

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME  
MASTER EN GENIE ELECTRIQUE

**OPTION : RESEAUX ELECTRIQUE**

**THEME**

---

---

## **Commande des Onduleurs Multiniveaux**

---

---

**Proposé et encadré par :**

Mr. CHOUAF Fethi

**Présenté par :**

MANSOURI Abdallah

Année Universitaire 2015/2016

N° d'ordre : REs-231

## *Remerciements*

*On remercie tout d'abord le dieu, le tout puissant qui nous facilite le chemin pour l'accomplissement de ce mémoire.*

*A tous nos enseignants et le chef de département de génie électrique*

*Mr. F.BENRABEH qui nous ont aidés de proche ou de loin pour être les master en réseaux électrique.*

*Nos grands remerciements vont également à Ms .F.CHOUAF de nous avoir et pour leurs disponibilité et leurs précieux conseils.*

*Nos remerciements à tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.*

*En fin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous les amis et collègues pour le soutien moral.*

## *Dédicaces*

*Après de longues années d'études et de travail, sachant l'importance de l'aide des personnes qui m'aiment, je voudrai humblement leurs, dédier ce modeste travail tout en avant qu'ils méritent le meilleur qui soit.*

*Je dédie ce travail :*

*A ma très chère mère (Chérifa), mon symbole de bonté et ma source de tendresse, t'es prières et ta bénédiction ont été avec moi, aucune dédicace ne saurait être suffisante pour toi, et pour exprimer ce que t'as pu faire pour moi, qu'Allah t'accorde le bonheur, la santé et une longue heureuse vie.*

*A mon cher père (Derradji) qui m'encourageait et qui a été toujours à mes cotés, qu'Allah t'accorde la santé et une vie pleine de bonheur.*

*A ma grand-mère (Guarmia) et ma tante (nana Naïma), qu'Allah vous garde pour nous tous en bonne santé et vous accorde le bonheur.*

*A mes frères (Faïcel, Hamza) et sœurs (Hafida , Khawla, Nabila et Roufaïda) avec qui j'ai partagé le pire et le meilleur, et qui ont coloré et donné un goût à ma vie, Sans vos conseils et vos tendresses je ne sais pas si je pouvais avancer, qu'Allah vous donne un avenir plein de joie, de bonheur et de réussite.*

*A mes beaux-frères, belles-sœurs et mes neveux (Khalil, Zikou) et nièces (Nada, Ritel, Rihem Hiba et Sadja).*

*A Doudou soundous qui m'a donner beaucoup de son temps et qui m'a montré qu'il y a encore des belles choses dans la vie.  
Qu'Allah te garde pour moi.*

*Je ne saurais aussi oublier mes amis et mes collègues en loïn et proche, ainsi tous ceux qui ont participé de loïn ou de prés et qui nous ont aidé l'élaboration de ce mémoire.*

# Table des matières

<b>Table des matières</b> .....	<b>I</b>
<b>Liste des Figures</b> .....	<b>III</b>
<b>Liste des Tableaux</b> ...	<b>V</b>
<b>Notions et symboles</b> .....	<b>VI</b>
<b>Introduction Générale</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre I Généralité sur les onduleurs</b>	
I.1.Introduction .....	3
I.2 Définitions des onduleurs.....	3
I.3. Les applications des onduleurs .....	4
I.3.1 Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone .....	4
I.3.2 Alimentation de secours UPS.....	4
I.3.3 Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes .....	5
I.4 Principe générale de fonctionnement .....	5
I.5 Classification des onduleurs.....	6
I.5.1 Onduleurs non autonome .....	6
I.5.2 Onduleur autonome .....	7
I.5.2.1 Les Onduleurs (autonomes) de tension .....	7
I.5.2.2 Les onduleurs (autonomes) de courants .....	8
I.6 Onduleur de tension triphasé .....	9
I.7 Onduleur de courante triphasé .....	9
I.8 Les onduleurs à résonance .....	9
I.8.1 Onduleur à résonance parallèle .....	10
I.8.2 Onduleur à résonance série.....	10
I.9 Intérêt des convertisseurs statiques multi niveaux.....	11
I.10 Description des principales topologies de la conversion multiniveaux.....	11
I.10.1 Onduleur multi niveaux à diode de bouclage .....	11
I.10.2 Onduleur multi niveaux à condensateurs flottants .....	13
I.10.3 Onduleurs multi niveaux en cascade .....	14
I.11 Autres topologies .....	16
I.12 Classification des topologies selon leur alimentation .....	16
I.13 Nombres de composants nécessaires .....	16
I.14 conclusion .....	17
<b>Chapitre II Description et modélisation des onduleurs 3 et 5 niveaux à diode de bouclage NPC</b>	
II.1. Introduction.....	18
II.2 Structure de l'onduleur à trois niveaux .....	18
II.3 Configurations et fonctionnement d'un bras de l'onduleur à trois niveaux.....	20
II.3.1 Première configuration {1100} .....	20
II.3.2 Deuxième configuration {0110} .....	20
II.3.3 Troisième configuration {0011} .....	21
II.4 Onduleur à cinq niveaux de type NPC .....	23

II.4.1 Structure de l'onduleur à cinq niveaux .....	23
II.5 Configurations d'un bras de l'onduleur NPC à cinq niveaux.....	23
II.5.1 Premier configuration {11110000}.....	23
II.5.2 Deuxième configuration {01111000}.....	24
II.5.3 troisième configuration {00111100} .....	25
II.5.4 Quatrième configuration {00011110}.....	25
II.5.5 Cinquième configuration {00001111} .....	26
II.6 Conclusion.....	28
<b>Chapitre III Stratégie de Commande des onduleurs multi niveaux</b>	
III.1. Introduction .....	29
III.2 Commande par hystérisées .....	30
III.3 Commande plein d ondes .....	30
III.4 Commande par La modulation de largeur d'impulsion .....	32
III.4.1 Commande par La modulation sinusoïdale naturelle .....	32
III.4.1.1 Caractéristique de la modulation sinusoïdale naturelle .....	33
III.4.2 Commande par La modulation vectorielle .....	33
III.4.2.2 Principe de La modulation vectorielle .....	33
III.5 Modulation vectorielle de l'onduleur à trois niveaux .....	34
III.5.1 Structure générale de l'onduleur à trois niveaux .....	34
III.5.2 Fonctions de commutation.....	34
III.5.3 Commande complémentaire des interrupteurs.....	34
III.5.4 Etats d'un bras de l'onduleur .....	35
III.5.5 Etats de l'onduleur .....	36
III.5.6 Tensions de sortie .....	37
III.5.7 Vecteur tension de sortie et diagramme vectoriel.....	37
III.5.8 Vecteur tension de référence .....	39
III.5.9 Séquence des états de l'onduleur.....	41
III.6 Conclusion .....	47
<b>Chapitre IV Simulation de l'onduleur de tension deux et trois niveaux type NPC</b>	
IV.1 Introduction.....	48
IV.2 Simulation de l'onduleur de tension à trois niveaux de type NPC .....	48
IV.2.1 Commande MLI Sinusoïdal de l'onduleur de tension à trois niveau.....	49
IV.2.1.1 POUR $r= 0.8$ $m= 40$ .....	49
IV.2.1.2 Pour $r= 0.8$ $m= 96$ .....	50
IV.2.2 Commande MLI vectorielle de l'onduleur de tension à trois niveaux .....	52
IV.2.2.1 Pour $r= 0.8$ $m= 40$ .....	52
IV.2.2.2 Pour $r= 0.8$ $m= 9$ .....	53
IV.3 Interprétation des résultats .....	55
IV.4 Conclusion .....	56
<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>57</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>58</b>
<b>Résumé</b>	

## LISTE DES FIGURES

### Chapitre I

Figure I .1 schéma de principe de la conversion continu-Alternative (DC-AC) .....	3
Figure I.2 Schéma de Conversion DC/AC et grandeur de sortie.....	3
Figure I.3 Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone.....	4
Figure I.4 Alimentation de secours.....	4
Figure I.5 Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes... ..	5
Figure I.6 Symbole et signal d'un onduleur.....	5
Figure I.7 Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 1er demi-cycle.....	5
Figure I.8 Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 2ème demis cycle.....	6
Figure I.9 Signal complet de l'onduleur.....	6
Figure I.10 Onduleur de tension en pont monophasé .....	7
Figure I.11 Signaux de commande et forme d'onde des tensions de sortie.....	7
Figure I.12 onduleur de courant en pont monophasés.....	8
Figure I.13 signaux de commande et forme d'onde de courante.....	8
Figure I.14 Circuit de puissance d'un onduleur de tension triphasé.....	9
Figure I.15 Onduleur résonance à parallèle (Monophasée).....	10
Figure I.16 Signaux de commande et forme d'onde des Courant.....	10
Figure I.17 Onduleur à résonance Série(Monophasée).....	11
Figure I.18 Signaux de commande et forme d'onde des tensions.. ..	11
Figure I.19 Topologies d'onduleurs NPC.....	19
Figure I.20 Topologies d'onduleurs NPC à condensateur Flottant .....	14
Figure I.21 Structure d'un convertisseur N niveaux en cascade.....	15

### Chapitre II

Figure II.1 Onduleur triphasé à trois niveaux.....	18
Figure II.2 Interrupteur bidirectionnel équivalent de la paire Transistor – diode.....	19
Figure II.3 Un bras de l'onduleur à trois niveaux de type NPC.....	19
Figure II.4 1ère configuration du 1er bras. ....	20
Figure II.5 2ème configuration du 1er bras.....	21
Figure II.6 3ème configuration du 1er bras. ....	21
Figure II.7 Forme d'onde de la tension de sortie d'un bras d'onduleur à trois niveaux NPC .....	22
Figure II-8 Bras d'un onduleur NPC à cinq niveaux... ..	23
Figure II-9 1ère configuration du 1er bras.....	24
Figure II-10 2 ème configuration du 1er bras.....	24
Figure II-11 3 ème configuration du 1er bras.....	25
Figure II-12 4 ème configuration du 1er bras.....	25
Figure II-13 5 ème configuration du 1er bras.....	26
Figure II-14 les signaux de commande de chaque interrupteur et la forme la tension de sortie Vao.....	27

**Chapitre III**

Figure III.2 Onduleur de tension triphasée.....30

Figure III.1 Schéma de commande par hystérésis... ..30

Figure III.3 Commande et chronogrammes des grandeurs de l'onduleur triphasés plein onde.....31

Figure III.4 principe de la modulation MLI sinusoïdale naturel.....32

Figure III.5 Onduleur de tension à trois niveaux de type NPC.....34

Figure III.6 Etats d'un bras de l'onduleur à trois niveaux.....35

Figure III.7 Etat de l'onduleur .....36

Figure III.8 Diagramme vectoriel de l'onduleur à trois niveaux... ..39

Figure III.9 Secteurs et région du diagramme vectoriel.....39

Figure III.10 La position de  $v^*s$  à les quatre régions de 1er secteur.....40

Figure III.11 les compensant  $m1$  et  $m2$  de  $V^*s$ .....40

Figure III.12 Etats X, Y et Z pour les différentes régions du diagramme vectoriel... ..42

Figure.III.13 Fonctions logiques  $Fij$  dans les quatre régions du premier secteur.....46

**Chapitre IV**

Figure IV.1 Schéma bloc de simulation d'un onduleur de tension à trois niveaux de type NPC commandé par SVM ... ..48

Figure IV.2 Signaux de la commande MLI sinusoïdal, tensions de sortie et analyse spectral de la tension de sortie pour  $r = 0.8$   $m = 40$ .....50

Figure IV.3 Signaux de la commande MLI sinusoïdal, tensions de sortie et analyse spectral de la tension de sortie pour  $r = 0.8$   $m = 96$ .....51

Figure IV.4 Signaux de la commande MLI vectorielle, tensions de sortie et analyse spectral de la tension de sortie Pour  $r = 0.8$   $m = 40$ .....53

Figure IV.5 Signaux de la commande MLI vectorielle,tensions de sortie et analyse spectral de la tension de sortie  $r = 0.8$   $m = 96$ .....54

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1 Grandeur connue pour chacune des configurations d'un bras de l'onduleur NPC à trois niveaux.....	21
Tableau II.2 Table de commutation de l'onduleur NPC à 5 niveaux.....	26
Tableau III.1 Etat d'un bras de l'onduleur.....	36
Tableau III.2 Etats de l'onduleur a trois niveaux et les coordonnées de vecteur $V_s$ ... ..	38
Tableau.III.3 Décomposition de l'équation (III.32).....	42
Tableau III.4 Les expressions de $dx$ $dy$ et $dz$ pour les différentes régions d'un secteur.....	43
Tableau III.5 Séquences des états dans les différentes régions du diagramme vectoriel.....	44
Tableau III.6 Durées de fermeture des interrupteurs dans le cas du premier secteur.....	45
Tableau IV.1 Les valeurs de THD pour les différentes techniques de commande.....	62

## Notions et symboles

$D_i$	Semi-conducteur non commandé (diode).
$U_C$	Tension principale de l'onduleur NPC.
$I_1, I_2, I_3$	Les courants alternatifs de la charge.
$I_K$	Le courant à la sortie de l'onduleur.
$K_{a1}, K_{b1}, K_{c1}$	Les commutateurs en haut de l'onduleur NPC à deux niveaux triphasé de Tension.
$K_{a2}, K_{b2}, K_{c2}$	Les commutateurs en bas de l'onduleur NPC à deux niveaux triphasé de Tension.
$I$	Le courant d'enté.
$T$	La période de modulation.
$T_i$	Semi-conducteur commandé (IGBT, GTO).
$C$	Le nombre de condensateurs d'équilibrage.
$D$	Le nombre de diodes principales.
$D_c$	Le nombre de diodes clampées.
$E$	La tension du bus continu à l'entrée de l'onduleur.
$i$	Le courant à l'entrée de l'onduleur.
$i_s$	Les courants électriques à la sortie de l'onduleur
$K$	Le nombre de commutateurs principaux.
$K_{is}$	Les commutateurs dans l'onduleur
$N$	Le nombre de niveaux de tension obtenus à la sortie de l'onduleur.
$C_1$	Condensateur de filtrage en haut de l'onduleur NPC à trois niveaux.
$C_2$	Condensateur de filtrage en bas de l'onduleur NPC à trois niveaux.
$D_i$	Semi-conducteur non commandé (diode).
$E$	Tension principale de l'onduleur NPC
$I_a, I_b, I_c$	Les courants alternatifs de la charge.
$I_{ki}$	Le courant qui traverse l'interrupteur bidirectionnel $K_s$ .
$I_S$	Le courant à la sortie de l'onduleur.
$K_i$	Interrupteur bidirectionnel en courant.
$K_{iS}$	Commutateur de l'onduleur NPC
$O$	Le point milieu entre $C_1$ , et $C_2$ .
$U_{c1}$	La tension continue au borne du $C_1$ .
$U_{c2}$	La tension continue au borne du $C_2$ .
$V_a, V_b, V_C$	Les tensions simples aux bornes de la charge.
$V_{a0}, V_{b0}, V_{c0}$	Les tensions simples à la sortie de l'onduleur entre les phases de la charge et le point milieu $o$ .
$V_{Ka1}, V_{Ka2}, V_{Ka3},$ $V_{Ka4}, \dots$	Les tensions inverses appliquées aux bornes des interrupteurs bloqués.

$f_p$	La fréquence du modulation
$m$	L'indice de modulation
$f_r$	La fréquence de la référence.
$r$	Le coefficient de réglage en tension
$A_r$	Amplitude de la référence.
$A_p$	Amplitude de la porteuse
MLI	Modulation de l'argeur d'impulsion
SVM	Space Vector Modulation
$S_{ij}$	Les interrupteurs de l'onduleur
$j$	Indicateur de phase
$I$	Numéro de l'interrupteur du bras
$F_{ij}$	Fonction de commutation
$V_{dc}$	Tension continue
$N$	Etats d'un bras de l'onduleur
$V_{x0}$	Tension phase point milieu
$S_1, S_2$ et $S_3$	Tension phase point neutre
$V^*s$	Tension de sortie
$V_s$	Vecteur Tension de référence
$V_x V_y V_z$	Les composants du vecteur $V_s$ sur les axes $x$ , $y$ et $z$
$V^*_1, V^*_2, V^*_3$	Les trois vecteurs de référence
$V_d, V_q$	composantes du vecteur dans le plan $d$ - $q$
$m$	taux de modulation
$\theta$	position angulaire du vecteur $V^*s$
$T_s$	période d'échantillonnage de l'onduleur. Sec
$T_x T_y T_z$	durées d'application des vecteurs $V_x V_y$ et $V_z$ en grandeur relative.
$dx dy$ et $dz$	durées d'application des vecteurs $V_x V_y$ et $V_z$ en grandeur relative.
$V_{max}$	Amplitude maximale du vecteur $V^*s$
$S$	secteur triangulaire
$m$	L'indice de modulation.
$n$	Le nombre de niveaux de tension.
$r$	Le coefficient de réglage.
$S_a, S_b, S_c$	Les temps de commutation des interrupteurs.
$I$	Le courant mesuré.
$V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}$	Les tensions composées entre les phases.
$S_j$	L'état des interrupteurs $S_j$ ( $j=a, b, c$ ).
$K_a$	L'interrupteur de haut d'un bras de l'onduleur à deux niveaux
$K_a'$	L'interrupteur de bas d'un bras de l'onduleur à deux niveaux
$T$	La période de modulation.
THD	Le facteur de distorsion des harmoniques de la tension de sortie.

# **Introduction Générale**

## Introduction Générale

L'électronique de puissance connaît depuis longtemps un essor très important. A l'heure actuelle, cette discipline du génie électrique touche des domaines d'applications vastes et très divers pour des puissances couvrant une large gamme (quelque watt à plusieurs centaines de mégawatts). Les structures de conversion d'énergie, principales actrices de cette spécialité, commutent des puissances de plus en plus importantes. [1]

Cette demande croissante a été motivée par les avancées technologiques et l'augmentation des calibres en tension et en courant des semi-conducteurs commandés. Néanmoins, un niveau de puissance élevé implique soit une tension d'utilisation élevée, soit un fort courant d'utilisation, voire même les deux à la fois. Dans les trois cas, les composants de puissance utilisés possèdent des calibres plus conséquents. L'augmentation de la tension est souvent privilégiée pour remplir des objectifs de rendement, et les performances statiques et dynamiques des semi-conducteurs se dégradent souvent sous ces conditions de fonctionnement. De plus, malgré des avancées significatives, l'évolution des possibilités de ces derniers est lente à l'heure actuelle par rapport au marché de la demande, notamment au niveau des calibres en tension disponibles.

L'apparition des structures de conversion multiniveaux depuis le début des années 1980 apporte des solutions par la mise en série de semi-conducteurs de puissance. Ces structures assurent la répartition de la contrainte en tension sur différents interrupteurs moyenne ou basse tension tout en améliorant les formes d'onde et le spectre d'harmoniques des grandeurs de sortie.

L'avènement de l'électronique de puissance à semi-conducteurs et le grand nombre de convertisseurs développés récemment permettent le choix d'une association optimale d'un moteur à courant alternatif et d'un onduleur de tension ou de courant à deux niveaux ou multi-niveaux.

Les onduleurs les plus connus jusqu'ici sont les onduleurs à deux niveaux. Ces onduleurs à deux niveaux sont limités en tension (1.4KV) et en puissance (1MVA). Pour monter en puissance et en tension, on associe généralement plusieurs onduleurs en série ou en parallèle, d'où une complication dans la commande et une augmentation du coût du système. [1]

Pour remédier à ces inconvénients, les structures de conversion multiniveaux apportent des solutions par la mise en série de semi-conducteurs de puissance.

Il y a trois principales topologies des onduleurs multiniveaux :

- 1- Structure avec distribution du potentiel commun (Neutral Point Clamped : NPC). dont la solution à trois niveaux est réalisée dans ce mémoire.
- 2- Les onduleurs multiniveaux à cellules imbriquées, cette structure nécessite des tensions continues séparées.
- 3- Les onduleurs multi niveaux en cascade.

Les onduleurs multi niveaux symétriques sont une alternative au NPC. L'adoption de cette structure dans les installations industrielles a été motivée par des avantages tels que la réduction du taux de distorsion harmonique, l'amélioration du facteur de puissance, la minimisation des grandeurs de filtrage et avoir une tension presque sinusoïdale.

L'application des techniques de modulation comme stratégie de commande de l'ouverture et la fermeture des interrupteurs aux onduleurs conventionnel ou multiniveaux de tension pour réduire les

harmoniques. Tel que la MLI sinusoïdale, et la MLI vectorielle. La MLI vectorielle est la méthode récemment la mieux adaptée au contrôle des moteurs asynchrones contrairement à d'autres méthodes.

