupteurs	29
2.3.2 Commande complémentaire	29
2.3.3 Fonction de connexion du demi-bras.....	29
2.3.4 Modélisation aux valeurs instantanées	30
2.4 Conclusion.....	32

CHAPITRE 3 : Stratégies de commande de l'onduleur cinq niveaux à structure NPC

3.1 Introduction	34
3.2 Stratégies de commande de l'onduleur de tension cinq niveaux à structure NPC	34
3.2.1 Commande PWM modulante sinusoïdale	35
3.2.1.1 Commande PWM à quatre porteuses unipolaires type1	35
3.2.1.2 Commande PWM à quatre porteuses unipolaires type 2	38
3.2.1.3 Commande PWM à quatre porteuses bipolaires	41
3.2.1.4 Commande PWM à quatre porteuses en dent de scie	44
3.2.1.5 Commande PWM avec injection de l'harmonique trois.....	46
3.2. 2 La commande vectorielle de l'onduleur à cinq niveaux à structure NPC	56
3.2.2.1 Vecteur de tension de sortie et diagramme vectoriel	56
3.2.2.2 Séquence des états de l'onduleur	60
3.3 Application de l'onduleur cinq niveaux pour une charge R-L	65
3.4 Conclusion	70

CHAPITRE 4 : Application à la conduite de la machine asynchrone

4.1 Introduction	71
4.2 Association de l'onduleur deux niveaux à la conduite de la machine asynchrone	71
4.3 Association de l'onduleur trois niveaux à la conduite de la machine asynchrone	72
4.4 Association de l'onduleur Cinq niveaux à la conduite de la machine asynchrone	74
4.5 Comparaisons entre les trois cascades convertisseur-machine	75
4.6 Conclusion.....	76

Conclusion générale

Conclusion générale	77
---------------------------	----

Annexe

Annexe	78
--------------	----

CHPITRE 1 : Etat de l'art des convertisseurs multiniveaux

Figure 1.1 : Schéma d'un bras d'onduleur :1) 2niveaux ; 2) 3 niveaux ; 3) N niveaux.....	4
Figure 1.2 : Structure d'un bras d'onduleur à diodes de blocage à cinq niveaux de tension	5
Figure 1.3 : Les trois états de la cellule de commutation type NPC	7
Figure 1.4 : Structure d'un bras de l'onduleur à cinq niveaux à structure NPC	8
Figure 1.5 : cellule de commutation type tripôle	9
Figure 1.6 : Structure d'un bras d'onduleur à trois niveaux à cellules imbriquées	10
Figure 1.7 : Structure d'un bras d'onduleur à cinq niveaux à cellules imbriquées	11
Figure 1.8 : Schéma d'un bras d'onduleur à trois niveaux à diodes flottantes	12
Figure 1.9 : Structure d'un bras d'onduleur à cinq niveaux à diodes flottantes	13
Figure 1.10 : Onduleur multiniveaux en H avec quatre sources continues.....	14
Figure 1.11 : Mise en série d'un NPC avec un pont en H	15
Figure 1.12 : Convertisseur en pont H à NPC en cascade.....	16
Figure 1.13 : Bras d'un onduleur Actif NPC à trois niveaux.....	17
Figure 1.14 : (a) Schéma du MMC, (b) Schéma d'un sous-module	17
Figure 1.15 : Convertisseur multiniveaux dans les bâtiments maritimes.....	21
Figure 1.16 : Convertisseur multiniveaux inséré dans un générateur éolien	22

CHAPITRE 2 : Modélisation de l'onduleur cinq niveaux à structure NPC

Figure 2.1 : Onduleur de tension triphasé à cinq niveaux à structure NPC	24
Figure 2.2 : Interrupteur bidirectionnel équivalent à la paire transistor-diode.....	24
Figure 2.3 : Structure d'un bras de l'onduleur à cinq niveaux à structure NPC	25
Figure 2.3.a : Configuration E_1 du premier bras de l'onduleur à cinq niveaux NPC	26
Figure 2.3.b : Configuration E_2 du premier bras de l'onduleur cinq niveaux NPC	26
Figure 2.3.c : Mise à zéro d'un bras de l'onduleur cinq niveaux NPC	27
Figure 2.3.d : Configuration E_4 du premier bras de l'onduleur cinq niveaux NPC	27
Figure 2.3.e : Configuration E_5 du premier bras d'onduleur cinq niveaux NPC.....	28

Chapitre 3 : Stratégies de commande de l'onduleur cinq niveaux à structure NPC

Figure 3.1 : Tensions de références et porteuses	36
Figure 3.2 : Tension simple de la phase 1 et son analyse harmonique pour ($m=6$, $m=15$).....	37
Figure 3.3 : Tension simple de la phase 1 et son analyse harmonique pour ($r=0.3$, $r=0.5$) ...	38
Figure 3.4 : Evolutions du THD en fonction de l'indice de modulation et l'amplitude du fondamental en fonction du coefficient de réglage	38
Figure 3.5 : Diagramme vectoriel de l'onduleur à cinq niveaux.....	57
Figure 3.6 : Secteurs et régions du diagramme vectoriel	58
Figure 3.7 : Désignation des états X, Y et Z pour les différentes régions du premier secteur	61
Figure 3.8 : Algorithme de la modulation vectorielle de l'onduleur à cinq niveaux a structure NPC	62
Figure 3.9 : Tension simple de la phase 1 et son analyse harmonique pour ($m=0.5$, 0.7 , 0.8 , 0.9 , 0.95).....	64
Figure 3.10 : Tension simple de la phase 1 et son analyse harmonique pour ($n=240$, 480) ...	65
Figure 3.11 : Evolutions du THD en fonction de nombres d'échantillonnage de modulation et l'amplitude du fondamental en fonction du coefficient de réglage	67
Figure 3.12 : Les Variables de sortie de la charge R-L.....	67

CHAPITRE 4 : Application à la conduite de la machine asynchrone

Figure 4.1 : Grandeurs de sortie de la machine asynchrone ($n=120$, $m=0.95$)	72
---	----

CHPITRE 1 : Etat de l'art des convertisseurs multiniveaux

Tableau 1.1 : Tension de sortie de l'onduleur monophasé en fonction des états des interpteures pour un bras d'onduleurs à diode de blocge à cinq niveaux	5
Tableau 1.2 : Etats des interrupteurs pour un bras d'onduleur à structure NPC à trois niveaux	7
Tableau 1.3 : Etats des interrupteurs pour un bras d'onduleur à structure NPC à cinq niveaux	8
Tableau 1.4 : Etats des interrupteurs pour un bras d'onduleur à cellules imbriquées à trois niveaux	10
Tableau 1.5 : Etats des interrupteurs pour un bras d'onduleur à cellules imbriquées à cinq niveaux	11
Tableau 1.6 : Etats des interrupteurs pour un bras d'onduleur à diodes flottantes à tois niveaux	13
Tableau 1.7 : Etats des interrupteurs pour un bras d'onduleur à diodes flottantes à cinq niveaux	14
Tableau 1.8 : Comparaison des convertisseurs NPC,FC, et CHB en terme de nombre de composants nécessaires pour chaque convertisseur	19

CHAPITRE 2 : Modélisation de l'onduleur cinq niveaux à structure NPC

Tableau 2.1 : Grandeurs électriques pour chacune des configurations d'un bras K de l'onduleur à cinq niveaux à structure NPC	28
---	----

Chapitre 3 : Stratégies de commande de l'onduleur cinq niveaux à structure NPC

Figure 3.1 : Durées relatives d'applications des états	62
---	----

CHAPITRE 4 : Application à la conduite de la machine asynchrone

Tableau 1.8 : Comparaison etre les trois cascades convertisseur-machine en termes de THD de courant et de tension	76
--	----

Nomenclature

V_{Nm} : Tension de sortie de l'onduleur par rapport au neutre de la source.

E : Tension continue à l'entrée du convertisseur.

V_{KM} : Tension simple du bras k.

$F_{b_{km}}$: *Fonction de connexion du demi-bras.*

F_{ks} : Fonctions de connexion des interrupteurs.

V_A, V_B, V_C : Tensions simples par rapport au neutre de la charge.

V_{AM}, V_{BM}, V_{CM} : Tensions des trois bras de l'onduleur par rapport au point milieu de la source.

m : Indice de modulation.

r, m' : Coefficient de réglage.

f_p : Fréquence de la porteuse.

f : Fréquence de la tension de référence.

$V_{ref}, V_{ref2}, V_{ref3}$: Tensions de références.

V_s : Vecteur de tension de sortie.

V_{10}, V_{20}, V_{30} : Tensions simples par rapport au neutre de la source continue.

V_d, V_q : Composantes du vecteur tension de sortie dans le plan d-q.

V_s^* : Vecteur de tension de référence.

$\overline{v_s}$: Moyenne des vecteurs v_x, v_y et v_z .

V_d^*, V_q^* : Composantes du Vecteur de référence dans le plan d-q.

α : Position angulaire du vecteur v_s^* à l'intérieur d'un secteur.

T_s : Période d'échantillonnage.

T_x , T_y et T_z : Durées d'applications des vecteurs v_x , v_y et v_z respectivement à la sortie de l'onduleur.

d_x, d_y, d_z : Durées relatives d'applications des états.

THD : Taux de distorsion harmonique.

$V_{\max}$: Amplitude maximal du vecteur V_s^* .

Θ : position angulaire du vecteur V_s^* dans le plan (d-q).

Abréviation

NPC : Neutral Point Clamped.

DCI : Diode Clamped Inverter.

FCI : Flying Capacitor Inverter.

ANPC : Active Neutral Point Clamped.

PWM : Pulse Withe modulation.

SVM : Space Vector Modulation.

MMC : Modular Multilevel Converter.

Introduction générale

Depuis de nombreuses années, l'évolution de l'électronique de puissance est très importante dans un monde où les aspects énergétiques sont devenus un enjeu essentiel. Les applications de celle-ci sont diverses et touchent un vaste domaine du génie électrique allant de quelques watts à plusieurs centaines de mégawatts. Les structures de conversion statique qui composent principalement les applications de l'électronique de puissance deviennent de plus en plus puissantes, la technologie a dû s'adapter à cette croissance de la puissance à convertir.

Cette croissance a été permise grâce à l'évolution des technologies des composants semi-conducteurs. L'évolution des calibres en tension et courant ainsi que l'amélioration des performances de ces composants a permis d'utiliser une électronique de puissance plus performante pour des applications de plus grande puissance [kou 10].

L'apparition des convertisseurs multiniveaux est l'un des résultats de cette évolution, ils sont utilisés pour l'alimentation des machines à courants alternatif de fortes puissances [Nab 80].

Il existe plusieurs topologies de ces convertisseurs de puissance qui sont utilisés dans l'industrie. Dans le cas de notre travail, on va étudier l'onduleur à cinq niveaux à structure NPC qui est un convertisseur très intéressant pour l'alimentation des machines de forte puissance. Ce dernier permet d'augmenter la puissance délivrée à la charge, ainsi d'améliorer la forme de la tension de sortie pour qu'elle soit plus proche de la sinusoïde [Lalili 09] [kou 10] [Imarz 05] [Lalili 09].

Le sujet du mémoire consiste à étudier les différentes stratégies de commande d'un onduleur cinq niveaux à structure NPC.

Le premier chapitre présente l'état d'art des convertisseurs multiniveaux, leurs avantages et inconvénients, ainsi leurs différents domaines d'application et intérêts.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation de l'onduleur cinq niveaux à structure NPC.

Dans le troisième chapitre, nous allons étudier les différentes stratégies de commande à PWM des onduleurs de tension multi niveaux ; tel que la MLI sinusoïdale avec différents

types de porteuses et la MLI vectorielle. Cette dernière est la méthode récemment la mieux adaptée au contrôle des moteurs asynchrones contrairement à d'autres méthodes.

Dans le quatrième chapitre, nous proposerons une application à la conduite de la machine asynchrone en utilisant l'onduleur à deux, trois et cinq niveaux à structure NPC, commandé par la MLI vectorielle.

Enfin, ce travail sera clôturé par une conclusion générale à travers laquelle on exposera les principaux résultats obtenus et on donnera les perspectives à envisager suite à ce travail.

1.1 Introduction

D'après les couples exigés par les différentes applications dans l'industrie, il est devenu une nécessité d'utiliser des machines électriques de plus en plus forte, ces dernières exigent une forte tension d'alimentation. Les onduleurs les plus connus sont les onduleurs à deux niveaux. Ces onduleurs sont limités en tension (1,4 kV) et en puissance (1 MVA). Pour monter en puissance et en tension ; on utilise généralement des groupements de ces onduleurs, ce qui provoque une complication dans la commande et une augmentation du coût du système.

Dans ce chapitre, nous présenterons un état de l'art des convertisseurs multiniveaux et les différents domaines d'application et intérêts de ces derniers.

1.2 Concept multiniveaux

Un onduleur de tension triphasé à N niveaux est un convertisseur statique capable de fournir, en équilibre, une tension entre chaque phase et le point négatif du bus continu avec N niveaux différents : 0, E/ (N-1), 2E/ (N-1), ..., E.

Indépendamment de sa topologie, un onduleur multiniveaux peut donc être modélisé dans une première approche selon l'équation :

$$V_{vm} = \frac{c_i}{N-1} \cdot E \quad (1.1)$$

Avec : v=1, 2, 3. Et C=0, 1, 2, N-1.

L'onduleur de la Figure (1.1.a) délivre à sa sortie deux niveaux de tensions :

- ✓ Position P1 : $V_{NO} = E$
- ✓ Position P2 : $V_{NO} = 0$

Les trois positions (P1, P2, P3) de l'interrupteur de la Figure (1.1.b), permettent d'avoir respectivement trois niveaux de tension (E, -E et 0).d'où l'appellation onduleur à N niveaux de la Figure (1.1.c).

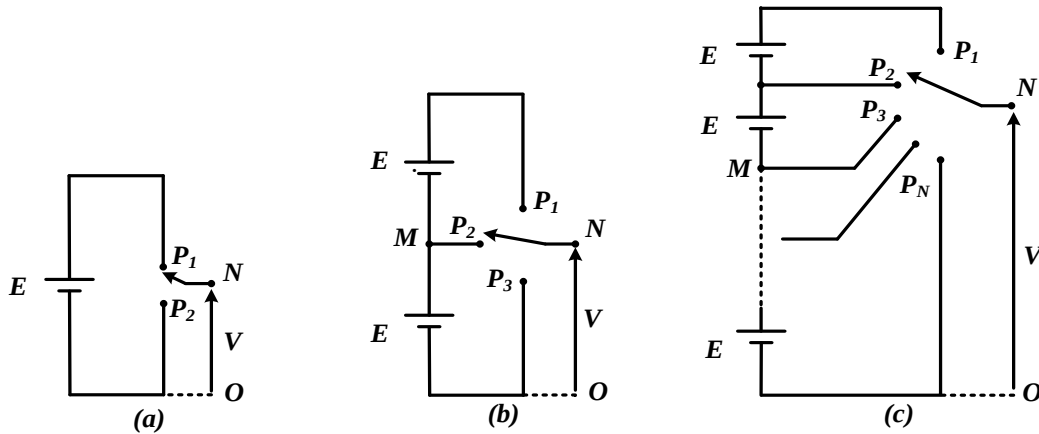


Figure 1.1 : Schéma d'un bras d'onduleur :a) 2 niveaux ;b) 3 niveaux ;c) N niveaux.

L'augmentation du nombre de sources continues et par conséquent du nombre de niveaux contribue sans doute à rendre la forme de la tension, à la sortie du convertisseur, plus proche de la sinusoïde avec un minimum de taux d'harmoniques.

1.3 Topologies multiniveaux

Le principe fondamental des techniques de conversion multiniveaux est essentiellement basé sur une association série/parallèle des composants de puissance.

Deux catégories d'onduleurs multiniveaux sont actuellement répertoriées.

La première catégorie regroupe les onduleurs principaux :

- 1) Les onduleurs à diodes de bouclage (en anglais clamping diodes) **[Rod 02]**.
- 2) Les onduleurs à structure NPC (Neutral Point Clamped) et à structure MPC (Multiple Point Clamped). **[Chi 99-1]**.
- 3) Les onduleurs à cellules imbriquées (à condensateurs flottants « Flying Capacitor ») **[Rod 02]**.
- 4) L'onduleur à pont en cascade H-bridge **[Mck 04]**.

La deuxième catégorie des onduleurs multiniveaux comporte les assemblages hybrides des onduleurs de la première catégorie. Ainsi, on peut citer entre autres :

- 1) NPC en cascade.
- 2) H-bridge en cascade.
- 3) NPC et H-bridge en cascade.

1.3.1 Convertisseurs multiniveaux à diodes de blocage (DCI : Diode Clamped Inverter)

La topologie la plus connue des onduleurs de tension multiniveaux, est la structure à diodes de blocage [Nab 80].

La Figure (1.2.1) représente un bras d'un convertisseur à cinq niveaux où les diodes sont utilisées pour réaliser la connexion avec le point neutre. Pour l'obtention d'une tension à N niveaux, (N-1) condensateurs sont nécessaires. Les tensions à leurs bornes sont toutes égales à $V_{dc}/(N-1)$.

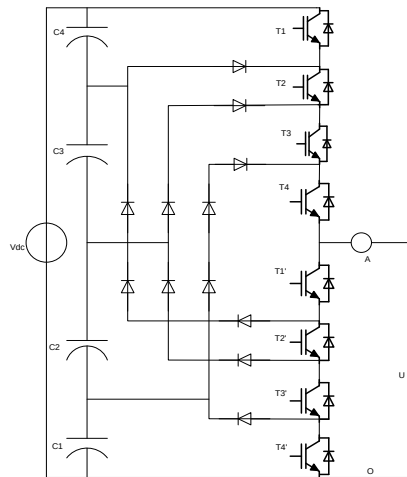


Figure 1.2 : Structure d'un bras d'onduleur à diodes de blocage à cinq niveaux de tension.

Selon le principe de fonctionnement présenté ci-dessus, on établit un tableau des états des interrupteurs pour un bras d'onduleur à diodes de blocage à cinq niveaux.

Etats des interrupteurs								
T1	T2	T3	T4	T1'	T2'	T3'	T4'	U
1	1	1	1	0	0	0	0	V_{dc}
0	1	1	1	1	0	0	0	$3V_{dc}/4$
0	0	1	0	0	1	0	0	$V_{dc}/2$
0	0	0	1	1	1	1	0	$V_{dc}/4$
0	0	0	0	1	1	1	1	0

Tableau 1.1 : Tension de sortie de l'onduleur monophasé en fonction des états des interrupteurs pour un bras d'onduleurs à diode de blocage à 5 niveaux.

Chaque couple d'interrupteurs (T_i, T_i') forme une cellule de commutation. Pour obtenir une tension à N niveaux. Il y a (N-1) interrupteurs consécutifs en état de conduction.

Cette topologie présente plusieurs avantages, notamment [Man 04] :

- ✓ La forme d'onde a une meilleure qualité spectrale par rapport à celle d'un onduleur triphasé classique.
- ✓ Elle est configurable de façon à obtenir un nombre élevé de niveaux, permettant de réduire la tension bloquée par chaque interrupteur, celle-ci est donnée par $V_{dc}/(N-1)$.

Du fait que la tension continue est obtenue à la sortie d'un redresseur présente également plusieurs limitations, parmi lesquelles :

- ✓ Lorsque le nombre de niveaux est supérieur à trois, l'équilibrage des tensions aux bornes des condensateurs devient très complexe.
- ✓ L'inégalité des tensions inverses supportées par les diodes.
- ✓ L'inégalité des commutations entre interrupteurs situés à l'extérieur de la structure par rapport aux autres.
- ✓ Le déséquilibre des tensions aux bornes des condensateurs lors de leur mise en série.

Lorsque l'architecture des convertisseurs possède plusieurs points clampés pour générer un niveau de tension avec plusieurs composants, il est dit MPC (multi point clamped) [Alb 07]. Le DCI appartient ainsi à cette famille car le bus continu entre deux interrupteurs est clampé par une diode.

En outre, quand le nombre de niveaux est impair, le convertisseur est dit NPC.

1.3.2 Onduleur multiniveaux à structure NPC

Cette structure a été introduite par A. Nabae et H. Akagie en 1981 [Nab 81]. L'objectif est de réduire l'amplitude des harmoniques injectés par l'onduleur dans la charge pour des applications de type alimentation des moteurs. La cellule de commutation de base d'un onduleur à trois niveaux à structure NPC est donnée par la figure (1.3.a). Cet onduleur possède deux simples diodes connectées au point milieu de la source de tension, qui protègent les interrupteurs externes contre les tensions excessives. Indirectement, si les diodes sont en conduction, les interrupteurs du centre sont également protégés.

La Figure (1.3) montre l'architecture des trois états de la cellule de commutation type NPC.

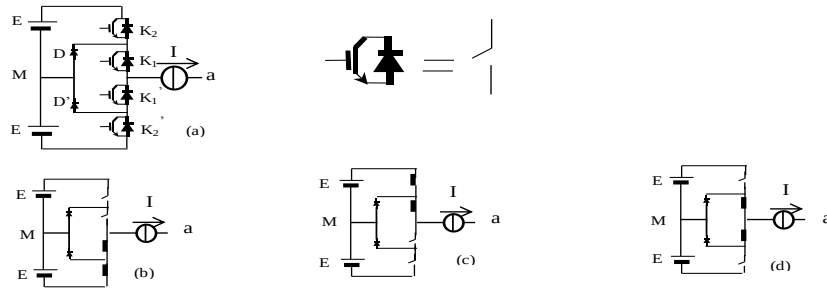


Figure1.3 : Les trois états de la cellule de commutation type NPC.

Selon le principe de fonctionnement présenté ci-dessus, on établit un tableau des états des interrupteurs pour un bras d'onduleur à structure NPC à trois niveaux

Etat des interrupteurs				
K_1	K_2	K'_1	K'_2	V_{am}
1	1	0	0	E
1	0	1	0	0
0	0	1	1	-E

Tableau 1.2 : Etats des interrupteurs pour un bras d'onduleur à structure NPC à trois niveaux.

Il est important, pour cette architecture, de stabiliser le neutre où sont connectées les diodes. Pour la structure NPC, on peut compter sur la symétrie glissante sur une demi-période du motif de commande et du courant pour que chaque utilisation du niveau intermédiaire avec un signe donné soit compensée par une utilisation pendant la même durée et avec un courant de signe contraire sur la demi-période suivante de modulation. A cette condition, le courant moyen prélevé en ce point est nul.

Dans un onduleur en pont complet (monophasé, triphasé, ...), le même point neutre peut être utilisé pour tous les bras et ce qui assure les compensations partielles des composantes de courant à la fréquence de modulation. Plusieurs études ont été faites sur cet onduleur pour des niveaux supérieurs à trois **[Him 15]**. Cette structure peut même être généralisée à un onduleur à 5 niveaux.

La Figure (1.4) montre un bras d'un onduleur NPC à cinq niveaux.

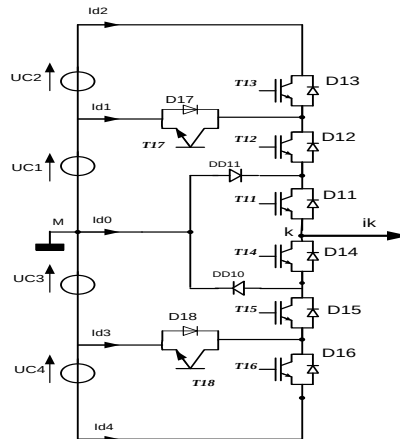


Figure 1.4 : Structure d'un bras de l'onduleur à cinq niveaux à structure NPC.

Selon le principe de fonctionnement présenté ci-dessus, on établit un tableau des états des interrupteurs pour un bras d'onduleur à structure NPC à cinq niveaux.

Etat des interrupteurs								
T ₁₁	T ₁₂	T ₁₃	T ₁₄	T ₁₅	T ₁₆	T ₁₇	T ₁₈	U
1	1	1	0	0	0	0	0	E/2
0	1	1	0	0	0	1	0	E/4
1	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	1	1	0	0	0	-E/4
0	0	0	1	1	1	0	0	-E/2

Tableau 1.3 : Etats des interrupteurs pour un bras d'onduleur à structure NPC à cinq niveaux.

De plus, cette structure peut même être généralisée à un onduleur à N niveaux, Il suffit d'ajouter le nombre adéquat d'interrupteurs et de sources continues alimentant le convertisseur.

Cette topologie présente des avantages les plus importants **[Gut 01]** :

- ✓ Amélioration de la forme d'onde de la tension de sorties. ainsi, le contenu harmonique de la forme d'onde de sortie sera plus faible.
- ✓ Réduction de la contrainte de tension sur les interrupteurs (ceci est proportionnel aux nombre de niveaux) et donc adapté pour les applications haute tension.

Par contre l'inconvénient de cette structure est :

- ✓ Déséquilibre de la tension des condensateurs. Dans certaines conditions de fonctionnement, la tension du point milieux 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.

1.3.3 Onduleurs multi niveaux à cellules imbriquées

La nouvelle structure de convertisseurs multiniveaux a été inventée au début des années 90 [Gat 97]. Elle est également connue sous l'appellation « flying capacitors multilevel inverter » dans la littérature anglo-saxonne. Cette structure est basée sur la mise en série de cellules de commutation entre lesquelles une source de tension flottante est insérée. Ces sources de tension flottantes sont réalisées par des condensateurs. Cette structure n'exige pas de source d'alimentation séparée, et pas de diodes de retour additionnelles comme la structure NPC.

Une source de tension flottante d'amplitude moitié de la source d'entrée permet également d'assurer l'équilibrage des tensions. C'est le principe des onduleurs multi niveaux à cellules imbriquées [Rod 02]. Le schéma de base d'une cellule de commutation tri-pôle, de cette structure est représenté à la Figure (1.5).

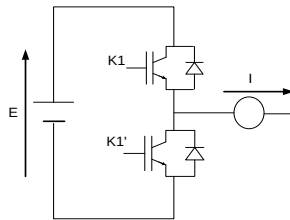


Figure 1.5 : Cellule de commutation type tri pole.

Les deux interrupteurs de commutation de cette cellule fonctionnent de façon complémentaire afin d'assurer la continuité énergétique entre les deux sources.

La Figure (1.6) illustre un bras d'onduleur à trois niveaux à cellules imbriquées.

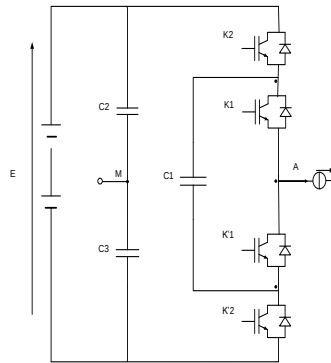


Figure 1.6 : Structure d'un bras d'onduleur à trois niveaux à cellules imbriquées.

Selon le principe de fonctionnement présenté ci-dessus, on établit un tableau des états des interrupteurs pour un bras d'onduleur à cellules imbriquées à trois niveaux.

V_{aM}	B_{k1}	B_{k2}	B'_{k1}	B'_{k2}
E	1	1	0	0
0	0	1	1	0
0	1	0	0	1
-E	0	0	1	1

Tableau 1.4 : Etats des interrupteurs pour un bras d'onduleur à cellules imbriquées à trois niveaux.

L'application stricte des règles d'interconnexion des sources avec les interrupteurs, conduit aux conditions suivantes : à l'intérieur de chaque paire ($k1$ et $k'1$, $k2$ et $k'2$), les interrupteurs doivent toujours être dans des états différents, ce qui impose directement l'existence d'une commutation commandée et d'une commutation spontanée. Chacune de ces paires forme une cellule de commutation. Cette nouvelle cellule de commutation peut alors être considérée comme l'imbrication de deux cellules de commutation élémentaires d'où le nom onduleur à cellules imbriquées.

La Figure (1.7) montre l'architecture d'une phase d'un onduleur NPC à cinq niveaux.

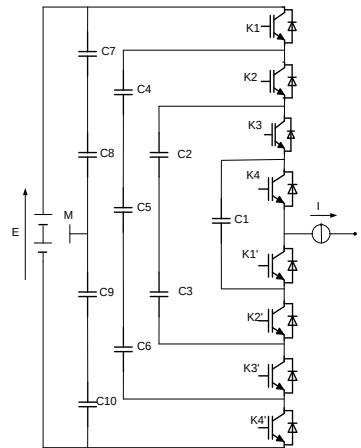


Figure 1.7 : Structure d'un bras d'onduleur à cinq niveaux à cellules imbriquées.

Selon le principe de fonctionnement présenté ci-dessus, on établit un tableau des états des interrupteurs pour un bras d'onduleur à cellules imbriquées à cinq niveaux.

Grandeurs électriques	Etats des interrupteurs							
	K ₄	K ₃	K ₂	K ₁	K' ₁	K' ₂	K' ₃	K' ₄
2E	1	1	1	1	0	0	0	0
E	1	1	1	0	1	0	0	0
E	0	1	1	1	0	0	0	1
E	1	0	1	1	0	0	1	0
0	1	1	0	0	1	1	0	0
0	0	0	1	1	0	0	1	1
0	1	0	0	1	0	1	1	0
0	0	1	1	0	1	0	0	1
0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	0	1	0	1	0	1	0	1
-E	0	0	1	1	0	1	1	1
-E	1	0	0	0	1	1	1	0
-E	0	1	0	0	1	1	0	1
-2E	0	0	0	0	1	1	1	1

Tableau 1.5 : Etats des interrupteurs pour un bras d'onduleur à cellules imbriquées à cinq niveaux.

Cette peut même être généralisée à N niveaux. Ceci nécessite (N-1). (N-2)/2 capacités avec (N-1) sources continues et en plus de (N-1) paire d'interrupteurs par bras.

Cette topologie présente plusieurs avantages, notamment :

- ✓ La tension de blocage des interrupteurs est partout la même.

- ✓ Le concept peut être facilement appliqué à d'autres types de convertisseurs (continu-continu, continu-alternatif, alternatif-alternatif), aussi bien pour un transfert unidirectionnel de la puissance que bidirectionnel.
- ✓ Sa modularité permet une extension et une adaptation aisées des stratégies de commande à un nombre élevé de niveaux.
- ✓ Les condensateurs n'étant jamais mis en série entre niveaux différents, le problème du déséquilibre de leur tension n'existe plus.

Par contre le principal inconvénient de cette structure réside dans le nombre relativement élevé de condensateurs : $(N-1) (N-2)/2$. De plus, si l'application dans laquelle le convertisseur est utilisé exige des tensions initiales non nulles aux bornes des condensateurs, il faut associer à la stratégie de commande une stratégie de pré-charge adéquate.