Pour réduire ces phénomènes, deux possibilités sont envisagées : soit augmenter le nombre des niveaux de la tension générée par le convertisseur (onduleur), soit d'imposer sur chaque période des commutations judicieusement placées de manière à faire varier la valeur du fondamental de la tension de sortie tout en minimisant son contenu harmonique. [1]

les avantages de ces convertisseurs :

- Transfert de puissance peut-être contrôlé et même régulé.
- Système moins encombrant et moins lourd.
- Un rendement excellent.
- Grâce à l'automatisation une facilité de mise œuvre.
- Protections plus efficaces.
- Grâce aux progrès dans la fabrication et le montage des composants,
- un coût relatif en baisse [2].

Dans notre travail, on se présente l'onduleur à trois niveaux de tension de type NPC commandé par les différentes commandes de modulation.

Nous avons organisé ce mémoire en V chapitres:

- Le premier chapitre présente la généralité sur les onduleurs.
- Le second chapitre étudie la Description et modélisation des onduleurs trois et cinq niveaux à diode de bouclage NPC
- Le troisième chapitre traite les différentes stratégies de commande à MLI des onduleurs de tension multi niveaux , est consacré à la présentation de la théorie de la commande SVM appliquée aux onduleurs à trois niveaux de tension de type NPC
- Dans le dernier chapitre, nous allons présenter la simulation de l'onduleur à deux et trois niveaux, sous MATLAB.

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



# **Chapitre I**

## **Généralité sur les Onduleurs**

### I.1 Introduction

Les conversions DC/AC consiste à générer une ou plusieurs tensions(s) alternative(s), le plus souvent sinusoïdale à partir d'une tension continue. Ceci permet principalement d'alimenter des appareils adaptés aux tensions réseaux à partir de batteries ou de tensions redressées, ou encore de piloter, par variation de fréquence, un moteur AC à vitesse variable. Les circuits qui réalisent ces opération sont appelés « onduleur » [3].

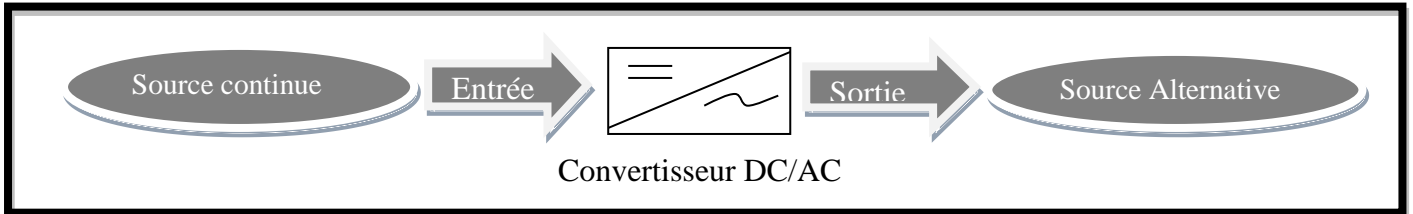


Figure I.1 schéma de principe de la conversion continu-Alternative (DC-AC).

### I.2 Définitions des onduleurs

Un onduleur est un dispositif permettant de transformer en alternatif une énergie électrique de type continue. Ils sont utilisés en électrotechnique pour :

- Soit fournir des tensions ou courants alternatifs de fréquence et amplitudes variables.
- Soit fournir une ou des tensions alternatives de fréquence et d'amplitude fixes [3].

En fait, cette conversion d'énergie st satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (semi-conducteurs). Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande [5], On distingue les onduleurs de tension et les onduleurs de courant, en fonction de la source d'entrée continue : source de tension ou source de courant.

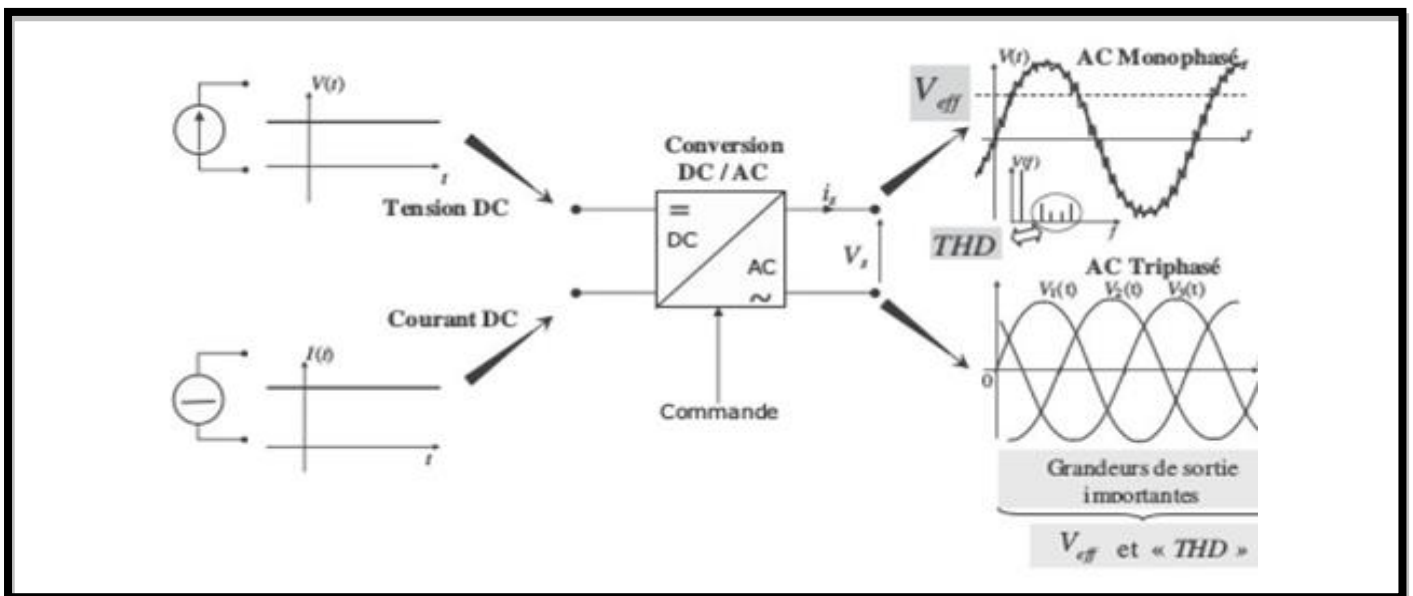


Figure I.2 Schéma de Conversion DC/AC et grandeur de sortie.

### I.3 Les applications des onduleurs

Parmi les nombreux domaines d'emploi des onduleurs autonomes, on trouve Principalement Les onduleurs à fréquence fixe à commutation forcée : Alimentés le plus souvent Par une batterie d'accumulateur, ils jouent d'ordinaire le rôle d'alimentation de sécurité, ils Constituent à ce titre, le principe déboucle actuel des onduleurs autonomes [5].

Les onduleurs à fréquence variable à commutation forcées : Alimentés à partir du réseau Industriel par l'intermédiaire d'un montage redresseur, ils délivrent une tension de fréquence et de valeurs efficaces nécessaires pour faire tourner à vitesse variable un moteur à courant alternatif [5].

L'onduleur de secours pour le matériel informatique permet d'assurer la continuité de l'alimentation en cas de coupures sur le réseau, Il permet aussi de filtrer les éventuels défauts de la tension du réseau (parasites ou Surtensions) [2].

#### I.3.1 Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone

La vitesse d'un moteur synchrone est fixée par la pulsation des courants statiques. Pour changer de vitesse il faut donc changer la fréquence des tensions d'alimentation. Il faut donc redresser la tension du réseau puis l'onduler à la fréquence désirée [5].

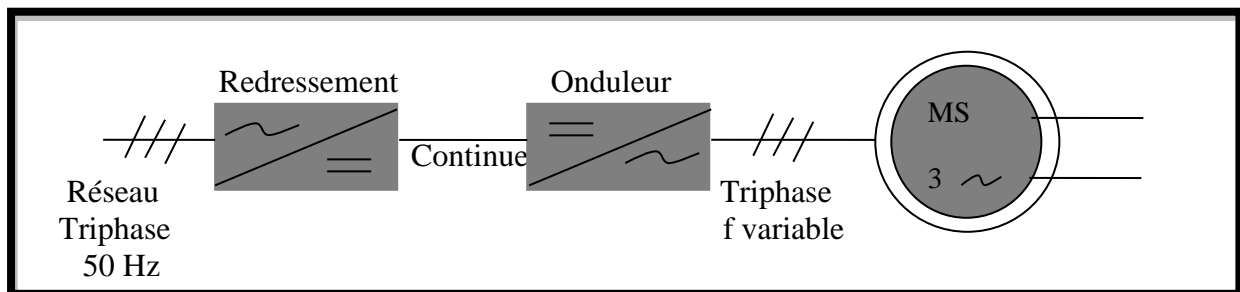


Figure I.3 Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone.

#### I.3.2 Alimentation de secours UPS

Lors d'une panne d'électricité, un onduleur assure la continuité de l'alimentation des machines à partir de batteries. En informatique professionnelle, un onduleur est indispensable pour éviter la perte d'informations en cas de panne du secteur [5].

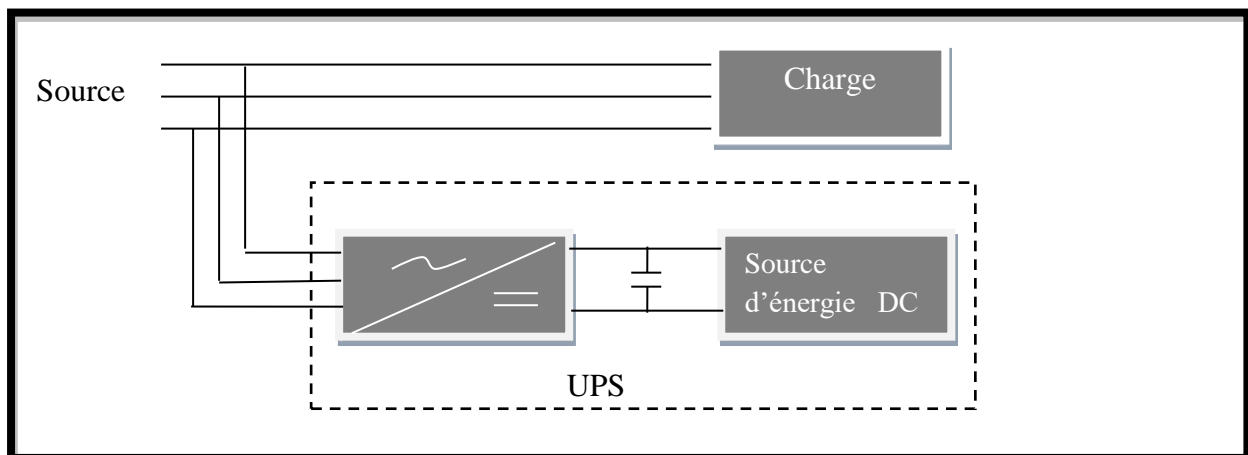


Figure I.4 Alimentation de secours.

### I.3.3 Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes

La France fournit de l'énergie électrique à la Grande-Bretagne, mais la fréquence du réseau anglais est 60 Hz. Il faut donc adapter la fréquence [5].

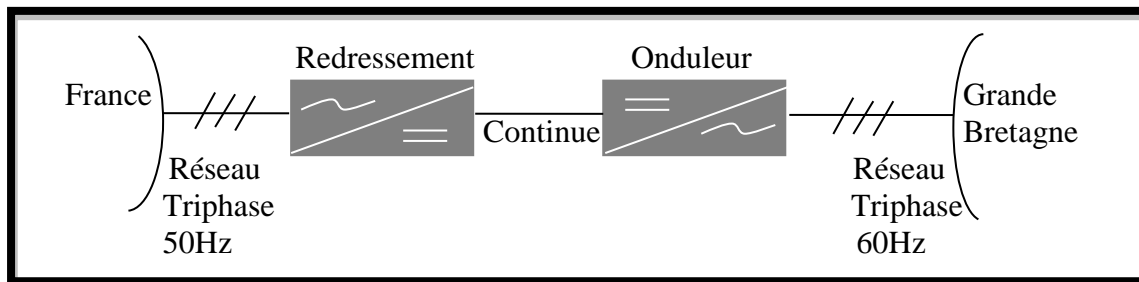


Figure I.5 Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes.

### I.4 Principe générale de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un onduleur est basé sur l'électronique de commutation, on génère une onde de tension alternative à partir d'une tension continue comme le montre la figure I.6. On peut dire qu'il existe deux moyens pour réaliser cette conversion.

L'utilisation directe d'une paire d'interrupteurs de base qui consiste à régler la fréquence et la durée des interconnexions de la source avec la sortie. Il est donc plutôt Temporel et débouche sur les techniques de modulation de largeur d'impulsion.

Contrôler l'amplitude soit de façon continue en créant une source réglable (ce qui suppose l'existence d'un autre étage de conversion), soit de façon discrète en disposant d'un nombre suffisant de sources [2].

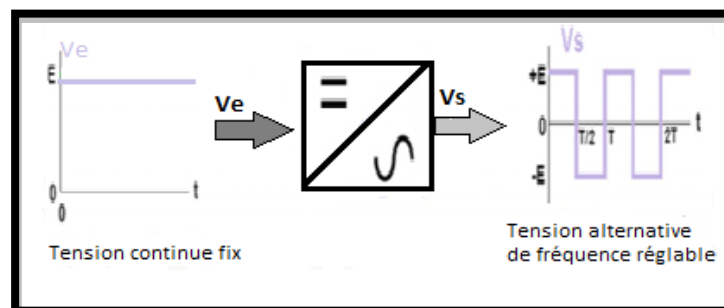


Figure I.6 Symbole et signal d'un onduleur.

Quand S1 - S2 sont fermés (On) et S3 - S4 sont ouverts (Off) pour  $t1 < t < t2$  on obtient une alternance positif  $U(t) = V_{dc}$  comme la montre la figure I.7

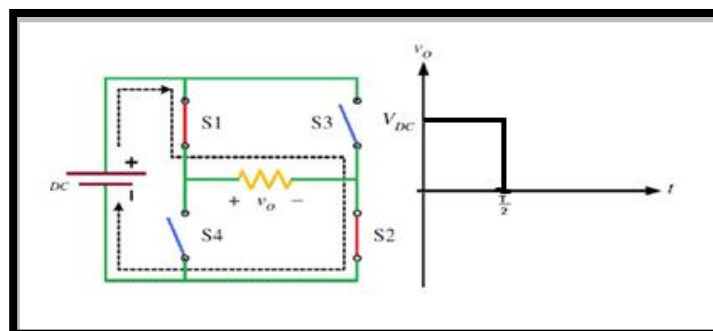


Figure I.7 Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 1er demi-cycle.

Quand S1 - S2 sont ouvert (Off) et S3 - S4 sont fermés (On) pour  $t_2 < t < t_3$  on Obtient une alternance négative  $U(t) = -V_{dc}$  comme la montre la figure I.8

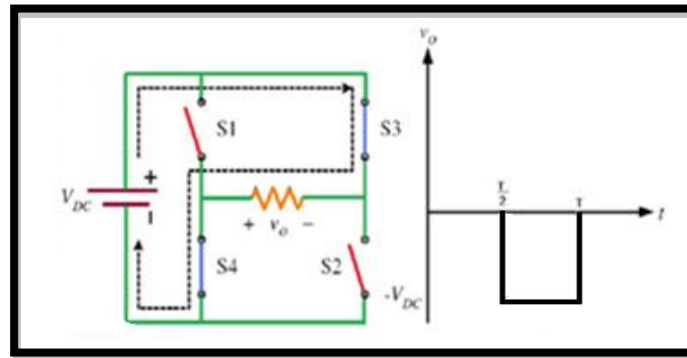


Figure I.8 Fonctionnement et signal de l'onduleur deux niveaux dans le 2ème demis cycle.

Pour obtenir le signal résultant sur la période complète qui est présentée sur la figure I.9

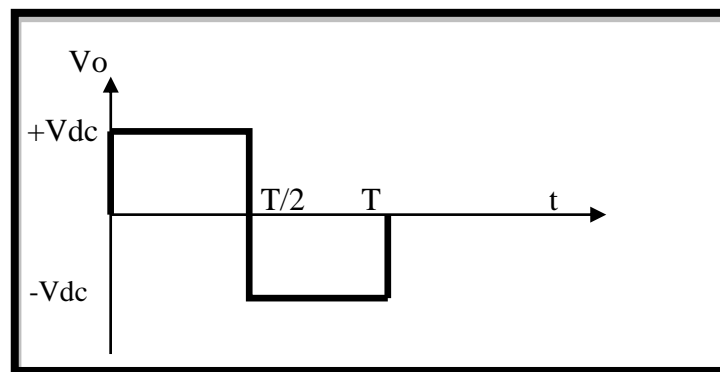


Figure I.9 Signal complet de l'onduleur.

## I.5 Classification des onduleurs

Une première classification peut être faite en distinguant : onduleurs non autonome et onduleur autonome. Entre ces deux types d'onduleurs, il existe un type intermédiaire d'onduleur appelé onduleur à commutation par la charge « ou encore onduleur à résonance » [7].

### I.5.1 Onduleurs non autonome

C'est le nom donné au montage redresseur tous les thyristors (pont de Graëtz) qui, en commutation naturelle assistée par le réseau auquel il est raccordé, permet un fonctionnement en onduleur (par exemple par récupération de l'énergie lors des périodes de freinage dans les entraînements à moteurs électriques). À la base du développement des entraînements statiques à vitesse variable pour moteurs à courant continu et alternatif, cyclo convertisseurs, onduleurs de courant pour machines synchrones et asynchrones, jusqu'à des puissances de plusieurs MW, [5].

## I.5.2 Onduleur autonome

Un onduleur autonome est un convertisseur statique assurant la conversion continu- alternatif. Alimenté en continu, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir de l'alternatif à la sortie.

Et aussi dit autonome s'il utilise l'énergie d'un circuit auxiliaire propre à lui pour la commutation des thyristors ou l'autre semi conducteurs, dans ce cas nous commandons la fréquence et la forme d'onde de la tension de sortie, [4].il dépend essentiellement de la nature du générateur et du récepteur entre lesquels il est monté cela conduit à distinguer :

- les onduleurs de tensions.
- Les onduleurs de courant [7].

### I.5.2.1 Les Onduleurs (autonomes) de tension

Un onduleur de tension est un onduleur qui est alimenté par une source de tension continue (source d'impédance interne négligeable), la tension «  $u$  » n'est pas affecté par les variations du courant «  $i$  » qui la traverse, la source continue impose la tension à l'entrée de l'onduleur et donc à sa sortie. Le courant à la sortie «  $i'$  » et donc le courant à l'entrée «  $i$  » dépendent de la charge placée du côté alternatif. Cette charge peut être quelconque à la seule condition qu'il ne s'agisse pas d'une autre source de tension (capacité ou f. e. m alternative) directement branchée entre les bornes de sortie [7].

Nous présentons le principe des onduleurs de tension dans le cas où la sortie est monophasée et utilisons l'onduleur en pont à quatre interrupteurs :  $K1, K2, K1'$  et  $K2'$ .

La Figure I.10 représente le circuit de puissance d'un tel onduleur (pont monophasée).

La Figure I.11 représente les signaux de commande et les formes d'ondes des tensions [5].

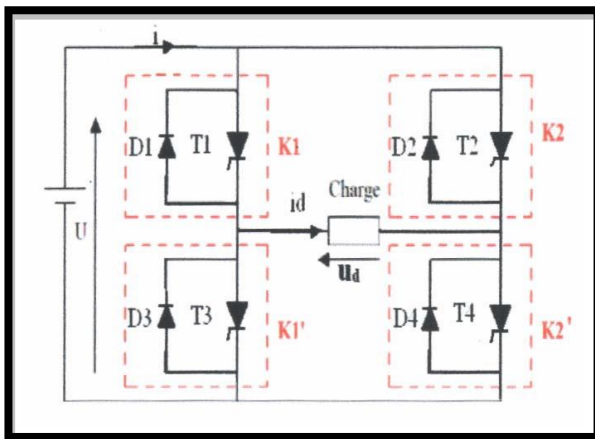


Figure I.10 Onduleur de tension en pont Monophasé

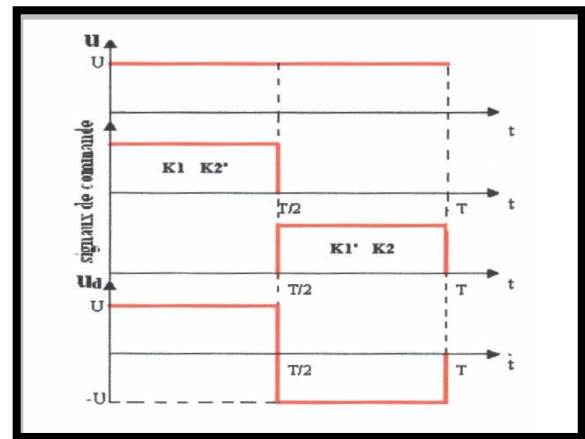


Figure I.11 Signaux de commande et forme d'onde des tensions de sortie

Les états des interrupteurs commandés nous permettent de donner l'expression de  $U_d(t)$  comme suit:

Si la tension d'entrée de l'onduleur est constant et égal à  $U$ , quelque soit  $I$  on a :

- Pour  $0 < t < T/2$  : les interrupteurs,  $K1, K2'$  sont fermés, et  $K2, K1'$  sont ouverts.