1.3.4 Onduleurs multiniveaux à diodes flottantes

La structure d'un bras d'onduleur à trois niveaux à diodes flottantes possède deux sources de tensions continuées, avec deux diodes liées au point milieu. La tension de sortie de cet onduleur possède trois niveaux intermédiaire E , 0 , $-E$. pour avoir le niveau E , on ferme les interrupteurs K_1 et K_2 . Le niveau 0 est obtenu quand K_1 et K'_1 sont fermés. Par contre au niveau $-E$, il faut fermer K'_1 et K'_2 . Comme le montre suivant :

La Figure (1.8) montre l'architecture d'une phase d'un onduleur à diodes flottantes à trois niveaux.

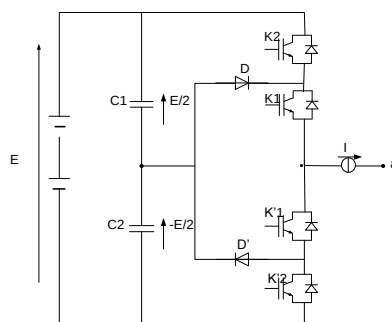


Figure 1.8 : Schéma d'un bras d'onduleur à trois niveaux à diodes flottantes.

Selon le principe et les conditions de fonctionnement présentées ci-dessus, on établit un tableau des états des interrupteurs pour un bras d'onduleur à diodes flottantes à trois niveaux.

Etat des interrupteurs				
K_1	K_2	K'_1	K'_2	V_{am}
1	1	0	0	E
1	0	1	0	0
0	0	1	1	-E

Tableau 1.6 : Etats des interrupteurs pour un bras d'onduleur à diodes flottantes à trois niveaux.

Les deux diodes servent à partager la tension d'entrée entre les interrupteurs, pour assurer leur équilibrage en tension. En plus de (N-1) sources de tension continues, (N-1)*(N-2) diodes simples et (N-1) paires d'interrupteurs bidirectionnels à semi-conducteurs. Le tableau précédent montre les états des interrupteurs d'un bras d'onduleur cinq niveaux à diodes flottantes.

La Figure (1.9) montre l'architecture d'un bras d'onduleur à diodes flottantes à cinq niveaux.

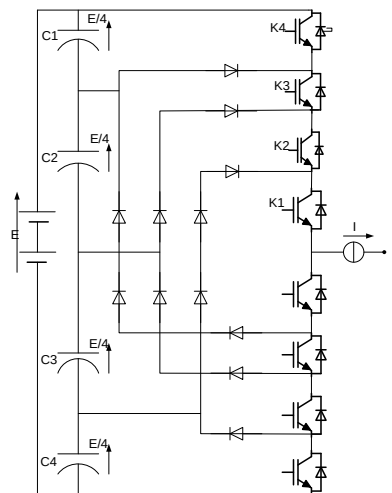


Figure 1.9 : Structure d'un bras d'onduleur à cinq niveaux à diodes flottantes.

Selon le principe et les conditions de fonctionnement présentées ci-dessus, on établit un tableau des états des interrupteurs pour un bras d'onduleur à diodes flottantes à cinq niveaux.

Grandeurs électriques	Etats des interrupteurs			
V_{aM}	K_1	K_2	K_3	K_4
$2E$	1	1	1	0
E	1	1	0	0
0	1	1	0	0
$-E$	1	0	0	0
$-2E$	0	0	0	0

Tableau 1.7 : Etats des interrupteurs pour un bras d'onduleur à diodes flottantes à cinq niveaux.

1.3.5 Onduleurs multiniveaux mise en série (en cascade ou en pont H)

En 1975, dans [Bak 75] les auteurs ont proposé un convertisseur multiniveaux en cascade qui consistait en la mise en série de plusieurs ponts à deux niveaux monophasé, ces ponts étant connectés à des sources de tension continue séparées.

De façon générale, un convertisseur à N niveaux est réalisé par l'association de $(N-1)/2$ onduleurs monophasé à deux niveaux. La tension V_s en sortie de tels structures est donnée par la somme des tensions des $(N-1)/2$ onduleurs à deux niveaux.

Cette structure présente deux grandes particularités : la simplicité de configuration quel que soit le nombre de niveaux de la tension désirée à la sortie du convertisseur, et l'existence de modules d'onduleurs standards sur le marché. Cependant, elle nécessite des sources d'alimentation isolées galvaniquement ce qui lui limite encore son expansion industrielle.

La Figure (1.10) montre le schéma de base d'une phase d'onduleur avec quatre cellules mises en cascade.

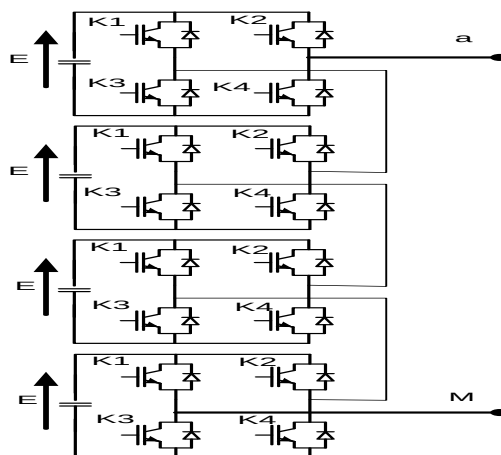


Figure 1.10 : Onduleur multiniveaux en H avec quatre sources continues.

1.4 Onduleurs multiniveaux hybrides

Les topologies citées ci-dessus constituent les structures de base de convertisseurs multiniveaux, la mise en série ou en parallèle de ces onduleurs de base permet d'obtenir des topologies hybrides.

On prend à titre d'exemple une structure hybride qui est constituée de deux onduleurs monophasés qui sont mises en série sur la même phase l'un est un onduleur monophasé de type NPC et l'autre est un onduleur monophasé en pont H. seule la cellule NPC est alimentée, ce qui réduit considérablement le volume de l'alimentation. Comme il est possible de connecter en série deux structures à cellules imbriquées.

Les topologies hybrides permettent de générer un nombre plus élevés de niveaux, le convertisseur génère une tension avec moins d'harmoniques pour un même nombre de semi-conducteurs. Mais elles exigent des stratégies de commande un peu plus complexes et peuvent poser des problèmes au niveau des échanges énergétiques entre les convertisseurs [Mar 05].

La Figure (1.11) montre un onduleur monophasé à structure NPC mise en série avec un onduleur monophasé en pont H.

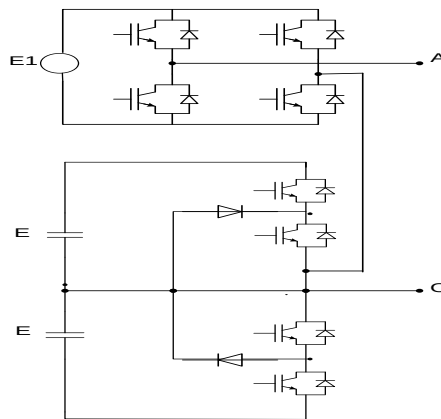


Figure 1.11 : Mise en série d'un NPC avec un pont en H.

1.5 Nouvelles topologies

Depuis l'introduction de la première topologie multiniveaux, presque quatre décennies déjà, environ une douzaine de variantes et de nouvelles topologies multiniveaux ont été proposées dans la littérature. La majorité d'elles sont des variations des topologies multiniveaux classiques citées plus haut, ou hybrides entre elles.

1.5.1 Convertisseur H-NPC à cinq niveaux

Ce convertisseur est la synthèse d'un raccordement des phases des convertisseurs NPC monophasés à trois niveaux classiques en pont H (Figure 1.12), formant ainsi un HNPC cinq niveaux (5L-HNPC), et a été proposé pour la première fois par. Cette topologie est commercialisée par ABB et TMEIC-GE [Kou 10].

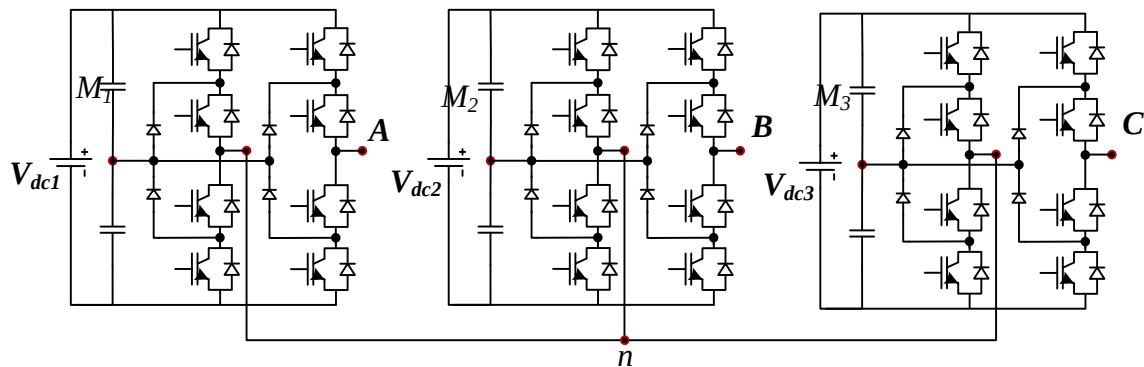


Figure 1.12 : Convertisseur en pont H à NPC en cascade.

La combinaison des trois niveaux de chaque bras de convertisseur NPC ($V_{dc}/2$, 0 , $-V_{dc}/2$) résulte cinq niveaux différents à la sortie (V_{dc} , $V_{dc}/2$, 0 , $-V_{dc}/2$, $-V_{dc}$). Comme le traditionnel pont H, cette topologie exige une source isolée pour chaque pont H pour éviter les courts circuits des bus continus [Kou 10].

1.5.2 Convertisseur à NPC trois niveaux

L'un des inconvénients de la topologie NPC trois niveaux est l'inégalité de la répartition des pertes entre les interrupteurs du haut et du bas de chaque bras du convertisseur. Ce problème peut être résolu en remplaçant les diodes de clampé par des interrupteurs pour avoir un moyen de contrôle du courant au neutre de la source, donc un contrôle de la distribution des pertes dans les interrupteurs du convertisseur. En d'autres termes, avec les diodes de clampé comme celles de l'NPC trois niveaux, le courant circule à travers la diode de clampé du haut ou du bas selon sa polarité, et cela quand le niveau zéro est généré. Par contre, avec les interrupteurs de clampé, le courant peut être forcé à passer à travers le chemin de clampé du haut ou du bas [Bru 01]. (Figure 1.13).

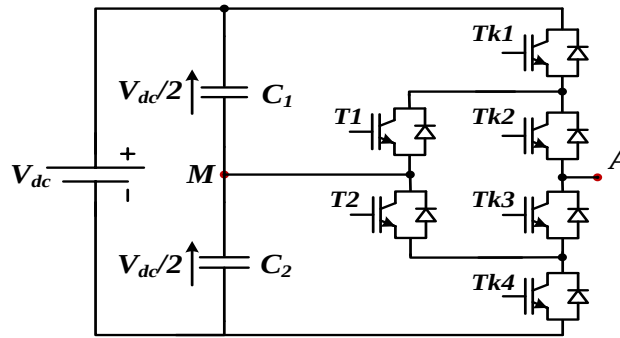


Figure 1.13 : Bras d'un onduleur actif NPC à trois niveaux.

1.5.3 Convertisseur multiniveaux modulaire MMC

Un autre convertisseur multiniveaux ayant trouvé des applications industrielles est le convertisseur multiniveaux modulaire (Modular Multilevel Converter, connu sous MMC). Cette topologie ait été développée au début des années 2000 [Mar 03].

Fondamentalement, le MMC est composé de convertisseurs de tension monophasés à deux niveaux, connus sous le nom de demi pont (ou même un pont complet), connectés on série, comme est montré sur la figure (Figure 1.14 a)). Le bras de chaque phase est divisé en deux parties égales (le nombre de cellules doit être pair) pouvant ainsi, générer un nombre égal de niveaux positifs et négatifs du coté alternatif [Kou 10].

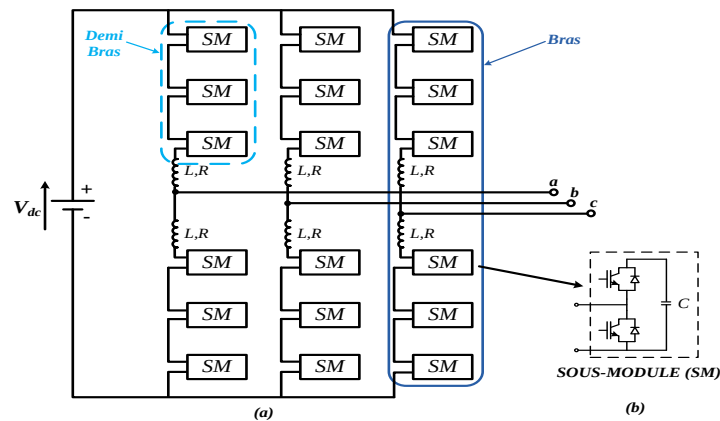


Figure 1.14 : a) Schéma du MMC, b) Schéma d'un sous-module.

Les deux interrupteurs de la cellule de puissance (Figure 1.14 b)) sont contrôlés par des signaux complémentaires et produisent deux états de commutation actifs, qui peuvent connecter ou non la capacité aux autres capacités du bras du convertisseur, générant ainsi, un signal multiniveaux. Il y a un troisième état de commutation, où les deux interrupteurs sont à l'état ouvert (off), permettant au courant de circuler à travers les diodes (ou à travers les

condensateurs, si cela est exigé par le signe du courant). Dans les applications pratiques, il y a un interrupteur additionnel pour une isolation complète des cellules. Le plus attirant dans cette topologie est sa modularité [Kou 10].

1.5.4 Convertisseur en pont H asymétrique

Si la topologie du pont H cascadié, comme le montre la figure (1.12), est alimentée avec des rapports de tension inégaux entre les cellules, une partie ou même tous les états de commutation redondants des niveaux de tension peuvent être éliminés, ce qui maximise le nombre de niveaux différents de tension générés par le convertisseur. Ce concept de ratios de sources continues asymétriques a été introduit pour des applications d'imagerie par résonance magnétique [Mue 94]. Plus tard, cette idée a été explorée pour les convertisseurs à moyenne tension avec deux ou plusieurs cellules en série avec des puissances de deux taux de déséquilibre de tension ($1:2: \dots: 2^{n-1}$), qui sont capables de générer sept niveaux de tension différents avec seulement deux cellules. Plus tard, des rapports de tension dans les puissances de trois ($1: 3: \dots: 3^{n-1}$) ont été introduits, [Dix 07], ce qui élimine tous les redondances et maximise le nombre de niveaux à la sortie. Ce convertisseur asymétrique est également connu comme "Convertisseur ternaire hybride multiniveaux " [Liu 08].

1.6 Comparaison des topologies multiniveaux

Les topologies telles que les onduleurs NPC et les onduleurs à cellules imbriquées divisent leur tension d'alimentation : la tension de sortie est plus petite ou égale à la tension continue d'entrée. Elles sont capables de fonctionner à partir d'une alimentation continue unique.

Par contre, dans les structures en ponts cascadiés la tension de sortie maximale est plus grande que chacune des tensions d'alimentation. Contrairement aux autres topologies, les alimentations des cellules ne peuvent pas être obtenues à partir d'une alimentation continue unique sans mettre en place des convertisseurs additionnels. Dans la plupart des cas, il faut recourir à des transformateurs pour obtenir les alimentations nécessaires. Le couplage parallèle des transformateurs du «côté alimentation» et l'addition des tensions «côté charge» conduit à une élévation de la tension [J.S.Mar 05].

Bien que le choix de la topologie multiniveaux soit directement lié à l'application et à la liste de caractéristiques, afin de réduire au maximum les pertes, le volume et les coûts, habituellement le nombre de composants joue le rôle le plus important [Sep 07]. Par conséquent, afin de fournir quelques recommandations pour sélectionner la topologie

appropriée, le tableau (1.8) récapitule le nombre de semi-conducteurs et de composants passifs exigés par les topologies classiques.

Topologie	Niveau	N_c	N_D	N_f	N_{dc}	N_V
NPC	3	12	6	0	2	1
	5	24	36	0	4	1
	7	36	90	0	6	1
	N	$6(N-1)$	$3(N-1).(N-2)$	0	$N-1$	1
FC	3	12	0	3	2	1
	5	24	0	18	4	1
	7	36	0	45	6	1
	N	$6(N-1)$	0	$\frac{3}{2}(N-1).(N-2)$	$N-1$	1
CHB	3	12	0	0	3	3
	5	24	0	0	6	6
	7	36	0	0	9	9
	N	$6(N-1)$	0	0	$\frac{3}{2}(N-1)$	$\frac{3}{2}(N-1)$

Tableau 1.8 : Comparaison des convertisseurs NPC, FC, et CHB en terme de nombre de composants nécessaires pour chaque convertisseur.

Avec :

- N_c : Nombre de commutateurs ;
- N_D : Nombre de diodes de clamp ;
- N_f : Nombre de capacités flottantes ;
- N_{dc} : Nombre de capacités du bus continu ;
- N_V : Nombre de sources continues ;

Pour une approche à trois niveaux, l'analyse prouve que les onduleurs clampés par le neutre (NPC), à capacité flottante (FC) et ponts H montés en cascade exigent le même nombre de commutateurs (12), toutefois ils diffèrent sur les éléments et le nombre de sources de tension continue requises. Pour des applications où seulement une source continue est disponible, les topologies de types NPC et FC sont avantageuses par rapport à celle des ponts H montés en cascade, qui exige la présence d'un transformateur spécial pour fournir les diverses sources continues indépendantes. Donc, quand les différentes sources sont disponibles la topologie de pont H montée en cascade pourrait être considérée une solution convenable puisqu'elle exige le moindre nombre de composantes [Cal 99] [Kou 10].

Cette première comparaison basée sur le nombre de composants permet de tirer quelques conclusions et de séparer les champs d'applications de ces différents convertisseurs. Les onduleurs NPC sont intéressants pour les applications triphasées nécessitant peu de niveaux. L'énergie stockée à l'étage intermédiaire peut être réduite. Les structures permettant une conversion directe, telles que NPC et cellules imbriquées, sont avantageuses pour les applications avec échange de puissance active, lorsqu'une isolation galvanique n'est pas nécessaire entre les sources échangeant de la puissance. Les onduleurs à cellules en cascade sont très avantageux pour les applications monophasées sans apport de puissance active. Ils conviennent même pour les très grandes tensions. Ce sont également des structures à privilégier pour les applications où il faut mettre en place une isolation galvanique à l'aide de transformateur moyenne ou haute fréquence.

1.7 Applications et domaines d'intérêt des convertisseurs multiniveaux

A cause des problèmes rencontrés au fait et qui sont posés par l'utilisation des convertisseurs à deux niveaux de tension, monophasés ou triphasés, il y'avait apparition de nouvelles structures appelés convertisseurs multiniveaux qui sont utilisés pour le réglage de la fréquence et de l'amplitude de la tension et aussi pour le transfert d'énergie entre une ou plusieurs sources d'alimentation à courant continu ou alternatif et une charge à courant alternatif monophasé ou triphasé. Cette utilisation ouvre plusieurs opportunités d'applications, dont quelques-unes sont cités dans cette partie.

1.7.1 Les applications des convertisseurs multiniveaux en photovoltaïques domestiques

Les installations photovoltaïques domestiques raccordées au réseau électrique de distribution (application de quelque kilowatt) peuvent être pénalisées par les courants de fuites capacitifs inhérents à la structure des modules photovoltaïques. L'amplitude de ces courants peut être suffisamment élevée pour provoquer la déconnexion de l'onduleur du réseau électrique de distribution. De plus, la fatigue des capacités de filtrage de la source de tension continue, ainsi que les niveaux importants de la tension de blocage des interrupteurs peuvent être des facteurs limitant la robustesse du convertisseur DC/AC. Les onduleurs multiniveaux permettent en partie de répondre à ces problématiques. Toutefois, leur mise en œuvre est difficile, ainsi que le nombre important de composants actifs et passif mis en jeu, sont des critères discriminants vis-à-vis de la robustesse du système de conversion [Him 15].

1.7.2 Application dans le domaine de l'alimentation des machines électriques

Les machines électriques de moyenne et forte puissances nécessitent une alimentation à moyenne tension. Sachant que les semi-conducteurs ne supportent qu'une faible tension par rapport à celle exigée par la machine. Dans ce cas l'utilisation des convertisseurs multiniveaux est mieux adaptée, car la qualité de la tension en termes d'harmonique est meilleure ainsi les effets néfastes sur la durée de vie de la machine et celle de réseau éventuelle est réduite [Lalili 09] [Lour 10] [Bouc 06]. En plus à partir de cellules de petite tension (comme des batteries, des piles à combustible ou des cellules photovoltaïques), il devient possible d'alimenter une machine à moyenne tension.

1.7.3 Application dans le domaine des réseaux électriques

Les convertisseurs multiniveaux 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, mais aussi l'impédance de la ligne de transmission. Ils peuvent donc jouer le rôle de compensateurs statiques.

1.7.4 Les réseaux de bord des bâtiments maritimes

Dans les bâtiments maritimes, il est possible d'exploiter les techniques de conversion multiniveaux pour assurer l'alimentation des navires (par exemple alimenter un réseau de bord).

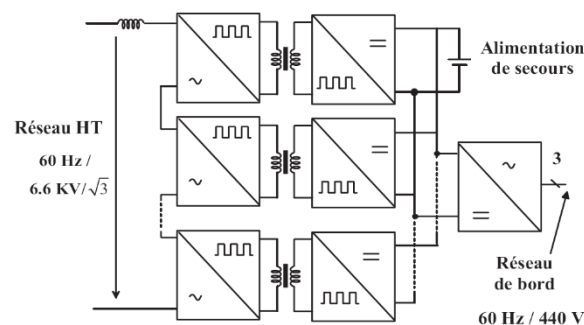


Figure 1.15 : Convertisseur multiniveaux dans les bâtiments maritimes.

1.7.5 Générateur à base d'une source d'énergie renouvelable

Vu que la place que prennent la production des énergies renouvelables, particulièrement les aérogénérateurs. L'association des convertisseurs multiniveaux permet d'améliorer la

forme d'onde en utilisant les différents niveaux de tension, injecté au point commun de connexion pour les aérogénérateurs à vitesse variable afin d'éviter la déconnexion de l'éolienne du réseau.

Ces convertisseurs contribuent à traiter les harmoniques, on associe ces dernier à des filtres (filtrage actif ou passif). La Figure (1.16) représente un aérogénérateur relié à un réseau à l'aide des convertisseurs multiniveaux [Mer 07].

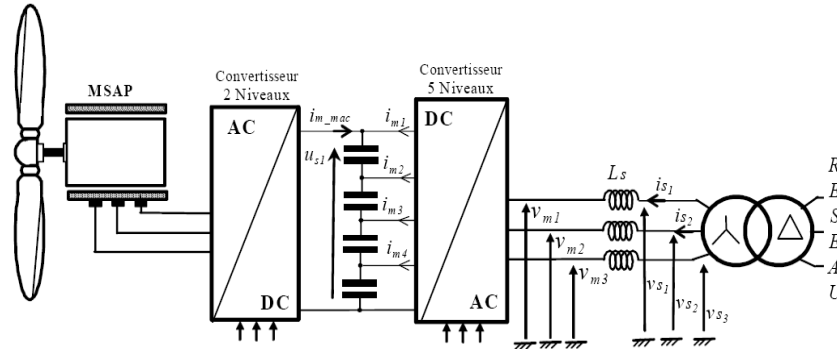


Figure 1.16 : Convertisseur multiniveaux inséré dans un générateur éolien.

1.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principaux concepts de la conversion multiniveaux d'énergie. Une étude brève sur la présentation des différentes topologies : homogènes, hybrides et des nouvelles topologies, leurs principes de fonctionnement, avantages et inconvénients.

A la fin de ce chapitre, on a montré les différentes applications et domaines d'intérêts des convertisseurs multiniveaux.

2.1 Introduction

L'onduleur est un convertisseur statique qui joue le rôle d'interface entre une source d'énergie électrique continue et une charge alimentée en alternatif. Les onduleurs de tension triphasés à cinq niveaux à structure NPC jouent un rôle incontournable dans des applications de forte puissance et haute tension.

Ce chapitre est consacré à la modélisation de l'onduleur de tension triphasé à cinq niveaux à structure NPC.

La modélisation est l'une des étapes essentielles pour la conception d'une commande, elle consiste à trouver le modèle mathématique décrivant le fonctionnement de système à commander.

2.2 Modélisation de l'onduleur de tension à cinq niveaux à structure NPC

Pour la modélisation de l'onduleur, on considère un fonctionnement idéalisé :

- Interrupteurs parfaits : la commutation des interrupteurs est instantanée (temps de fermeture et ouverture) et sans pertes, et que la chute de tension dans les interrupteurs est considérée nulle en conduction.
- Une charge équilibrée : la charge alimentée est équilibrée dans le sens où elle ne génère pas une composante homopolaire.
- Sources parfaites : la tension aux bornes du dipôle continu est constante et ne varie pas avec la puissance échangée.

2.2.1 Structure de l'onduleur cinq niveaux NPC

L'onduleur triphasé à cinq niveaux à structure NPC (Neural Point Clamping) étudié est constitué de trois bras et quatre sources de tension continue. Chaque bras comporte huit interrupteurs, six en série et les deux autres en parallèle, plus deux diodes. Chaque interrupteur est composé d'un transistor et une diode antiparallèle montée en tête bêche.

La Figure (2.1) montre le schéma électrique d'un onduleur triphasé à cinq niveaux à structure NPC.

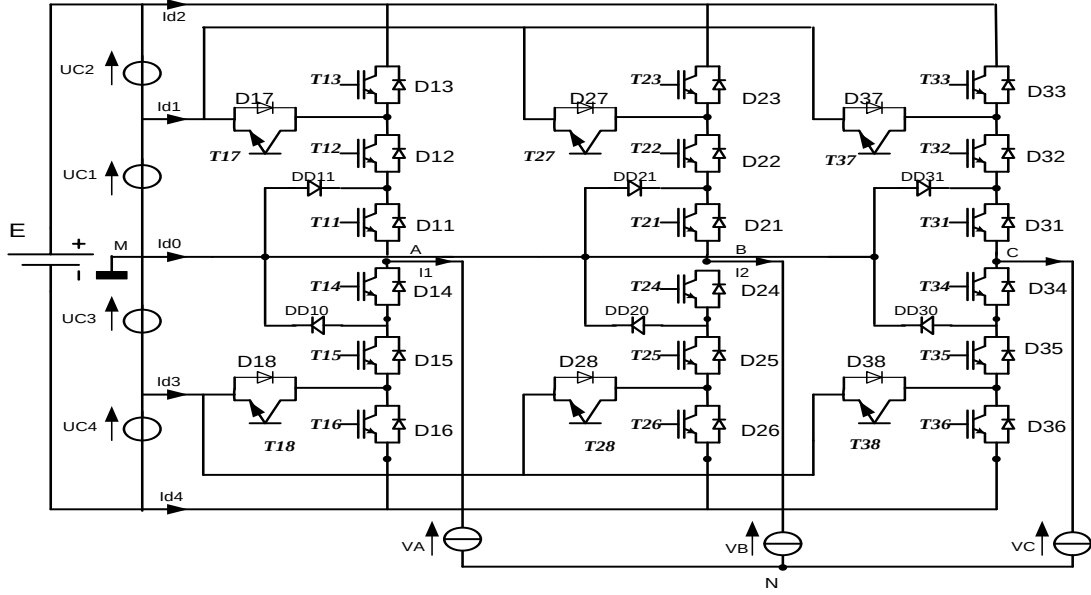


Figure 2.1 : Onduleur de tension triphasé à cinq niveaux à structure NPC.

Pour simplifier la représentation de l'onduleur, nous représentons chaque paire transistor-diode par un seul interrupteur bidirectionnel B_{KS} supposé parfait.

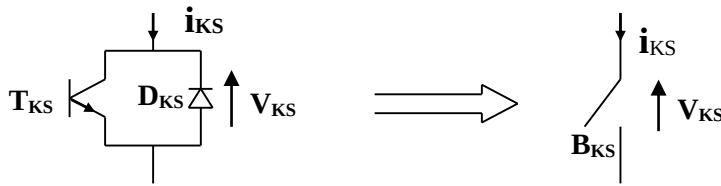


Figure 2.2 : Interrupteur bidirectionnel équivalent à la paire transistor-diode.

Pour un fonctionnement commandable de ce convertisseur, nous adoptons la commande complémentaire suivante [Mer 07], [Bouc 06] [Lour 10] :

$$\begin{cases} B_{K1} = \overline{B_{K5}} \\ B_{K2} = \overline{B_{K4}} \\ B_{K3} = \overline{B_{K6}} \\ B_{K7} = B_{K1} B_{K2} \overline{B_{K3}} \\ B_{K8} = B_{K4} B_{K5} \overline{B_{K6}} \end{cases} \quad (2.1)$$

2.2.2 Modélisation du fonctionnement d'un bras d'onduleur cinq niveaux NPC

La symétrie de la structure de l'onduleur triphasé cinq niveaux NPC permet sa modélisation par bras sans à priori sur la commande. Ensuite nous déduisons celui de l'onduleur complet Figure (2.3).

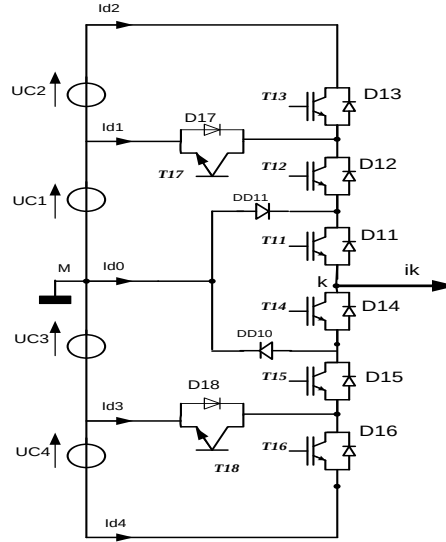


Figure 2.3 : Structure d'un bras de l'onduleur à cinq niveaux à structure NPC.