D'où:  $U = +U$

- Pour  $T/2 < t < T$  : les interrupteurs,  $K2, K1'$  sont fermés, et  $K1, K2'$  sont ouverts.

D'où:  $U = -U$

Le courant de la sortie est donc le courant  $I$  à l'entrée, il dépend de la charge placée du côté alternatif.

Notant que les interrupteurs  $K_i$  de l'onduleur; Figure I.10 sont formés par la mise en parallèle d'un semi-conducteur  $T_i$  commandé à l'ouverture et à la fermeture et d'une diode  $D_i$ . Cette dernière assure la continuité de courant permettant ainsi la conduction d'un courant négatif dans le cas où le courant est déphasé par rapport à la tension de sortie. [5]

### I.5.2.2 Les onduleurs (autonomes) de courants

Un onduleur de courant (souvent appelé commutateur de courant) est alimenté par une source de courant continu, c'est –à – dire par une source d'inductance interne si grande que le courant «  $i$  » qui la traverse ne peut être affecté par les variations de la tension «  $u$  » à ses bornes, [7] Comme exemple, on prend le montage de la figure ci-dessous illustrant le modèle d'un onduleur de courant monophasé, qui se compose de quatre interrupteurs de puissance  $K_1, K_2, K_1'$  et  $K_2'$ , sur La Figure I.12 sont représentés les signaux de commande et les formes d'ondes des courants Correspondants [5].

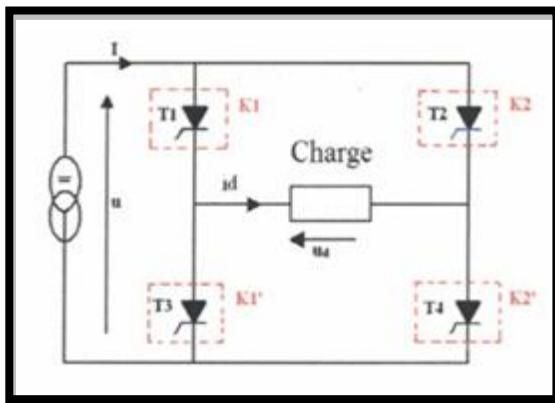


Figure I.12 onduleur de courant en pont monophasés

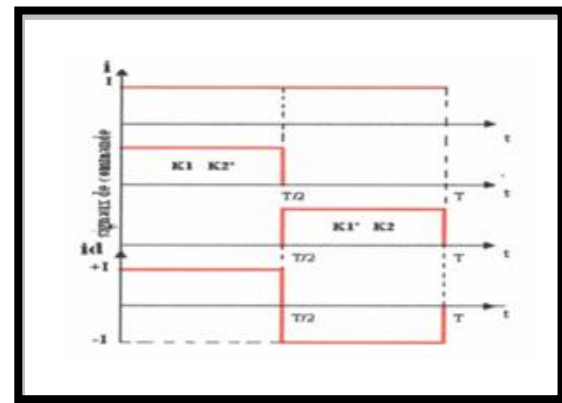


Figure I.13 signaux de commande et forme d'onde de courante

De même, pour l'onduleur de courant, les états des interrupteurs commandés nous permettent de donner l'expression de  $i_d(t)$ . Si le courant d'entrée de l'onduleur est constant et égal à  $I$ , quelque soit  $U$ :

- Pour  $0 < t < T/2$  : les interrupteurs,  $K_1, K_2'$  sont fermés, et  $K_2, K_1'$  sont ouverts :

D'où:  $i = +I$

- Pour  $T/2 < t < T$  : les interrupteurs,  $K_2, K_1'$  sont fermés, et  $K_1, K_2'$  sont ouverts :

D'où  $i = -I$

La tension  $U_d(t)$  de la sortie est donc la tension  $U$  à l'entrée, elle dépend de la charge placée dans le côté alternatif. Dans ce cas; l'interrupteur est formé d'un semi conducteur commandé à l'ouverture et la fermeture, il n'a pas à être réversible en courant, alors on n'a pas besoin de diode mise en parallèle [5].

## I.6 Onduleur de tension triphasé

On peut réaliser un onduleur triphasé en regroupant, en parallèle, trois onduleurs monophasés (en pont ou en demi-pont) et commander les interrupteurs de chacun pour obtenir à la sortie trois phases décalées de  $120^\circ$ . En fait, en regroupant trois demi ponts monophasés, on obtient un onduleur en pont triphasé à six interrupteurs représenté par la Figure I.14 dont les interrupteurs du même bras de l'onduleur doivent être complémentaires pour que la tension continue  $U$  ne soit jamais en court circuit et pour que les circuits des courants  $i_a$ ,  $i_b$  et  $i_c$  ne soient jamais ouverts. Afin que les interrupteurs puissent imposer les tensions de sortie, quelques soient les courants de charge, il faut que ces derniers soient bidirectionnels en courant. Chacun d'eux est formé d'un semi-conducteur à ouverture et à fermeture commandées et d'une diode montée en antiparallèle. Ces interrupteurs peuvent être réalisées, suivant la puissance à contrôler, avec des transistors MOS ou bipolaires, des IGBTs ou des GTOS associés à une diode en antiparallèle pour obtenir la réversibilité en courant [5].

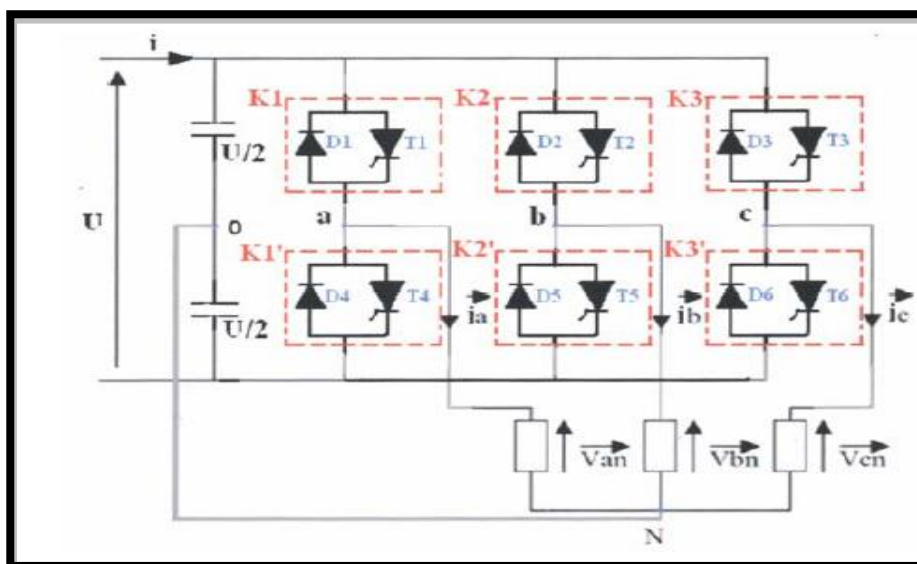


Figure I.14 Circuit de puissance d'un onduleur de tension triphasé.

## I.7 Onduleur de courante triphasé

L'onduleur de courant transforme un courant continu en courants triphasés dans les enroulements de la machine. Il peut fonctionner en commutation naturelle, c'est le cas des machines synchrones. La commutation forcée est réalisée pour toutes les autres machines. Ce type d'onduleur ne permet que le réglage de la fréquence des grandeurs de sortie, l'amplitude de celle-ci doit être réalisée par ajustement de la grandeur d'entrée [8].

Parmi les onduleurs de tension ou de courant, on trouve aussi les onduleurs à résonances :

## I.8 Les onduleurs à résonance

Les onduleurs à résonance s'inscrivent dans le cadre, beaucoup plus vaste, de l'étude de l'alimentation alternative d'une charge (R-L série) à partir d'une source continue de tension ou de courant. La conversion de l'énergie est réalisée par un convertisseur continu-alternatif monophasé non

modulé, dont la structure dépend de la nature de la source continue. Ce convertisseur est, soit un onduleur de tension, soit de courant et délivre des ondes carrées de tension ou de courant.

La structure des onduleurs à résonance est souvent en demi-pont, la commande des interrupteurs de ce type d'onduleurs se fait sans pertes par commutation, en effet ils sont commandés soit à tension nulle ou à courant nul.

La charge des onduleurs à résonance est constituée par un circuit oscillant peu amorti et la commande des interrupteurs est directement liée à la charge de l'onduleur, l'onduleur n'est pas donc autonome. [9]

Ces onduleurs permettent d'imposer le courant ou la tension et la fréquence. Alors, pour le cas particulier où la charge est constituée d'un circuit oscillant peu amorti, on peut commander les interrupteurs à une fréquence très proche de la fréquence de résonance de la charge. Si la charge varie, la fréquence de commande varie. Ce qui signifie que la fréquence de l'onduleur dépend de la charge, il n'est plus non autonome, On distingue deux modèles à résonance. [5]

### I.8.1 Onduleur à résonance parallèle

Ce dernier débite sur un circuit *RLC* résonnant parallèle peu amorti comme l'illustre la **Figure I.15** suivant

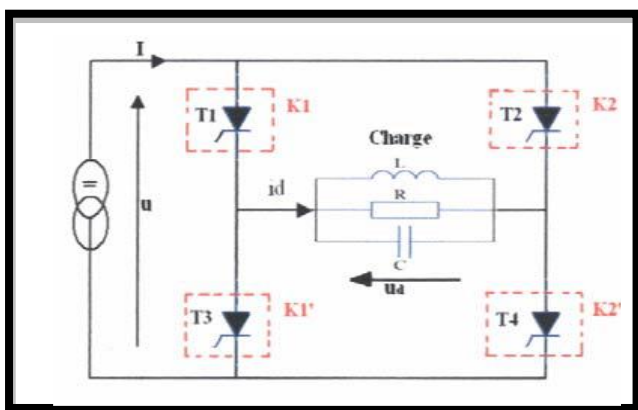


Figure I.15 : Onduleur à résonance parallèle (Monophasée)

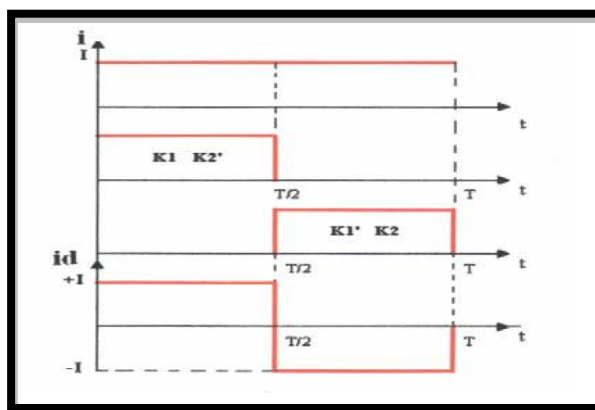


Figure I.16: Signaux de commande et forme d'onde des courants

Pour cela, on dispose d'une capacité branchée entre les bornes de la sortie, pour s'opposer à la brusque variation de la tension; donc l'onduleur doit être alimenté par une source de courant continu. Il représente donc un cas particulier de l'onduleur de courant, dont la **Figure I.16** donne les signaux de commande et les formes d'ondes des courants.

### I.8.2 Onduleur à résonance série

Celui-ci débite sur un circuit *RLC* résonant série peu amorti la **Figure I.17** Dans ce cas, on dispose d'une inductance placée en série dans la charge, pour s'opposer aux discontinuités du courant *I*, donc l'onduleur doit être alimenté par une source de tension. Il représente donc un cas particulier de l'onduleur de tension.

La **Figure I.18** représente les signaux de commande et les formes d'ondes des tensions :

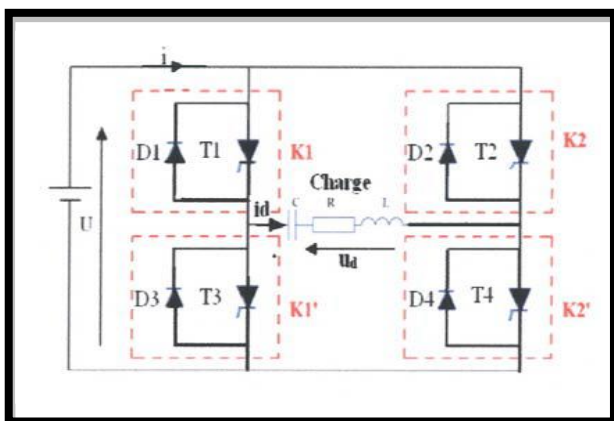


Figure I.17: Onduleur à résonance série (Monophasée)

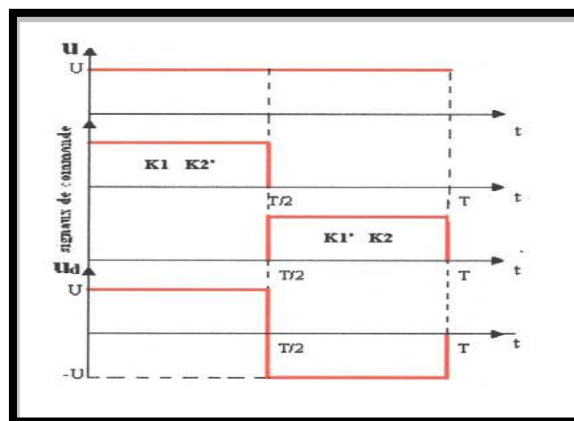


Figure I.18: Signaux de commande et forme d'onde des tensions

## I.9 Intérêt des convertisseurs statiques multi niveaux

Un convertisseur statique est dit « multi niveaux » lorsqu'il génère une tension découpée de sortie composée d'au moins trois niveaux. Ce type de convertisseur présente essentiellement deux avantages. D'une part les structures multi niveaux permettent de limiter les contraintes en tension subies par les interrupteurs de puissance : chaque composant, lorsqu'il est à l'état bloqué, supporte une fraction d'autant plus faible de la pleine tension continu que le nombre de niveaux est élevé. D'autre part, la tension de sortie délivrée par les convertisseurs multi niveaux présente d'intéressantes qualités spectrales. Le fait de multiplier le nombre de niveaux intermédiaires permet de réduire l'amplitude de chaque front montant ou descendant de la tension de sortie. L'amplitude des raies harmoniques est, par conséquent, d'autant moins élevée. Dans le cas plus précis d'un fonctionnement en modulation de largeur d'impulsion, le recours à un convertisseur multiniveaux associé à une commande judicieuse des composants de puissance permet en outre de supprimer certaines familles de raies harmoniques.[10]

## I.10 Description des principales topologies de la conversion multiniveaux

Les onduleurs de tension multi niveaux peuvent être implantés de différentes manières, dans lesquelles la tension de sortie est synthétisée de plusieurs niveaux.

Pour cela, on est concerné de présenter une brève synthèse des principale topologies des convertisseurs multi niveaux, leurs principes de fonctionnement et on cite quelque avantages et inconvénients. [10] Les principales topologies sont :

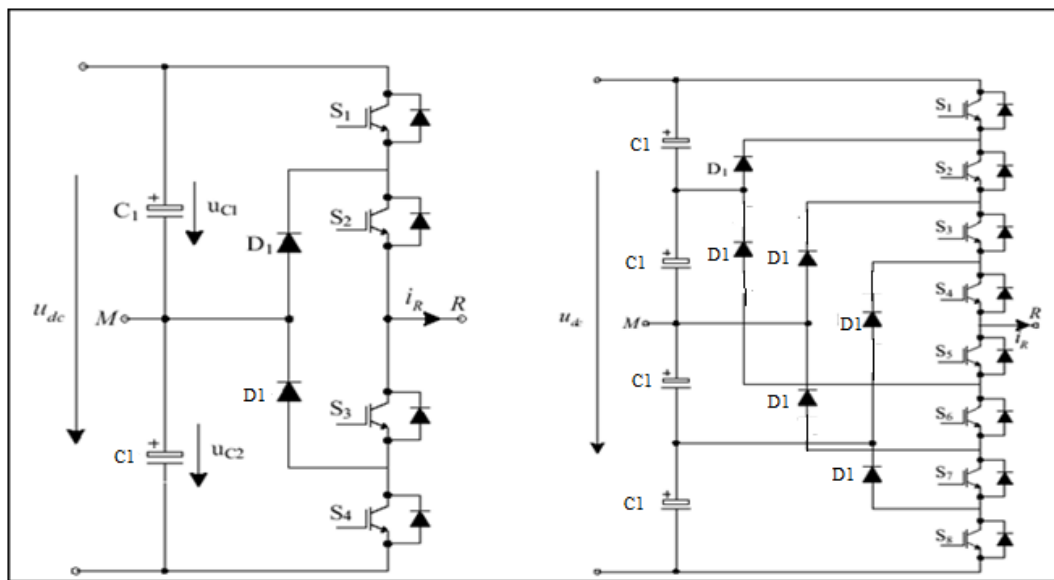
- La topologie à diode de bouclage (NPC).
- La topologie au condensateur flotteur (à cellule imbriquées).
- La topologie en cascade

### I.10.1 Onduleur multi niveaux à diode de bouclage

La première topologie la plus pratique d'onduleur de tension multi niveaux est le NPC (Neutral Point Clamped). Cette topologie à été initialement proposé par A.Nabac en 1981 pour la génération de N niveaux de tension. La figure I.19 représente la structure d'un convertisseur triphasé à potentiel distribué, dans la quelle les diodes sont utilisés pour réaliser la connexion avec le point de référence 0. afin d'avoir une tension de 220 V,  $L = 3(N-1) (N-2)$ , L est le nombre des diodes. Pour  $N=5$ , on a

besoin de 36 diodes, cependant ces diodes non seulement augmentent le coût de ce type de convertisseur mais créent un problème d'encombrement.

Pour l'obtention d'une tension de  $N$  niveaux,  $N-1$  capacités. Les tensions aux bornes des condensateurs sont toutes égales à  $E/(N-1)$ ,  $E$  est la tension totale du bus continu. Chaque couple d'interrupteur ( $S_{2k}$ ,  $S_{2k+1}$ ) forme une cellule de commutation, les deux interrupteurs sont donc commandés de façon complémentaire. [10]



a) NPC trois niveaux

b) NPC cinq niveaux

Figure I.19 Topologies d'onduleurs NPC

Cette topologie présente plusieurs avantages dont quelques uns sont énumérés ci-dessous :

- les composants de puissance à semi-conducteur bloquent une tension inverse égale seulement à la moitié de la tension de la source continue.
- cette topologie peut être généralisée et les principes employés dans la topologie d'onduleur à trois niveaux peuvent être étendus pour l'utilisation dans des topologies avec n'importe quel nombre de niveaux.
- Toutes les phases partagent le même bus continu.
- la fréquence fondamentale assure un haut rendement.
- La méthode de contrôle est relativement simple.[14]
- La forme d'onde de trois niveaux résulte dans une meilleure qualité spectrale par rapport à celle d'un onduleur triphasé classique, ce qui rend les filtres passifs peu volumineux.[10]

Par contre, cette topologie présente plusieurs difficultés techniques dans les cas de grande puissance tel que :

- Pour les topologies avec plus de trois niveaux, les diodes de bouclage peuvent augmenter les contraintes en tension jusqu'à une valeur égale à  $E(N-1)/N$ . Donc, les connexions des diodes en série pourraient être exigées et cela complique la conception et soulève des questions de fiabilité et du coût de réalisation.
- Cette topologie exige des diodes de bouclage à vitesse de commutation élevée qui doivent être capable de supporter le courant de la pleine charge.

- Différents calibres pour les appareils de commutation sont nécessaires en raison de leur conduction cyclique.

Le maintien de l'équilibre de la charge des condensateurs demeure toujours une question ouverte pour les topologies des onduleurs NPC avec plus de trois niveaux. Bien que le l'onduleur NPC à trois niveaux fonctionne avec un facteur de puissance élevé, il est employé surtout dans les circuits de compensation. Cela est dû au problème d'équilibrage des capacités. [14]

### **I.10.2 Onduleur multi niveaux à condensateurs flottants**

Dans la topologie multi niveaux proposée par T. Meynard et H. Foch en 1992. La structure de ce convertisseur est similaire à celle de l'onduleur à diode de bouclage sauf qu'au lieu d'utiliser des diodes de blocage, l'onduleur utilise des condensateurs à leur place. D'où l'appellation «Onduleur à Condensateurs Flottants ». Cette structure est proposée pour résoudre d'une part le problème de balancement de tension, et d'autre part le nombre excessif des diodes.

Dans la topologie suivante, figure I 21, on représente l'onduleur à condensateur flottant à trois et cinq niveaux.

Ce type de convertisseur présente plusieurs avantages :

- Le concept de condensateur Flottant peut être appliqué à un certain nombre de convertisseurs de différents types, DC /AC ou AC/ DC
- La plupart des stratégies de modulation sont facilement appliquées à cette topologie
- Les tensions sur les condensateurs sont automatiquement équilibrées par cette stratégie de modulation conventionnelle. Si désiré, les tensions de condensateur peuvent être activement contrôlées par une modification appropriée des signaux de commande.
- La charge est par défaut partagée équitablement entre les commutateurs.
- La topologie est modulaire et ne dépend pas d'un transformateur Néanmoins.[14]
- La tension de blocage des interrupteurs partout la même.

Le concept peut être facilement appliqué à d'autres types de convertisseurs, aussi bien pour un transfert unidirectionnel de la puissance que bidirectionnel.

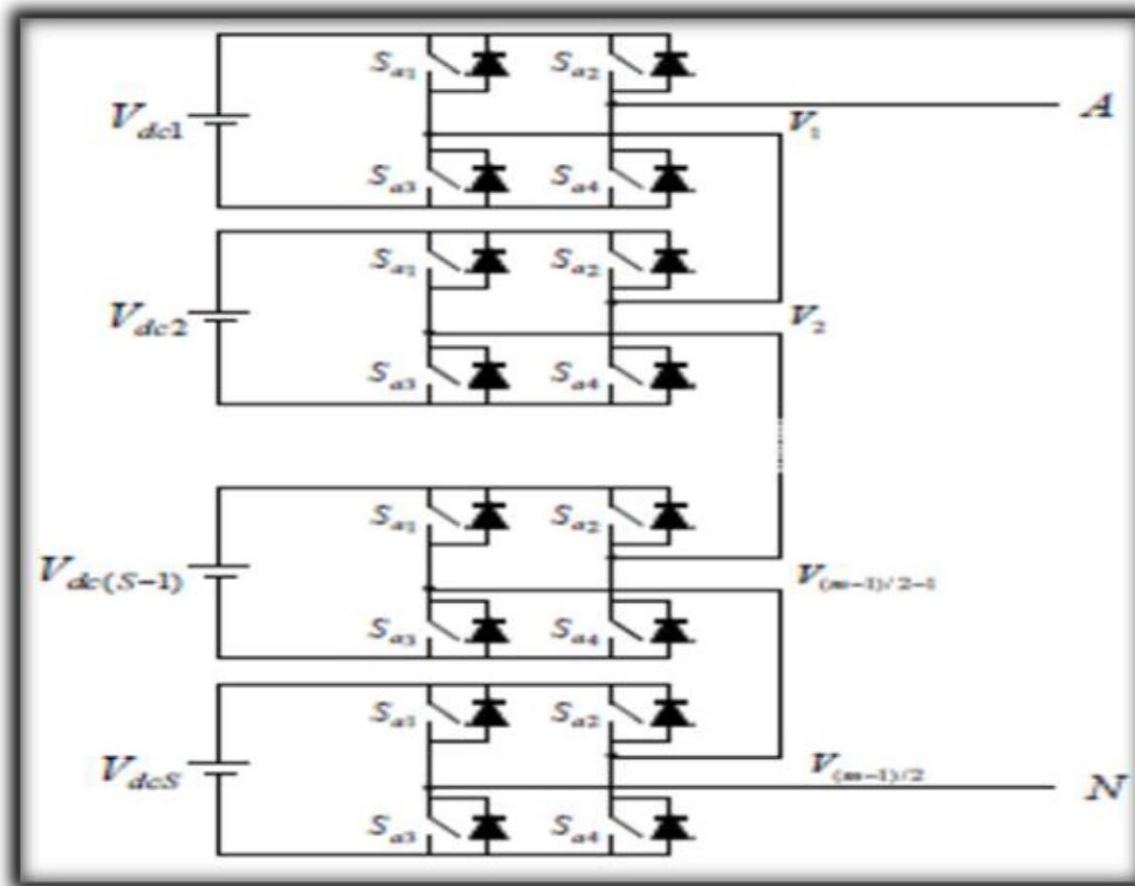
- Sa modularité permet une extension et une adaptation aisées des stratégies de commande à un nombre élevé de niveaux.

- Les condensateurs n'étant jamais mis en série entre niveaux différents, le problème du déséquilibre de leur tension n'existe plus.[9]

Cette topologie présente quelques inconvénients, tel que:

- La topologie exige beaucoup de condensateurs à haute tension-beaucoup plus nombreux que d'autres topologies. Ces condensateurs doivent conduire le courant de pleine charge pendant au moins une partie du cycle de commutation. Heureusement si la fréquence de commutation est élevée, ces condensateurs peuvent généralement être relativement faibles en valeur de la capacité.
- La topologie n'est pas intrinsèquement tolérante aux pannes.[14]
- Contrairement au premier cas qui ne nécessite que (N-1) capacité. De plus il est évident que des courants de grandes valeurs efficaces circuleront à travers ces condensateurs.
- Il y a un potentiel de résonance parasite entre les condensateurs découplés. [9]





**Figure I.21 Structure d'un convertisseur N niveaux en cascade**

Comme toutes structures, l'onduleur multi-niveaux en cascade possède des avantages et Inconvénients dont on peut citer :

**Avantage:**

L'onduleur multi niveaux en cascade est une structure de convertisseurs d'énergie, il présente l'idée d'employer des sources séparées à courant continu pour produire une forme d'onde d'une tension alternative.

- Pour atteindre le même nombre de niveaux de tension, ce type de convertisseur nécessite moins de composants.
- Contrairement à l'onduleur à diode de bouclage et à condensateur flottant, aucune diode supplémentaire n'est nécessaire.
- La tension de sortie totale de phase est une sommation des tensions produites par chaque onduleur monophasé.
- Les petites sources à courant continu sont généralement impliquées, ce qui entraîne moins

De problèmes de sécurité.

- Le nombre de niveaux possibles de tension de sortie est plus du double du nombre de sources à Courant continu ( $N = 2s + 1$ ).[14]

**Inconvénients:**

- Pour un système à trois phases, il faudra plus de commutateurs que dans un onduleur Traditionnel.
- Nécessité d'équilibrer les sources DC entre les différents niveaux.
- Besoin de plusieurs connecteurs/câbles pour connecter les sources DC.[14]

## I.11 Autres topologies

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

- a) Le convertisseur asymétrique hybride,
- b) Le convertisseur avec des ponts en cascade et sources CC/CC avec isolement,
- c) Le convertisseur avec commutation douce,
- d) Les convertisseurs reliés par transformateur,
- e) Le convertisseur Diode/Capacitor-Clamped : variante de l'onduleur NPC,
- f) Le convertisseur multi niveaux généralisé.[15]

## I.12 Classification des topologies selon leur alimentation

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

Au contraire, les structures telles que les onduleurs en cascade élèvent leur tension d'alimentation, la tension maximale est plus grande que chacune des tensions d'alimentation, elle est plus petite ou égale à la somme des tensions d'alimentation. [10]

## I.13 Nombres de composants nécessaires

Du point de vue du nombre de composants, les onduleurs à cellules cascadiées paraissent être la solution multi niveaux la plus avantageuse, surtout lorsque le nombre de niveaux devient important. C'est effectivement le cas pour les applications monophasées telles que le filtrage actif ou la compensation statique, lorsque le convertisseur n'a pas besoin de fournir d'énergie au système. Pour les applications triphasées et pour un petit nombre de niveaux, les onduleurs NPC sont intéressants, car les condensateurs sont partagés par les différentes branches, ce qui permet un équilibrage de la puissance circulant entre les phases. Cet équilibrage permet une réduction notable de la taille des condensateurs intermédiaires. [10]

## **I.14 conclusion**

La technique des onduleurs multi-niveaux représente un domaine de recherche important. Recherche liée également à des applications toujours plus performantes et plus puissantes. Dans ce chapitre on a présenté une généralité sur les onduleurs, différents types monophasés et triphasés sont présentés succinctement, ainsi que leurs applications, principe de fonctionnement et une description des principales topologies des convertisseurs multiniveau avec leurs avantages et inconvénients. Ces topologies comprennent principalement la technique des onduleurs NPC à potentiels distribués, la technique dite des cellules imbriquées, ainsi que la technique des convertisseurs cascades.

Les onduleurs NPC sont intéressants pour les applications triphasées nécessitant peu de niveaux. Les deux structures d'onduleurs NPC et à cellule imbriquée sont avantageuses pour les applications avec échange de puissance active. L'onduleur en cascade est avantageux pour les applications monophasées. Il convient même pour les très grandes tensions.

Le convertisseur de tension NPC à N niveaux permet d'obtenir des performances statiques et dynamique très intéressantes par rapport à une structure à deux niveaux et ses applications sont diverses de nos jours.

Dans le deuxième chapitre on présentera une structure d'onduleur de tension à trois et cinq niveaux à diode de bouclage (NPC), ainsi que leur principe de fonctionnement.

# **Chapitre II**

## **Description et modélisation des onduleurs Trois et cinq niveaux à diode de bouclage NPC**

## II.1 Introduction

Avec le développement de l'électronique de puissance et des composants à semi-conducteurs, la technique des onduleurs multi niveaux représente un domaine de recherche important, ce dernier liée également à des tensions plus élevées. D'autre part, on cherche à obtenir des grandeurs de sortie ayant une meilleure définition, c'est-à-dire présentent un contenu harmonique réduit, Il existe plusieurs topologies de la conversion multi niveaux, La première topologie a été initialement proposée par A.Nabac en 1981 pour la génération de plusieurs niveaux de tension.

Dans ce chapitre, Nous allons étudier en détail l'onduleur de tension à trois niveaux de type NPC (structure et principe de fonctionnement), Nous allons étudier aussi en brève l'onduleur à cinq niveaux de type NPC.[10]

## II.2 Structure de l'onduleur à trois niveaux

L'idée de base de l'onduleur NPC est l'obtention d'une tension de sortie à trois niveaux par la superposition de deux interrupteurs élémentaires alimentés chacun par une source de tension continue distincte.

L'onduleur triphasé à trois niveaux utilisé est constitué de trois bras et de deux sources de tension continue. Chaque bras comporte quatre interrupteurs en série et deux diodes médianes. Chaque interrupteur est composé d'un transistor et une diode montée en tête bêche.

Le point milieu de chaque bras est relié à une alimentation continue, de force électromotrice (E). A l'aide d'un diviseur de tension capacitif formé par les condensateurs de filtrage  $C_1$  et  $C_2$  de même capacité, on obtient deux sources secondaires de tension continue délivrant chacune une demi tension ( $E/2$ ). Étant connectés entre eux en un point neutre noté o. Ces dernier sont identiques de manière à éviter le déséquilibre de charge ( $C_1=C_2$  c'est-à-dire  $U_{c1}=U_{c2}$ ).

Le point o est connecté avec les deux diodes médianes ( $DD_{K1}$ ,  $DD_{K2}$ ). La Figure II.1 fournit une représentation schématique de cet onduleur. [10]

En général un convertisseur NPC N-niveau à trois phases, est composé de  $2 \cdot (N-1)$  interrupteurs connectés en série et (N-1) liaison à courant continu. La tension aux bornes du condensateur est égale à  $(U_{dc}/N-1)$ . [14]

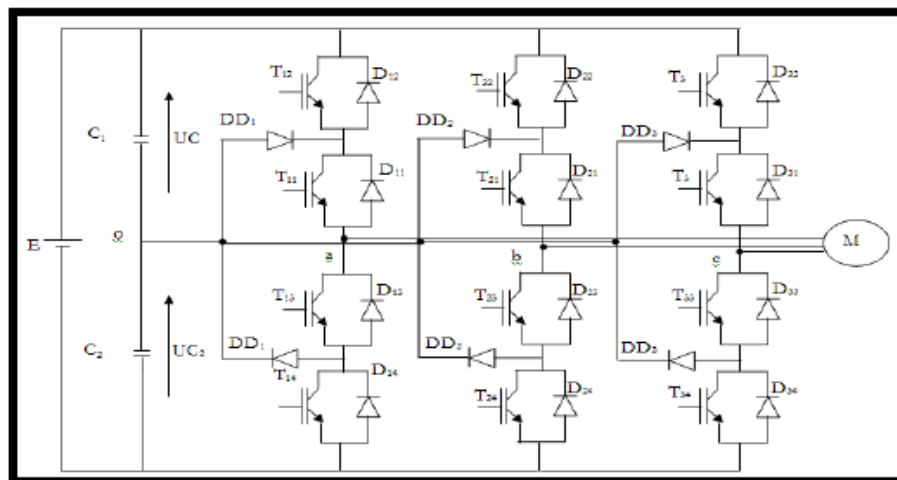


Figure II.1 Onduleur triphasé à trois niveaux.

Pour simplifier la complexité de la structure de l'onduleur à trois niveaux, on présente chaque paire (Transistor -diode) par un seul interrupteur bidirectionnel TDKS, Figure II.2 et vue la symétrie de la structure, on présente la configuration d'un seul bras, Figure II.3.

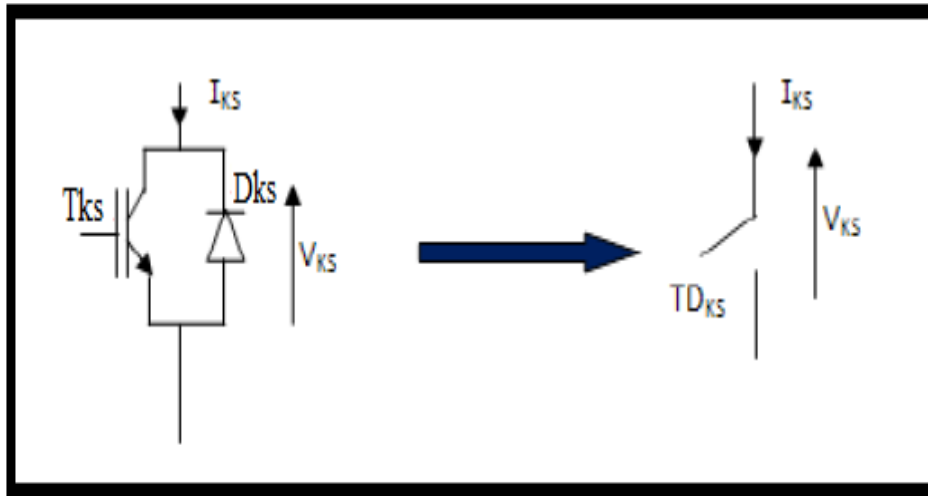


Figure II.2 Interrupteur bidirectionnel équivalent de la paire Transistor – diode.

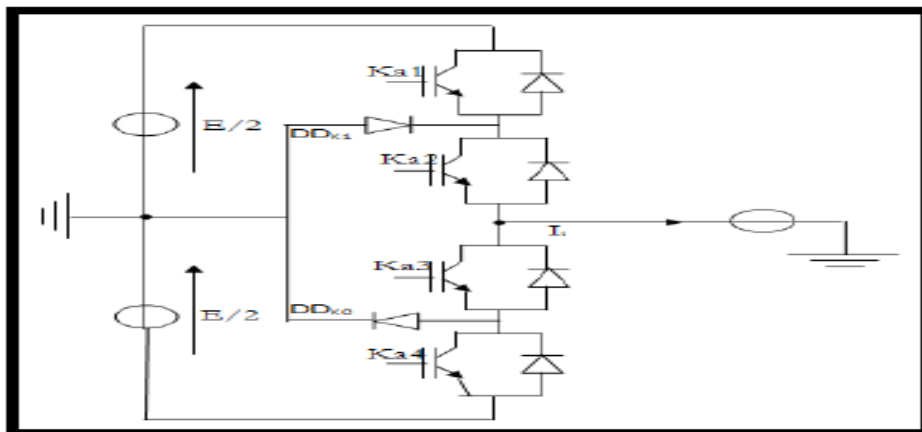


Figure II.3 Un bras de l'onduleur à trois niveaux de type NPC.

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs dépend de :

- La commande externe BKS (l'ordre d'amorçage ou de blocage du semi-conducteur Bidirectionnel TKS).
- Une commande interne définie par les signes du courant du bras.
- Pour éviter la mise en conduction simultanée des quatre interrupteurs d'un seul bras, qui provoque un court circuit aux bornes des sources continues et par conséquent le risque de distorsion des condensateurs et des composants semi-conducteurs par surintensité et qui peut engendrer la distorsion par surtension des interrupteurs lors d'ouvertures simultanée de ces dernier, on adopte la solution classique suivante :

On doit réaliser une commande complémentaire des différents interrupteurs d'un même bras de l'onduleur. [10]

## II.3 Configurations et fonctionnement d'un bras de l'onduleur à trois niveaux

Il faut déterminer les valeurs que peut prendre la tension simple  $V_{ao}$  entre la borne (a) de la charge et le point neutre 0. Cette tension est entièrement définie par l'état (0 ou 1) des quatre interrupteurs  $K_{a1}$ ,  $K_{a2}$ ,  $K_{a3}$  et  $K_{a4}$  du bras.

Sur les  $2^4 = 16$  configurations possibles, seules trois configurations sont mises en œuvre. Toutes les autres séquences ne sont pas fonctionnelles et sont donc à éviter. En effet, elles provoquent soit des courts-circuits des sources de tension continue, soit elles provoquent la déconnexion de la charge.

L'onduleur à trois niveaux étant symétrique, l'étude peut se limiter au fonctionnement d'un seul bras, (où on distingue trois configurations possibles).

On donne ci dessous le tableau récapitulatif tableau (II -1) représente la tension de sortie  $V_{ao}$  d'un onduleur NPC à trois niveaux en fonction de l'état des interrupteurs, la tension au borne des interrupteurs de puissance n'excède jamais la moitié du bus d'entrée.

A la différence de l'onduleur à deux niveaux, chaque demi-bras de l'onduleur à trois niveaux utilisée non pas un interrupteur bidirectionnel mais deux, ce qui permet d'effectuer une commande décalée. [10]

### II.3.1 Première configuration {1100}

$K_{a1}$ ,  $K_{a2}$  sont passants et  $K_{a3}$  et  $K_{a4}$  sont bloqués Figure II.4, la valeur de tension simple  $V_{ao}$  est donnée par l'équation suivante :  $V_{ao} = +E/2$

La tension inverse aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{ka3} = V_{ka4} = +E/2.$$

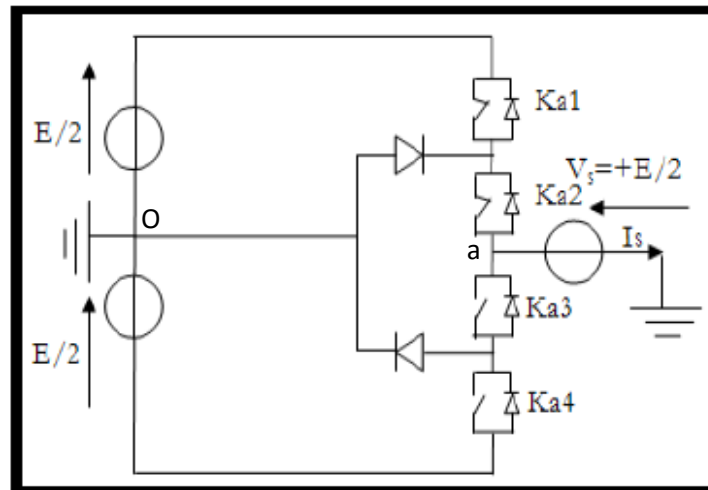


Figure II.4 1ère configuration du 1er bras.

### II. 3.2 Deuxième configuration {0110}

$K_{a2}$ ,  $K_{a3}$  sont passants et  $K_{a1}$  et  $K_{a4}$  sont bloqués Figure II.5, le point a est relié directement au point neutre 0. La tension simple  $V_{ao}$  est nulle :  $V_{ao} = 0$ .

La tension inverse aux bornes des interrupteurs bloqués est :  $V_{ka1} = V_{ka4} = +E/2$ .