2.2.3 Différentes configurations d'un bras d'onduleur cinq niveaux NPC

Une analyse topologique d'un bras montre cinq configurations possibles. Ces dernières dépendent de la tension du bras **k** par rapport au point milieu **M** composé de cinq niveaux distincts. Le nombre de niveaux de tension de cet onduleur représente le nombre de potentiels différents du bus continu imposé à la tension de sortie. Les figures (a-e) présentent ces différentes configurations [Seg 77].

$$\text{On a : } U_{c1} = U_{c2} = U_{c3} = U_{c4} = E/4$$

➤ Première configuration E₁ [11100000]

Cette configuration est représentée sur la Figure (2.3.a) Dans ce cas, les interrupteurs B₁₁, B₁₂ et B₁₃ sont commandés à l'état **1** et les autres interrupteurs restent à l'état **0**. La valeur de la tension V_{KM} est donnée par l'équation (2.2) :

$$V_{KM} = B_{13} \frac{E}{4} + B_{11} B_{12} \frac{E}{4} = \frac{E}{2} \quad (2.2)$$

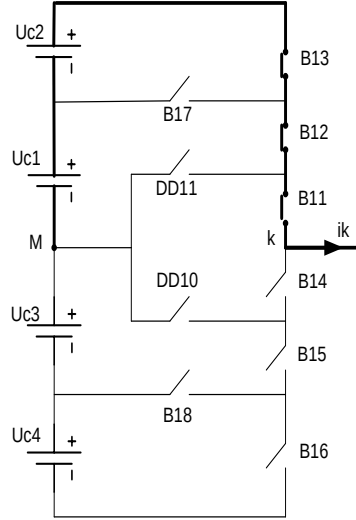


Figure 2.3.a : Configuration E₁ du premier bras de l'onduleur à cinq niveaux NPC.

➤ **Deuxième configuration E₂ [01100010]**

En commandant les interrupteurs B₁₁, B₁₂ et B₁₇ à l'état **1** et les autres à l'état **0** Figure (2.3.b), l'équation (2.3) donne la valeur de la tension V_{KM} correspondant à cette configuration

$$V_{KM} = B_{11} B_{12} B_{17} \frac{E}{4} = \frac{E}{4} \quad (2.3)$$

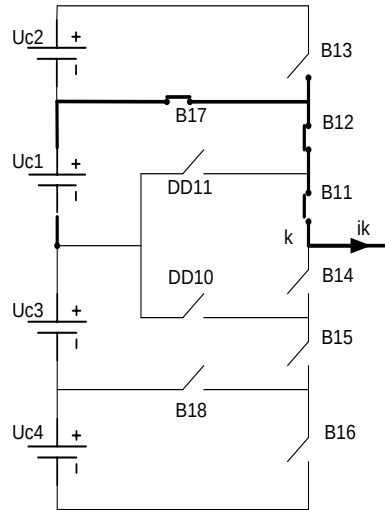


Figure 2.3.b : Configuration E₂ du premier bras de l'onduleur cinq niveaux NPC.

➤ **Troisième configuration E₃ [00110000]**

La conduction des interrupteurs B₁₁ et B₁₄ permet la mise à zéro de la tension V_{KM}

Figure (2.3.c). La valeur de la tension V_{KM} est donnée par l'équation (2.4) :

$$V_{KM} = B_{11} \frac{E}{4} - B_{14} \frac{E}{4} = 0 \quad (2.4)$$

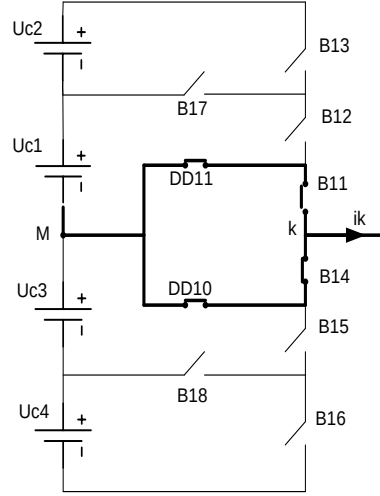


Figure 2.3.c : Mise à zéro d'un bras de l'onduleur cinq niveaux NPC.

➤ **Quatrième configuration E₄ [00011001]**

Cette configuration fournit la partie négative, définie par l'état des interrupteurs B₁₄, B₁₅ et B₁₈ Figure (2.3.d). L'équation (2.5) donne la valeur de V_{KM}.

$$V_{KM} = B_{14} B_{15} B_{18} \left(-\frac{E}{4}\right) = -\frac{E}{4} \quad (2.5)$$

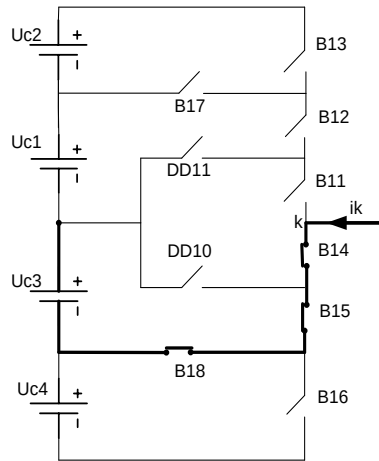


Figure 2.3.d : Configuration E₄ du premier bras de l'onduleur cinq niveaux NPC.

➤ **Cinquième configuration E₅ [00011100]**

Le cinquième niveau d'un bras de l'onduleur à cinq niveaux est montré par la Figure (2.3.e).

La valeur de la tension correspondante V_{KM} est donnée par l'équation (2.6) :

$$V_{KM} = -B_{16} \frac{E}{4} - B_{14} B_{15} \frac{E}{4} = -\frac{E}{2} \quad (2.6)$$

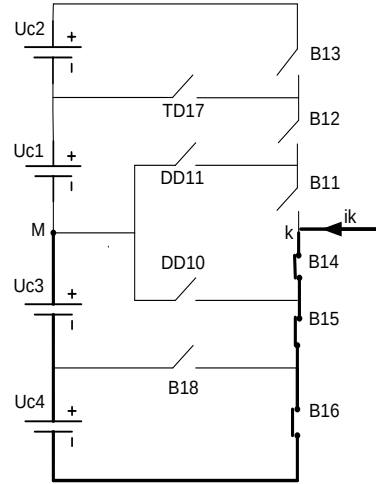


Figure 2.3.e : Configuration E_5 du premier bras d'onduleur cinq niveaux NPC.

Le tableau (1.1) donne les grandeurs électriques caractérisant chacune de ces configurations (Avec $\mathbf{M}$ origine des potentiels et V_{kM} ($K = A, B$ et C) le potentiel du nœud $\mathbf{M}$ du bras $\mathbf{k}$).

Configuration	Grandeurs électriques
E_0	$i_k = 0$
E_1	$V_{KM} = U_{C1} + U_{C2} = 2 U_C$
E_2	$V_{KM} = U_{C2} = U_C$
E_3	$V_{KM} = 0$
E_4	$V_{KM} = -U_{C3} = -U_C$
E_5	$V_{KM} = -U_{C3} - U_{C4} = -2 U_C$

Tableau 2.1 : Grandeurs électriques pour chacune des configurations d'un bras K de l'onduleur à cinq niveaux à structure NPC.

2.3 Modélisation en vue de la commande d'onduleur cinq niveaux NPC

2.3.1 Fonction de connexion des interrupteurs

On associe une fonction F_{ks} à chaque interrupteur, qui décrit son état fermé ou ouvert, tel que [Lour 10], [Lal 09] :

$$F_{ks} = \begin{cases} 1 & \text{si l'interrupteur } B_{ks} \text{ est fermé} \\ 0 & \text{si l'interrupteur } B_{ks} \text{ est ouvert} \end{cases} \quad (2.7)$$

2.3.2 Commande complémentaire

En utilisant la commande complémentaire (1.1), les fonctions de connexion des interrupteurs du bras k sont liées par les relations suivantes :

$$\begin{cases} F_{K1} = 1 - F_{K5} \\ F_{K2} = 1 - F_{K4} \\ F_{K3} = 1 - F_{K6} \\ F_{K7} = F_{K1} F_{K2} \overline{F_{K3}} \\ F_{K8} = F_{K4} F_{K5} \overline{F_{K6}} \end{cases} \quad (2.8)$$

2.3.3 Fonction de connexion du demi-bras

On définit pour l'onduleur à cinq niveaux une fonction logique de connexion du demi-bras notée F_{km}^b tel que [Mer 07], [Tal 04] :

k Indice du bras ($k = 1, 2, 3$).

$$m = \begin{cases} 0 & \text{Pour le demi-bras du bas} \\ 1 & \text{Pour le demi-bras du haut} \end{cases} \quad (2.9)$$

Les fonctions de connexion des trois demi-bras s'expriment comme suites :

$$\begin{cases} F_{11}^b = F_{11} F_{12} F_{13} \\ F_{10}^b = F_{14} F_{15} F_{16} \end{cases} \begin{cases} F_{21}^b = F_{21} F_{22} F_{23} \\ F_{20}^b = F_{24} F_{25} F_{26} \end{cases} \begin{cases} F_{31}^b = F_{31} F_{32} F_{33} \\ F_{30}^b = F_{34} F_{35} F_{36} \end{cases} \quad (2.10)$$

Les fonctions de connexion des interrupteurs parallèles du bras k sont liées par les équations suivantes :

$$\begin{cases} F_{K7}^b = F_{K1} F_{K2} (1 - F_{K3}) \\ F_{K8}^b = F_{K4} F_{K5} (1 - F_{K6}) \end{cases} \quad (2.11)$$

2.3.4 Modélisation aux valeurs instantanées

Cette modélisation sera effectuée en considérant l'association de l'onduleur de tension triphasé à cinq niveaux avec une charge triphasé couplée en étoile avec le neutre isolé.

Nous allons tout d'abord définir les notations et les hypothèses que nous avons utilisées :

- Les tensions d'entrée de l'onduleur sont supposées parfaites. Veux dire que ; quel que soit le courant i_k émis par cette alimentation, la tension à ses bornes reste constante ($U_{c1}=U_{c2}=U_{c3}=U_{c4}$)
- Le convertisseur est contrôlable c'est-à-dire que les transitions entre les différentes configurations dépendent que du contrôle externe B_{ki} .
- La chute de tension aux bornes des semi-conducteurs est négligeable devant U_{Cj} ($j=1, 2, 3,4$).
- La charge est triphasée équilibrée, couplée on étoile avec le neutre isolé. D'ou :

$$\begin{cases} i_A + i_B + i_C = 0 \\ V_A + V_B + V_C = 0 \end{cases} \quad (2.12)$$

Les potentiels des nœuds A, B et C de l'onduleur triphasé à cinq niveaux NPC par rapport au point milieu (M) s'expriment comme suit :

$$\begin{cases} V_{AM} = F_{11}F_{12}(1-F_{13})U_{C1} + F_{11}F_{12}F_{13}(U_{C1} + U_{C2}) - F_{14}F_{15}(1-F_{16})U_{C3} - F_{14}F_{15}F_{16}(U_{C3} + U_{C4}) \\ V_{BM} = F_{21}F_{22}(1-F_{23})U_{C1} + F_{21}F_{22}F_{23}(U_{C1} + U_{C2}) - F_{24}F_{25}(1-F_{26})U_{C3} - F_{24}F_{25}F_{26}(U_{C3} + U_{C4}) \\ V_{CM} = F_{31}F_{32}(1-F_{33})U_{C1} + F_{31}F_{32}F_{33}(U_{C1} + U_{C2}) - F_{34}F_{35}(1-F_{36})U_{C3} - F_{34}F_{35}F_{36}(U_{C3} + U_{C4}) \end{cases} \quad (2.13)$$

Pour les tensions simples on a :

$$\begin{cases} V_A = V_{AN} = V_{AM} - V_{NM} \\ V_B = V_{BN} = V_{BM} - V_{NM} \\ V_C = V_{CN} = V_{CM} - V_{NM} \end{cases} \quad (2.14)$$

Les équations des mailles du système source – onduleur – charge donnent :

$$V_{AM} + V_{BM} + V_{CM} = V_A + V_B + V_C + 3V_{NM} \quad (2.15)$$

Avec V_{NM} la tension entre le point milieu de l'alimentation continue de l'onduleur **M** et le point neutre de la charge **N**, et dans le cas où le neutre de la charge est isolé permet d'exprimer :

$$V_{NM} = \frac{1}{3}(V_{AM} + V_{BM} + V_{CM}) \quad (2.16)$$

À partir des équations (2.14) et (2.15) on a :

$$\begin{cases} V_A = V_{AM} - \frac{1}{3}(V_{AM} + V_{BM} + V_{CM}) = \frac{1}{3}(2V_{AM} - V_{BM} - V_{CM}) \\ V_B = V_{BM} - \frac{1}{3}(V_{AM} + V_{BM} + V_{CM}) = \frac{1}{3}(-V_{AM} + 2V_{BM} - V_{CM}) \\ V_C = V_{CM} - \frac{1}{3}(V_{AM} + V_{BM} + V_{CM}) = \frac{1}{3}(-V_{AM} - V_{BM} + 2V_{CM}) \end{cases} \quad (2.17)$$

En introduisant les fonctions de connexions des demi-bras et des interrupteurs en parallèles, on aura :

$$\begin{bmatrix} V_{AM} \\ V_{BM} \\ V_{CM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{17} + F_{11}^b \\ F_{27} + F_{21}^b \\ F_{37} + F_{31}^b \end{bmatrix} U_{C1} + \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} U_{C2} - \begin{bmatrix} F_{18} + F_{10}^b \\ F_{28} + F_{20}^b \\ F_{38} + F_{30}^b \end{bmatrix} U_{C3} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} U_{C4} \quad (2.18)$$

D'après l'équation (2.18), on peut déduire que l'onduleur à cinq niveaux est une mise en série de quatre onduleurs à deux niveaux ou de deux onduleurs à trois niveaux.

Dans le cas où ($U_{C1} = U_{C2} = U_{C3} = U_{C4} = U_C$), la relation se réduit à :

$$\begin{bmatrix} V_{AM} \\ V_{BM} \\ V_{CM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{17} + 2F_{11}^b - F_{18} - 2F_{10}^b \\ F_{27} + 2F_{21}^b - F_{28} - 2F_{20}^b \\ F_{37} + 2F_{31}^b - F_{38} - 2F_{30}^b \end{bmatrix} U_C \quad (2.19)$$

Les tensions composées s'expriment comme suit :

$$\begin{cases} U_{AB} = V_{AM} - V_{BM} \\ U_{BC} = V_{BM} - V_{CM} \\ U_{CA} = V_{CM} - V_{AM} \end{cases} \quad (2.20)$$

Donc, à partir des fonctions de connexions, ces tensions s'écrivent sous la forme :

$$\begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{17} + 2F_{11}^b - F_{18} - 2F_{10}^b \\ F_{27} + 2F_{21}^b - F_{28} - 2F_{20}^b \\ F_{37} + 2F_{31}^b - F_{38} - 2F_{30}^b \end{bmatrix} U_C \quad (2.21)$$

Les tensions simples sont liées aux tensions composées par les relations :

$$\begin{cases} V_{AN} = V_A = \frac{1}{3}(U_{AB} - U_{CA}) \\ V_{BN} = V_B = \frac{1}{3}(U_{BC} - U_{AB}) \\ V_{CN} = V_C = \frac{1}{3}(U_{CA} - U_{BC}) \end{cases} \quad (2.22)$$

Et donc, en fonctions de connexions sous la forme :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{17} + 2F_{11}^b - F_{18} - 2F_{10}^b \\ F_{27} + 2F_{21}^b - F_{28} - 2F_{20}^b \\ F_{37} + 2F_{31}^b - F_{38} - 2F_{30}^b \end{bmatrix} U_C \quad (2.23)$$

Les courants d'entrée $i_{d1}, i_{d2}, i_{d3}, i_{d4}, i_{d0}$ de l'onduleur à cinq niveaux sont liés aux courants i_1, i_2, i_3 de la charge par les expressions qui suivent :

$$\begin{cases} i_{d1} = F_{17} i_1 + F_{27} i_2 + F_{37} i_3 \\ i_{d2} = F_{11}^b i_1 + F_{21}^b i_2 + F_{31}^b i_3 \\ i_{d3} = F_{18} i_1 + F_{28} i_2 + F_{38} i_3 \\ i_{d4} = F_{10}^b i_1 + F_{20}^b i_2 + F_{30}^b i_3 \end{cases} \quad (2.24)$$

$$i_{d0} = (i_1 + i_2 + i_3) - (i_{d1} + i_{d2} + i_{d3} + i_{d4}) \Leftrightarrow$$

$$i_{d0} = [1 - (F_{17} + F_{18} + F_{11}^b + F_{10}^b) \cdot i_1] + [1 - (F_{27} + F_{28} + F_{21}^b + F_{20}^b) \cdot i_2] + [1 - (F_{37} + F_{38} + F_{31}^b + F_{30}^b) \cdot i_3] \quad (2.25)$$

Pour l'onduleur triphasé à cinq niveaux, le vecteur d'état est :

$$[U_{C1} U_{C2} U_{C3} U_{C4} i_1 i_2 i_3]^t \quad (2.26)$$

Et ces entrées internes sont :

$$[V_A V_B V_C i_{d1} i_{d2} i_{d3} i_{d4} i_{d0}]^t \quad (2.27)$$

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la modélisation d'un onduleur à cinq niveaux à structure NPC. Nous avons présenté un modèle pour l'onduleur ainsi leurs

commandes complémentaires optimales et les matrices de transferts en utilisant les fonctions de connexions.

Les résultats obtenus de cette analyse sont :

- L'onduleur à cinq niveaux est la mise en série de deux onduleurs à trois niveaux ou bien la mise en série de quatre onduleurs à deux niveaux.
- L'utilisation des fonctions de commutations, de connexion des interrupteurs et des demi-bras permet l'extrapolation des relations donnant les différentes tensions.

L'application de ces modèles élaborés sera faite dans le chapitre suivant qui sera consacré aux stratégies de commandes et une application sur une charge R-L.

3.1 Introduction

L'amélioration de la forme de la tension de sortie des convertisseurs est un axe de recherche très actif, qui ne cesse de se développer en profitant de la technologie des semi-conducteurs et des calculateurs numériques.

Pour améliorer la tension de sortie d'un onduleur, on peut agir sur sa structure ou sur la méthode de sa commande. Généralement on utilise des commandes par modulation de largeurs d'impulsions. On rencontre plusieurs stratégies de ce type de commande, telles que la modulation triangulo-sinusoïdale, la modulation par hystérésis, et la modulation vectorielle.

Dans ce chapitre, nous allons appliquer les différentes techniques de la modulation triangulo-sinusoïdale et la modulation vectorielle pour la commande de l'onduleur cinq niveaux à structure NPC.

3.2 Stratégies de commande de l'onduleur de tension cinq niveaux à structure NPC

Afin de générer une tension la plus sinusoïde possible, différentes stratégies de commande ont été proposées pour les onduleurs à deux et à trois niveaux.

Les récents progrès technologiques dans le domaine des dispositifs à semi-conducteurs ont élargi le domaine d'application des techniques de modulation de largeurs d'impulsions dans le contrôle de la tension de sortie des convertisseurs statiques.

Dans cette partie, nous élaborons quelques stratégies de commande MLI de l'onduleur triphasé à cinq niveaux à structure NPC. Certaines stratégies que nous allons présenter sont des extensions de celles des onduleurs à deux et à trois niveaux. Qui sont :

- Commande PWM à quatre porteuses unipolaires type1.
- Commande PWM à quatre porteuses unipolaires type2.
- Commande PWM à quatre porteuses bipolaires.
- Commande PWM à quatre porteuses en dent de scie.
- Commande PWM à quatre porteuses unipolaires type1 avec injection de l'harmonique trois.
- Commande PWM à quatre porteuses unipolaires type2 avec injection de l'harmonique trois.
- Commande PWM à quatre porteuses bipolaires avec injection de l'harmonique trois.

- Commande PWM à quatre porteuses en dent de scie avec injection de l'harmonique trois.
- La modulation vectorielle (SVM)

L'analyse de ces différentes stratégies sera basée sur la bande de réglage et le spectre harmonique des tensions de sortie.

3.2.1 Commande PWM modulante sinusoïdale

Le principe de cette stratégie consiste à utiliser l'intersection d'une onde de référence ou modulante (qui est l'image de l'onde de sortie qu'on veut obtenir) sinusoïdale, avec une onde de modulation ou porteuse, généralement triangulaire d'où l'appellation triangulo-sinusoïdale.

Les tensions de référence de l'onduleur triphasé à cinq niveaux qui permettent d'obtenir un système de tension triphasé équilibré sont données par l'équation (3.1) [Mer 07], [Tham 10], [Tal 04].

$$\begin{cases} V_{ref\ 1} = V_m \sin(\omega t) \\ V_{ref\ 2} = V_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{ref\ 3} = V_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (3.1)$$

Les caractéristiques de la modulation sont [Mer 07], [Tham 10], [Tal 04].

- L'indice de modulation " m " défini comme étant le rapport de la fréquence f_p de la porteuse à la fréquence f de la tension de référence $m = \frac{f_p}{f}$
- Le taux de modulation ou coefficient de réglage de tension " r " comme étant le rapport de l'amplitude référence V_m de et de la tension U_{pm} de la porteuse.

$$r = \frac{V_m}{U_{pm}}$$

NB :

- Les équations des porteuses et les algorithmes de commande sont les mêmes pour le même type de porteuses quel que soit la modulante pour cela on va les citer que dans la partie de la commande PWM modulante sinusoïdale.

3.2.1.1 Commande PWM à quatre porteuses unipolaires type1

Dans cette commande, on utilise quatre porteuses ($U_{p1}, U_{p2}, U_{p3}, U_{p4}$) décalées l'une par rapport à l'autre d'un niveau de tension U_{pm} . Les équations des porteuses sont les suivantes [Mer 07], [Tham 10], [Tal 04].

$$\begin{cases} U_{p1}(t) = \begin{cases} U_{pm} \frac{t}{T_p} & 0 < t \leq \frac{T_p}{2} \\ U_{pm} \left(1 - \frac{t}{T_p}\right) & \frac{T_p}{2} < t \leq T_p \end{cases} \\ U_{p2}(t) = U_{p1}(t) + U_{pm} \\ U_{p3}(t) = U_{p1}(t) - U_{pm} \\ U_{p4}(t) = U_{p1}(t) - 2U_{pm} \end{cases} \quad (3.2)$$

L'algorithme de commande pour un bras k de cet onduleur est le suivant :

$$\begin{cases} [0 < V_{refk} \text{ et } 0 \leq |V_{refk}| \leq U_C \text{ et } |V_{refk}| \leq U_{p1}] \Rightarrow V_{Km} = 0 \\ [0 < V_{refk} \text{ et } 0 \leq |V_{refk}| \leq U_C \text{ et } |V_{refk}| > U_{p1}] \Rightarrow V_{Km} = U_C \\ [0 < V_{refk} \text{ et } U_C \leq |V_{refk}| \leq 2U_C \text{ et } |V_{refk}| \leq U_{p2}] \Rightarrow V_{Km} = U_C \\ [0 < V_{refk} \text{ et } U_C \leq |V_{refk}| \leq 2U_C \text{ et } |V_{refk}| > U_{p2}] \Rightarrow V_{Km} = 2U_C \\ [V_{refk} < 0 \text{ et } 0 \leq |V_{refk}| \leq U_C \text{ et } |V_{refk}| \leq U_{p1}] \Rightarrow V_{Km} = 0 \\ [V_{refk} < 0 \text{ et } 0 \leq |V_{refk}| \leq U_C \text{ et } |V_{refk}| > U_{p1}] \Rightarrow V_{Km} = -U_C \\ [V_{refk} < 0 \text{ et } U_C \leq |V_{refk}| \leq 2U_C \text{ et } |V_{refk}| \leq U_{p2}] \Rightarrow V_{Km} = -U_C \\ [V_{refk} < 0 \text{ et } U_C \leq |V_{refk}| \leq 2U_C \text{ et } |V_{refk}| > U_{p2}] \Rightarrow V_{Km} = -2U_C \end{cases} \quad (3.3)$$

Les différents signaux de la stratégie triangulo-sinusoïdale à quatre porteuses unipolaire type 1 pour (**m=6, r=0.8**) sont montrés dans la Figure (3.1).

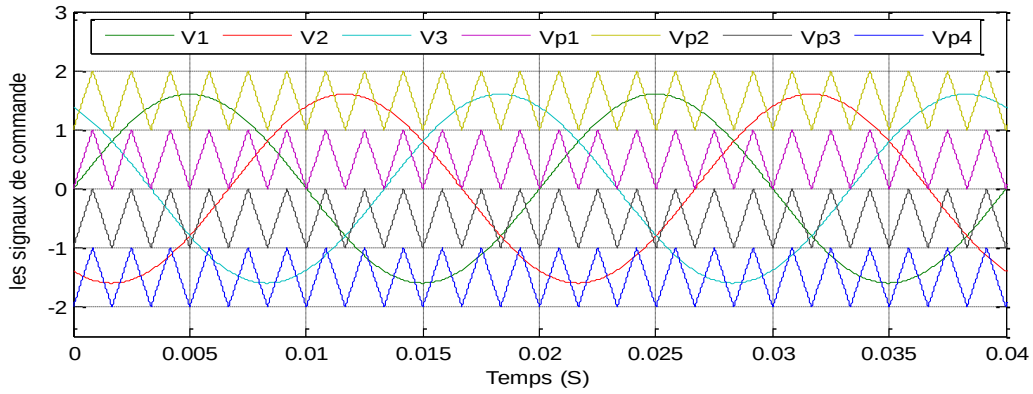
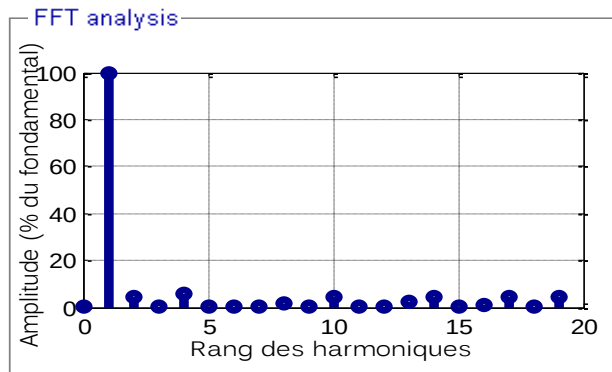
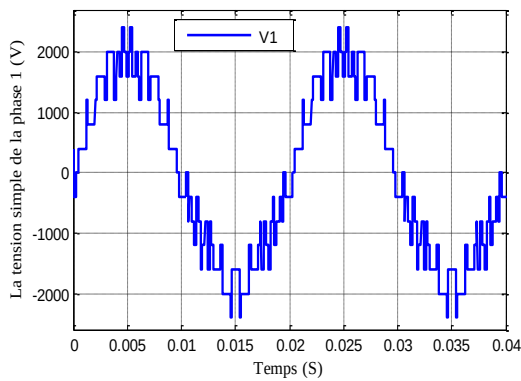


Figure 3.1 : Tensions de références et porteuses.

Les figures (3.2) et (3.3) représentent la tension de la sortie V1 et son spectre d'harmonique pour différentes valeurs de m et r :

On varie m et on fixe ($r=0.8$) :

$m=6$



$m=15$

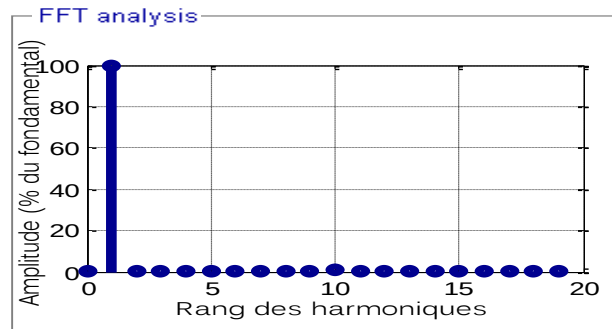
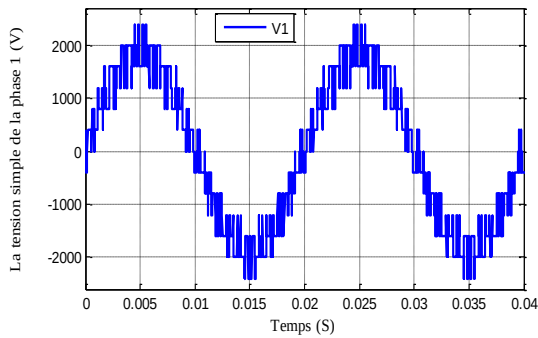
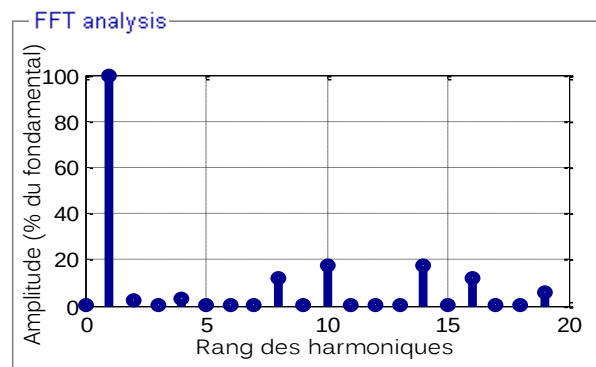
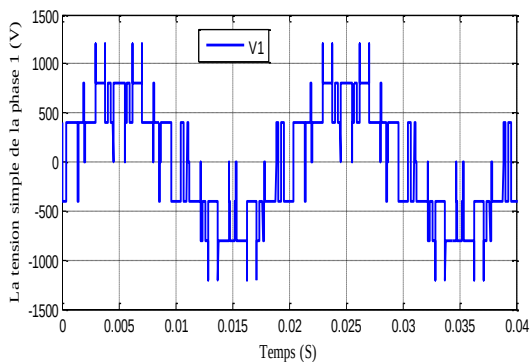


Figure 3.2 : Tension simple de la phase 1 et son analyse harmonique pour ($m=6$, $m=15$).

On varie r et on fixe ($m=6$) :

$r=0.3$



$r=0.5$

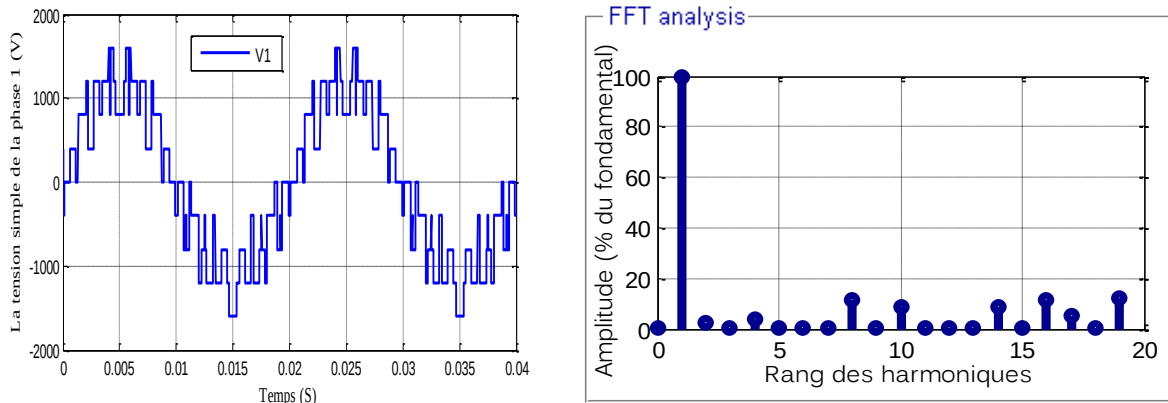


Figure 3.3 : Tension simple de la phase 1 et son analyse harmonique pour ($r=0.3$, $r=0.5$).