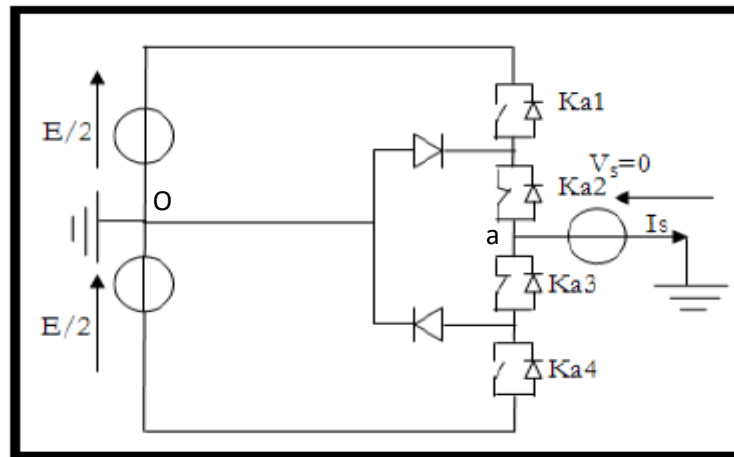


Figure II.5 2ème configuration du 1er bras.

### II.3.3 Troisième configuration {0011}

Ka3, Ka4 sont passants et Ka1 et Ka2 sont bloqués (Figure II.6), la valeur de tension simple  $V_{ao}$  est donnée par l'équation suivante :  $V_{ao} = -E/2$

La tension inverse aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{ka1} = V_{ka2} = +E/2.$$

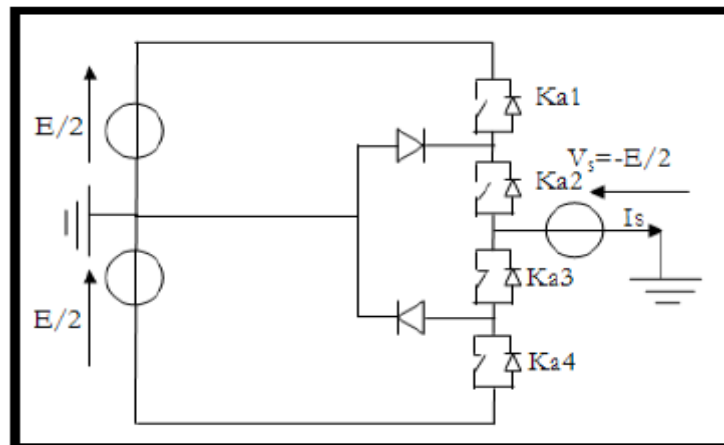


Figure II.6 3ème configuration du 1er bras.

Etat des interrupteurs				Tension de sortie $V_{ao}$
Ka1	Ka2	Ka3	Ka4	
1	1	0	0	$E/2$
0	1	1	0	0
0	0	1	1	$-E/2$

Tableau II.1 Grandeur connue pour chacune des configurations d'un bras de l'onduleur NPC à trois niveaux.

Pour visualiser l'enchaînement des configurations décrites ci-dessus, la Figure II.7 représente les signaux de commande de chaque interrupteur, ainsi que la forme d'onde de la tension de sortie  $V_{ao}$ . [10]

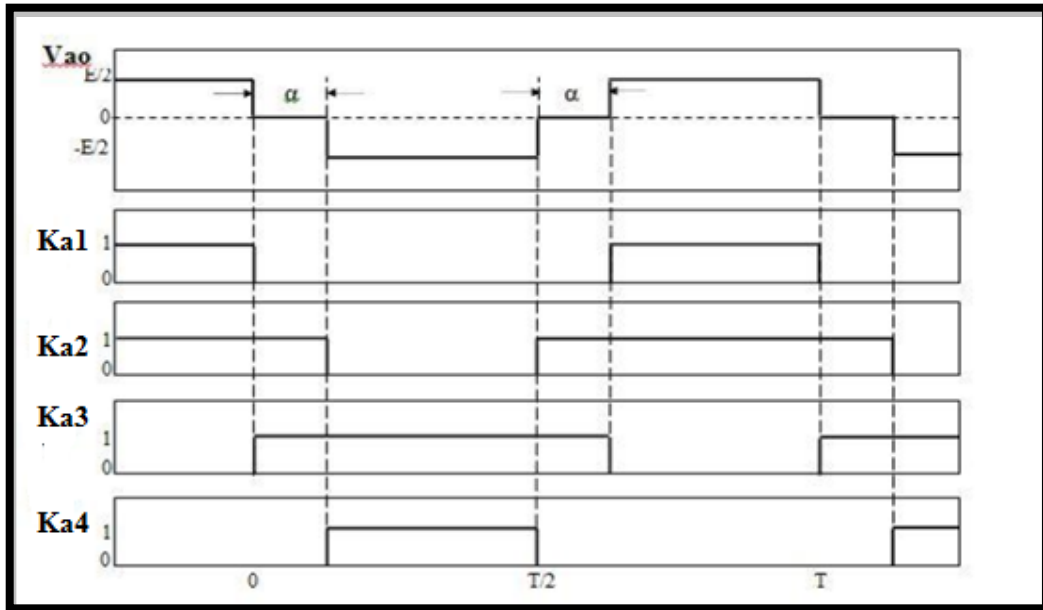


Figure II.7 Forme d'onde de la tension de sortie d'un bras d'onduleur à trois niveaux de type NPC.

## II.4 Onduleur à cinq niveaux de type NPC

### II.4.1 Structure de l'onduleur à cinq niveaux

L'onduleur triphasé à cinq niveaux étudié est constitué de trois bras et quatre sources de tension continue. Chaque bras comporte huit interrupteurs, plus deux diodes. Chaque interrupteur est composé d'un transistor et une diode montés en tête bêche. La figure II-8 donne une représentation schématique d'un bras de cet onduleur.[10]

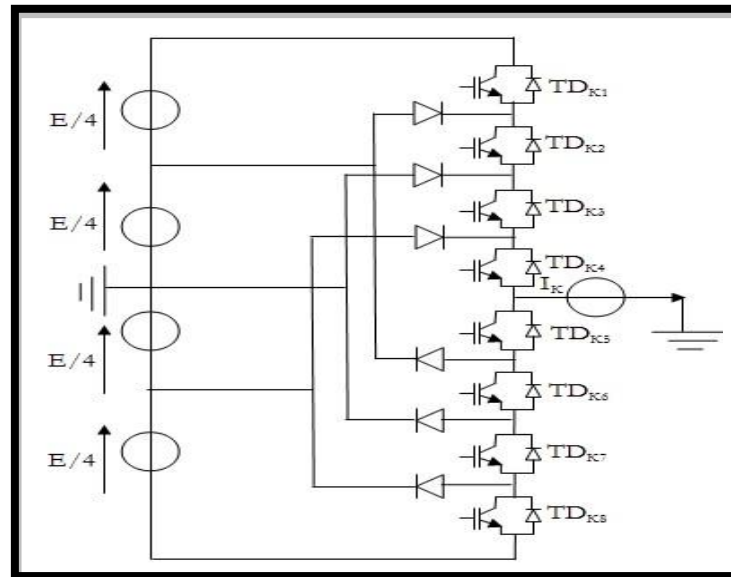


Figure II-8. Bras d'un onduleur NPC à cinq niveaux

## II.5 Configurations d'un bras de l'onduleur NPC à cinq niveaux

Une analyse topologique d'un bras montre cinq configurations possibles, pour définir les séquences de fonctionnements de cet onduleur, définissant d'abord les différents états que peut prendre la tension simple (la tension entre le bras de l'onduleur et le point milieu fictif), par exemple. La tension simple  $V_{ao}$  est définie par l'état de huit quadruplet qui peuvent être transistor, un GTO ou bien un IGBT ou autre avec une diode en antiparallèle. Les états possibles d'un seul bras d'interrupteurs est de  $2^5 = 32$  états que l'on peut représenter par un quadruplet de 0 et 1. Seules les cinq états suivantes sont possibles.[10]

### II.5.1 Premier configuration {11110000}

$K_{a1}$ ,  $K_{a2}$ ,  $K_{a3}$  et  $K_{a4}$  sont passants et  $K_{a5}$ ,  $K_{a6}$ ,  $K_{a7}$  et  $K_{a8}$  sont bloqués figure II-9, la valeur de tension simple  $V_{ao}$  est donnée par l'équation suivante :

$$V_{ao} = +E/2 \tag{II-1}$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est

$$V_{ka5} = V_{ka6} = V_{ka7} = V_{ka8} = +E/4 \tag{II-2}$$

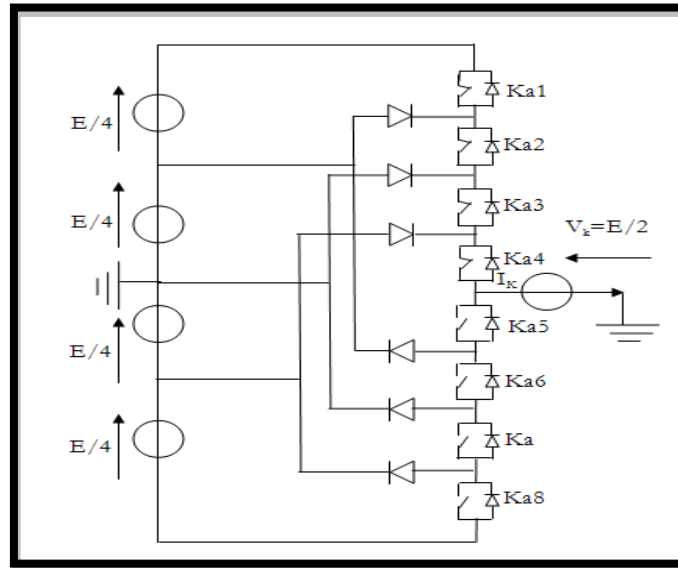


Figure II-9. 1<sup>ère</sup> configuration du 1<sup>er</sup> bras

**II.5.2 Deuxième configuration {01111000}**

Ka2, Ka3, Ka4 et Ka5 sont passants et Ka6, Ka7, Ka8 et Ka1 sont bloqués figure II-10, la valeur de tension simple  $V_{ao}$  est donnée par l'équation suivante :

$$V_{ao} = +E/4 \tag{II-3}$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{ka1} = V_{ka6} = V_{ka7} = V_{ka8} = +E/4 \tag{II-4}$$

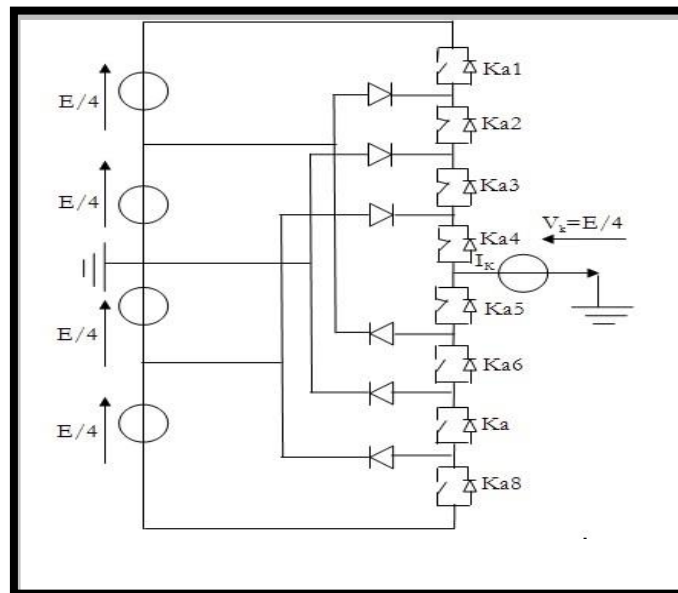


Figure II-10. 2<sup>ème</sup> configuration du 1<sup>er</sup> bras

**II.5.3 troisième configuration {00111100}**

Ka3, Ka4, Ka5 et Ka6 sont passants et Ka7, Ka8, Ka1 et Ka2 sont bloqués figure II-11, la valeur de tension simple  $V_{ao}$  est donnée par l'équation suivante :

$$V_{ao} = 0 \tag{II-5}$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{ka1} = V_{ka2} = V_{ka7} = V_{ka8} = +E/4 \tag{II-6}$$

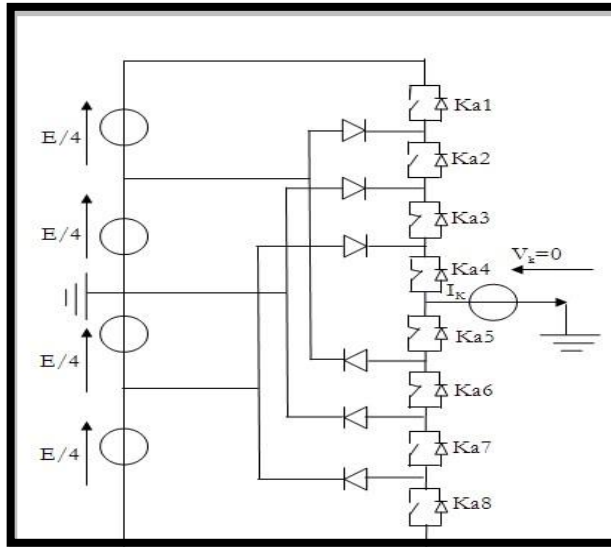


Figure II-11 3<sup>ème</sup> configuration du 1<sup>er</sup> bras

**II.5.4 Quatrième configuration {00011110}**

Ka4, Ka5, Ka6 et Ka7 sont passants et Ka8, Ka1, Ka2 et Ka3 sont bloqués figure II-12, la valeur de tension simple  $V_{ao}$  est donnée par l'équation suivante :

$$V_{ao} = - E/4 \tag{II-7}$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{ka1} = V_{ka2} = V_{ka3} = V_{ka8} = +E/4 \tag{II-8}$$

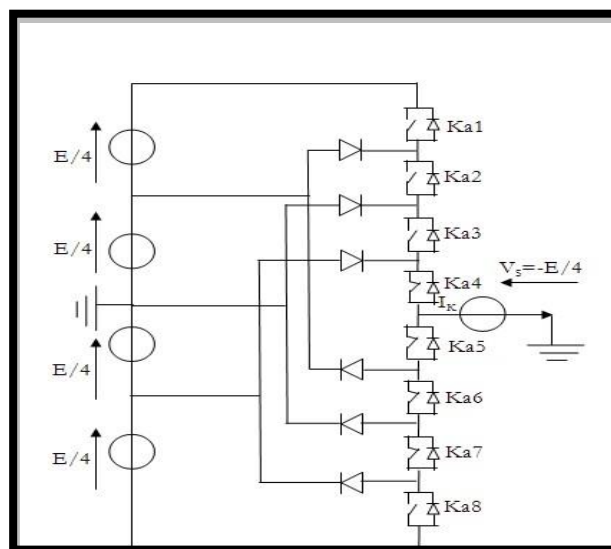


Figure II-12 . 4<sup>ème</sup> configuration du 1<sup>er</sup> bras

**II.5.5 Cinquième configuration {00001111}**

Ka5, Ka6, Ka7 et Ka8 sont passants et Ka1, Ka2, Ka3 et Ka4 sont bloqués figure II-13, la valeur de tension simple Vao est donnée par l'équation suivante :

$$V_{ao} = - E/2 \tag{II-9}$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{ka1} = V_{ka2} = V_{ka3} = V_{ka4} = +E/4 \tag{II-10}$$

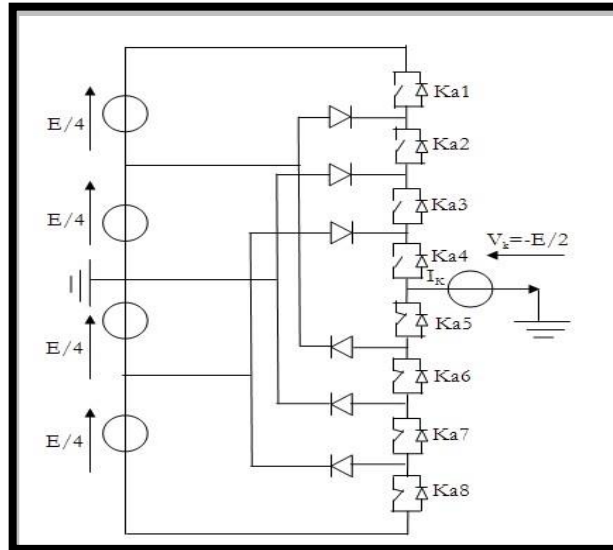


Figure II-13 . 5<sup>ème</sup> configuration du 1<sup>er</sup> bras

Etat des interrupteurs								Tension
Ka1	Ka2	Ka3	Ka4	Ka5	Ka6	Ka7	Ka8	De sortie Vao
1	1	1	1	0	0	0	0	E/2
0	1	1	1	1	0	0	0	E/4
0	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	0	-E/4
0	0	0	1	1	1	1	1	-E/2

Tableau. II-2: Table de commutation de l'onduleur NPC à 5 niveaux

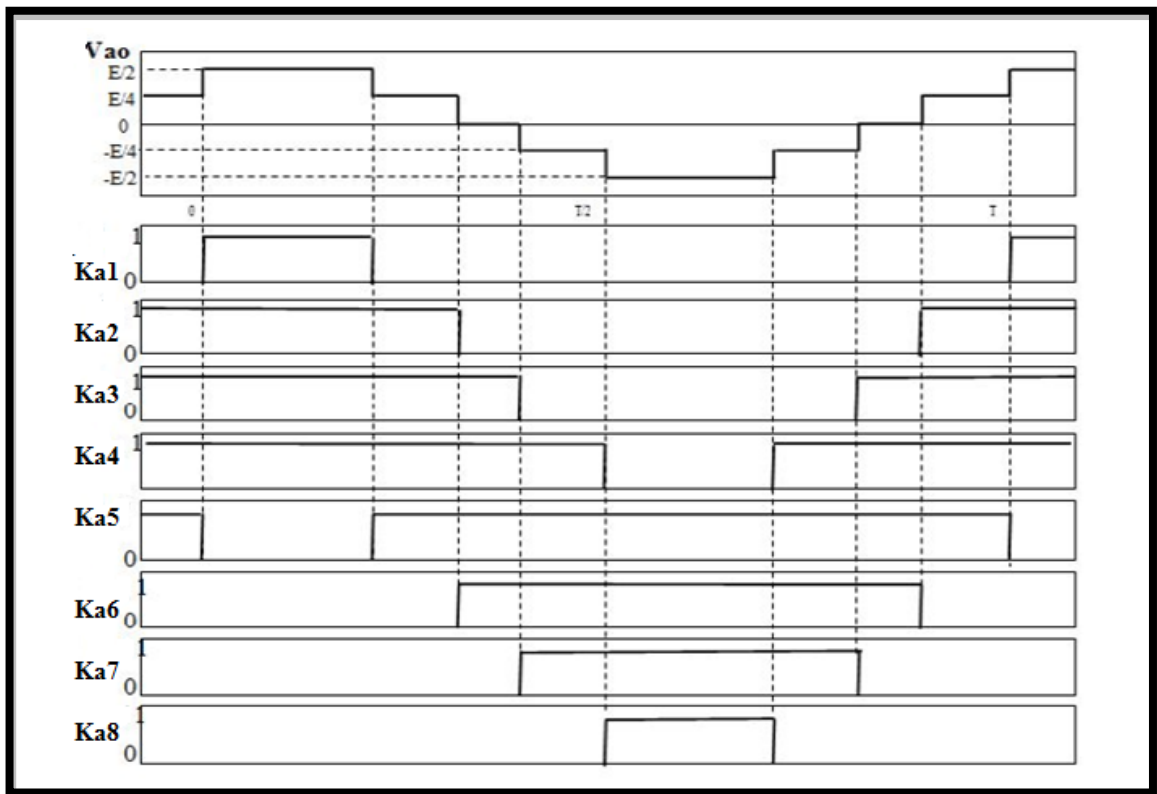


Figure II-14. les signaux de commande de chaque interrupteur et la forme d'onde de la tension de sortie  $V_{ao}$

## II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé une structure topologique d'un onduleur multi niveaux de tension triphasé de type NPC (Neutral Point Clamped Converter), onduleur à cinq niveaux, ainsi que l'onduleur à trois niveaux: leur principe de fonctionnement .

La structure NPC à trois niveaux est plus avantageux que l'onduleur à deux niveaux, il est très utilisée, a cause de sa simplicité à mettre en œuvre et accessible pour les applications envisagées avec les gammes de tension actuelle des semi-conducteurs.