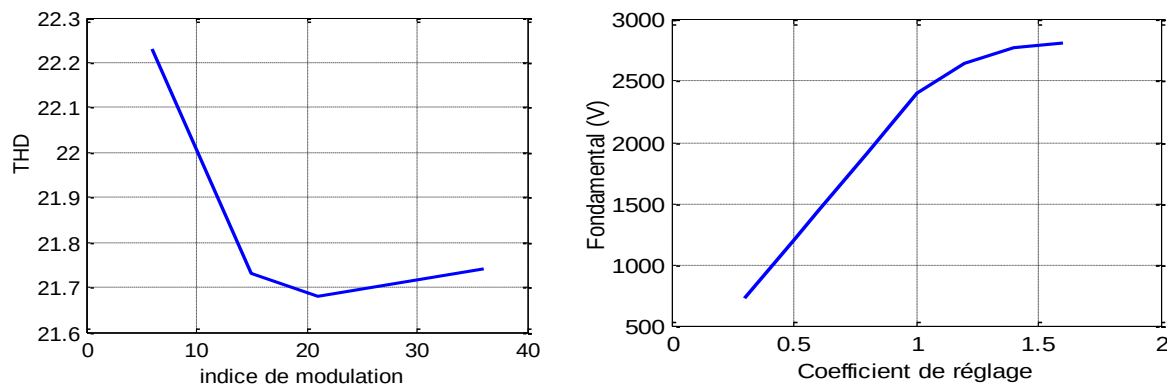


Figure 3.4 : Evolutions du THD en fonction de l'indice de modulation et l'amplitude du fondamental en fonction du coefficient de réglage.

Interprétations des résultats

- ✓ Cette stratégie permet un réglage linéaire de l'amplitude du fondamental de $r=0.3$ à $r=1$, et décroissance de taux d'harmonique de distorsion.
- ✓ L'analyse spectrale d'harmonique de la tension simple de la phase A de l'onduleur triphasé à cinq niveaux montre seulement la présence des harmoniques paires.
- ✓ L'augmentation de l'indice de modulation m permet de pousser les harmoniques vers les fréquences élevées et donc facilement filtrées

3.2.1.2 Commande PWM à quatre porteuses unipolaires type 2

Dans cette commande, on utilise quatre porteuses ($U_{p1}, U_{p2}, U_{p3}, U_{p4}$) identique à celles utilisées pour la commande précédente, sauf que, les tensions (U_{p1}, U_{p3}), (U_{p2}, U_{p4}) sont symétriques par rapport à l'axe des temps. D'où les équations des porteuses sont les [Mer 07], [Tham 10], [Tal 04]

$$\begin{cases} U_{p1}(t) = \begin{cases} U_{pm} \frac{t}{T_p} & 0 < t \leq \frac{T_p}{2} \\ U_{pm} \left(1 - \frac{t}{T_p}\right) & \frac{T_p}{2} < t \leq T_p \end{cases} \\ U_{p2}(t) = U_{p1}(t) + U_{pm} \\ U_{p3}(t) = -U_{p1}(t) \\ U_{p4}(t) = -U_{p2}(t) \end{cases} \quad (3.4)$$

Les différents signaux de la stratégie triangulo-sinusoidale unipolaire type 2 à quatre porteuses ($m=6$, $r=0.8$)

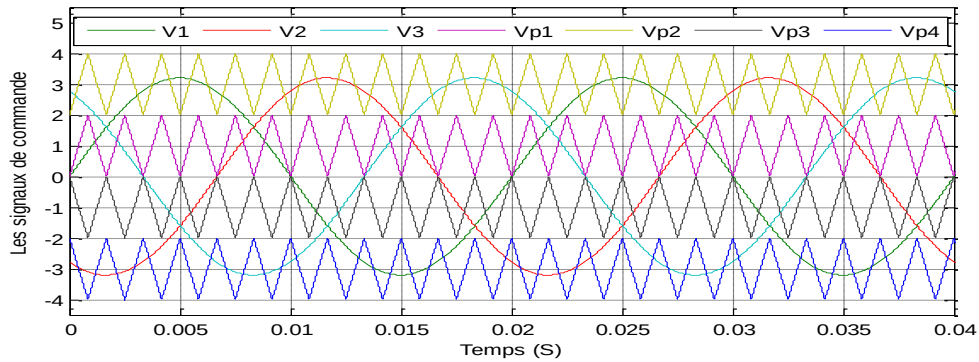
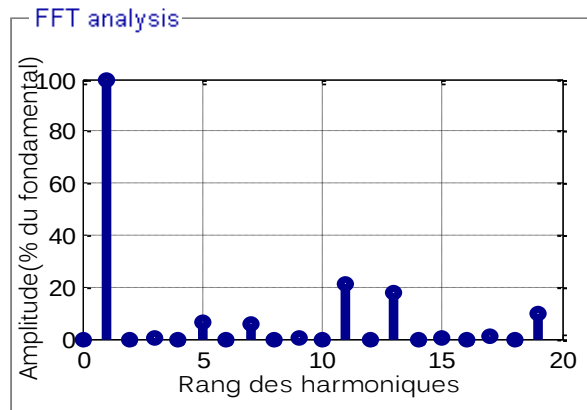
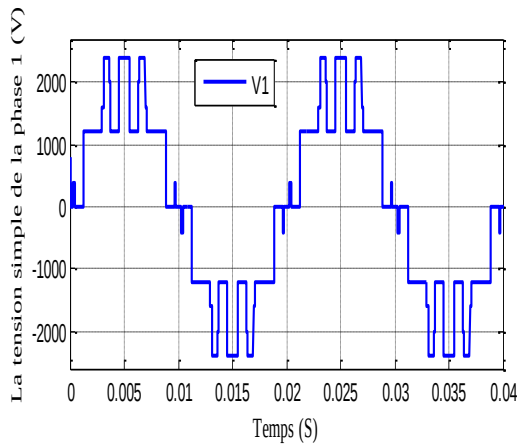


Figure 3.1 : Tensions de références et porteuses.

On varie m et on fixe ($r=0.8$) :

$m=6$



$m=15$

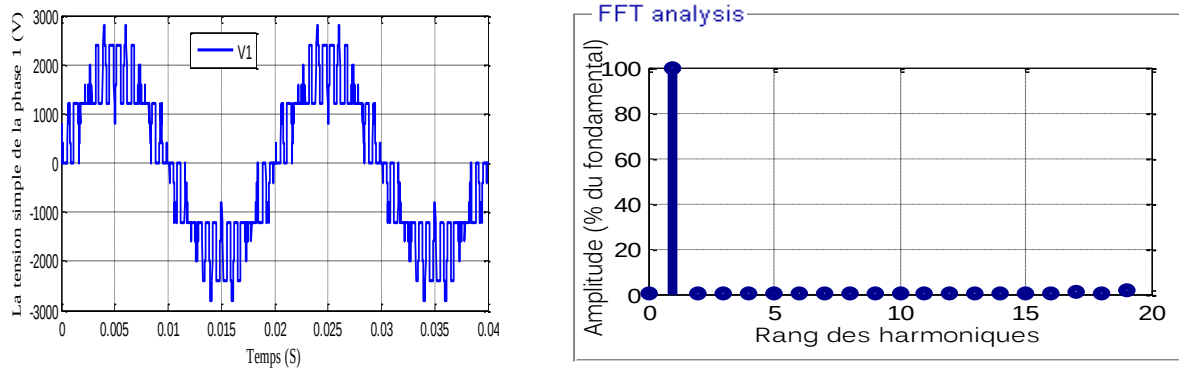
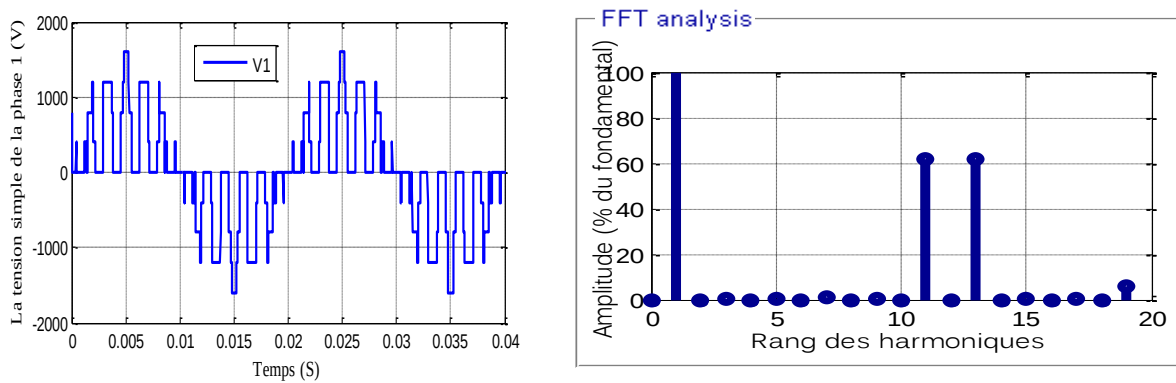


Figure 3.2 : Tension simple de la phase 1 et son analyse harmonique pour ($m=6$, $m=15$).

On varie r et on fixe ($m=6$) :

$r=0.3$



$r=0.5$

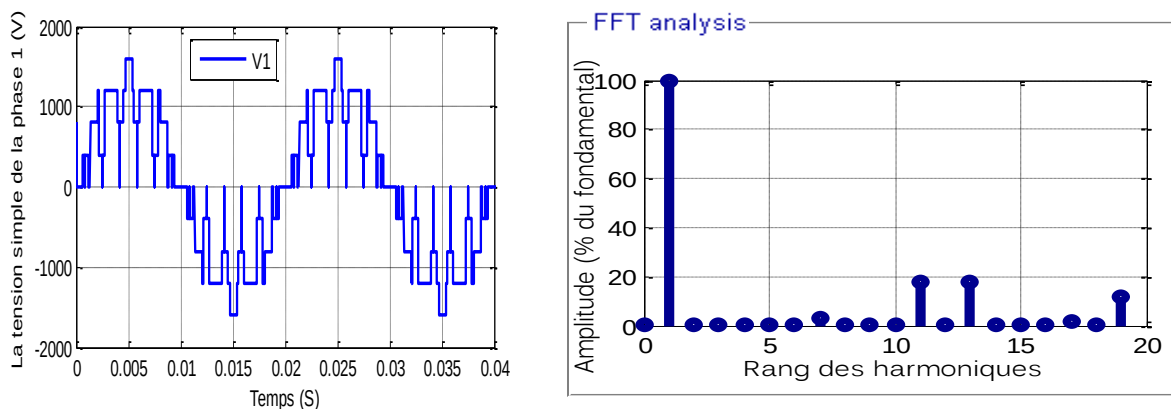


Figure 3.3 : Tension simple de la phase 1 et son analyse harmonique pour ($r=0.3$, $r=0.5$).

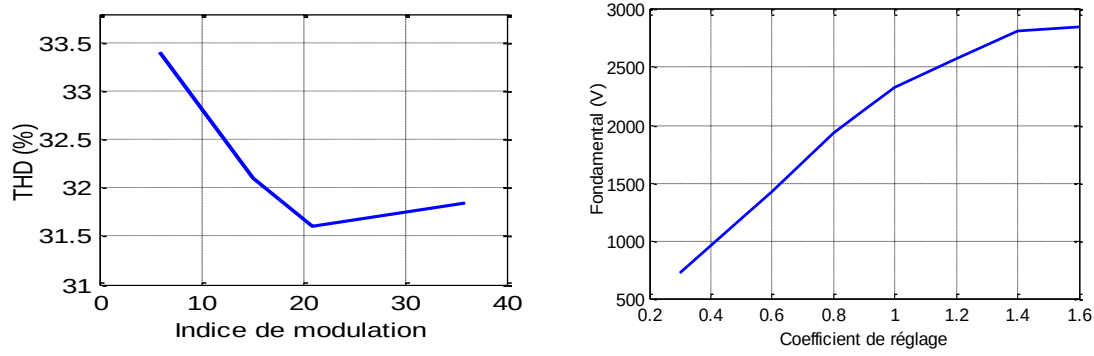


Figure 3.4 : Evolutions du THD en fonction de l'indice de modulation et l'amplitude du fondamental en fonction du coefficient de réglage.

Interprétation des résultats

- ✓ Cette stratégie permet un réglage linéaire de l'amplitude du fondamental de $r=0.3$ à $r=1$, et décroissance de taux d'harmonique de distorsion.
- ✓ L'analyse spectrale d'harmonique de la tension simple de la phase A de l'onduleur triphasé à cinq niveaux montre seulement la présence des harmoniques impaires.
- ✓ L'augmentation de l'indice de modulation m permet de pousser les harmoniques vers les fréquences élevées et donc facilement filtrées

3.2.1.3 Commande PWM à quatre porteuses bipolaires

Les quatre porteuses (U_{p1} ; U_{p2} ; U_{p3} ; U_{p4}) utilisées sont déphasés d'un quart période ($T_p/4$) l'une par rapport à l'autre, définies comme suit [Mer 07], [Tham 10], [Tal 04] [Him 15].

$$\begin{cases} U_{p1} = \begin{cases} 2U_{pm} \left(4 \frac{t}{T_p} - 1 \right) & 0 < t \leq \frac{T_p}{2} \\ 2U_{pm} \left(-4 \frac{t}{T_p} + 3 \right) & \frac{T_p}{2} < t \leq T_p \end{cases} \\ U_{p2} = U_{p1} \left(t - \frac{T_p}{4} \right) \\ U_{p3} = U_{p1} \left(t - \frac{T_p}{2} \right) \\ U_{p4} = U_{p1} \left(t - \frac{3T_p}{4} \right) \end{cases} \quad (3.5)$$

Les différents signaux de la stratégie triangulo-sinusoïdale à quatre porteuses bipolaire ($m=6$, $r=0.8$)

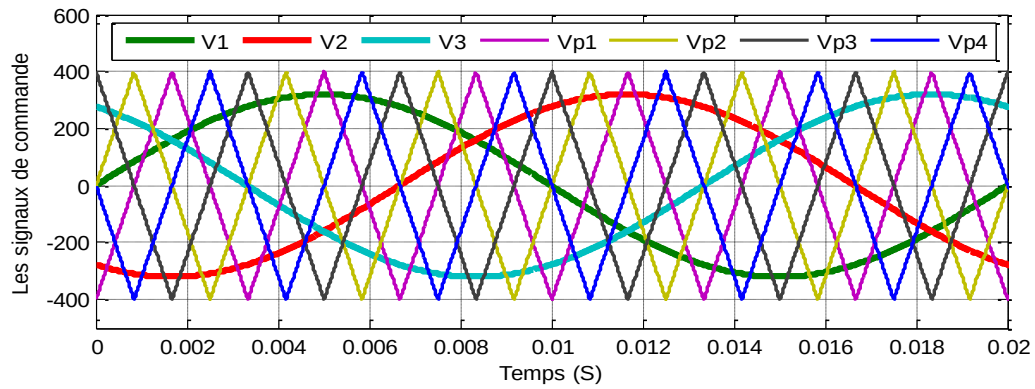
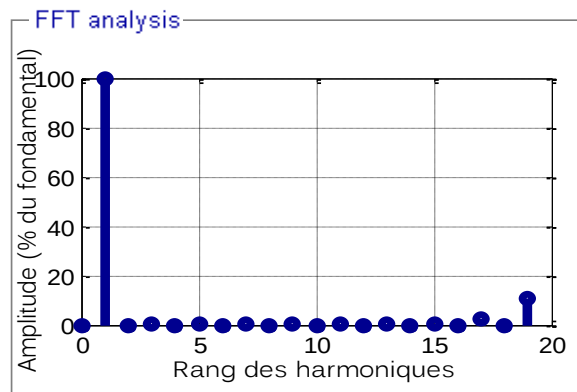
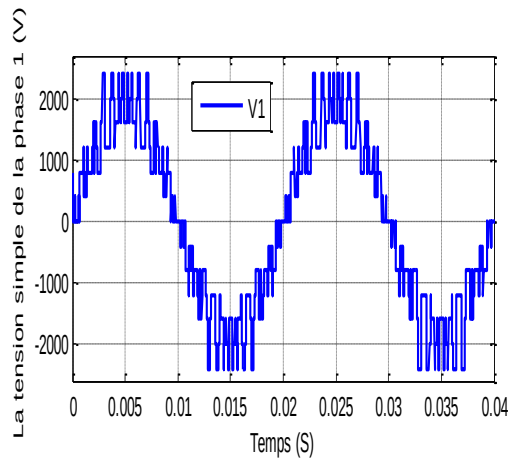


Figure 3.1 : Tensions de références et porteuses.

On varie m et on fixe ($r=0.8$) :

$m=6$



$m=15$

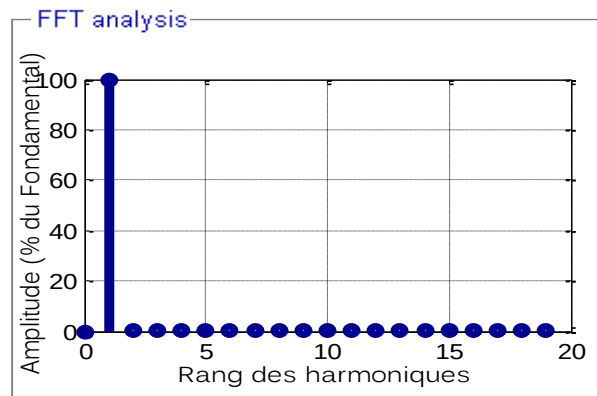
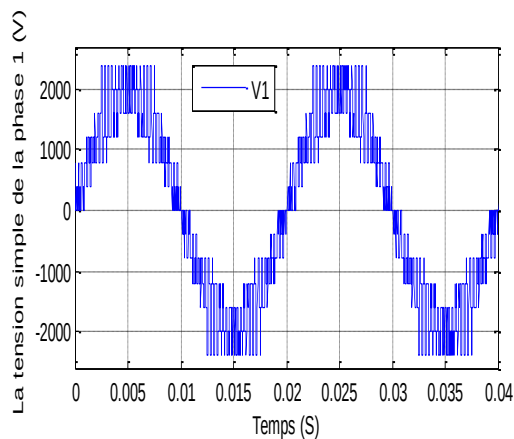
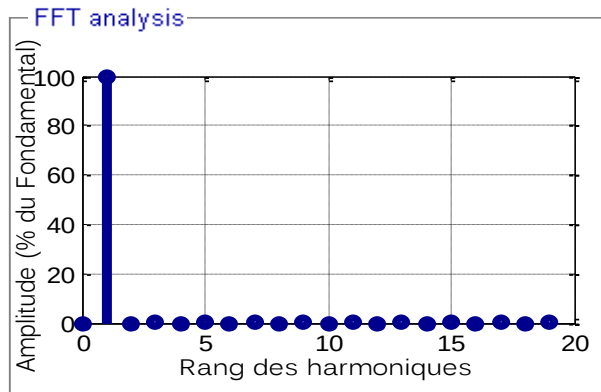
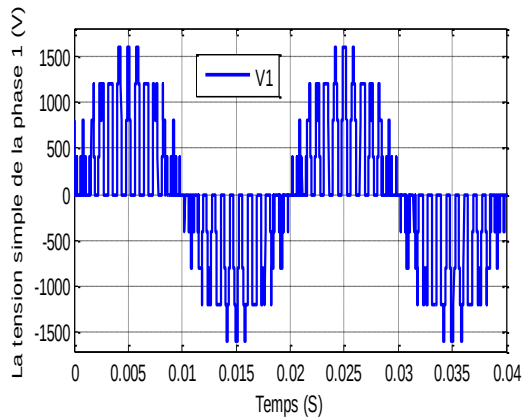


Figure 3.2 : Tension simple de la phase 1 et son analyse harmonique pour ($m=6$, $m=15$).

On varie r et on fixe ($m=6$) :

$r=0.3$



$r=0.5$

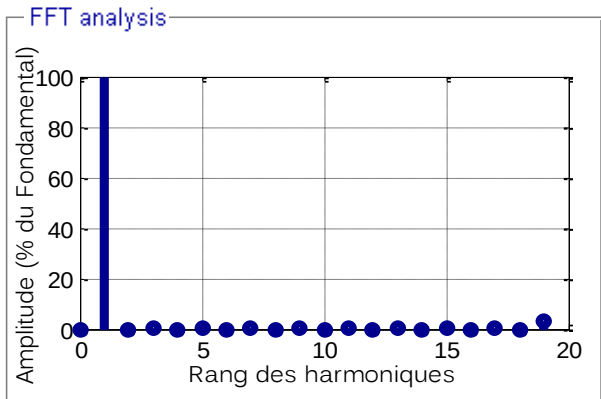
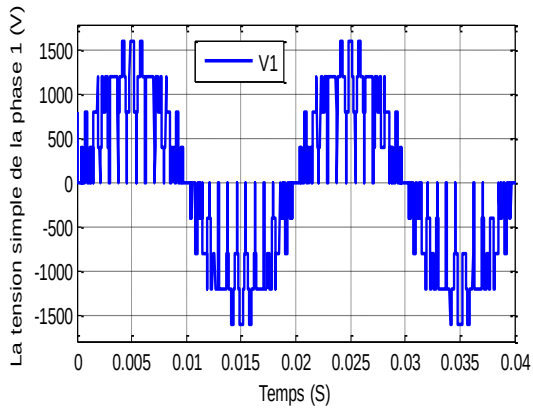


Figure 3.3 : Tension simple de la phase 1 et son analyse harmonique pour ($r=0.3$, $r=0.5$).

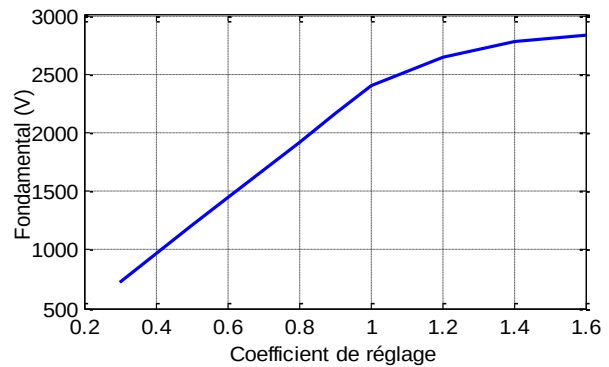
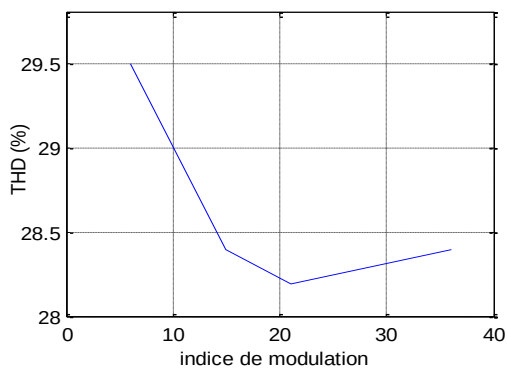


Figure 3.4 : Evolutions du THD en fonction de l'indice de modulation et l'amplitude du fondamental en fonction du coefficient de réglage.

Interprétation des résultats

- ✓ Quelque soit m pair ou impair, la tension $V1$ ne présente que des harmoniques impaires.
- ✓ La commande de cette stratégie permet un réglage linéaire de l'amplitude du fondamental de $r=0.3$ à $r=1$.
- ✓ L'augmentation de l'indice de modulation m permet de pousser les harmoniques vers les fréquences élevées et donc facilement filtrées.

3.2.1.4 Commande PWM à quatre porteuses en dent de scie

Afin d'améliorer le taux d'harmoniques, on utilise quatre porteuses en dents de scie bipolaires ($U_{p1}, U_{p2}, U_{p3}, U_{p4}$) déphasées d'un quart période ($T_p/4$) l'une par rapport à l'autre [Mer 07], [Tham 10], [Tal 04].

Les différentes équations des différentes porteuses utilisées dans cette stratégie sont :

$$\begin{cases} U_{p1} = 2U_{pm} \left(-2\frac{t}{T_p} + 1 \right) & 0 < t \leq T_p \\ U_{p2} = U_{p1} \left(t - \frac{T_p}{4} \right) \\ U_{p3} = U_{p1} \left(t - \frac{T_p}{2} \right) \\ U_{p4} = U_{p1} \left(t - \frac{3T_p}{4} \right) \end{cases} \quad (3.6)$$

Les différents signaux de la stratégie triangulo-sinusoïdale à quatre porteuses en dent de scie ($m=6, r=0.8$)

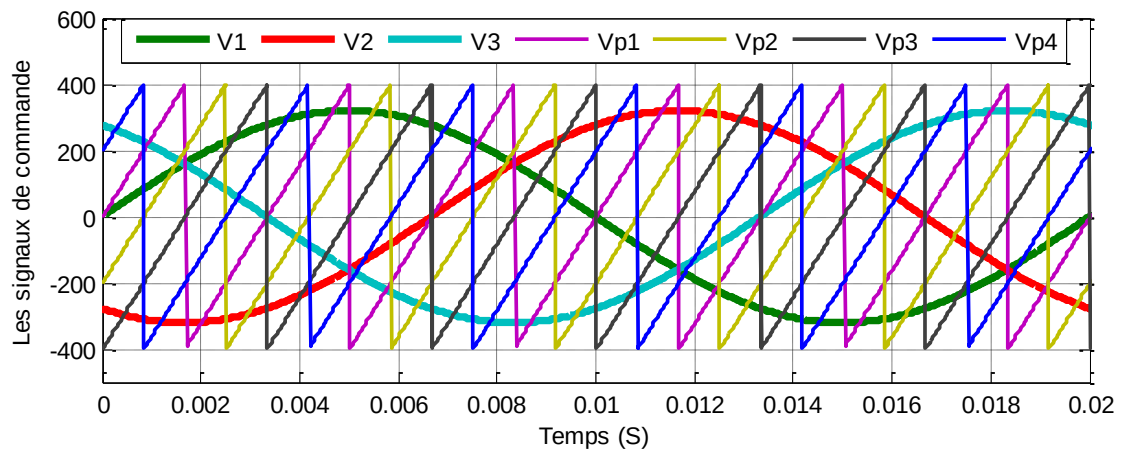
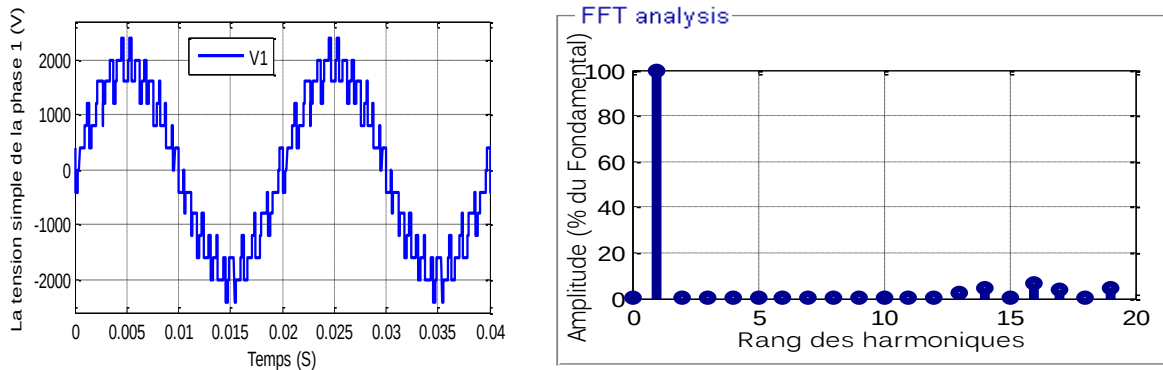


Figure 3.1 : Tensions de références et porteuses.

On varie m et on fixe ($r=0.8$) :

$m=6$



$m=15$

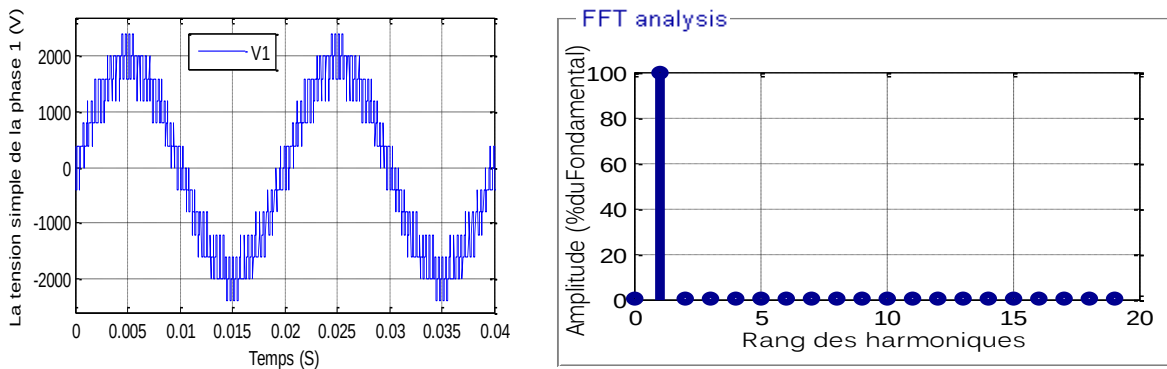
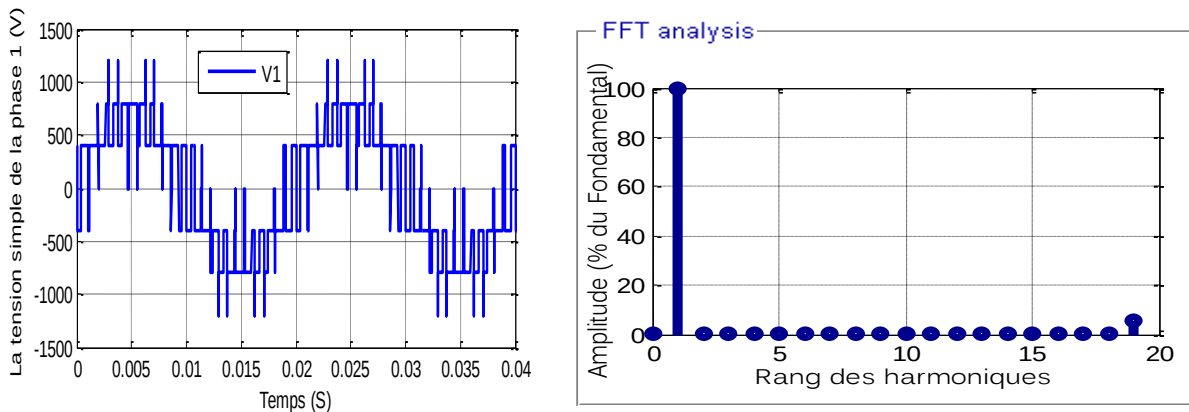


Figure 3.2 : Tension simple de la phase 1 et son analyse harmonique pour ($m=6$, $m=15$).

On varie r et on fixe ($m=6$) :

$r=0.3$



$r=0.5$

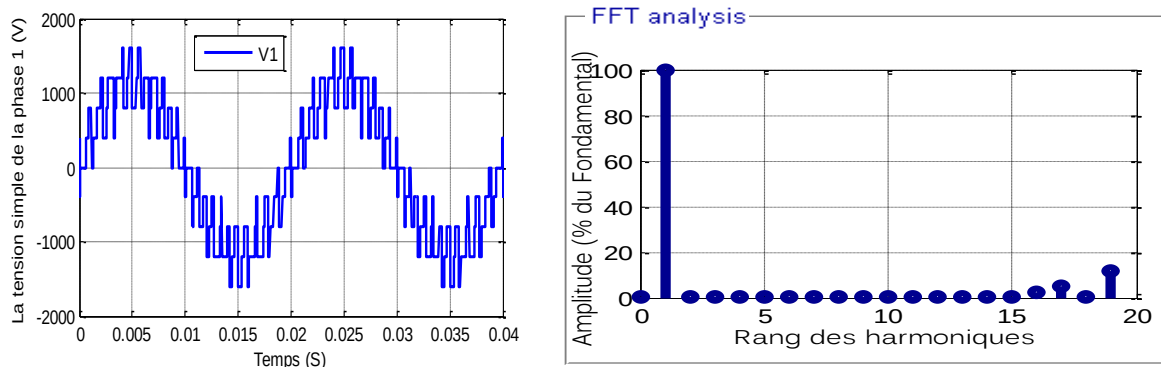


Figure 3.3 : Tension simple de la phase 1 et son analyse harmonique pour ($r=0.3$, $r=0.5$).

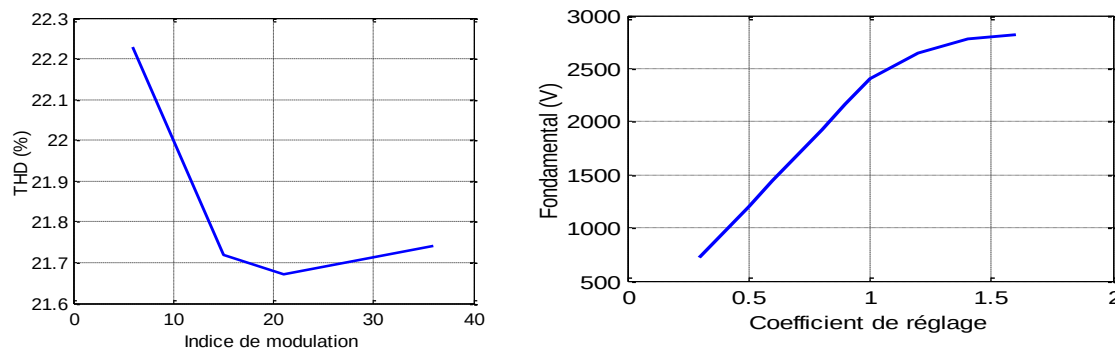


Figure 3.4 : Evolutions du THD en fonction de l'indice de modulation et l'amplitude du fondamental en fonction du coefficient de réglage.

Interprétations et commentaires

- ✓ On constate que le taux de modulation r permet, un réglage linéaire de l'amplitude du fondamentale de $r = 0.3$ à $r = 1$, , et le taux d'harmonique de distorsion diminue quand m augmente.
- ✓ L'analyse spectrale d'harmonique de la tension simple de la phase A de l'onduleur triphasé à cinq niveaux montre la présence des harmoniques paires et impaires.
- ✓ L'augmentation de l'indice de modulation m permet de pousser les harmoniques vers les fréquences élevées et donc facilement de les filtrés.

3.2.1.5 Commande PWM avec injection de l'harmonique trois

Comme les harmoniques de rang multiples de trois sont nuls pour les tensions simples et composées des onduleurs triphasés, on peut alors injecter ces harmoniques dans les tensions de référence afin d'élargir la zone linéaire de réglage de l'onduleur triphasé à cinq niveaux.

Dans ce cas, les nouvelles tensions de références sont données par le système suivant [Mer 07], [Tham 10], [Tal 04].

$$\begin{cases} V_{ref1} = V_m [\sin(\omega t) + a \sin(3\omega t)] \\ V_{ref2} = V_m \left[\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + a \sin(3\omega t) \right] \\ V_{ref3} = V_m \left[\sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) + a \sin(3\omega t) \right] \end{cases} \quad (3.7)$$

Nous avons choisi pour notre étude ($a = 0.6$)

3.2.1.5.1 Commande PWM à quatre porteuses unipolaires type1 avec injection de l'harmonique trois

Les différents signaux de la stratégie triangulo-sinusoïdale à quatre porteuses unipolaires type 1 avec injection d'harmoniques trois ($m=6$, $r=0.8$).

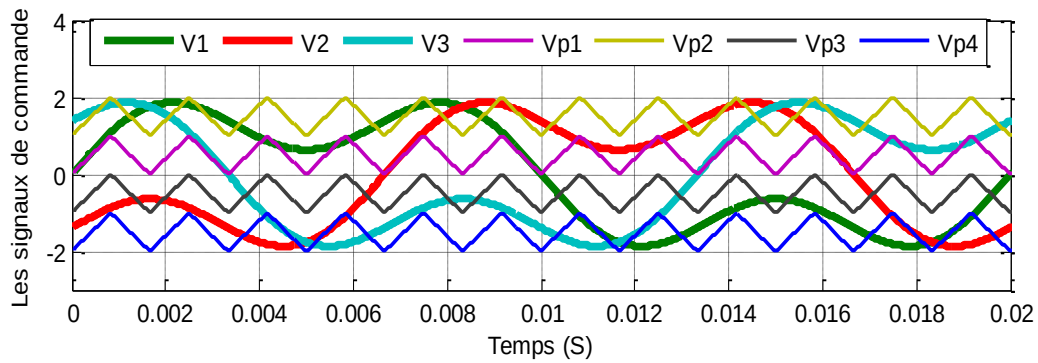
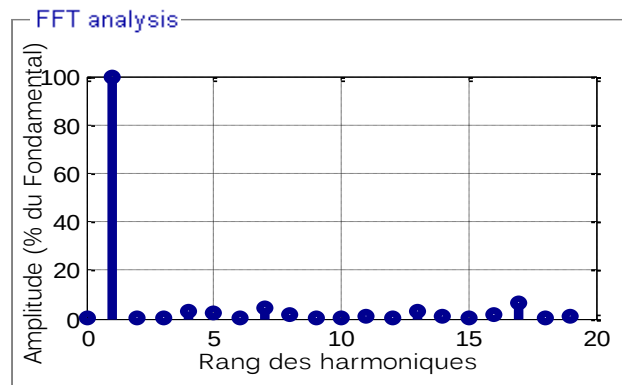
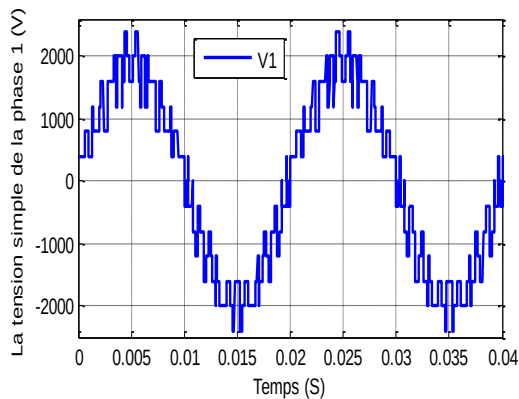


Figure 3.1 : Tensions de références et porteuses.

Les figures (3.2) et (3.3) représentent la tension de sortie V1 et son spectre d'harmonique pour la stratégie PWM à quatre porteuses unipolaires type 1 avec injection de l'harmonique trois.

On varie m et on fixe ($r=0.8$) :

$m=6$



$m=15$

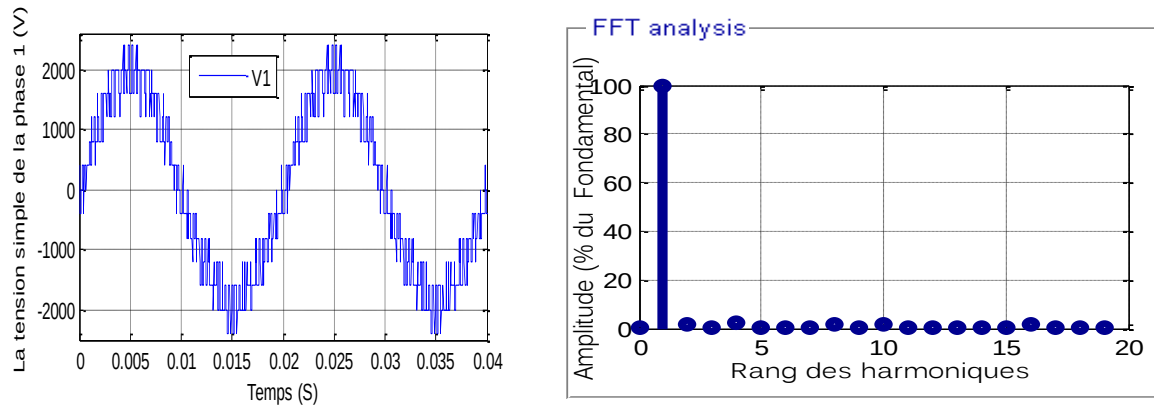
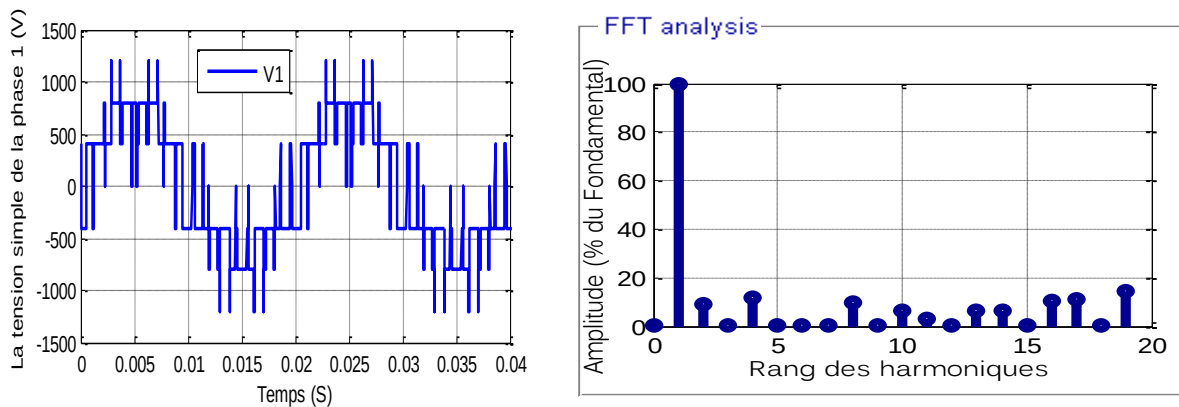


Figure 3.2 : Tension simple de la phase 1 et son analyse harmonique pour ($m=6$, $m=15$).

On varie r et on fixe ($m=6$) :

$r=0.3$



$r=0.5$

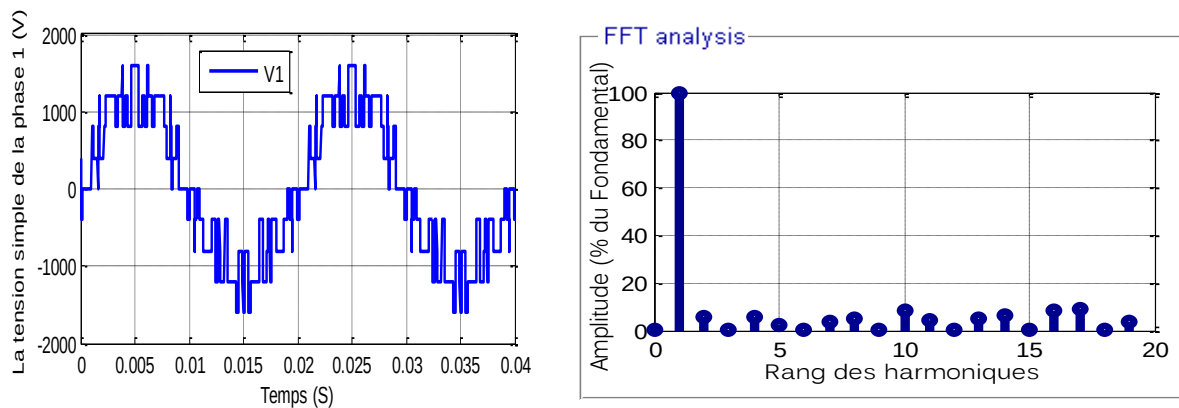


Fig 3.3 : Tension simple de la phase 1 et son analyse harmonique pour ($r=0.3$, $r=0.5$).

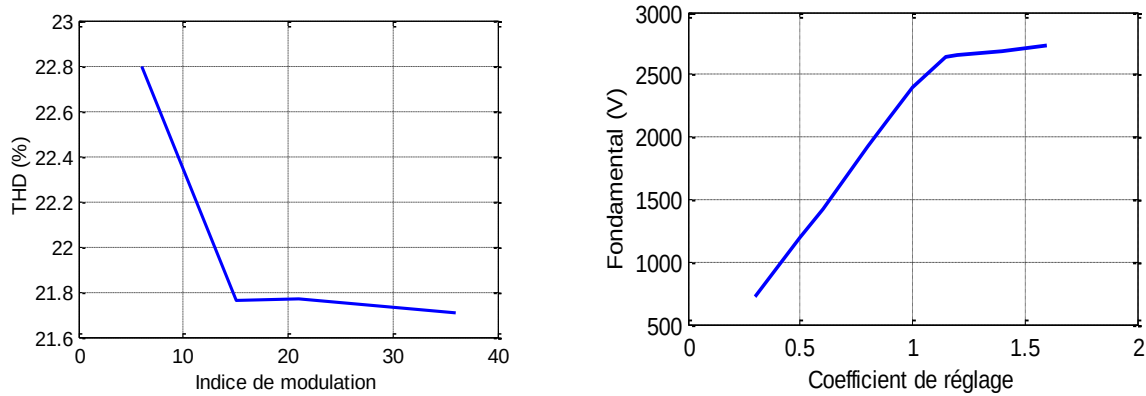


Figure 3.4 : Evolutions du THD en fonction de l'indice de modulation et l'amplitude du fondamental en fonction du coefficient de réglage.

Interprétations et commentaires

- ✓ La commande de cette stratégie permet un réglage linéaire de l'amplitude du fondamental de $r = 0.3$ à $r = 1.15$ d'où la zone linéaire de la caractéristiques de réglage s'élargit de 15%.
- ✓ L'augmentation de l'indice de modulation m permet de pousser les harmoniques vers les fréquences élevées et donc facilement filtrées.

3.2.1.5.2 Commande PWM à quatre porteuses unipolaires type2 avec l'injection de l'harmonique trois

Les différents signaux de la stratégie triangulo-sinusoïdale à quatre porteuses unipolaires type 2 avec injection d'harmoniques trois ($m=6$, $r=0.8$) :

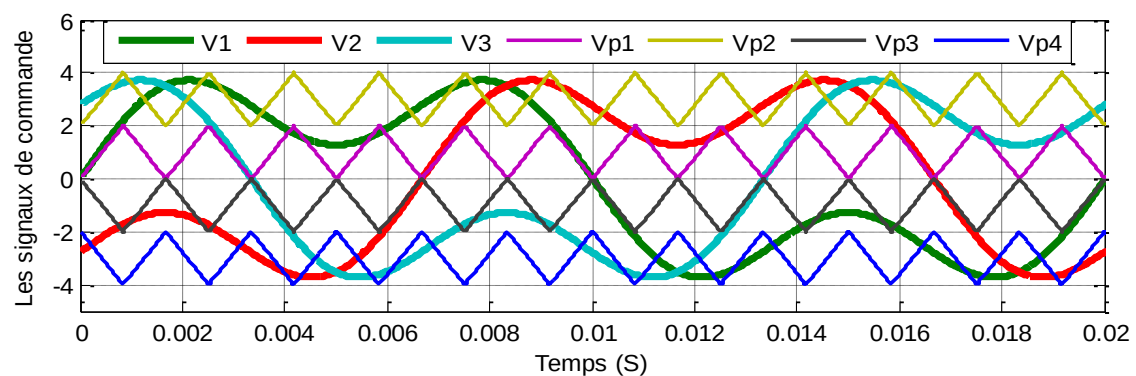
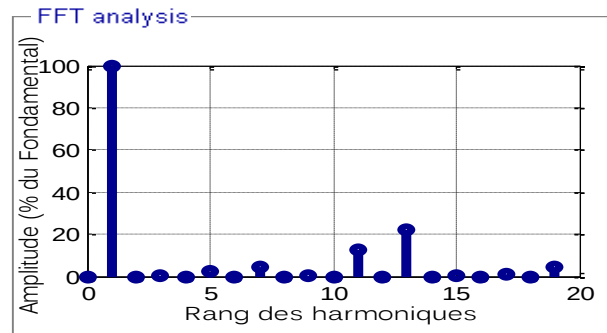
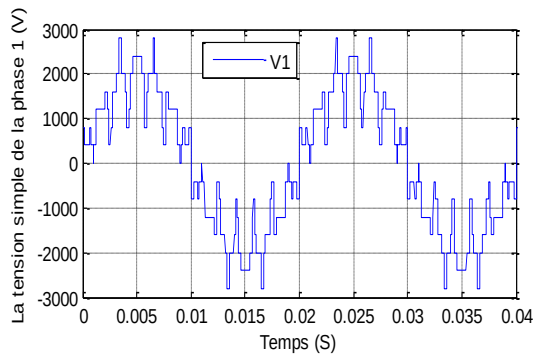


Figure 3.1 : Tensions de références et porteuses.

Les figures (3.2) et (3.3) représentent la tension de sortie V1 et son spectre d'harmonique pour la stratégie PWM à quatre porteuses unipolaires type 2 avec injection de l'harmonique trois.

On varie m et on fixe ($r=0.8$) :

$m=6$



$m=15$

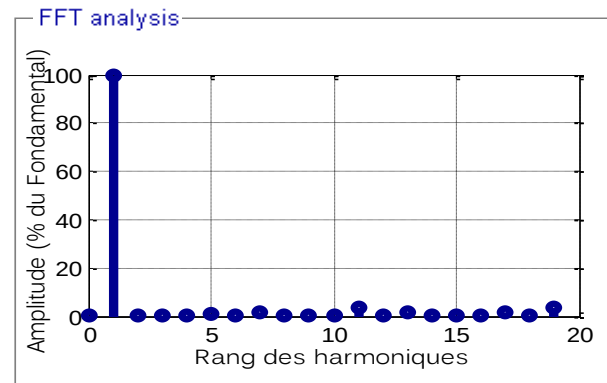
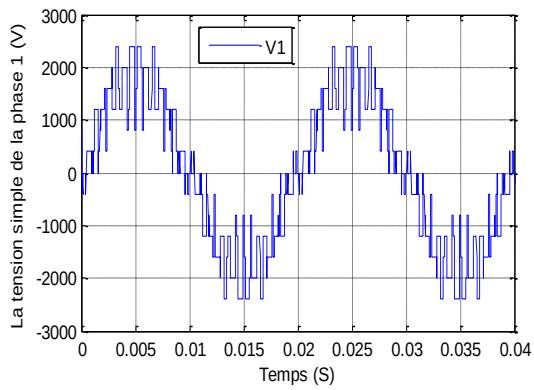
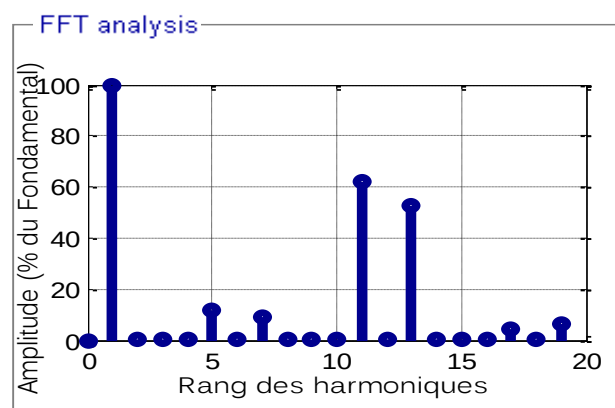
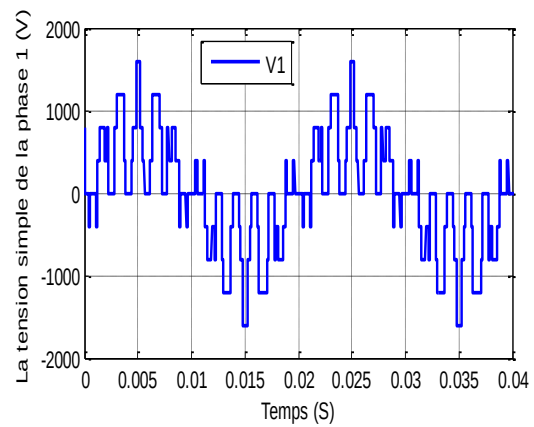


Figure 3.2 : Tension simple de la phase 1 et son analyse harmonique pour ($m=6$, $m=15$)

On varie r et on fixe ($m=6$) :

$r=0.3$



$r=0.5$

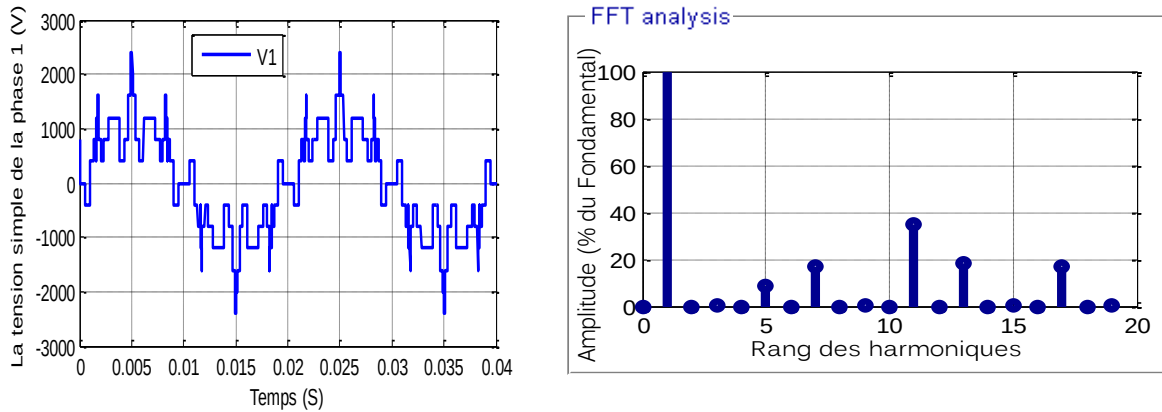


Figure 3.3 : Tension simple de la phase 1 et son analyse harmonique pour ($r=0.3$, $r=0.5$).

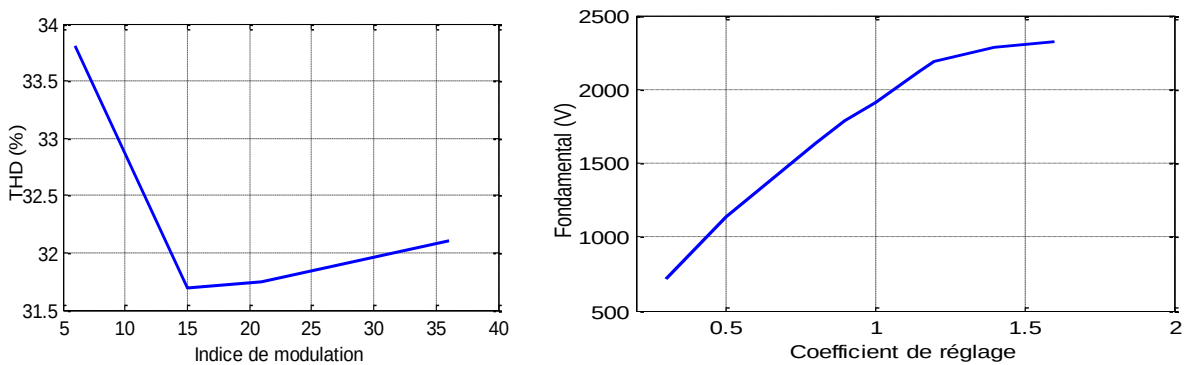


Figure 3.4 : Evolutions du THD en fonction de l'indice de modulation et l'amplitude du fondamental en fonction du coefficient de réglage.

Interprétations et commentaires

- ✓ L'analyse spectrale d'harmonique de la tension simple de la phase 1 de l'onduleur triphasé à cinq niveaux montre seulement la présence des harmoniques impaires.
- ✓ La commande de cette stratégie permet un réglage linéaire de l'amplitude du fondamental de $r = 0.3$ à $r = 1.15$ d'où la zone linéaire de la caractéristique de réglage s'élargit de 15%.
- ✓ L'augmentation de l'indice de modulation m permet de pousser les harmoniques vers des fréquences élevées et donc facilement filtrées.

3.2.1.5.3 Commande PWM à quatre porteuses bipolaires avec injection de l'harmoniques trois

Les différents signaux de la stratégie triangulo-sinusoïdale à quatre porteuses bipolaires avec l'injection de l'harmoniques trois ($m=6$, $r=0.8$) :

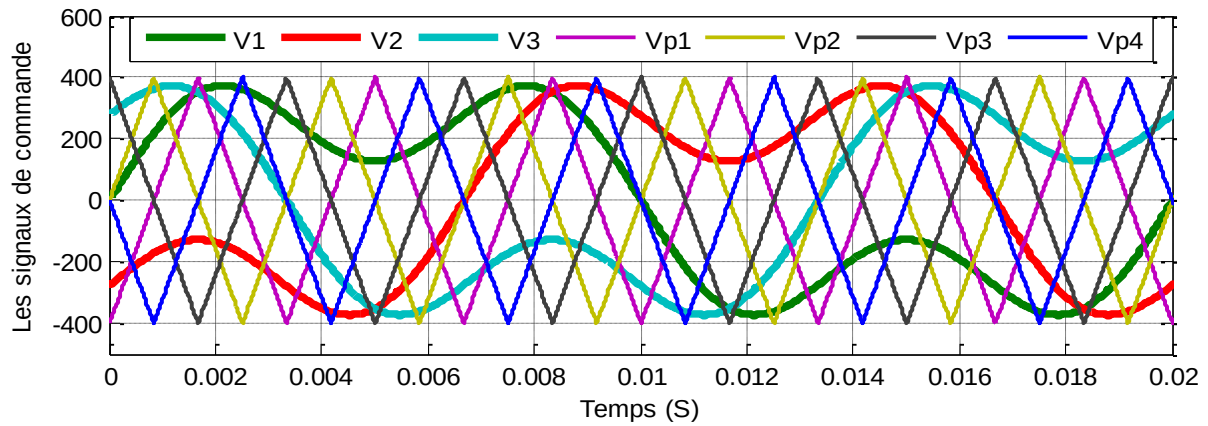
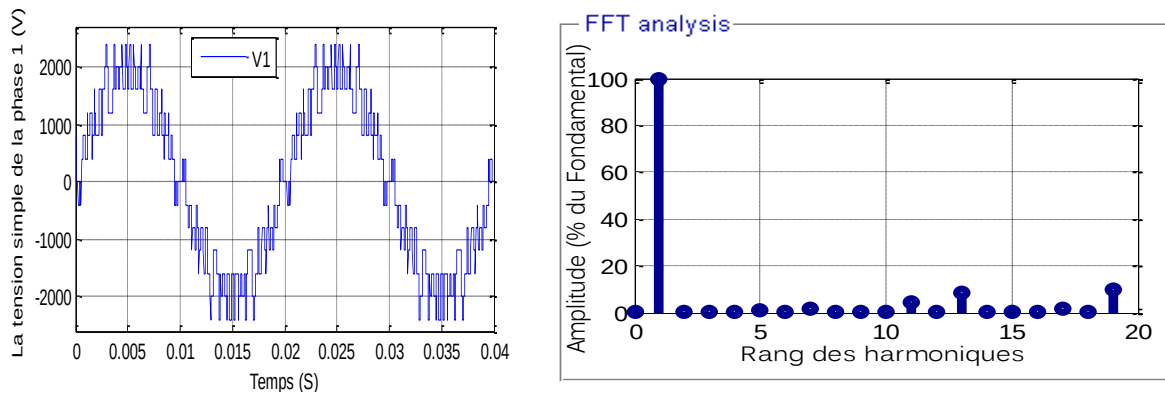


Figure 3.1 : Tensions de références et porteuses.

Les figures (3.2) et (3.3) représentent la tension de sortie V1 et son spectre d'harmonique pour la stratégie PWM à quatre porteuses bipolaires avec l'injection de l'harmonique trois.