La forme des ondes de tension obtenu  $V_{ao}$ , n'est pas sinusoïdale, elle est très riche en harmonique. Pour les applications de basse et moyenne puissance les ondes de tension rectangulaire ou en escalier sont acceptables. Mais pour les applications de forte puissance, les ondes de faibles perturbations sont nécessaires, avec la disponibilité du semi conducteur de puissance. Les harmoniques peuvent être réduire à l'aide de technique MLI. Il existe plusieurs stratégies de commande pour varier le gain de l'onduleur, parmi ces stratégies on peut citer Commande par hystérisées commande plein d'ondes et la MLI sinusoïdale, et la MLI vectorielle, que nous aborderons dans le prochain chapitre.

**Chapitre III**  
**Stratégie de Commande des onduleurs**  
**multi niveaux**

### III.1 Introduction

La structure du système de commande de l'onduleur peut être séparée en deux sous systèmes ayant des dynamiques différentes : l'une dite rapide qui est liée aux courants, et une autre dite lente qui est associée à la tension continue. On peut de ce fait, synthétiser deux régulateurs, un pour la boucle interne des courants et un autre pour la boucle externe de la tension continue.

D'autre part, il est bien connu que la performance de la boucle des courants joue un rôle essentiel dans la performance globale du système ; c'est pourquoi une commande ayant une réponse rapide et un bon comportement en état stationnaire s'avère nécessaire. Pour le réglage de la tension continue, l'utilisation de commandes classiques, en particulier du type proportionnel.

-intégral(PI), semble, être suffisante pour obtenir des performances acceptables. C'est pour cette raison que ce travail est plutôt consacré à l'étude des différentes lois de commande pour la boucle interne des courants.

L'objectif principal consiste à réinjecter les courants de référence dans le réseau électrique. Cette opération se fait à travers des ordres de commande appliqués aux divers interrupteurs. [11]

On peut citer quelques techniques de la Commande des onduleurs triphasés.

La tension de sortie dépend essentiellement de la commande à utiliser, les techniques de commande les plus utilisées sont :

- Commande par hystérisées
- Commande plein d ondes
- Commande par MLI Sinusoïdale.
- commande par MLI vectorielle.

## III.2 Commande par hystérésis

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur. L'erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis. Dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure, un ordre de commande est envoyé de manière à rester à l'intérieur de la bande. La simplicité de la mise en œuvre, illustrée par la Figure III.1, est le principal atout de cette technique. En revanche, les commutations évoluant librement à l'intérieur de la bande d'hystérésis, les fréquences situées dans le haut de cette bande se maîtrisent difficilement à cause des fréquences de commutation. [11]

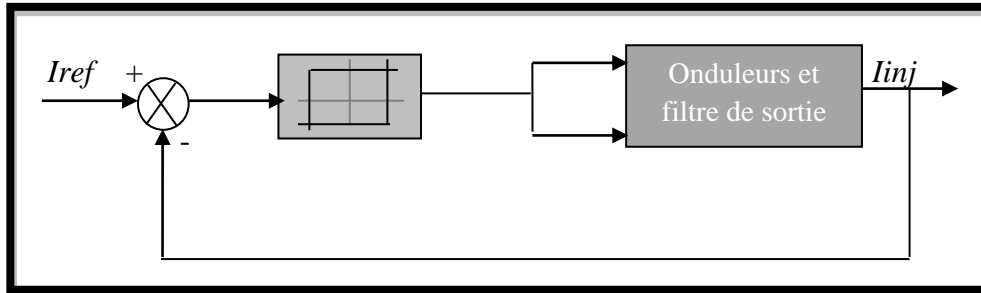


Figure III.1 Schéma de commande par hystérésis.

La commande par hystérésis assure en même temps la modulation et la protection contre les surcharges ou les courts-circuits. De plus le nombre des commutations par période change automatiquement en fonction des variables de commande. [9]

## III.3 Commande plein ondes

La structure de bas d'un onduleur de tension triphasée est l'extension à trois cellules de commutation de celle de l'onduleur monophasé. Le schéma électrique représenté sur la Figure III.2, est ainsi organisé autour de six ensembles transistor-diode de roue libre, constituant l'interrupteur commandes K1 à K6, La tension d'alimentation  $V_e$  est supposée parfaitement continue.

Les interrupteurs commandes (IGBT 1 à 6) sont considérés comme idéaux et commandés par les six signaux logiques : COM1, COM1..... COM3, COM3.

En réalité, chaque transistor est bien commandé à partir d'un signal logique mais un circuit spécialisé appelé "driver" se charge de la mise en forme et de l'amplification du courant de grille. [3]

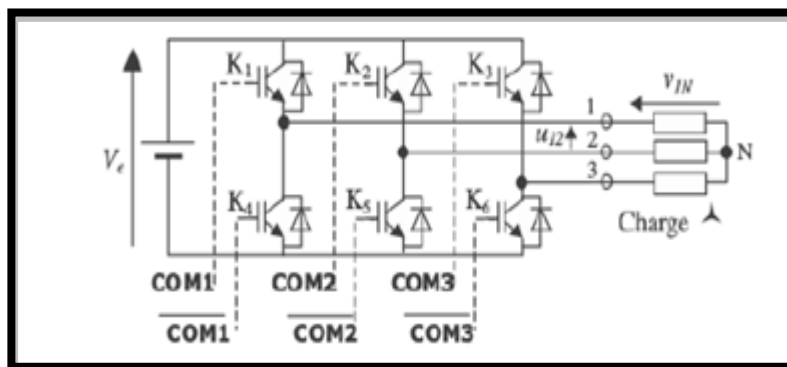


Figure III.2 Onduleur de tension triphasée.

La commande pleine onde correspond ici au fait que chaque « bras » du pont (chaque cellule de commutation) est commandé par un signal logique et son complément, ici COM1 et COM1 .....COM3 et COM3. En conséquence chaque « bras » présente à chaque instant, un commutateur passant et l'autre bloque.

Il est ainsi suffisant de connaître l'évolution des signaux de commande pour déterminer l'ensemble des tensions produites.

La figure II.3 illustre ainsi l'allure des signaux de commande associés à la commande « plein onde » des trois bras de pont, identiques et déphasés entre eux d'un tiers de période. de ces signaux sont déduits, sur chaque intervalle les commutateurs qui sont « passants ».

L'identification des commutateurs qui sont passants sur chaque intervalle permet ainsi de tracer les allures des tensions composées du système  $U_{12}$ ,  $U_{23}$ ,  $U_{31}$ . par exemple. sur le tout premier intervalle trace, les commutateurs  $K_1$ ,  $K_2$  et  $K_3$  sont conducteurs, ils amènent donc la tension  $V$  entre les phases 1 et 2 ainsi qu'entre les phases 3 et 2. On en déduit  $U_{12}=V_e$  et  $U_{23}=-U_{32}=-V_e$ . Enfin, la fermeture simultanée de  $K_1$  et  $K_2$  court-circuite les phases 1 et 3, en conséquence  $U_{31}=0$ . en faisant de même sur les cinq autres intervalles qui forment la période on obtient l'allure complète des tensions composées représentées sur la figure III.3. [4]

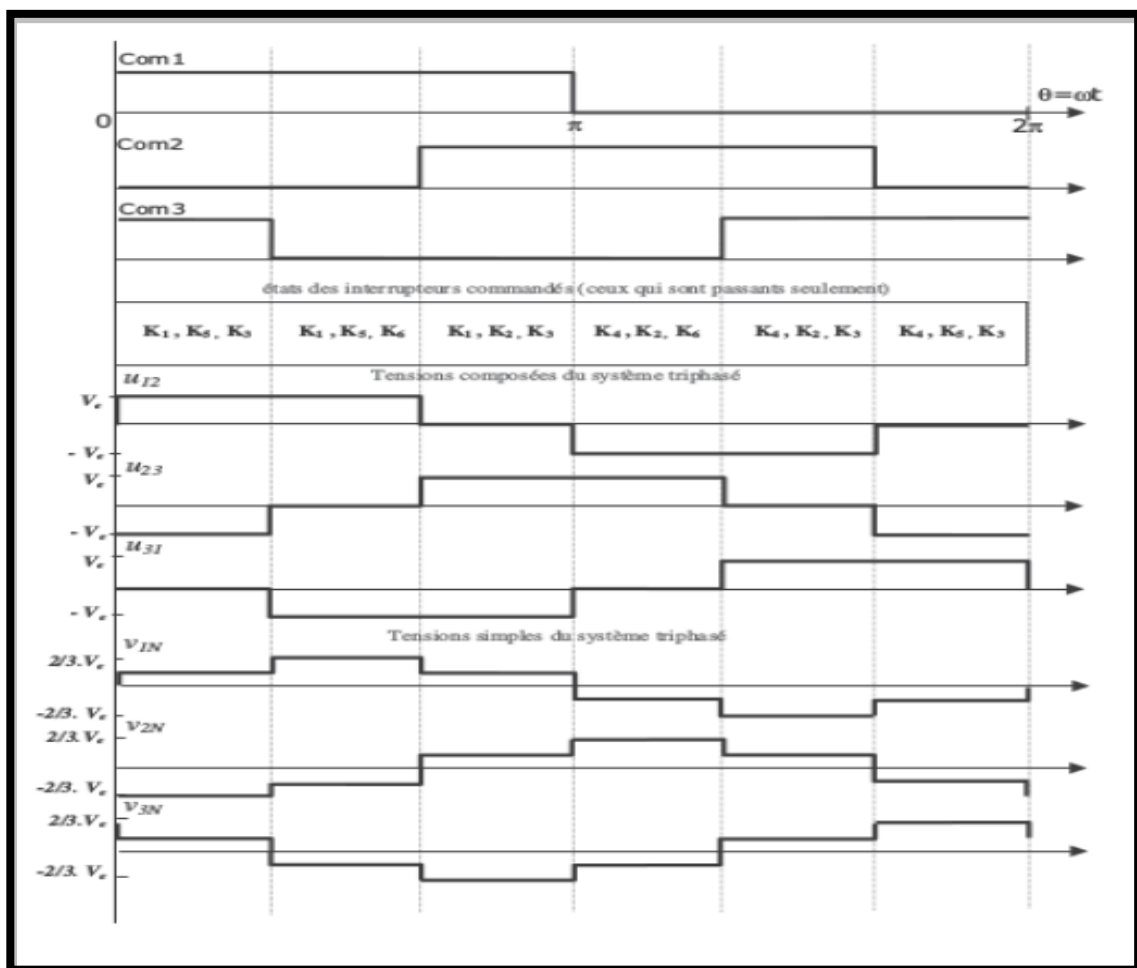


Figure III.3 Commande et chronogrammes des grandeurs de l'onduleur triphasés plein onde

### III.4 Commande par La modulation de largeur d'impulsion

La modulation de largeur d'impulsion (Pulse Width Modulation) consiste à adopter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie et former chaque alternance de la tension de sortie d'une succession de créneaux de largeur convenable.

L'essor de la modulation de largeur d'impulsion est lié aux progrès de développement des semi-conducteurs de puissance ; l'augmentation des nombres des commutations entrainerait des pertes excessives si on n'avait pas réussi à réduire les pertes à chacune des commutations.

La multiplication des nombres d'impulsions formant chacune des alternances d'une tension de sortie offre la possibilité de moduler la forme de cette tension de manière à avoir la forme sinusoïdale que possible.

La modulation de largeur d'impulsion permet de repousser vers des fréquences, élevées les harmoniques de la tension de sortie; ce qui facilite le filtrage, la multiplication du nombre des impulsions, formant chacune des alternances d'une tension de sortie, faire varier la valeur du fondamental de la tension de sortie. Offre la possibilité de moduler la forme de cette tension et obtenir une forme d'onde approximant de la sinusoïde.

La génération des signaux de commande de la modulation se fait le plus souvent en temps réel. Pour déterminer en temps réel les instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs on fait appel à l'électronique de commande analogique ou numérique ou les deux simultanément. La modulation de largeur d'impulsion nous permet cette détermination. [10]

#### III.4.1 Commande par La modulation sinusoïdale naturelle

La conversion continue alternative est assurée par les commutations des interrupteurs de l'onduleur qui vont ainsi effectuer des connexions temporaires entre les bornes de la source d'alimentation continue et les lignes de la charge triphasée alternative. Le transfert d'énergie est contrôlé par le rapport entre intervalles d'ouverture et de fermeture (rapport cyclique) de chaque interrupteur, donc par la modulation de largeurs d'impulsions de contrôle de ces interrupteurs (MLI), cette technique est basée sur la comparaison d'un signal de référence appelé aussi modulatrice d'amplitude  $A_r$  et de fréquence  $f$ , avec un signal appelé porteuse d'amplitude  $A_p$  et de fréquence  $f_p$  très élevée. Figure III.4. [7]

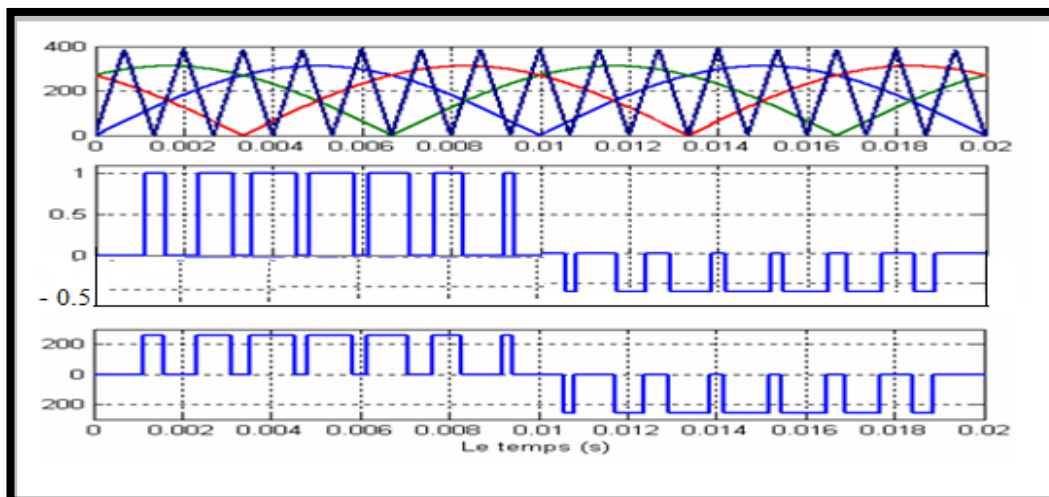


Figure III.4 principe de la modulation MLI sinusoïdale naturel

### III.4.1.1 Caractéristique de la modulation sinusoïdale naturelle

Les paramètres essentiels de la MLI sont :

- La fréquence de modulation :  $f_p$
- L'indice de modulation :  $m = f_p / f_r$  ou  $f_r$  est la fréquence de la référence.
- Le coefficient de réglage en tension  $r$  :  $r = A_r / A_p$ .

Avec :

$A_r$  : Amplitude de la référence.

$A_p$  : Amplitude de la porteuse. [7]

### III.4.2 Commande par La modulation vectorielle

Au milieu des années quatre-vingt, La modulation vectorielle (en anglais : Space Vector Modulation ou SVM) a été proposée par. La modulation vectorielle diffère, entre d'autres techniques par le fait que les signaux de commandes sont élaborés en tenant compte de l'état des trois bras de l'onduleur en même temps. Cette technique est adéquate pour des applications de tension et de puissance élevées car elle diminue l'ondulation du courant et permet une implantation relativement simple dans les processeurs numériques. La modulation vectorielle consiste à obtenir analytiquement une tension de référence (en valeur moyenne) à partir des états de commutation de l'onduleur. La modulation vectorielle présente les avantages suivants par rapport au reste des techniques de modulation:

- Cette technique de modulation est valable pour tous les types de convertisseurs multiniveaux.
- Elle contrôle directement les trois phases de l'onduleur.
- Une bonne utilisation de la tension du bus continu est atteinte car le troisième harmonique est introduit implicitement.
- Le courant de sortie a une ondulation très réduite.
- Les vecteurs redondants fournissent un degré de liberté additionnel. Ceci permet l'incorporation des fonctions complémentaires comme par exemple l'équilibrage de la tension du bus continu, la minimisation des pertes, la réduction d'harmoniques et la réduction de la tension en mode commun.
- L'implantation physique est relativement simple avec un processeur de signaux numériques.

Il y a plusieurs algorithmes utilisant la MLI vectorielle pour commander l'onduleur ou le redresseur. Le but de toutes les stratégies de modulation est de réduire les pertes de commutation et les harmoniques, et d'assurer une commande précise.[13]

#### III.4.2.1 Principe de La modulation vectorielle

La MLI vectorielle est la méthode récemment la mieux adaptée au contrôle des moteurs asynchrones.

Contrairement à d'autres méthodes, la MLI vectorielle ne s'appuie pas sur des calculs séparés des modulations pour chacun des bras de l'onduleur. Cette technique de MLI suit les principes suivants :

- Un vecteur tension de contrôle  $V_{ref}$  est calculé globalement est approximé sur une période de modulation «  $T_m$  » par un vecteur tension moyen.
- Pour chaque phase réalisation d'une impulsion de largeur  $T$  centrée sur la période dont la valeur moyenne est égale à la tension de référence à l'instant d'échantillonnage.
- Tous les interrupteurs d'un même demi-pont ont un état identique au centre et aux deux extrémités de la période. [7]

### III.5 Modulation vectorielle de l'onduleur à trois niveaux

#### III.5.1 Structure générale de l'onduleur à trois niveaux

La structure de l'onduleur à trois niveaux de type NPC est représentée sur la Figure. III.5. Ce dernier se compose de trois bras symétriques constitué chacun de (4) interrupteurs bidirectionnels en série, Ces interrupteurs ne doivent pas être ouverts ou fermés simultanément, afin d'éviter le court-circuit de la source continue de l'entrée de l'onduleur, ou l'ouverture du circuit inductif de sa charge. Chaque interrupteur est composé d'un semi-conducteur bicommandable  $S_{ij}$  ( $i=1 \dots 4$  et  $j= 1,2$  ou  $3$ ) et d'une diode montée en antiparallèle. Le nombre des diodes flottantes est (2) par bras  $D1j D2j$  assurent l'application des différents niveaux de tension à la sortie de chaque bras [3]. Chaque bras est relié à une alimentation continue de force électromotrice  $2U_c$  ces deux générateurs sont égaux  $U_{c1}=U_{c2}=V_{dc}/2$  Cet onduleur est dit à trois niveaux car il délivre trois niveaux de tension par bras  $V_{dc}/2, 0, -V_{dc}/2$ . [13]

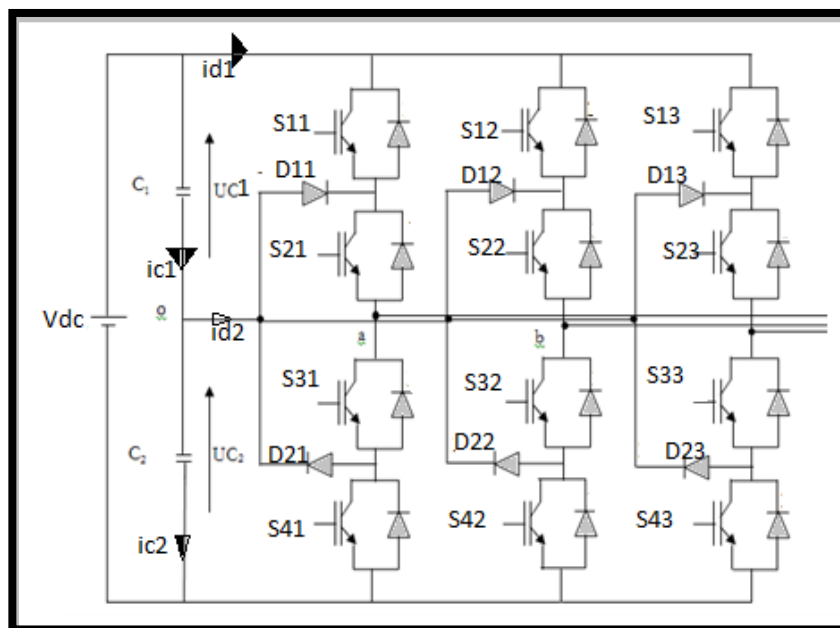


Figure III.5 Onduleur de tension à trois niveaux de type NPC

#### III.5.2 Fonctions de commutation

Pour chaque interrupteur  $S_{ij}$  ( $i= 1, 2,3$  et  $4$   $j= 1, 2$  et  $3$ ) on définit une fonction de commutation  $F_{ij}$  de la manière suivante

$$F_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } S_{ij} \text{ est fermé} \\ 0 & \text{si } S_{ij} \text{ est ouvert} \end{cases} \quad \text{III 1}$$

Avec :  $j= 1,2,3$  Indicateur de phase, Numéro de l'interrupteur du bras  $i= 1,2$

$F_{ij}$  = fonction de connexion

#### III.5.3 Commande complémentaire des interrupteurs

Les interrupteurs de chaque bras sont complémentaires :

$$F_{ij} = 1 - F_{(i-2)j} \quad i = 3,4 \quad j = 1,2,3 \quad \text{III 2}$$

**III.5.4 Etats d'un bras de l'onduleur**

Les états possibles d'un seul bras de quatre interrupteurs est de  $2^4 = 16$  états que l'on peut représenter par un quadruplet de 0 et de 1 suivant l'état des interrupteurs  $S_{x1}$   $S_{x2}$   $S_{x3}$  et  $S_{x4}$  L'analyse topologique d'un bras de l'onduleur montre l'existence de quatre configurations possibles, dont une est inutile, c'est là où les deux interrupteurs  $S_{x1}$  et  $S_{x4}$  sont commandés puisqu'elle déconnecte totalement la charge de la source continue. Donc il reste trois états utiles définis comme suit :

**Etat 2:** Les deux interrupteurs du haut  $S_{x1}$  et  $S_{x2}$  sont fermés, tandis que les deux interrupteurs du bas  $S_{x3}$  et  $S_{x4}$  sont ouverts. La tension de sortie par rapport au neutre de la source (o) est  $V_{xo} = V_{dc}/2$  Si le courant  $i_x$  est positif, il passera par les deux transistors, ou par les deux diodes antiparallèles s'il est négatif.