On varie m et on fixe ($r=0.8$) :

$m=6$



$m=15$

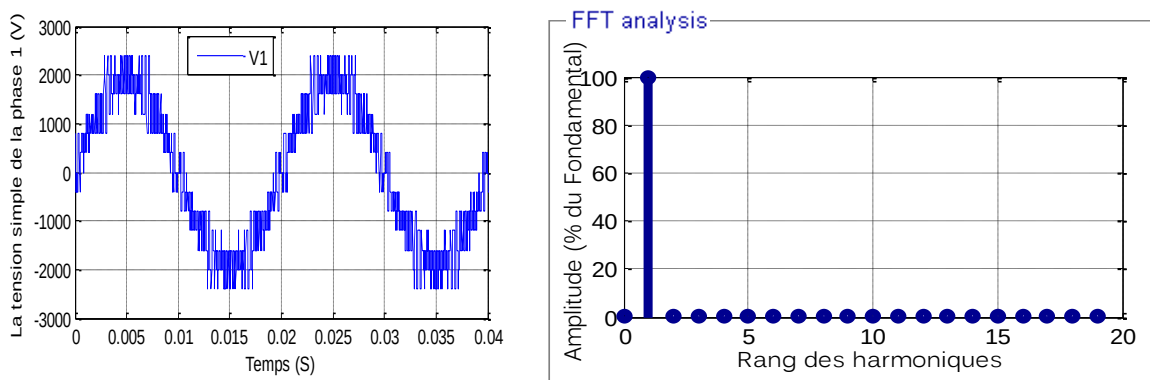
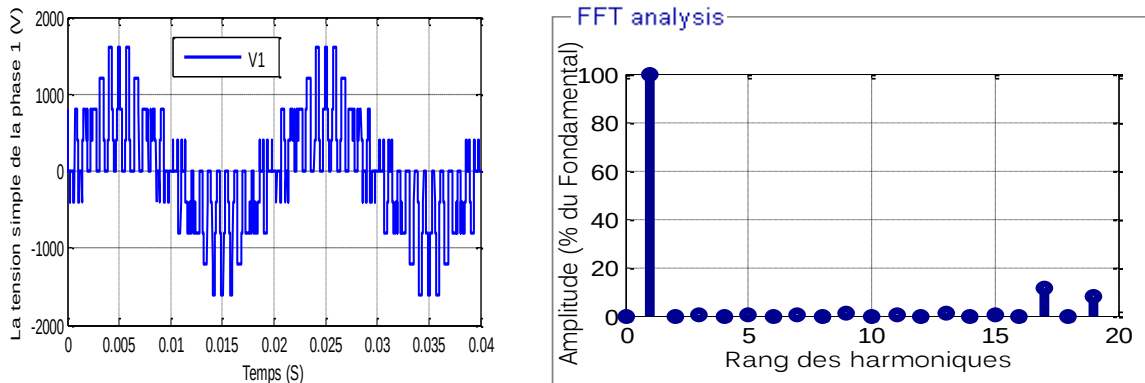


Fig 3.2 : Tension simple de la phase 1 et son analyse harmonique pour ($m=6$, $m=15$).

On varie r et on fixe ($m=6$) :

$r=0.3$



$r=0.5$

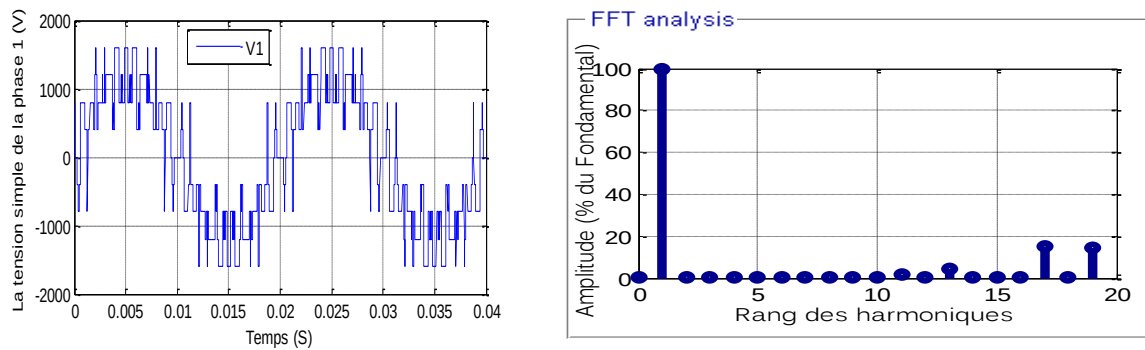


Fig 3.3 : Tension simple de la phase 1 et son analyse harmonique pour ($r=0.3$, $r=0.5$).

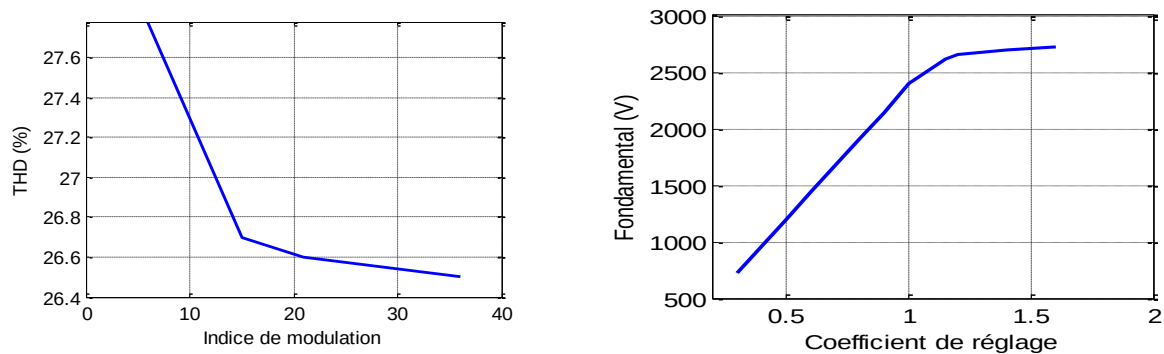


Figure 3.4 : Evolutions du THD en fonction de l'indice de modulation et l'amplitude du fondamental en fonction du coefficient de réglage.

Interprétations et commentaires

- ✓ L'augmentation de l'indice de modulation m permet de pousser les harmoniques vers des fréquences élevées et donc facilement à filtrées.

- ✓ La commande de cette stratégie permet un réglage linéaire de l'amplitude du fondamental de $r = 0.3$ à $r = 1.2$ d'où la zone linéaire de la caractéristiques de réglage s'élargit de 20%.
- ✓ D'une manière générale, les harmoniques sont pratiquement les mêmes que pour le cas sans injection de l'harmonique trois.
- ✓ L'augmentation de l'indice de modulation m permet de pousser les harmoniques vers les fréquences élevées et donc facilement filtrées.

3.2.1.5.4 Commande PWM à quatre porteuses en dent de scie avec injection de l'harmonique trois

Les différents signaux de la stratégie triangulo-sinusoïdale avec injection d'harmoniques trois à quatre porteuses dent de scie ($m=6$, $r=0.8$)

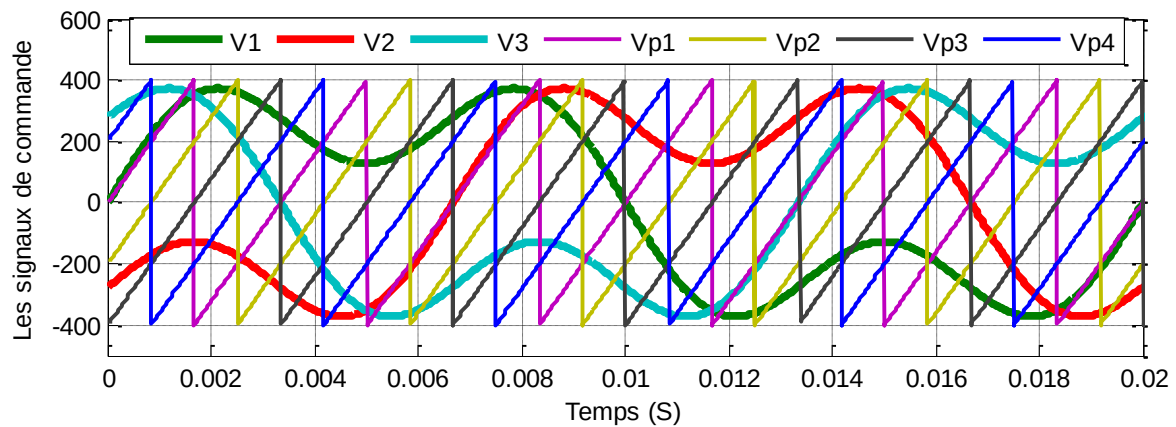
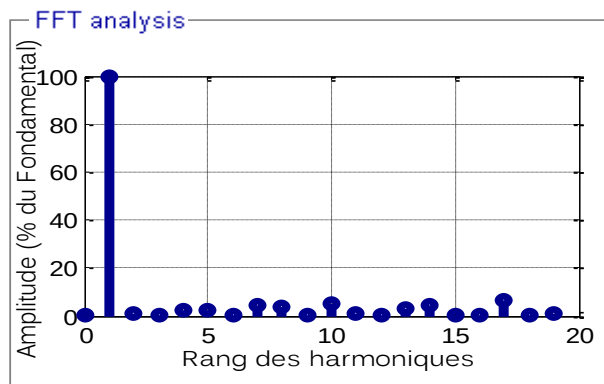
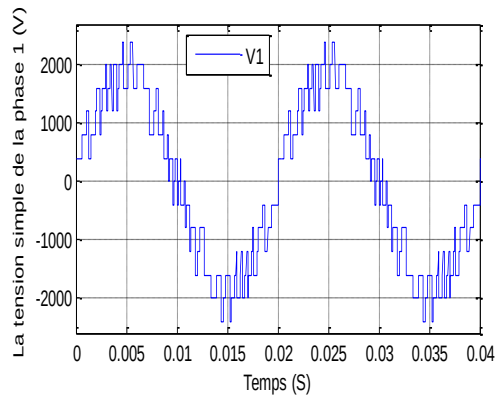


Figure 3.1 : Tensions de références et porteuses.

Les figures (3.2) et (3.3) représentent la tension de sortie V1 et son spectre d'harmonique pour la stratégie PWM en dent de scie avec injection de l'harmonique trois.

On varie m et on fixe ($r=0.8$) :

$m=6$



$m=15$

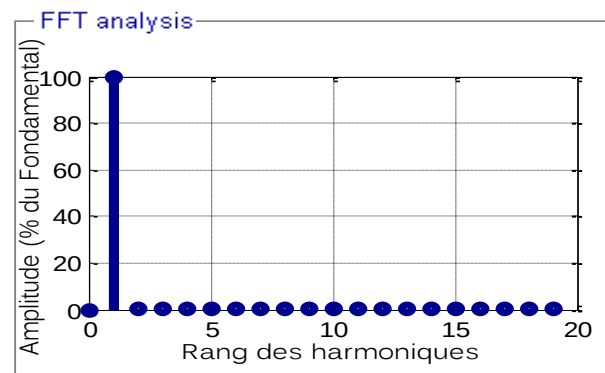
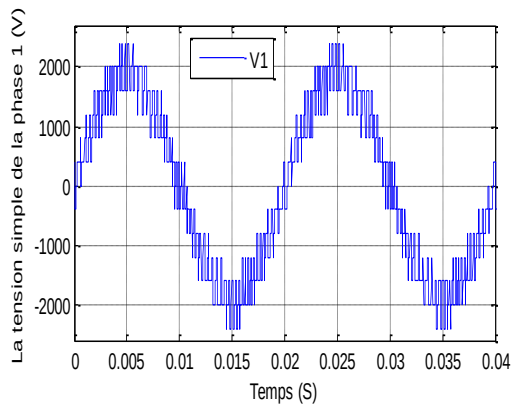
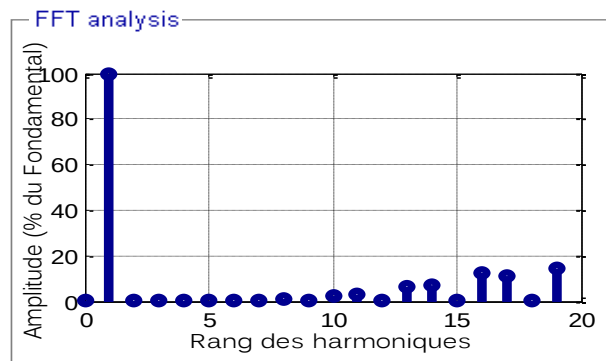
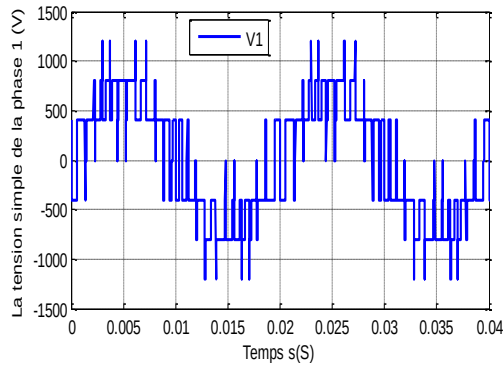


Figure 3.2 : Tension simple de la phase 1 et son analyse harmonique pour ($m=6$, $m=15$).

On varie r et on fixe ($m=6$) :

$r=0.3$



$r=0.5$

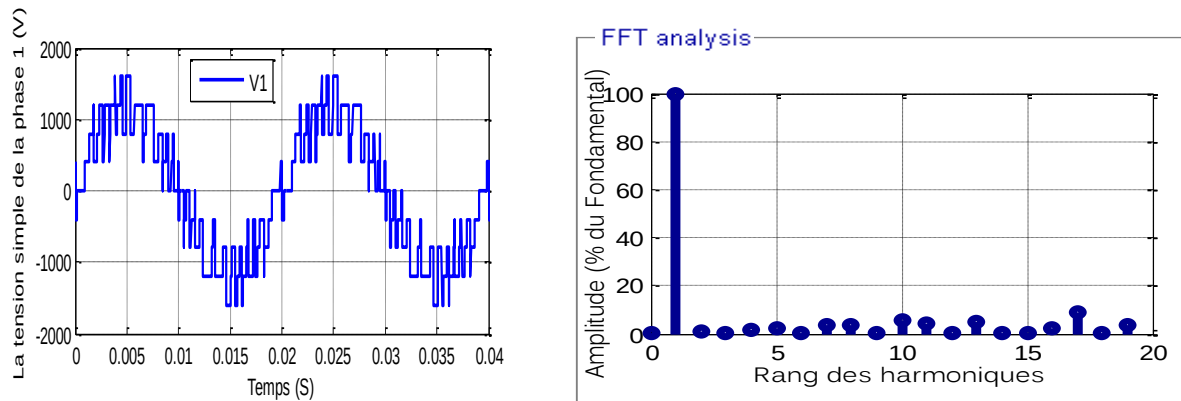


Figure 3.3 : Tension simple de la phase 1 et son analyse harmonique pour ($r=0.3$, $r=0.5$).

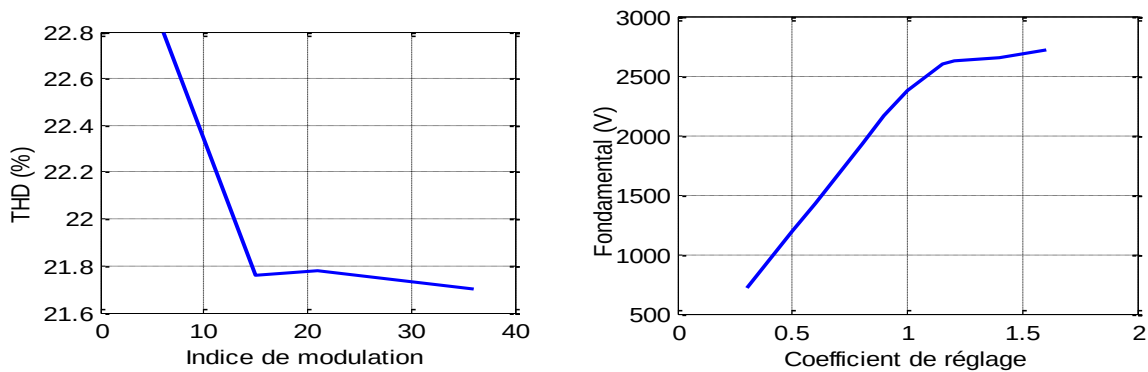


Figure 3.4 : Evolutions du THD en fonction de l'indice de modulation et l'amplitude du fondamental en fonction du coefficient de réglage.

Interprétation du résultat

- ✓ Le taux d'harmonique diminue quand r augmente.
- ✓ D'une manière générale, les harmoniques sont pratiquement les mêmes que pour le cas sans injection de l'harmonique trois.

3.2. 2 La commande vectorielle de l'onduleur à cinq niveaux à structure NPC

L'onduleur à cinq niveaux possède $5^3 = 125$ états, identifiés par la combinaison des états des trois bras. P_2N_1O , signifie que le premier bras est à l'état P_2 , le deuxième est l'état N_1 et le troisième est à l'état O .

3.2.2.1 Vecteur de tension de sortie et diagramme vectoriel

A partir des tensions de sortie v_{10} , v_{20} et v_{30} , on définit vecteur tension de sortie

$$v_s = v_{10} \cdot e^{j0} + v_{20} \cdot e^{-j2\pi/3} + v_{30} \cdot e^{j2\pi/3} \quad (3.8)$$

On effectue le passage du plan triphasé au plan biphasé stationnaire (d-q) comme suite :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \\ 0 \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{10} \\ v_{20} \\ v_{30} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Dans le repère (d-q), le vecteur v_s s'écrit :

$$v_s = v_d + j \cdot v_q \quad (3.10)$$

Suivant les états de l'onduleur, ce vecteur peut prendre plusieurs positions dans le plan (d-q). Ces positions sont indiquées sur le diagramme vectoriel de la Figure (3.5) (diagramme vectoriel de l'onduleur à cinq niveaux [Lour 10]).

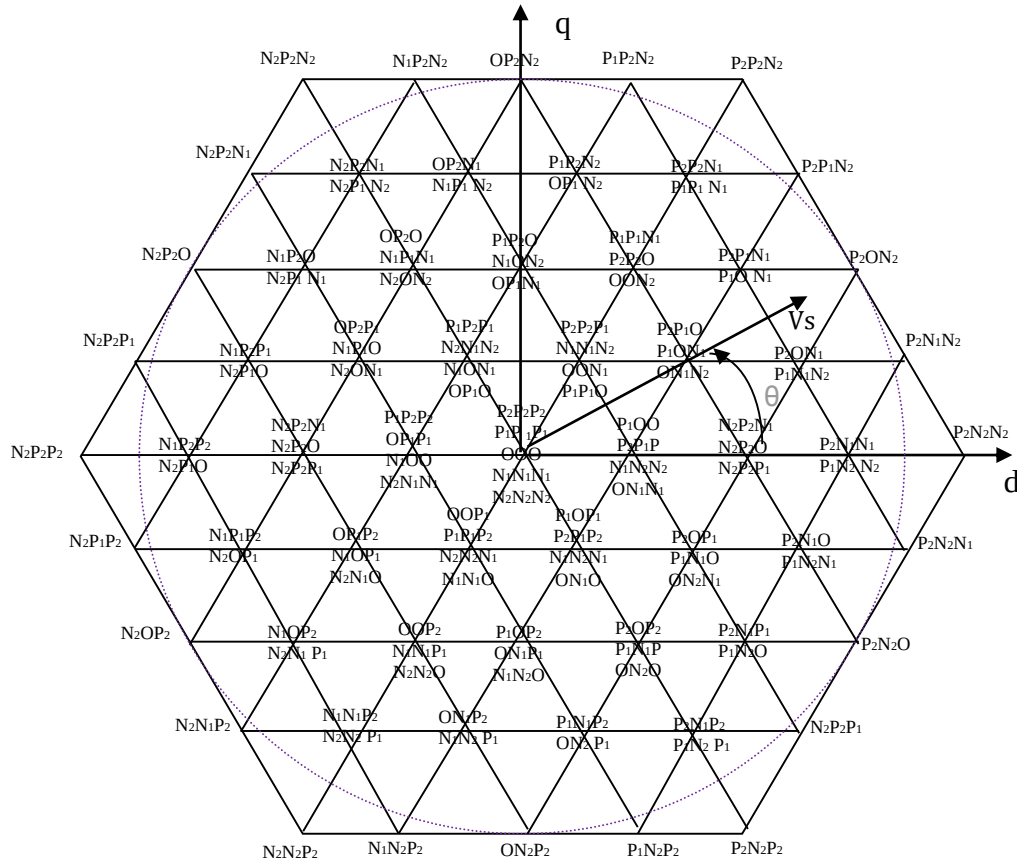


Figure 3.5 : Diagramme vectoriel de l'onduleur à cinq niveaux.

On distingue 60 positions discrètes, distribuées sur quatre hexagones, en plus d'une position au centre de l'hexagone. Certaines positions sont créées par plusieurs états redondants.

De l'hexagone externe vers l'hexagone interne, les positions du vecteur v_s sont créées par un, deux, trois et quatre états redondants. La position du centre de l'hexagone, qui correspond à une tension de sortie nulle, est créée par états redondants. On distingue ainsi [lour 10].

- 24 positions à une seule redondance
- 18 positions à deux redondances
- 12 positions à trois redondances
- 6 positions à quatre redondances

Les 61 positions du vecteur tension de sortie divise le diagramme vectoriel en six secteurs triangulaires. Chaque secteur est composé de 16 régions triangulaires de la Figure (3.6) on a ainsi 96 régions triangulaires dans le diagramme vectoriel complet.

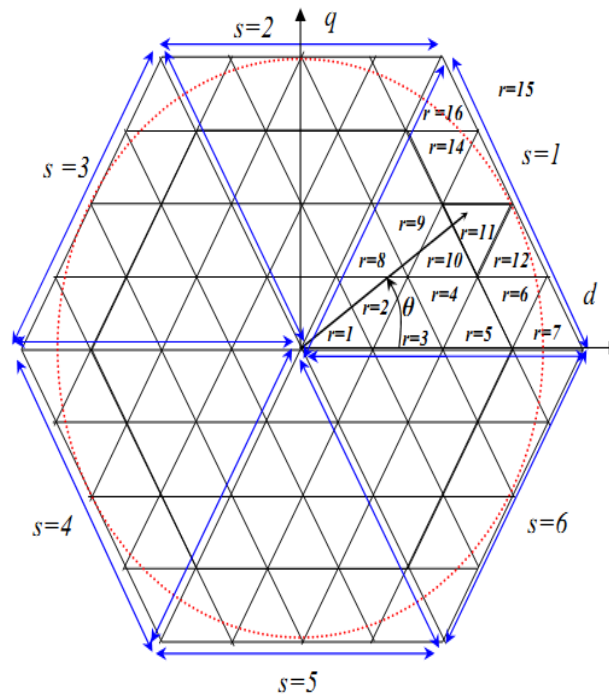


Figure 3.6 : Secteurs et régions du diagramme vectoriel.

A partir des tensions de références v_1^* , v_2^* et v_3^* , on définit le vecteur tension de référence :

$$\begin{cases} v_s^* = v_{10}^* \cdot e^{j0} + v_{20}^* \cdot e^{-j2\pi/3} + v_{30}^* \cdot e^{j2\pi/3} \\ v_s^* = v_d^* + j \cdot v_q^* \\ v_s^* = m \cdot v_{\max} \cdot e^{j\theta} \end{cases} \quad (3.11)$$

Le vecteur v_s^* est un vecteur tournant dans le diagramme vectoriel, le secteur S contenant ce vecteur se déduit à partir de sa position angulaire de la manière suivante :

$$s = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 \leq \theta < \pi/3 \\ 2 & \text{si } \pi/3 \leq \theta < 2\pi/3 \\ 3 & \text{si } 2\pi/3 \leq \theta < \pi \\ 4 & \text{si } \pi \leq \theta < 4\pi/3 \\ 5 & \text{si } 4\pi/3 \leq \theta < 5\pi/3 \\ 6 & \text{si } 5\pi/3 \leq \theta < 2\pi \end{cases} \quad (3.12)$$

A l'intérieur de chaque secteur, la région r contenant le secteur v_s^* se déduit en utilisant les deux composantes v_d^* et v_q^* . Chaque région est définie par les équations de ses trois côtés. Par exemple, les côtés de la région hachurée de la Figure (3.6) (région r=11 du S=1) ont les trois équations suivantes (en utilisant les grandeurs relatives : v_d^* et v_q^* désignent leurs grandeurs relatives :

$$v_d^* / \sqrt{(v_d^*)^2 + (v_q^*)^2} \quad \text{Et} \quad v_q^* / \sqrt{(v_d^*)^2 + (v_q^*)^2} :$$

$$\begin{cases} v_q^* = \frac{\sqrt{3}}{4} \\ v_q^* = \sqrt{3}v_d^* - \frac{\sqrt{3}}{2} \\ v_q^* = -\sqrt{3}v_d^* + \frac{3\sqrt{3}}{4} \end{cases} \quad (3.13)$$

Ainsi, le vecteur v_s^* se situe dans la région r=11 de S=1 lorsque ses deux composantes v_d^* et v_q^* vérifient les inéquations suivantes :

$$\begin{cases} v_q^* \leq \frac{\sqrt{3}}{4} \\ v_q^* \leq \sqrt{3}v_d^* - \frac{\sqrt{3}}{2} \\ v_q^* \leq -\sqrt{3}v_d^* + \frac{3\sqrt{3}}{4} \end{cases} \quad (3.14)$$

De la même manière on déduit les équations relatives aux autres régions afin de minimiser les harmoniques de la tension de sortie, on impose au vecteur tension de référence de se localiser à l'intérieur du cercle délimité par l'hexagone externe, ce qui donne :

$$v_{\max} = \frac{\sqrt{3}}{2} v_{dc} \quad (3.15)$$

3.2.2.2 Séquence des états de l'onduleur

Le vecteur tension de référence v_s^* doit coïncider, sur chaque période d'échantillonnage T_s , avec la moyenne des vecteurs v_x , v_y et v_z représentant les sommets de la région triangulaire lui contenant [Lalili 09].

$$\overline{v_s} = v_s^* = m' \cdot v_{\max} \cdot e^{j\alpha} = \frac{T_x \cdot v_x + T_y \cdot v_y + T_z \cdot v_z}{T_s} = d_x \cdot v_x + d_y \cdot v_y + d_z \cdot v_z \quad (3.16)$$

Avec :

α : la position angulaire du vecteur v_s^* à l'intérieur d'un secteur : $\alpha = \Theta [\pi/3]$.

T_x , T_y et T_z : les durées d'applications des vecteurs v_x , v_y et v_z respectivement à la sortie de l'onduleur.

d_x , d_y et d_z : les durées T_x , T_y et T_z en grandeur relatives :

$$d_x = \frac{T_x}{T_s}; d_y = \frac{T_y}{T_s}; d_z = \frac{T_z}{T_s} \quad (3.17)$$

T_x , T_y et T_z sont reliées par l'équation :

$$\begin{cases} T_x + T_y + T_z = T_s \\ d_x + d_y + d_z = 1 \end{cases} \quad (3.18)$$

Les vecteurs v_x , v_y et v_z utilisés pour approximer le vecteur v_s^* dépendent de sa position dans le diagramme vectoriel. Par exemple, le vecteur v_s^* représenté sur le diagramme vectoriel de la Figure (3.6) se situe dans la région $r=11$ du $S=1$. Ainsi, le vecteur v_x est généré par un des deux états redondants $P_2P_1N_1$ ou P_1ON_2 (appelé état X), le vecteur v_y est généré par un des deux états redondants P_2ON_1 ou $P_1N_1N_2$ (appelé état Y), le vecteur v_z est généré par l'état P_2ON_2 (appelé état Z). La désignation des états X, Y et Z pour les différentes régions du $S=1$ est indiquée sur la Figure (1.35) on désigne les états des cinq autres secteurs de la même façon.

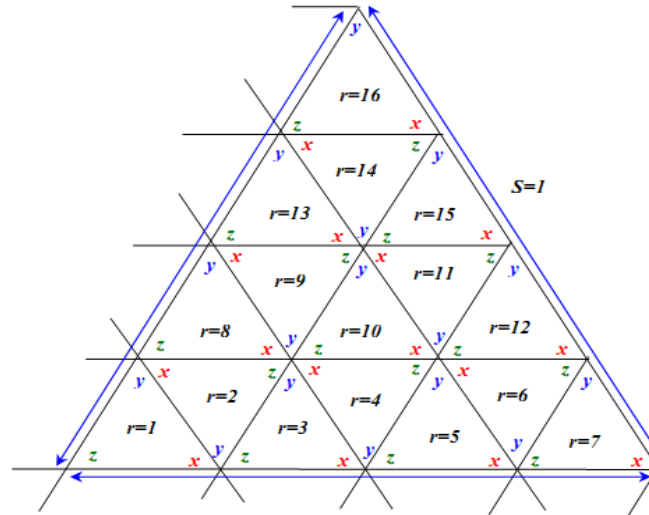


Figure 3.7 : Désignation des états X, Y et Z pour les différentes régions du premier secteur.

Pour calculer les durées relatives d_x , d_y et d_z correspondantes à chaque région. On décompose l'équation (3.16) suivant les deux axes d et q, et on utilise l'équation (3.18). On obtient ainsi un système de trois équations à trois inconnus. La résolution de ce système donne d_x , d_y et d_z et par conséquent T_x , T_y et T_z en utilisant l'équation (3.17). Par exemple, pour la région $r=11$ du $S=1$ la décomposition de l'équation (3.16) donne :

$$\begin{cases} \frac{\sqrt{3}}{2}.m'.\cos \theta = \frac{1}{2}.d_x + \frac{5}{8}.d_y + \frac{3}{4}.d_z \\ \frac{\sqrt{3}}{2}.m'.\sin \theta = \frac{\sqrt{3}}{4}.(d_x + d_z) + \frac{\sqrt{3}}{8}.d_y \end{cases} \quad (3.19)$$

La résolution donne :

$$\begin{cases} d_x = 2 - 4.m'.\sin(\frac{\pi}{3} - \theta) \\ d_y = 2 - 4.m'.\sin \theta \\ d_z = 1 - d_x - d_y \end{cases} \quad (3.20)$$

Les expressions analytiques de d_x , d_y et d_z pour les différentes régions sont résumées dans le tableau (3.1). Ces expressions sont valables quelque soit le secteur contenant le vecteur de référence, car on peut orienter l'axe d du système d'axes d-q au début de n'importe quel secteur [Lour 10] [Lalili 09].

Tableau 3.1 : Durées relatives d'applications des états

	Région 1	Région 2	Région 3	Région 4
d_x d_y	$dx=4.m'.\sin(\pi/3-\Theta)$ $dy=4.m'.\sin \Theta$	$dx=1-4.m'.\sin (\pi /3- \Theta)$ $dy=1-4.m'.\sin \Theta$	$dx=4.m'.\sin (\pi /3- \Theta)-1$ $dy=4.m'.\sin \Theta$	$dx=2-4.m'.\sin (\pi /3- \Theta)$ $dy=1-4.m'.\sin \Theta$
	Région 5	Région 6	Région 7	Région 8
d_x d_y	$dx=4.m'.\sin (\pi /3- \Theta)-2$ $dy=4.m'.\sin \Theta$	$dx=3-4.m'.\sin (\pi /3- \Theta)$ $dy=1-4.m'.\sin \Theta$	$dx=4.m'.\sin (\pi /3- \Theta)-3$ $dy=4.m'.\sin \Theta$	$dx=4.m'.\sin (\pi /3- \Theta)$ $dy=4.m'.\sin \Theta-1$
	Région 9	Région 10	Région 11	Région 12
d_x d_y	$dx=1-4.m'.\sin (\pi /3- \Theta)$ $dy=2-4.m'.\sin \Theta$	$dx=4.m'.\sin (\pi /3- \Theta)-1$ $dy=4.m'.\sin \Theta-1$	$dx=2-4.m'.\sin (\pi /3- \Theta)-1$ $dy=2-4.m'.\sin \Theta$	$dx=4.m'.\sin (\pi /3- \Theta)-2$ $dy=4.m'.\sin \Theta-1$
	Région 13	Région 14	Région 15	Région 16
d_x d_y	$dx=4.m'.\sin (\pi /3- \Theta)$ $dy=4.m'.\sin \Theta-2$	$dx=1-4.m'.\sin (\pi /3- \Theta)$ $dy=3-4.m'.\sin \Theta$	$dx=4.m'.\sin (\pi /3- \Theta)-1$ $dy=4.m'.\sin \Theta-2$	$dx=4.m'.\sin (\pi /3- \Theta)$ $dy=4.m'.\sin (\Theta-3)$
d_z	Pour tous les régions : $d_z=1-d_x-d_y$			

Enfin, l'algorithme de la modulation vectorielle de l'onduleur cinq niveaux à structure NPC peut être résumé dans l'organigramme de la Figure (3.8).

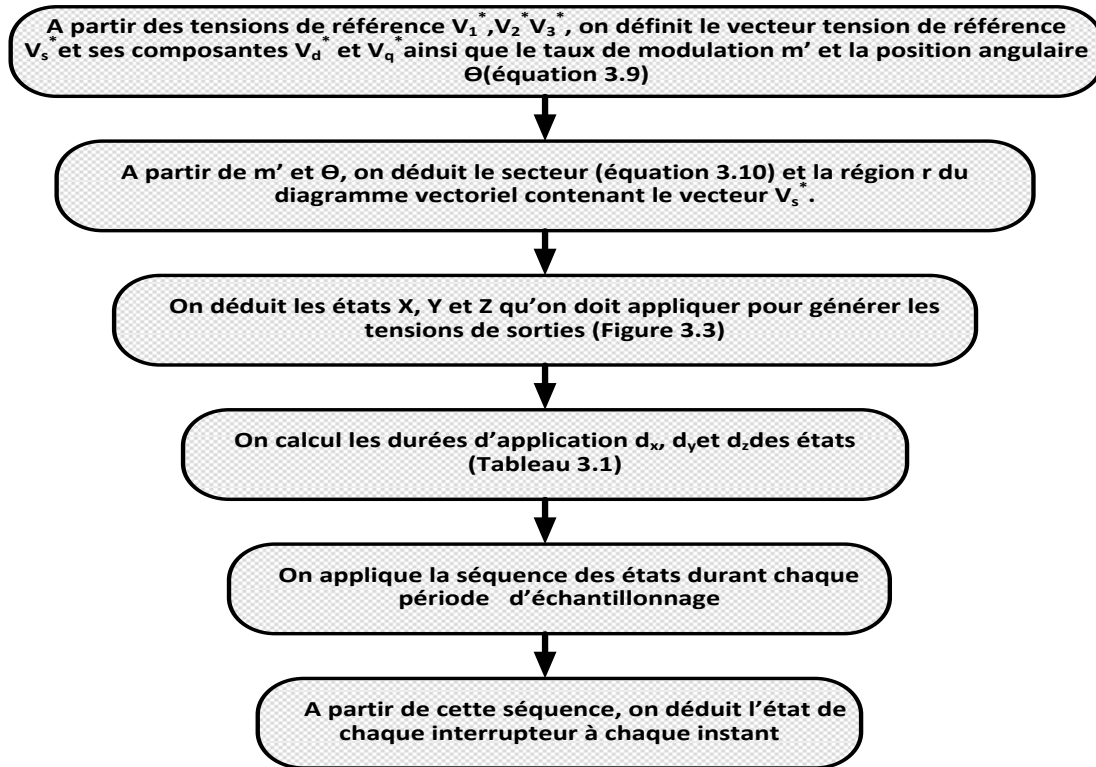
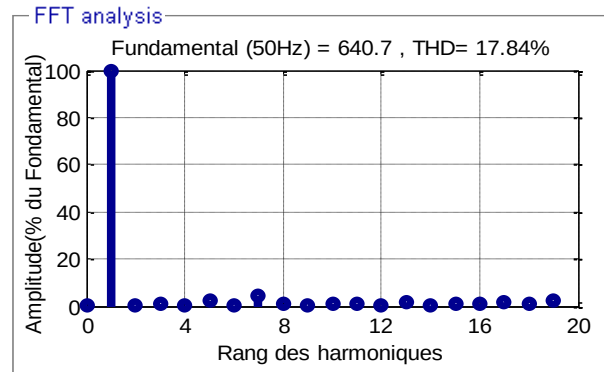
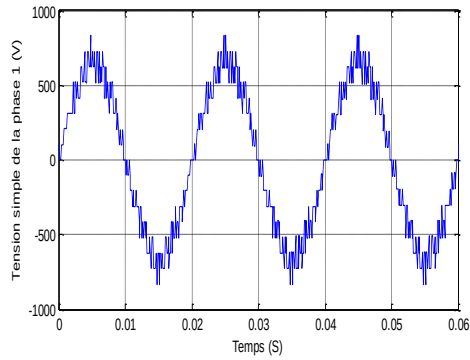


Figure 3.8 : Algorithme de la modulation vectorielle de l'onduleur à cinq niveaux à structure NPC.

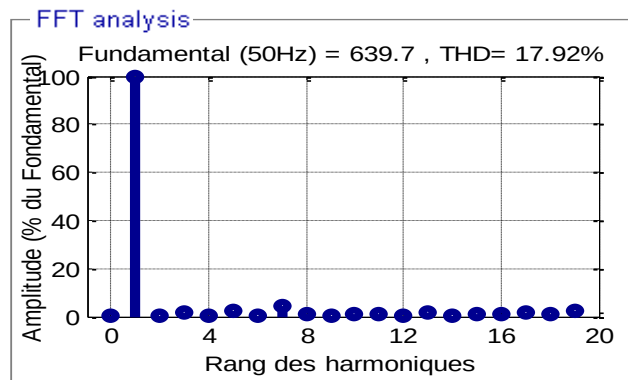
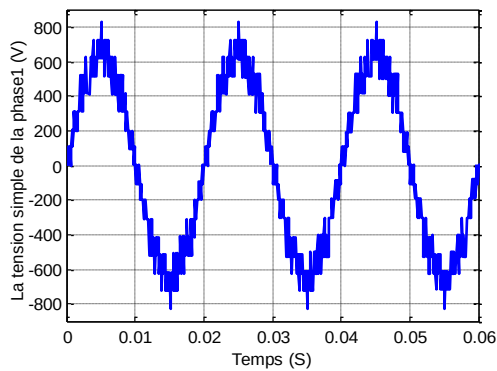
3.2.2.3 Résultats de simulation

On varie m' et on fixe ($n=120$) :

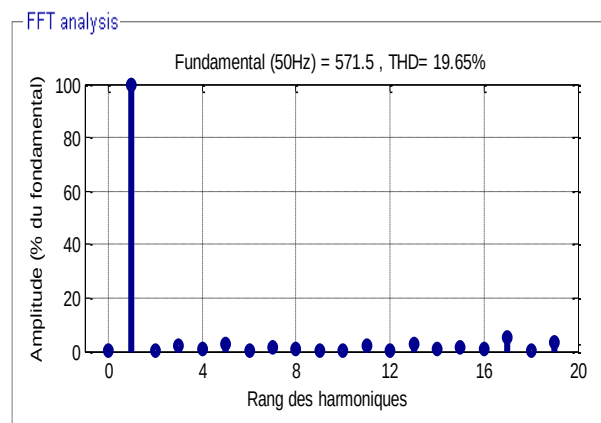
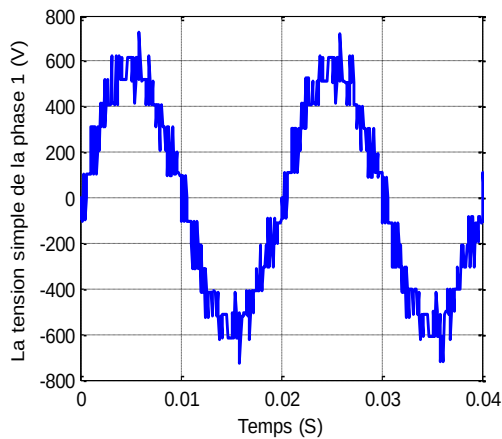
$m'=0.95$



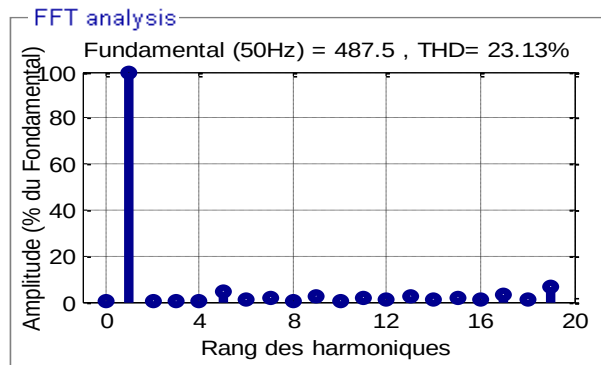
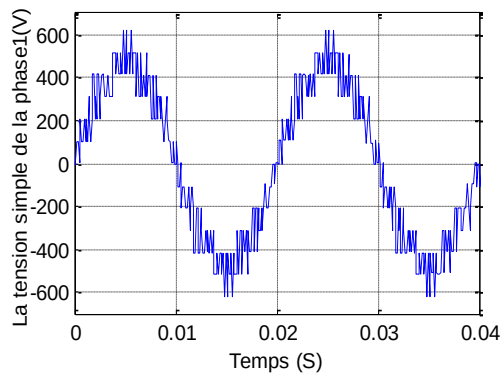
$m'=0.9$



$m'=0.8$



$m'=0.7$



$m'=0.5$

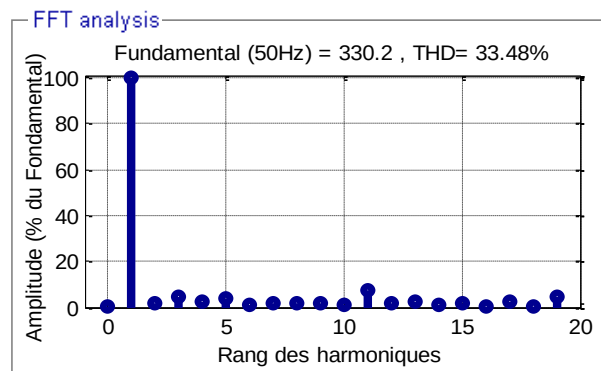
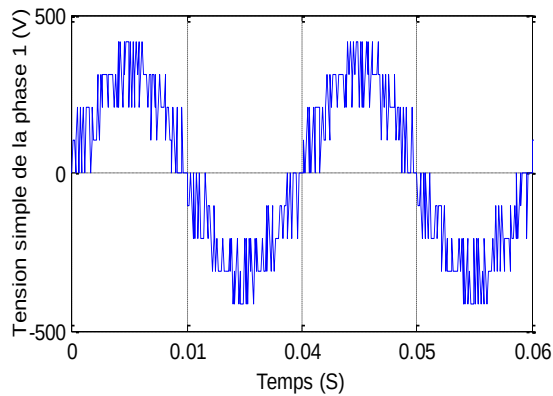
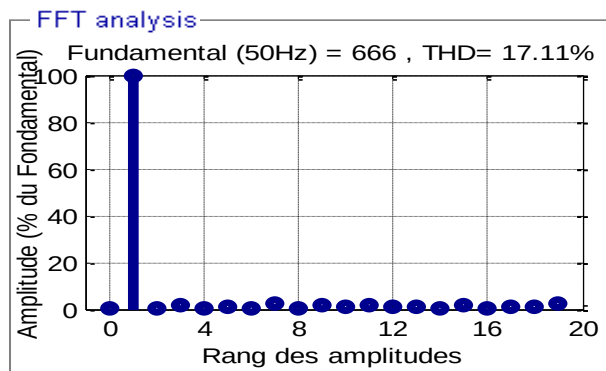
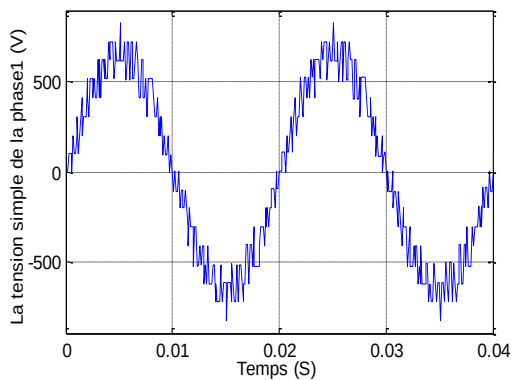


Figure 3.9 : Tension simple de la phase 1 et son analyse harmonique pour ($m=0.5, 0.7, 0.8, 0.9, 0.95$).

On varie n et on fixe ($m'=0.95$) :

$n=240$



$n=480$

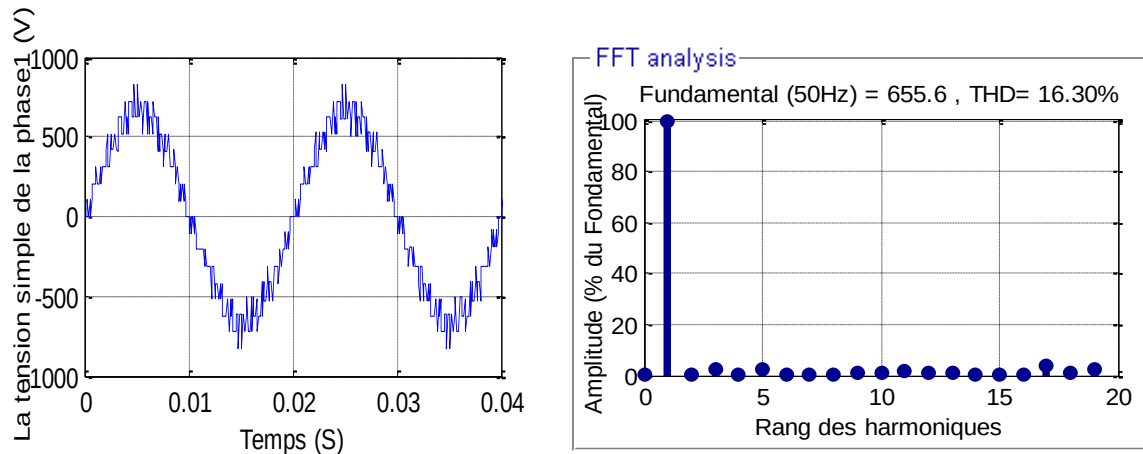


Figure 3.10 : Tension simple de la phase 1 et son analyse harmonique pour ($n=240, 480$).

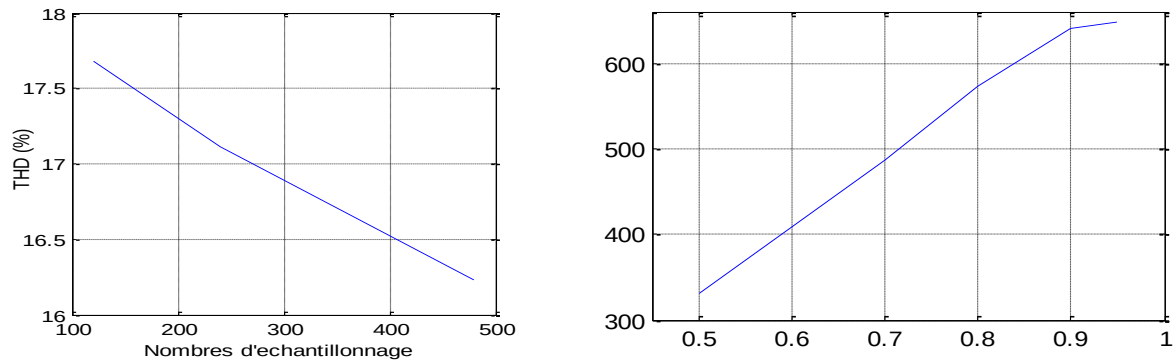


Figure 3.11 : Evolutions du THD en fonction de nombres d'échantillonnage de modulation et l'amplitude du fondamental en fonction du coefficient de réglage.

Interprétation des résultats

- ✓ Cette stratégie permet un réglage linéaire de l'amplitude du fondamental de $m'=0.5$ à $m'=0.9$, et décroissance de taux d'harmonique de distorsion.
- ✓ On constate que taux d'harmoniques est inversement proportionnel à la période d'échantillonnage et au taux de modulation, tandis que le module du fondamental augmente avec l'augmentation du taux de modulation (Coefficient de réglage).

3.3 Application de l'onduleur cinq niveaux pour une charge R-L

A l'aide de l'outil Matlab/Simulink, On simule l'association de l'onduleur cinq niveaux commandé par la modulation vectorielle à une charge R-L. Les paramètres de la charge sont indiqués dans l'annexe.

On varie m' et on fixe ($n=120$) :

$m'=0.95$

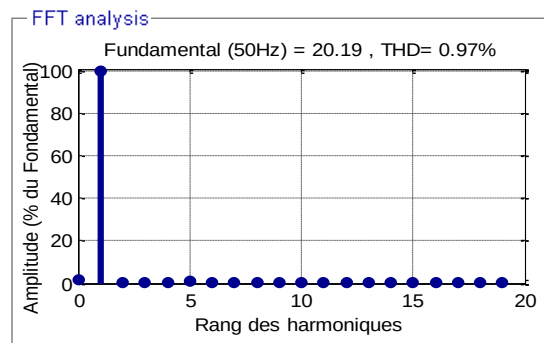
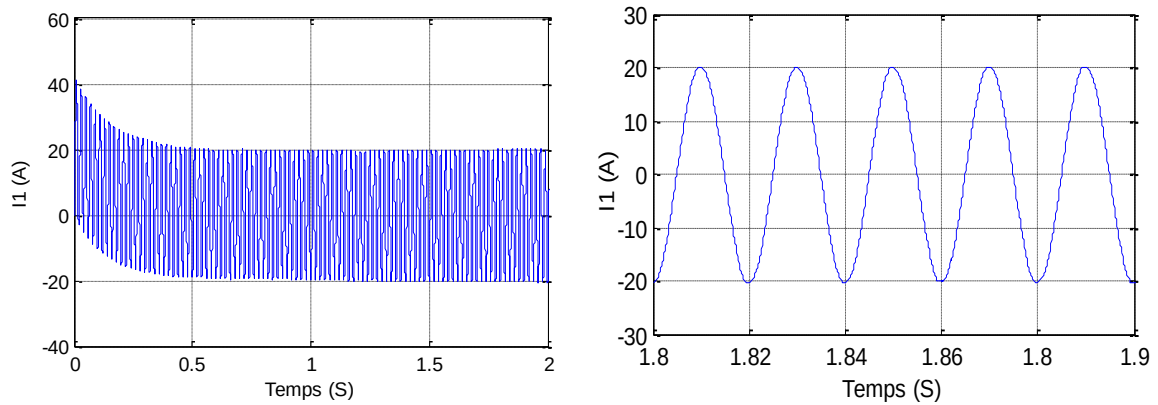
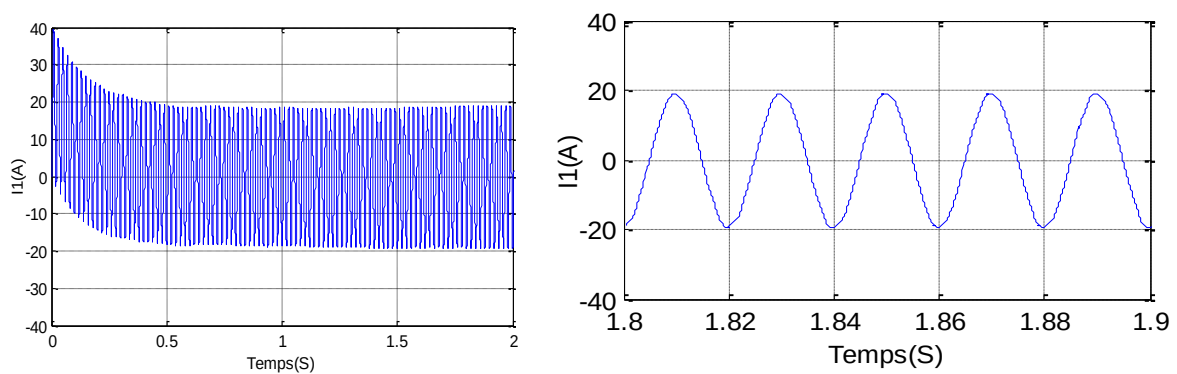


Figure 3.12 : Les Variables de sortie de la charge R-L.

$m'=0.9$



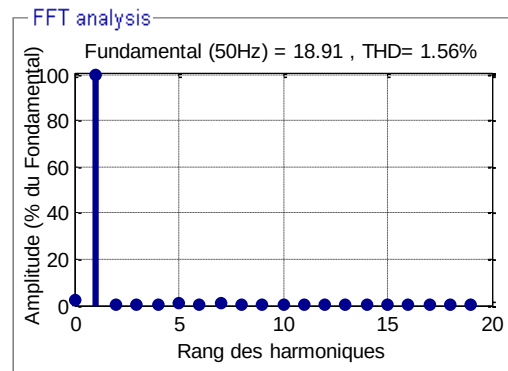


Figure 3.12 : Les Variables de sortie de la charge R-L.

$m'=0.75$

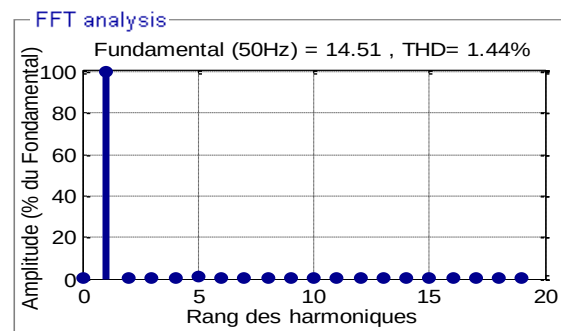
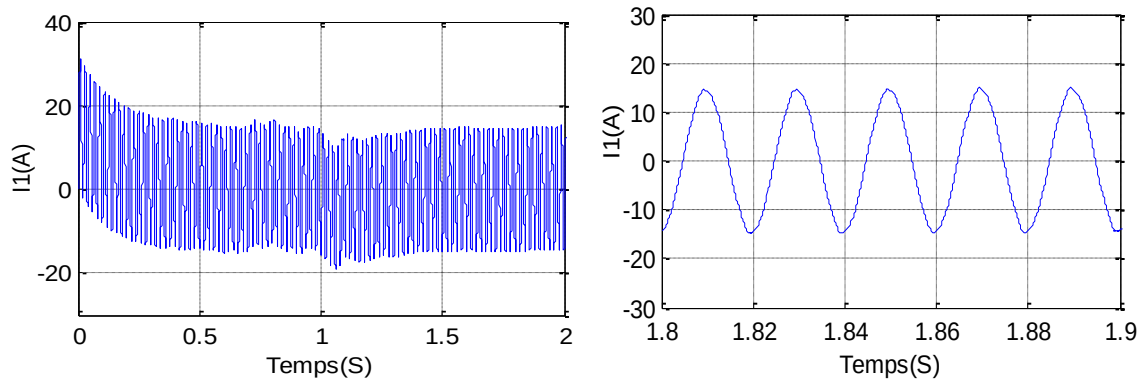


Figure 3.12 : Les Variables de sortie de la charge R-L.

$m'=0.5$

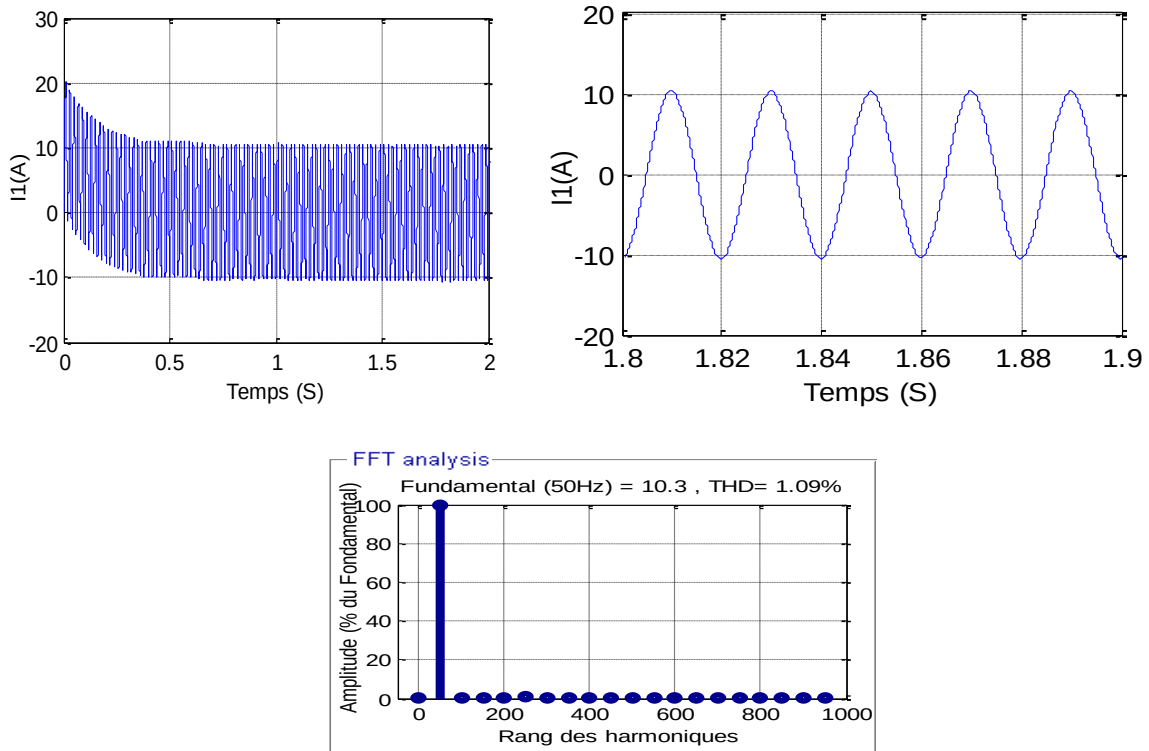
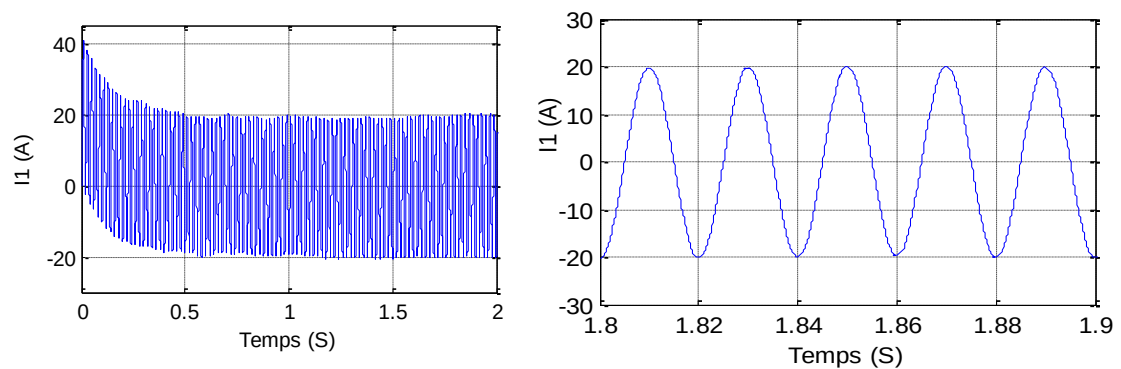


Figure 3.12 : Les Variables de sortie de la charge R-L.

On varie n et on fixe ($m'=0.95$) :

$n=240$



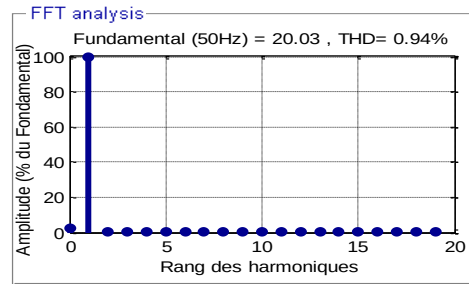


Figure 3.12 : Les Variables de sortie de la charge R-L.

n=480

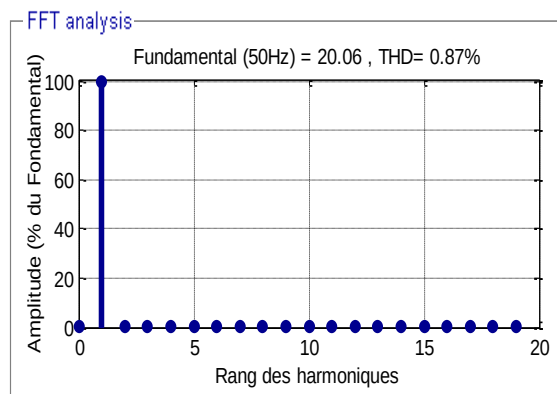
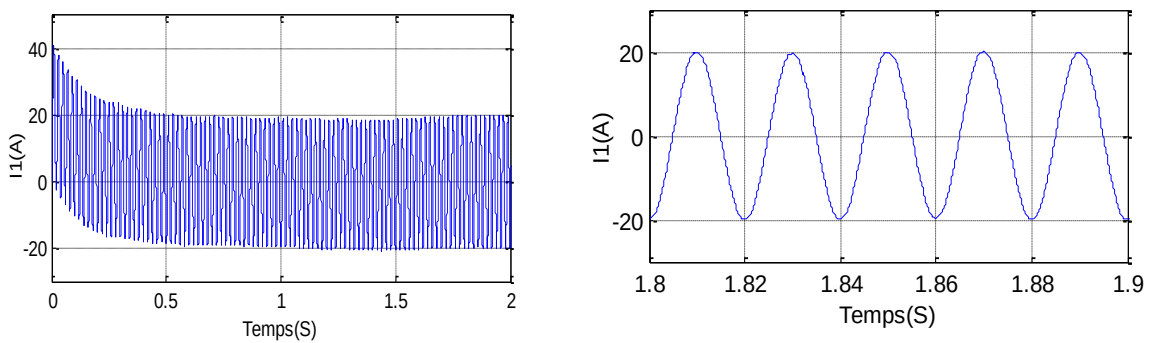


Figure 3.12 : Les Variables de sortie de la charge R-L.