**Etat 1:** Les deux interrupteurs du milieu  $S_{x2}$  et  $S_{x3}$  sont fermés, tandis que les deux interrupteurs des extrémités  $S_{x1}$  et  $S_{x4}$  sont ouverts. La tension de sortie par rapport au neutre de la source (o) est  $V_{xo} = 0$  Si le courant  $i_x$  est positif, il passera par le transistor  $S_{x2}$  et la diode de clamp  $D_{x1}$  ou par le transistor  $S_{x3}$  et la diode de clamp  $D_{x2}$  s'il est négatif.

**Etat 0:** Les deux interrupteurs du bas  $S_{x3}$  et  $S_{x4}$  sont fermés, tandis que les deux interrupteurs du haut  $S_{x1}$  et  $S_{x2}$  sont ouverts. La tension de sortie par rapport au neutre de la source (o) est  $V_{xo} = -V_{dc}/2$  Si le courant  $i_x$  est négatif, il passera par les deux transistors  $S_{x3}$  et  $S_{x4}$  ou par les deux diodes principales s'il est positif.

Les autres configurations sont à éviter

- Soit, elles provoquent le court-circuit des sources continues  $U_{c1}$ ,  $U_{c2}$  ou  $V_{dc}$
- Soit, elles n'assurent pas la connexion de la charge au point neutre des sources continues.

La correspondance entre les états du bras, les états des interrupteurs et la tension de sortie est résumée au tableau III.1.

On définit pour chaque bras (j) trois fonctions de connections, correspondantes au trois états du bras.[13]

$$F_{c1j} = F_{1j} \cdot F_{2j}$$

$$F_{c2j} = F_{2j} \cdot F_{3j}$$

$$j = 1, 2, 3$$

III 3

$$F_{c3j} = F_{3j} \cdot F_{4j}$$

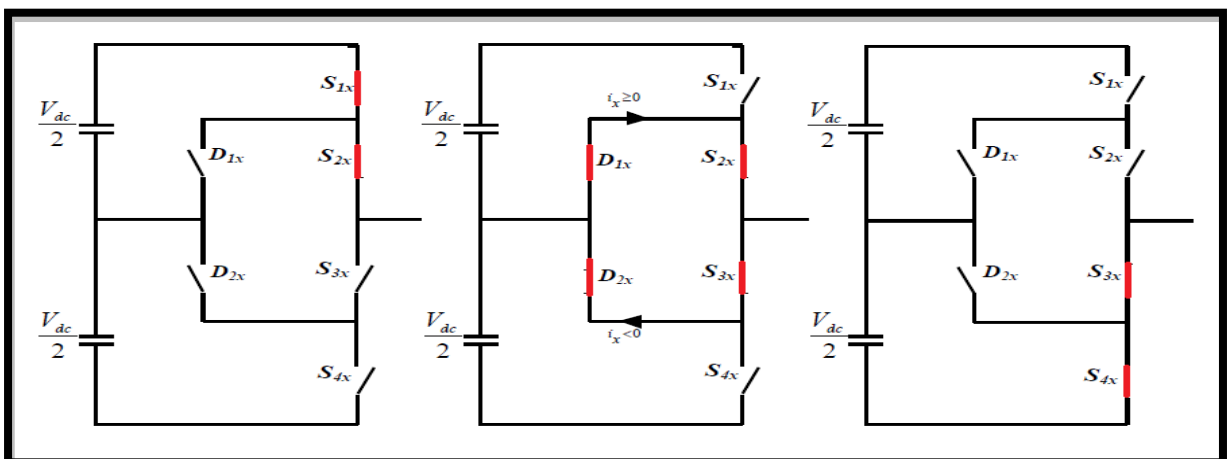


Figure III.6 Etats d'un bras de l'onduleur à trois niveaux.

Etat du bras	Etat d'interrupteurs du bras				Tension de sortie
	S <sub>1x</sub>	S <sub>2x</sub>	S <sub>3x</sub>	S <sub>4x</sub>	
2	1	1	0	0	V <sub>dc</sub> /2
1	0	1	1	0	0
0	0	0	1	1	-V <sub>dc</sub> /2

Tableaux III.1 Etat d'un bras de l'onduleur

### III.5.5 Etats de l'onduleur

Chaque bras de l'onduleur peut prendre trois états. Ainsi l'onduleur triphasé a  $3^3=27$  états possibles. Ces états sont identifiés en indiquant les états des trois bras. Par exemple, l'état (210) indique que le premier bras est à l'état (2), le deuxième est à l'état (1), et le troisième est à l'état (0). La (Fig.III.7) résume les états de l'onduleur triphasé à trois niveaux [13] :

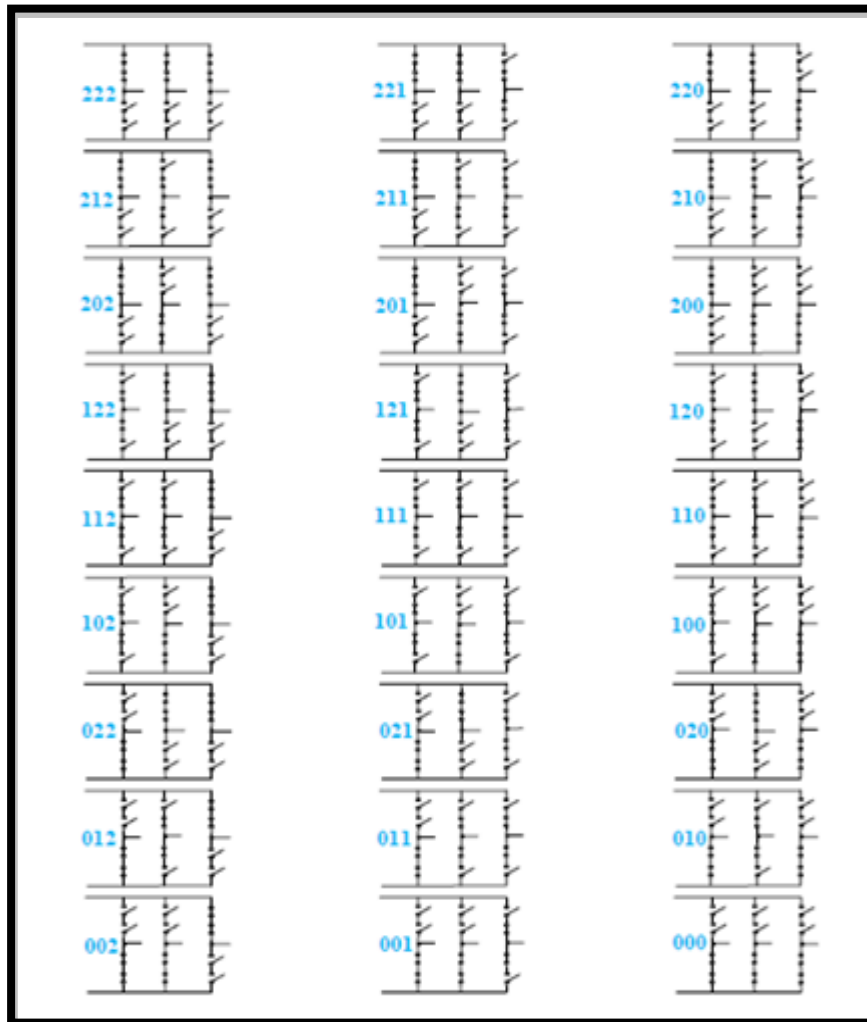


Figure III.7 Etat de l'onduleur

### III.5.6 Tensions de sortie

Les tensions de sortie par rapport au point neutre de la source continue (o) sont exprimées par :

$$\begin{pmatrix} v_{1o} \\ v_{2o} \\ v_{3o} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{c11} & F_{c21} & F_{c31} \\ F_{c12} & F_{c22} & F_{c32} \\ F_{c13} & F_{c23} & F_{c33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{dc}/2 \\ 0 \\ -V_{dc}/2 \end{pmatrix} \quad \text{III 4}$$

A un instant donné, une seule des trois fonctions de connexions des bras prend la valeur 1. Les autres fonctions sont à zéro. Ainsi, on peut avoir trois niveaux de tension pour chacune des tensions  $V_{1o}$ ,  $V_{2o}$  et  $V_{3o}$  ce qui est à l'origine de l'appellation : onduleur à trois niveaux.

Les tensions composées entre les phases de la charge sont :

$$\begin{pmatrix} v_{12} \\ v_{23} \\ v_{31} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{1o} & v_{2o} \\ v_{2o} & v_{3o} \\ v_{3o} & v_{1o} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{c11} - F_{c12} & F_{c21} - F_{c22} & F_{c31} - F_{c32} \\ F_{c12} - F_{c13} & F_{c22} - F_{c23} & F_{c32} - F_{c33} \\ F_{c13} - F_{c11} & F_{c23} - F_{c21} & F_{c33} - F_{c31} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{dc}/2 \\ 0 \\ -v_{dc}/2 \end{pmatrix} \quad \text{III 5}$$

Dans le cas d'une charge équilibrée, les tensions de sortie par rapport au neutre de charge sont exprimées par

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} v_{12} & v_{31} \\ v_{23} & v_{12} \\ v_{31} & v_{23} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 2F_{c11} - F_{c12} - F_{c13} & 2F_{c21} - F_{c22} - F_{c23} & 2F_{c31} - F_{c32} - F_{c33} \\ 2F_{c12} - F_{c13} - F_{c11} & 2F_{c22} - F_{c21} - F_{c23} & 2F_{c32} - F_{c33} - F_{c31} \\ 2F_{c13} - F_{c11} - F_{c12} & 2F_{c23} - F_{c21} - F_{c22} & 2F_{c33} - F_{c31} - F_{c32} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{dc}/2 \\ 0 \\ -v_{dc}/2 \end{pmatrix} \quad \text{III 6}$$

### III.5.7 Vecteur tension de sortie et diagramme vectoriel

On rappelle le vecteur tension de référence, défini par les équations :

$$V_s = V_{1o}e^{j0} + V_{2o}e^{-j2\pi/3} + V_{3o}e^{j2\pi/3} = V_d + j.V_q \quad \text{III 7}$$

$V_d$  et  $V_q$  sont les composantes du vecteur  $V_s$  dans le plan  $d$ - $q$

Les deux composantes  $v_d$  et  $v_q$  sont données en fonction des fonctions de connexion par :

$$\begin{pmatrix} V_d \\ V_q \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc} \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} F_{c11} - F_{c31} \\ F_{c12} - F_{c32} \\ F_{c13} - F_{c33} \end{pmatrix} \quad \text{III 8}$$

Le tableau (III.2) représente les différents états de l'onduleur et les coordonnées du vecteur de tension de sortie  $V_s$  correspondant à chaque état.

Etat de l'onduleur	$V_{\alpha i}$	$V_{\beta i}$
222,111,000	0	0
211,100	$\frac{1}{2} V_{dc}$	0
200	$V_{dc}$	0
210	$\frac{1}{4} V_{dc}$	$\sqrt{\frac{3}{4}} V_{dc}$
221,110	$\frac{1}{2} V_{dc}$	$\sqrt{\frac{3}{2}} V_{dc}$
220	$\frac{3}{4} V_{dc}$	$\sqrt{\frac{3}{4}} V_{dc}$
120	0	$\sqrt{\frac{3}{2}} V_{dc}$
121,010	$-\frac{1}{4} V_{dc}$	$\sqrt{\frac{3}{4}} V_{dc}$
020	$-\frac{1}{2} V_{dc}$	$\sqrt{\frac{3}{2}} V_{dc}$
021	$-\frac{3}{4} V_{dc}$	$\sqrt{\frac{3}{4}} V_{dc}$
122,011	$-\frac{1}{2} V_{dc}$	0
022	$-V_{dc}$	0
012	$-\frac{3}{4} V_{dc}$	$-\sqrt{\frac{3}{4}} V_{dc}$
112,001	$-\frac{1}{4} V_{dc}$	$-\sqrt{\frac{3}{4}} V_{dc}$
002	$-\frac{1}{2} V_{dc}$	$-\sqrt{\frac{3}{2}} V_{dc}$
102	0	$-\sqrt{\frac{3}{2}} V_{dc}$
212,101	$\frac{1}{4} V_{dc}$	$-\sqrt{\frac{3}{4}} V_{dc}$
202	$\frac{1}{2} V_{dc}$	$-\sqrt{\frac{3}{2}} V_{dc}$
201	$\frac{3}{4} V_{dc}$	$-\sqrt{\frac{3}{4}} V_{dc}$

**Tableaux III.2 Etats de l'onduleur a trois niveaux et les coordonnées de vecteur  $V_s$**

Ce vecteur prend dix-huit positions discrètes dans le plan d-q suivant les états de l'onduleur. Ces positions sont indiquées sur le diagramme vectoriel de l'onduleur (Fig. III.8). Ils sont rangés sur deux hexagones: douze positions sur l'hexagone externe (correspondantes aux états (200,210,220,120,020,021,022,012,002,102,202 et 210)), six positions sur l'hexagone interne (correspondantes aux états ((211-100), (221-110), (121-010), (122-011), (112-001) et (212-101)), en plus d'une position à l'origine du diagramme, correspondante aux états 222,111 et 000. Chaque position sur l'hexagone interne est produite par deux états distincts. Ces états sont appelés états redondants, et les vecteurs correspondants sont appelés vecteurs redondants.

Les positions discrètes du vecteur de tension de sortie  $V_s$  divise le diagramme vectoriel en six secteurs triangulaires, les sommets de ces secteurs triangulaires étant l'origine du diagramme vectoriel et les apex de l'hexagone externe. Chaque secteur est composé de quatre régions triangulaires (Fig.III.8). On a ainsi 24 régions dans la totalité du diagramme vectoriel [13]

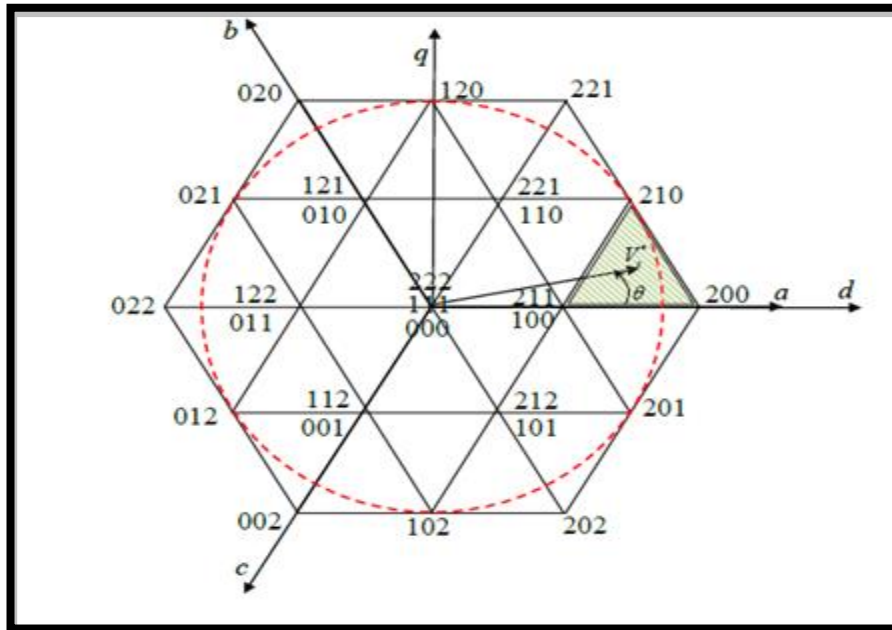


Figure III.8 Diagramme vectoriel de l'onduleur à trois niveaux

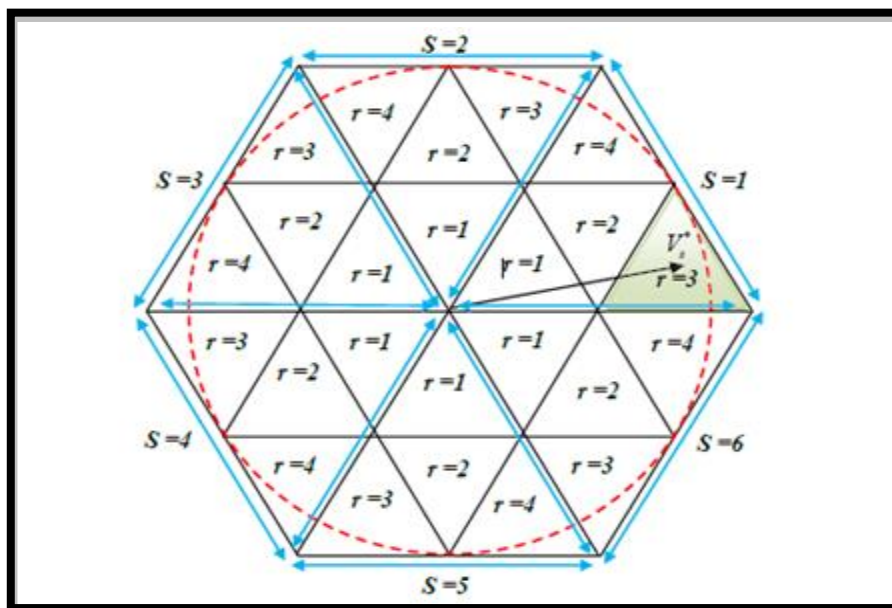


Figure III.9 Secteurs et région du diagramme vectoriel

### III.5.8 Vecteur tension de référence

A partir des tensions de référence triphasées  $V_1^*, V_2^*$  et  $V_3^*$  on définit le vecteur tension de référence

$$\begin{aligned}
 V_s^* &= V_1^* e^{j0} + V_2^* e^{-j2\pi/3} + V_3^* e^{j2\pi/3} \\
 &= V_d^* + j.V_q^* \\
 &= m.V_{max}^* e^{j\theta}
 \end{aligned}
 \tag{III 9}$$

$V_d^*$  et  $V_q^*$  sont les composantes du vecteur  $V_s^*$  dans le plan  $d-q$

$m$  : ( $0 \leq m \leq 1$ ) : Taux de modulation

$$m = \frac{\sqrt{2}V_s}{V_{dc}}
 \tag{III 10}$$

$V_{max}$  : amplitude maximale du vecteur  $V_s^*$

$\theta$  : Position angulaire du vecteur  $V_s^*$  dans le plan  $d_q$

A partir des coordonnées  $V_d^*, V_q^*$  et de la position angulaire  $\theta$ , on déduit dans quel secteur(s), et dans quelle région(r) se situe le vecteur  $V_s^*$  dans le plan  $d_q$  figure III 9, Le secteur triangulaire s se déduit de la manière suivante :

$$S = \begin{cases} 1 \text{ si } 0 \leq \theta \leq \pi/3 \\ 2 \text{ si } \pi/3 \leq \theta \leq 2\pi/3 \\ 3 \text{ si } 2\pi/3 \leq \theta \leq \pi \\ 4 \text{ si } \pi \leq \theta \leq 4\pi/3 \\ 5 \text{ si } 4\pi/3 \leq \theta \leq 5\pi/3 \\ 6 \text{ si } 5\pi/3 \leq \theta \leq 2\pi \end{cases} \quad \text{III 11}$$

La région triangulaire à l'intérieur de chaque secteur se déduit en utilisant les équations de temps  $T_x, T_Y$  et  $T_z$ . Par exemple, les quatre régions ( $r=1, 2, 3, 4$ ) à l'intérieur du secteur  $s=1$ , représenté dans la (fig. III.9).