Interprétation des résultats

- ✓ L'augmentation de nombre d'intervalle d'échantillonnage n permet de pousser les harmoniques vers les fréquences élevées et donc facilement filtrées.
- ✓ Le taux de modulation m est inversement proportionnel à l'amplitude du fondamental.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les différentes stratégies de commande de l'onduleur cinq niveaux à structure NPC à savoir la commande MLI sinusoïdale avec différents types de porteuse et la commande MLI vectoriel. Puis nous avons montré les résultats de simulation de l'association onduleur cinq niveaux NPC- charge RL, d'après ces résultats nous avons constaté que la commande MLI vectoriel permet une meilleure qualité spectrale de la tension de sortie de l'onduleur cinq niveaux NPC. Néanmoins, les inconvénients de cette technique de commande résident dans la complexité de l'algorithme de commande ce qui nécessite un temps de simulation élevé par rapport avec la commande MLI sinusoïdale, de plus le problème de déséquilibre des tensions du bus continu.

4.1 Introduction

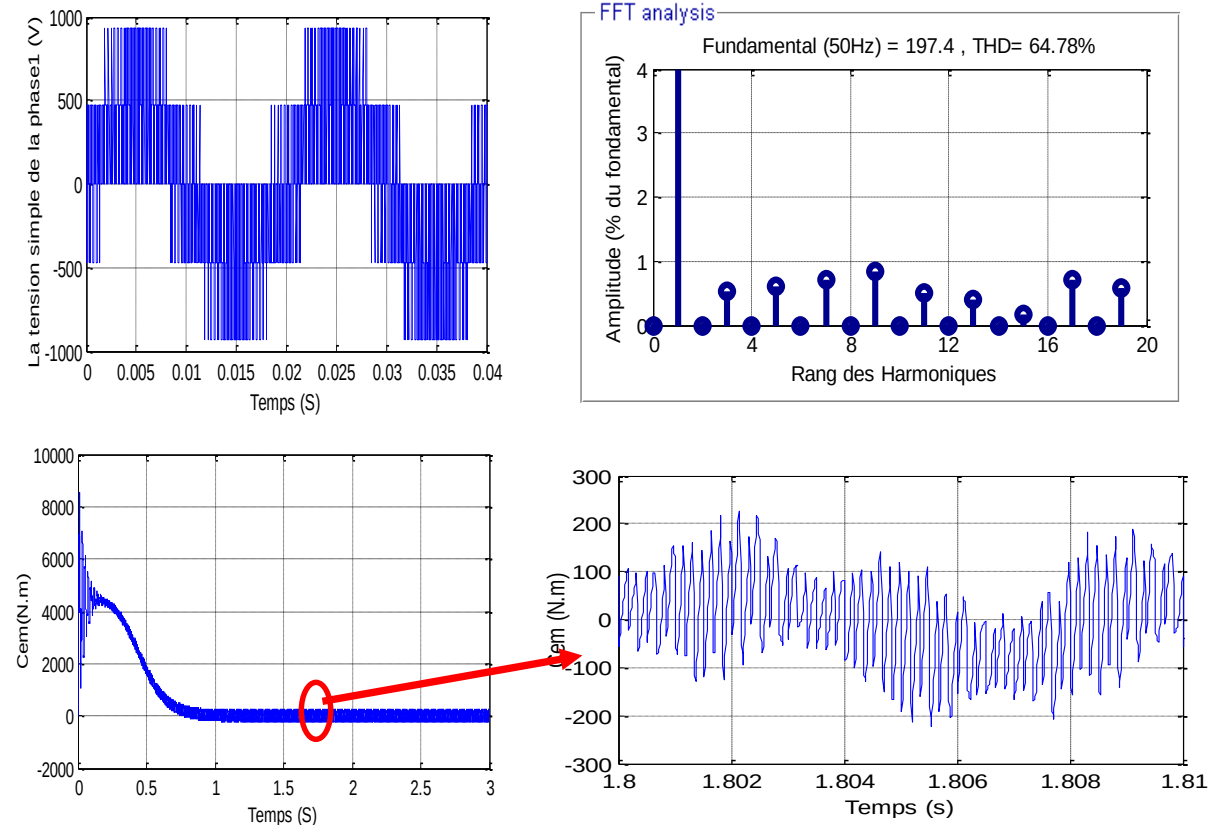
Une machine asynchrone à cage de 1MW est alimentée à travers un convertisseur de puissance. Pour obtenir le fonctionnement optimal de cette machine, on doit l'alimenter par une source de tension aussi proche que possible d'une forme sinusoïdale.

Dans ce chapitre, nous proposerons une application à la conduite de la machine asynchrone en utilisant l'onduleur à deux, trois et cinq niveaux à structure NPC, commandé par la modulation vectorielle.

4.2 Association de l'onduleur deux niveaux à la conduite de la machine asynchrone

A l'aide de l'outil Matlab/Simulink, On simule l'association de l'onduleur à deux niveaux commandé par modulation vectorielle à une machine asynchrone triphasé de puissance 1MW. Les paramètres de la machine sont indiqués dans l'annexe [Lalili 09] [Gued 09].

Pour pouvoir obtenir une tension de sortie de l'onduleur à l'échelle de la tension nominale de la machine (791V), on a besoin d'alimenter l'onduleur par une source continue de valeur $U_c=1400$ (V). La modulation vectorielle est caractérisée par le taux de modulation m , et la période d'échantillonnage T_s ($f_s = 1/T_s$).



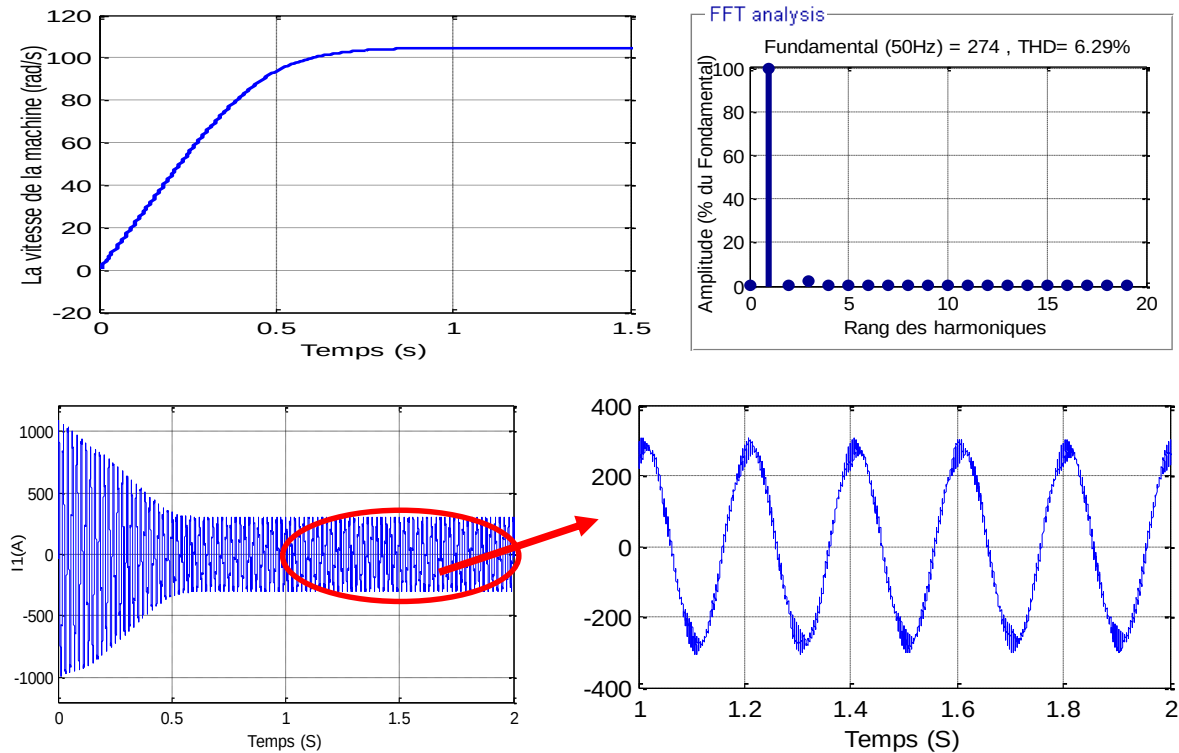


Figure 4.1 : Variables de sortie de la machine asynchrone ($n=120$, $m'=0.95$).

Interprétations des résultats :

Les variables de la machine asynchrone sont présentées à la Figure (4.1). La montée de la vitesse est effectuée dans un temps d'environ 0.5 secondes, pour atteindre une valeur nominale d'environ 105 rd/sec. Le couple est nul en régime permanent du fait que la machine n'est pas chargée. Le courant de phase en régime permanent s'approche à une forme sinusoïdale avec des harmoniques qui se pousse vers des ordres élevés proportionnellement à la fréquence d'échantillonnage avec un THD du courant qui vaut 6.29%.

4.3 Association de l'onduleur trois niveaux à la conduite de la machine asynchrone

L'onduleur à trois niveaux commandé par modulation vectorielle est associé à un moteur asynchrone triphasé, dont les paramètres sont indiqués dans l'annexe. La tension continue à l'entrée de l'onduleur est de 1400V, divisée en deux parties égales, à l'aide de deux capacités.

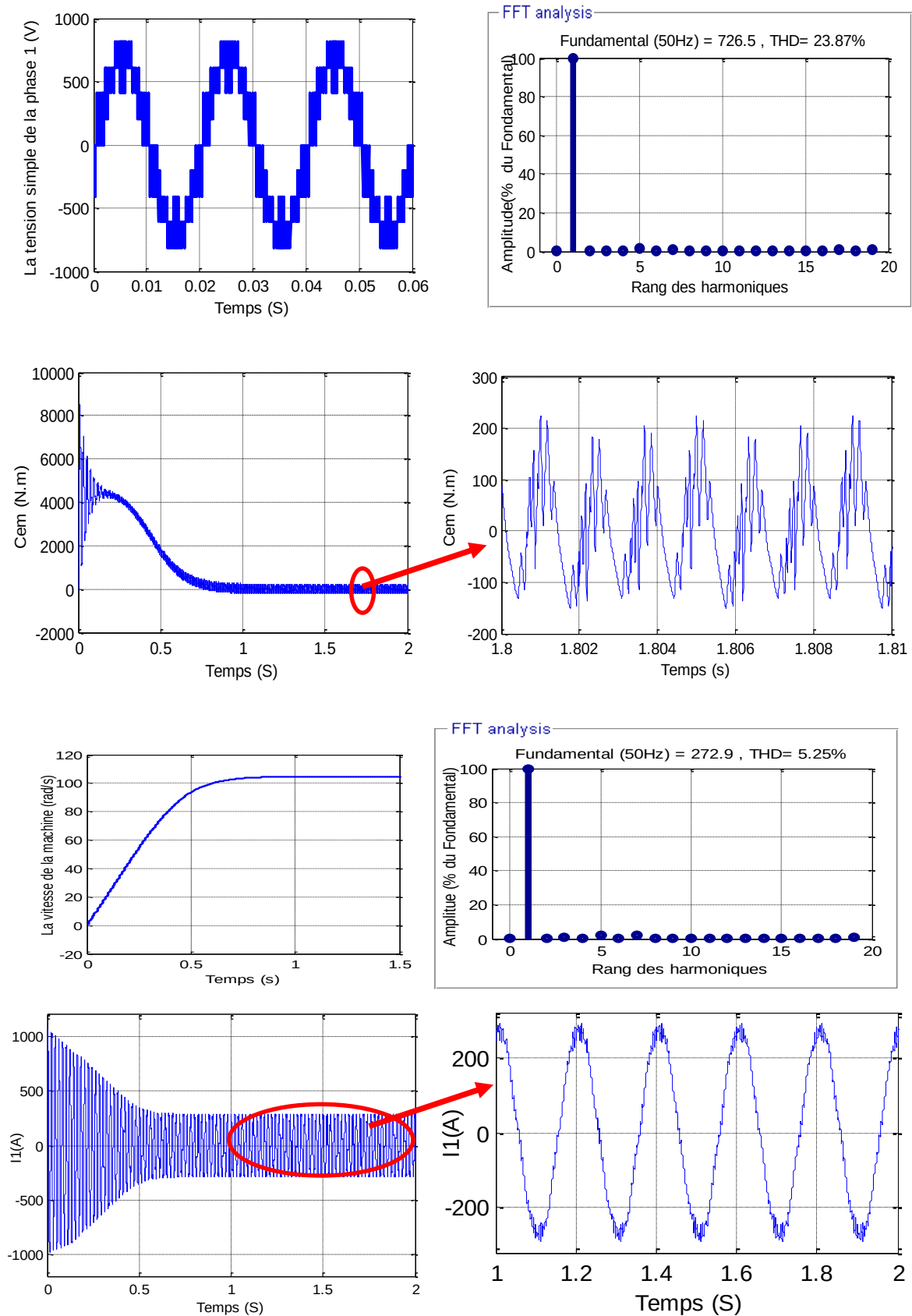


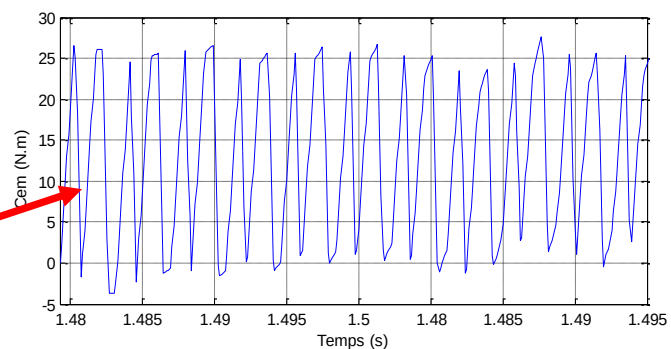
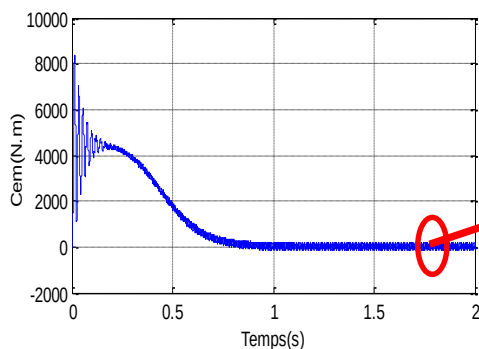
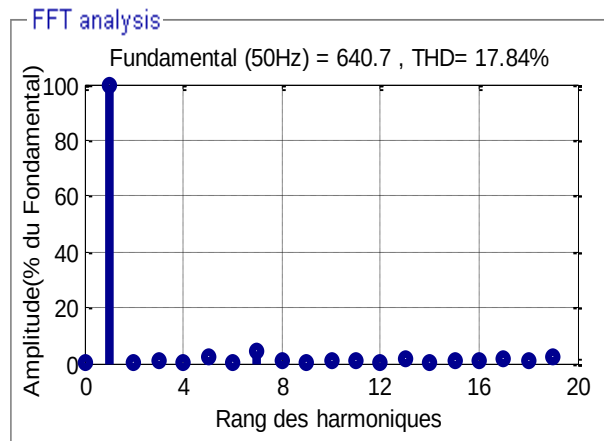
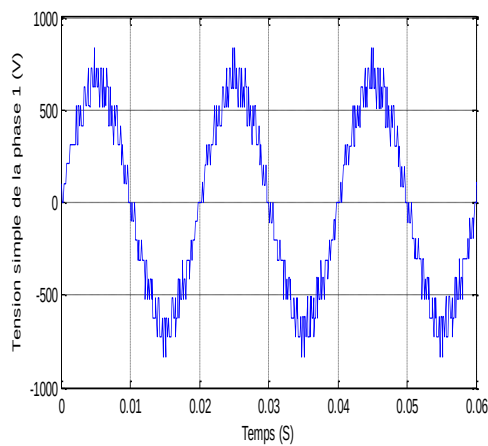
Figure 4.1 : Variables de sortie de la machine asynchrone ($n=120$, $m'=0.95$).

Interprétations des résultats :

Les variables de la machine asynchrone sont présentées à la Figure (4.1). La montée de la vitesse est effectuée dans un temps d'environ 0.5 secondes, pour atteindre une valeur nominale d'environ 105 rd/sec. Le couple est nul en régime permanent du fait que la machine n'est pas chargée. Le courant de phase en régime permanent s'approche à une forme sinusoïdale avec des harmoniques qui se poussent vers des ordres élevés proportionnellement à la fréquence d'échantillonnage avec un THD du courant de la charge qui vaut 5.25%.

4.4 Association de l'onduleur Cinq niveaux à la conduite de la machine asynchrone

La charge de l'onduleur est une machine asynchrone. La tension d'entrée de l'onduleur est de 1400V, divisée en égalité entre quatre condensateurs.



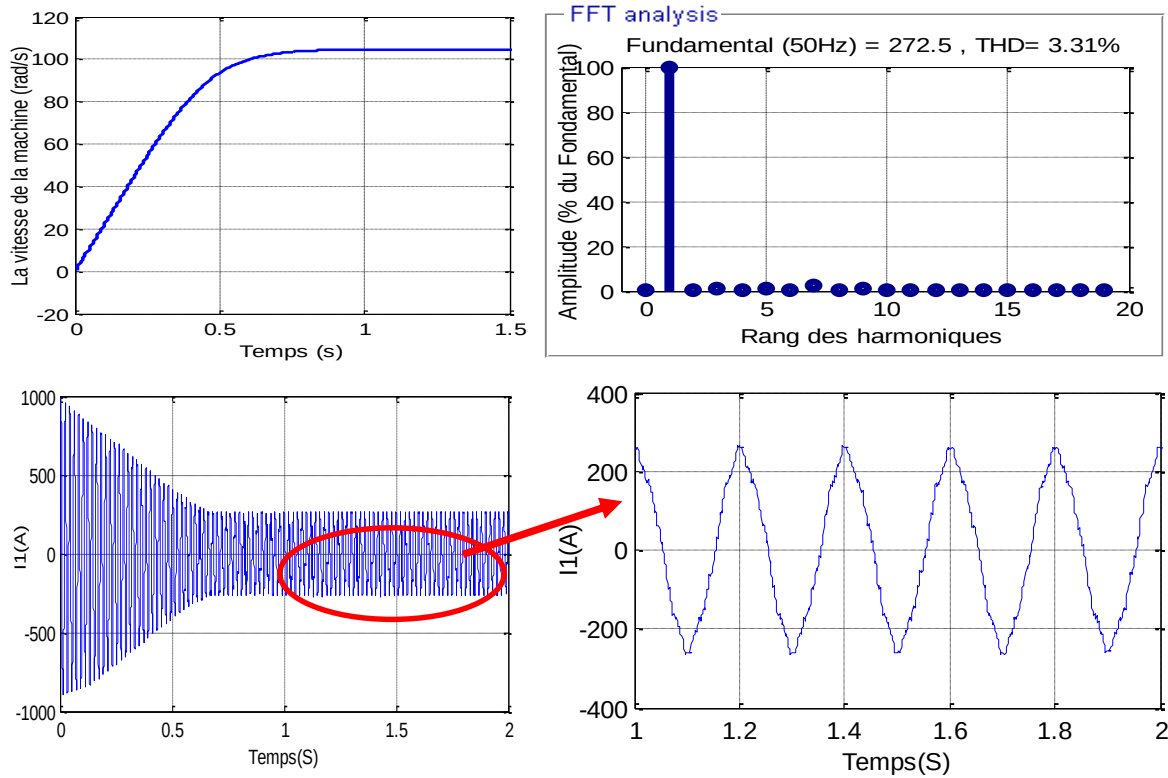


Figure 4.1 : Variables de sortie de la machine asynchrone ($n=120$, $m'=0.95$).

Interprétations des résultats :

- ✓ On constate que Le courant de phase en régime permanent s'approche de plus en plus à une forme sinusoïdale avec des harmoniques qui se pousse vers des ordres élevés proportionnellement à la fréquence d'échantillonnage.
- ✓ Le couple est nul en régime permanent du fait que la machine n'est pas chargée.
- ✓ Le THD du courant de la charge vaut 3.31%.

4.5 Comparaisons entre les trois cascades convertisseur-machine

En comparant les performances obtenues dans le cas de l'onduleur à cinq niveaux avec celles de l'onduleur à deux et à trois niveaux, on constate que sous les mêmes conditions de fonctionnement (même fréquence d'échantillonnage et même taux de modulation).

Type de convertisseurs	THD de tension (%)	THD de courant (%)
2 niveaux	64.78	6.29
3 niveaux	23.87	5.25
5 niveaux	17.84	3.31

Tableau 4.1 : Comparaison entre les trois cascades convertisseur-machine en termes de THD de courant et de tension.

- ✓ l'onduleur à cinq niveaux produit une tension de sortie contenant moins d'harmoniques.
- ✓ L'onduleur à cinq niveaux donne une qualité du courant plus propre (THD=3.31%).
- ✓ Les ondulations du couple diminuent.

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons appliqué la modulation vectorielle pour les onduleurs à deux niveaux, à trois et à cinq niveaux à structure NPC utilisés pour la conduite d'une machine asynchrone. D'après les résultats de simulations obtenues, nous avons remarqué que la qualité de la tension de sortie de l'onduleur s'améliore dans le cas des onduleurs multiniveaux par rapport à l'onduleur deux niveaux ainsi l'analyse harmonique du courant de la charge montre une meilleure qualité spectrale pour le cas de l'onduleur cinq niveaux par rapport aux onduleurs 2 et 3 niveaux.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'étude des différentes stratégies de commande d'un onduleur cinq niveaux à structure NPC, où l'objectif est de trouver la stratégie qui donne les meilleures performances en termes de qualité d'énergie.

Dans le premier chapitre, nous avons fait un bref rappel sur les différentes structures d'onduleurs multiniveaux. Ensuite, nous avons présenté leurs avantages et inconvénients ainsi que leurs domaines d'application.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté le modèle de fonctionnement de l'onduleur triphasé à cinq niveaux à structure NPC sans à priori sur la commande en utilisant les fonctions de connexion.

Dans le troisième chapitre, nous avons étudié la commande en modulation de largeur d'impulsion de l'onduleur cinq niveaux à structure NPC, et en particulier la commande MLI sinusoïdale et la commande MLI vectorielle.

L'étude des caractéristiques de la tension de sortie de l'onduleur, pour les différentes stratégies, a montré que la stratégie de la commande vectorielle présente un taux distorsion harmonique THD faible par rapport aux autres stratégies.

Pour les stratégies de modulation sinusoïdale avec les différents types des porteuses, les harmoniques de la tension se regroupent en familles centrées autour des fréquences multiples de la fréquence du fondamental ($m \cdot f$). La stratégie de la modulation vectorielle est la plus importante pour la commande de l'onduleur multiniveaux.

Dans le quatrième chapitre, afin d'exposer clairement l'avantage de l'onduleur 5 niveaux à structure NPC, nous avons étudié les cascades onduleur 2 niveaux-machine asynchrone, onduleur 3 niveaux-machine asynchrone et onduleur 5 niveaux-machine asynchrone. Les performances de la machine asynchrone alimentée par l'onduleur de tension à cinq niveaux sont assez satisfaisantes pour des applications de haute tension et forte puissance avec une meilleure qualité spectrale de la tension de l'alimentation de la machine.

Enfin, notre travail est achevé par une conclusion qui expose les principaux résultats obtenus.

Annexe

1. Paramètres de la machine asynchrone utilisée :

La puissance utile :	$P_u = 1 \text{ MW}$
Tension nominale :	$V_n = 791 \text{ V}$
La résistance statorique :	$R_s = 0.228 \Omega$
La résistance rotorique :	$R_r = 0.332 \Omega$
L'inductance statorique :	$L_s = 0.0084 \text{ H}$
L'inductance rotorique :	$L_r = 0.0082 \text{ H}$
La Mutuelle :	$M = 0.0078 \text{ H}$
Le moment d'inertie :	$J = 20 \text{ Kg.m}^2$
Nombre de Paire de pôles :	$P = 3$

2. Paramètres de la charge statique RL :

La résistance :	$R = 0.7 \Omega$
L'inductance :	$L = 100 \text{ mH}$

- [Alb 07]** Alberto lega « multi level converters : dual two-level inverter Scheme ».Thèse de doctorat. University of Bologna March 2007.
- [Bak 75]** R.H. Baker, « Electric power converter », U.S.patent N° 3, 867, 643, Feb. 1975.
- [Bouc 06]** F. BOUCHAFAA, « Etude et Commande de différentes Cascades à Onduleur à Neuf Niveaux à Structure NPC. Application à la conduite d'une MSAP », Thèse doctorat, 2006.
- [Bru 01]** T. Brückner, S. Bernet, "Loss Balancing in Three-Level Voltage Source Inverters Applying Active NPC Switches", IEEE Power Electronics Specialists Conference, vol.2, pp.1135-1140, 2001.
- [Cal 99]** M. Calais, V. G. Agelidis, M. Meinhart, "Multilevel Converters for single-phase grid connected photovoltaic systems : an overview", Elsevier Science Ltd, Vol. 66, No. 5, pp. 325-335, 1999.
- [Chi 99-01]** Chibani.R « Modélisation et Commande d'un Onduleur à Cinq Niveaux à Structure NPC, Application à la Machine Synchrone à Aimants Permanents », thèse de magister, ENP, 1999.
- [Dix 07]** J. Dixon, A. A. Breton, F. E. Rios, J. Rodriguez, J. Pontt, and M. A. Perez, "High-Power Machine Drive, Using Non Redundant 27-Level Inverters And Active Front end Rectifiers," IEEE Trans. Power Electron., vol. 22, no. 6, pp. 2527–2533, Nov. 2007.
- [D.R 04]** D. Soto, R. Pena «Nonlinear control strategies for cascaded multilevel STATCOMS ». IEEE Trans. On power delivery 2004.
- [Gat 97]** G. Gateau, « contribution à la commande des convertisseurs statiques multicellulaires série », thèse de doctorat INP. Toulouse 1997.
- [Gued 09]** Rabia GUEDOUANI Etude et Commande des Différentes Cascades Redresseurs de Tension Triphasé MLI - Onduleur de Tension à Cinq Niveaux. Application à la Conduite de la Machine Asynchrone de Forte Puissance 2009.
- [Gut 01]** M.F.E. Gutiérrez, « contribution à la définition de structures optimales d'onduleurs pour la commande des machines à courant alternatif »Thèse de doctorat, supelec, 2001.

[Him 15] K. Himour « optimisation des systèmes photovoltaïques par l’insertion des onduleurs multiniveaux », thèse doctorat, 2015.

[Imarz 05] IMARAZENE Khoukha. Application des Réseaux de Neurones à la Commande par Elimination d’Harmoniques des Onduleurs Multiniveaux, 2005.

[J.S.Mar 05] J.-S. Mariethoz, “Etude Formelle pour la Synthèse de Convertisseurs Multiniveaux Asymétriques : Topologie, Modulation et Commande”, Thèse de l’Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2005.

[Koya 92] M. Koyama, T. Fujii, R. Uchida, T. Kawabata, “Space voltage vector-based new PWM method for large capacity three-level GTO inverter”, Proc. IEEE International Conf. On Power Electronics and Motion Control, IECON’92, 9-13 Nov 1992, Vol.1, pp. 271-276.

[Kou 10] S. Kouro et al, “Recent advances and industrial applications of multilevel converters”. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, N°. 8, Aout 2010

[Lai 96] J. S. Lai, & F. Z. Peng, “Multilevel converters- A new breed of power converters”, Transactions on Industry Applications, Vol.32, No. 3, May/June 1996, pp.509-517.

[Lalili 09] Djafer LALILI. MLI Vectorielle et Commande Non Linéaire du Bus Continu des Onduleurs Multiniveaux. Application à la Conduite de la Machine Asynchrone.

[Liu 08] Y. Liu and F. L. Luo, “Trinary Hybrid 81-Level Multilevel Inverter for Motor Drive With Zero Common-Mode Voltage,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 55, no. 3, pp. 1014–1021, Mar. 2008.

[Lour 10] Lourci N : « Contribution à l’étude et la commande d’un onduleur à cinq niveaux à diodes flottantes. Application à la conduite d’une machine asynchrone triphasée ». Thèse de magister, ENP, Alger 2000.

[Man 04] J, SONG MANGUELLE « convertisseurs multi niveaux asymétriques alimentés par transformateurs multi secondaires basse fréquence. Réaction au réseau d’alimentation ». Thèse doctorat, l’école polytechnique fédérale de lausanne 2004.

[Mar 03] R. Marquardt, A. Lesnicar, “A New Modular Voltage Source Inverter Topology”, Proceedings of EPE, CD-ROM, 2003.

[Mck 04] Mckenzie.K.J « Eliminating Harmonics in a Cascaded H-bridges Multilevel Inverter Using Resultant Theory, Symmetric Polynomials, and Power Sums », Thesis for the master of science degree,the university of Tennessee, Knoxville, May 2004.

[Mer 07] F.MERRAHI, « Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne)», MEMOIRE DE MAGISTER, 2007.

[Mue 94] O. M. Mueller and J. N. Park, "Quasi-linear IGBT Inverter Topologies," in Proc. 9th. APEC, Feb. 13–17, 1994, pp. 253–259.h Annu

[Nab 80] A Nabae,I. Takahashi, H. Akagi « A new Neutral Clamped PWM Inverter » IEEE trans. Ind.appli, 1980.

[Nab 81] A. N. Nabae, I. Takahashi, H. Akagi, "A new neutral-point-clamped PWM inverter", IEEE Transactions on Industrial Applications, Vol.1A-12, Sep. / Oct. 1981, pp.518-323.

[Rod 02] J.Rodriguez « multi Level inverters : a survey of topologies, control and applications », IEEE trans. On ind. Appl, 2002.

[Seg 77] Seguier G, Notelet F. « Electrotechnique industrielle », Edition TEC & DOC 1977.

[Sep 07] L. A. Sepra, "Current Control and Strategies for and Multilevel Grid and Connected", Thèse de doctorat N° d'ordre : 1746, FIT Zurich, 2007.

Proc. IEEE Int. Symp. Circuits Syst., Orlando, FL, 30 Mai–02 Juin, 1999, vol. 5, pp. 198–201.

[Tal 04] A.TALHA, «Etude de différentes cascade de l'onduleur a sept niveaux à structure NPC. Application à la conduite d'une machine synchrone à aimant permanents », thèse doctorat 2004.

[Tham 10] ABDELKRIM Tameur « Etude et Implémentation de Différents Algorithmes Numériques de Modulation de Largeur d'Impulsions d'un Onduleur Triphasé à Trois Niveaux». Thèse de magister, ENP, 2004.