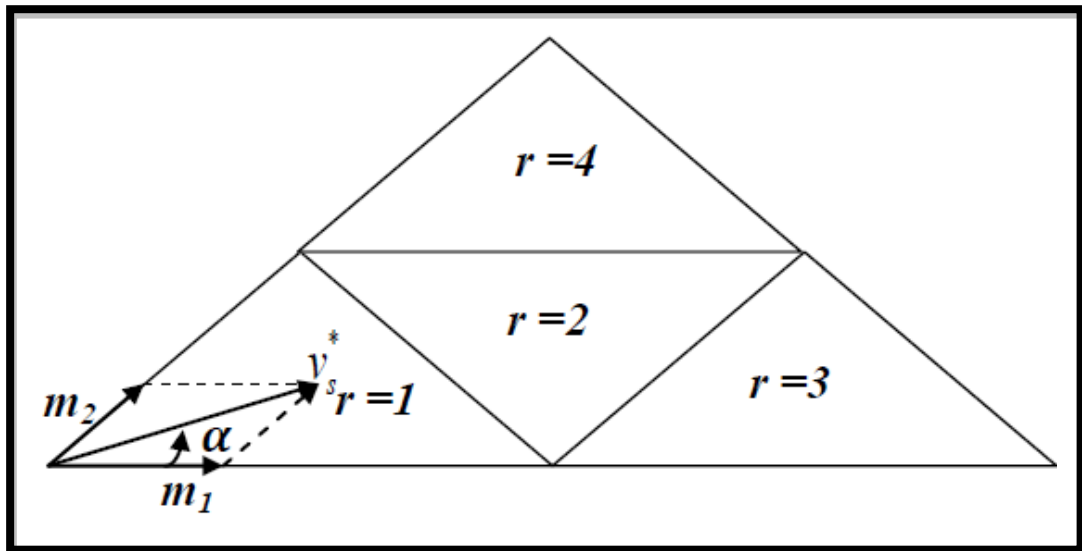


Figure III.10 La position de  $v_s^*$  à les quatre régions de 1<sup>er</sup> secteur.

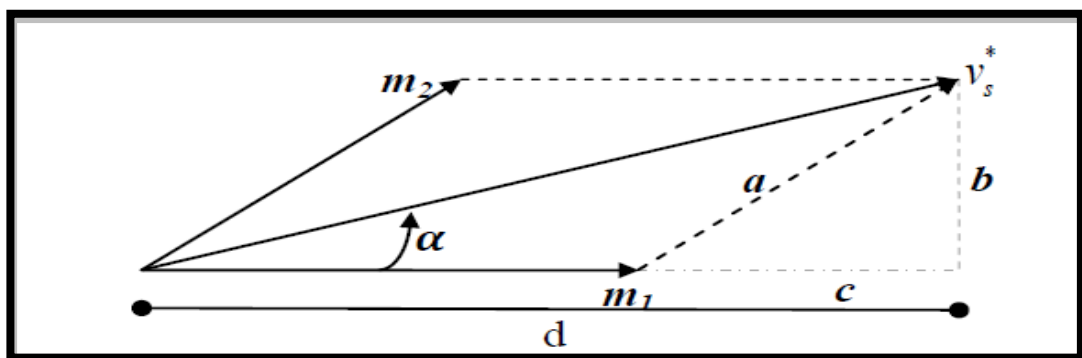


Figure III.11 les compoent  $m1$  et  $m2$  de  $V_s^*$

De la figure. III.11 on calcule  $m_1$  et  $m_2$  :

$$\begin{cases} a = m_2 = \frac{b}{\sin(\frac{\pi}{3})} = \frac{2}{\sqrt{3}} b = \frac{2}{\sqrt{3}} V^* s \sin \alpha \\ m_1 = V^* s \cos \alpha - \left( \frac{2}{\sqrt{3}} V^* s \sin \alpha \right) \cos(\pi/3) \\ m_1 = V^* s \left( \cos \alpha - \frac{\sin \alpha}{\sqrt{3}} \right) \end{cases} \quad \text{III 12}$$

donc

si  $m_2 < 0.5(\sqrt{2/3} V_{dc})$  et  $m_1 < 0.5(\sqrt{2/3} V_{dc})$  et  $(m_1 + m_2) < 0.5(\sqrt{2/3} V_{dc})$  alors  $V^* s$  et dans la région1.

si  $m_2 < 0.5(\sqrt{2/3} V_{dc})$  et  $m_1 < 0.5(\sqrt{2/3} V_{dc})$  et  $(m_1 + m_2) > 0.5(\sqrt{2/3} V_{dc})$  alors  $V^* s$  et dans la région2.

Si  $m_1 > 0.5(\sqrt{2/3} V_{dc})$  alors  $V^* s$  et dans la région 3.

Si  $m_2 > 0.5(\sqrt{2/3} V_{dc})$  alors  $V^* s$  et dans la région 4.

Afin de minimiser les harmoniques de tension de sortie, on impose au vecteur tension de référence de ce localiser à l'intérieur du cercle délimité par l'hexagone externe, ce qui donne :

$$V_{\max} = \frac{\sqrt{2}}{3} V_{dc} \quad \text{III13}$$

### III.5.9 Séquence des états de l'onduleur

Sur une période d'échantillonnage  $T_s$ , le vecteur tension de référence  $V_s^*$  doit coïncider avec la moyenne des vecteurs  $V_x$ ,  $V_y$  et  $V_z$  représentant les apex du triangle contenant  $V_s^*$ :

$$\bar{V}_s = V^* s = m V_{\max} e^{j\alpha} = \frac{T_x V_x + T_y V_y + T_z V_z}{T_s} = d_x \cdot v_x + d_y \cdot v_y + d_z \cdot v_z \quad \text{III14}$$

$\alpha$  c'est la position angulaire du vecteur  $V^* s$  à l'intérieur d'un secteur :  $\alpha = \theta [\pi/3]$ .

$T_x$ ,  $T_y$  et  $T_z$  sont les durées d'application des vecteurs  $v_x$ ,  $v_y$  et  $v_z$  respectivement à la sortie de l'onduleur. Ils sont reliés par l'équation :

$$T_x + T_y + T_z = T_s \quad \text{et} \quad d_x + d_y + d_z = 1 \quad \text{III15}$$

Les vecteurs  $v_x$ ,  $v_y$  et  $v_z$  dépendent de la position du vecteur  $V_s^*$  dans le plan  $d_{-q}$ . Par exemple, le vecteur  $V^* s$  représenté sur le diagramme vectoriel de la (Fig.III.8) se situe dans la région  $r=3$  du secteur  $S=1$ . Ainsi, le vecteur  $v_x$  est celui généré par l'état 200 (appelé alors état X), le vecteur  $v_y$  est celui généré par l'état 210 (appelé état Y) et le vecteur  $v_z$  est celui généré par l'état 211 (appelé  $Z_1$ ) ou l'état 100 (appelé  $Z_2$ ). La (Fig. III.12) indique les états X, Y et Z pour les différentes régions du diagramme vectoriel

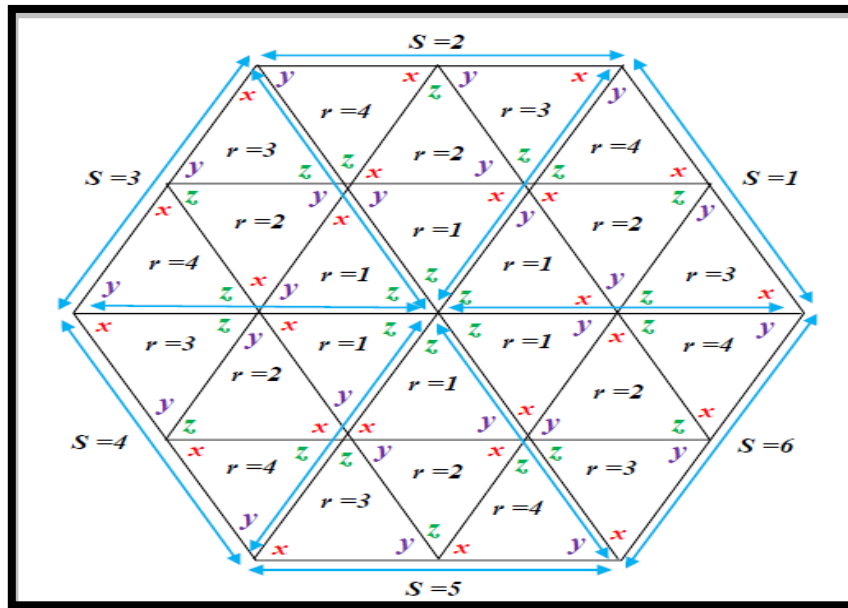


Figure III.12 Etats X, Y et Z pour les différentes régions du diagramme vectoriel.

L'équation (III.15) et la décomposition de l'équation (III.14) suivant les deux axes  $d_q$  permet de déduire les rapports  $d_x, d_y, d_z$ , et par suite les durées  $T_x, T_y$  et  $T_z$ . Le tableau (III.3) donne la décomposition de l'équation (III.12) pour les quatre régions d'un secteur donné. Cette décomposition s'applique pour tous les secteurs du diagramme vectoriel : pour passer d'un secteur à l'autre, il suffit de positionner l'axe  $d$  sur le début du secteur concerné

région	Decomposition
$r = 1$	$\begin{cases} \frac{\sqrt{3}}{2} m \cos \theta = \frac{1}{2} d_x + \frac{1}{4} d_y \\ \frac{\sqrt{3}}{2} m \sin \theta = \frac{\sqrt{3}}{4} d_y \end{cases}$
$r = 2$	$\begin{cases} \frac{\sqrt{3}}{2} m \cos \theta = \frac{1}{4} d_x + \frac{1}{2} d_y + \frac{3}{4} d_z \\ \frac{\sqrt{3}}{2} m \sin \theta = \frac{\sqrt{3}}{4} (d_x + d_y) \end{cases}$
$r = 3$	$\begin{cases} \frac{\sqrt{3}}{2} m \cos \theta = d_x + \frac{3}{4} d_y + \frac{1}{2} d_z \\ \frac{\sqrt{3}}{2} m \sin \theta = \frac{\sqrt{3}}{4} d_y \end{cases}$
$r = 4$	$\begin{cases} \frac{\sqrt{3}}{2} m \cos \theta = \frac{3}{4} d_x + \frac{1}{2} d_y + \frac{1}{4} d_z \\ \frac{\sqrt{3}}{2} m \sin \theta = \frac{\sqrt{3}}{4} (d_x + d_z) + \frac{\sqrt{3}}{2} d_y \end{cases}$

Tableau.III.3 Décomposition de l'équation (III.12).

La résolution du système formé par l'équation (III.15) et les deux équations issues de la décomposition de (III.14) donne les expressions  $d_x$ ,  $d_y$  et  $d_z$  de indiquées dans le tableau (III.4).

Exprision	r = 1	r = 2	r = 3	r = 4
$d_x$	$2m \sin(\pi/3 - \alpha)$	$1-2m \sin(\pi/3 - \alpha)$	$2m \sin(\pi/3 - \alpha)-1$	$2m \sin(\pi/3 - \alpha)-1$
$d_y$	$2m \sin \alpha$	$1-2m \sin \alpha$	$2m \sin \alpha$	$2m \sin \alpha - 1$
$d_z$	Pour tout les regions $d_z=1- d_x - d_y$			

Tableau. III.4 Les expressions de  $d_x$ ,  $d_y$  et  $d_z$  pour les différentes régions d'un secteur.

Ainsi, pour avoir des tension  $V_1, V_2$  et  $V_3$  de sortie aussi proche que possible au tensions de références sinusoïdales triphasées  $V_1^*, V_2^*$  et  $V_3^*$ , on applique l'état X pendant une durée  $d_x T_x$ , l'état Y pendant une durée  $d_y T_y$  et l'état Z pendant le reste de la période  $d_z T_z$ .

Certains états X, Y et Z sont des états redondants. Ils produisent les mêmes tensions de sortie  $V_1, v_2$  et  $v_3$  dans ce cas, on peut choisir l'état redondant à appliquer suivant plusieurs critères :

- La minimisation des pertes de puissance dans l'onduleur par la minimisation du nombre d'interruptions par période.
- L'équilibrage des tensions aux bornes des condensateurs au coté continu de l'onduleur. En effet, ces condensateurs se chargent ou se déchargent suivant les états redondants appliqués.

Afin de minimiser les pertes dans l'onduleur et de réduire les harmoniques de la tension de sortie, on choisit une séquence des états X, Y et Z qui consiste à :

- appliquer les trois états dans un ordre donné durant la demi période, puis dans l'ordre inverse durant le reste de la période.
- de diviser le temps approprié à chaque état sur toute les redondances.
- d'utiliser le même état au début et à la fin de la période d'échantillonnage.
- d'inverser l'ordre de succession des états par alternance entre les six secteurs.

Le tableau(III.5) résume la succession des états pendant une demi-période d'échantillonnage dans toutes les régions du diagramme vectoriel. Ces états s'appliquent dans la prochaine demi période dans l'ordre inverse. A partir de cette succession, on déduit les fonction logiques  $F_{ij}$  associées aux interrupteurs de l'onduleur. La (Fig.III.13) indique la forme des fonctions logiques associées aux interrupteurs des demi bras supérieurs, sur une période d'échantillonnage  $T_s$  dans les quatre régions du premier secteur du diagramme vectoriel. Les fonctions logiques des interrupteurs des demi-bras inférieurs se déduisent par complémentation. On remarque que chaque interrupteur change son état deux fois seulement durant la période d'échantillonnage.[13]

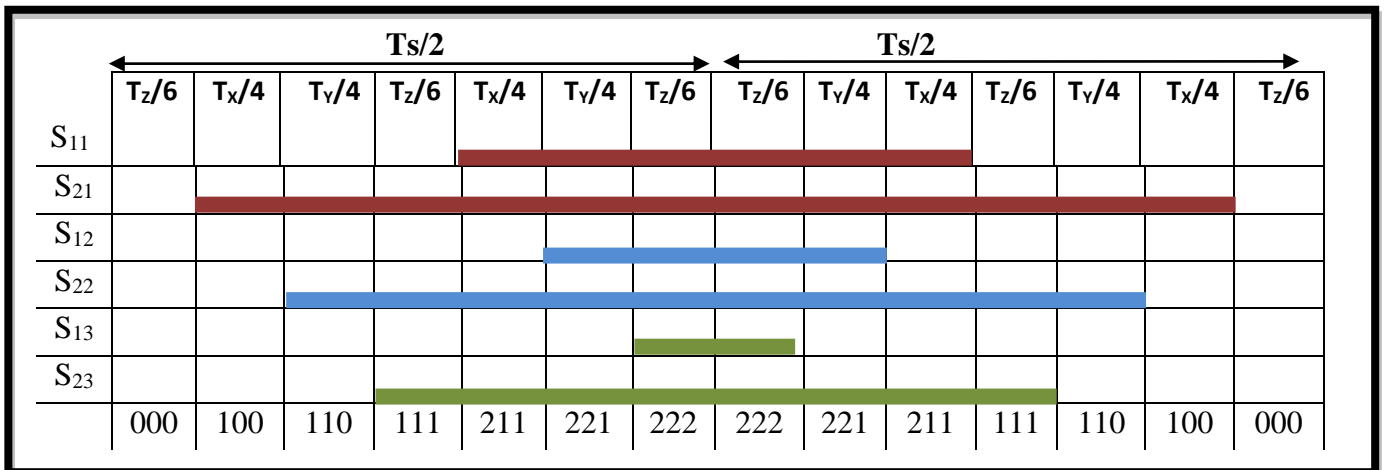
	Région1							Région2					Région3				Région4			
<b>1</b>	0	1	1	1	2	2	2	1	1	2	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2
	0	0	1	1	1	2	2	0	1	1	1	2	0	0	1	1	1	1	2	2
	0	1	0	1	1	1	2	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1
<b>2</b>	2	2	1	1	1	0	0	2	1	1	1	0	2	1	1	1	1	1	0	0
	2	2	2	1	1	1	0	2	2	2	1	1	2	2	2	1	2	2	2	1
	2	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
<b>3</b>	0	1	0	1	1	1	2	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1
	0	0	1	1	2	2	2	1	1	2	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2
	0	1	1	1	1	2	2	0	1	1	1	2	0	0	1	1	1	0	2	2
<b>4</b>	2	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
	2	2	1	1	1	0	0	2	1	1	1	0	2	2	1	1	1	1	0	0
	2	2	2	1	1	1	0	2	2	2	1	1	2	2	2	1	2	2	2	1
<b>5</b>	0	0	1	1	1	2	2	0	1	0	1	2	0	0	1	1	1	1	2	2
	0	0	0	1	1	1	2	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1
	0	1	1	1	2	2	2	1	1	2	0	2	1	2	2	2	1	2	2	2
<b>6</b>	2	2	2	1	1	1	0	2	2	2	1	1	2	2	2	1	2	2	2	1
	2	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
	2	2	1	1	1	0	0	2	1	1	1	0	2	2	1	1	1	1	0	0

Tableau .III.5 Séquences des états dans les différentes régions du diagramme vectoriel.

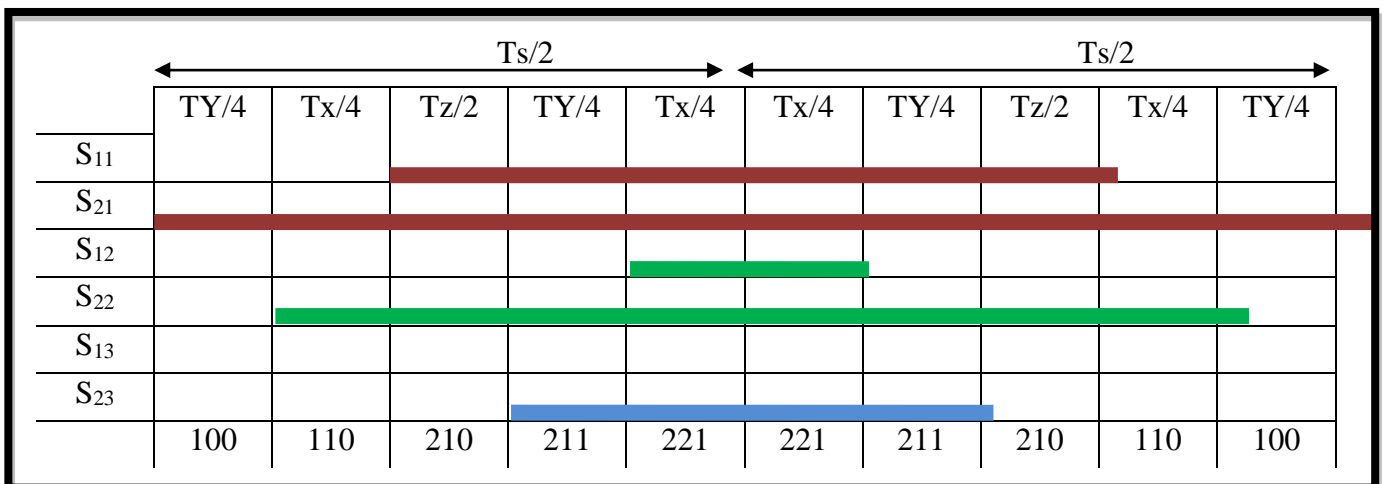
A partir de la (Fig. III.13), on déduit les durées de fermeture des interrupteurs durant la période d'échantillonnage  $T_s$  dans chaque région. Par exemple, pour les quatre régions du premier secteur, les durées de fermeture des interrupteurs des demis bras supérieurs sont résumées dans le tableau(III.6). Les durées de fermeture des autres interrupteurs se déduisent par complémentation

Région	Demi-bras 1	Demi-bras 1	Demi-bras 1
<b>1</b>	$S_{11} = T_s/2 + T_y/2 + T_z/3$ $S_{21} = T_s + T_y + 2T_z/3$	$S_{12} = T_y/2 + T_z/3$ $S_{22} = T_s/2 + T_y/2 + 2T_z/3$	$S_{13} = T_z/3$ $S_{23} = T_x/2 + T_y/2$
<b>2</b>	$S_{11} = T_s/2 + T_y/2 + T_z$ $S_{21} = T_s + T_y + T_z$	$S_{12} = T_x/2$ $S_{22} = T_s/2 + T_y/2 + T_z$	$S_{13} = 0$ $S_{23} = T_x/2 + T_y/2 + 2T_z/3$
<b>3</b>	$S_{11} = T_s + T_y + T_z/2$ $S_{21} = T_s + T_y + T_z$	$S_{12} = 0$ $S_{22} = T_y + T_z/2$	$S_{13} = 0$ $S_{23} = T_z/2$
<b>4</b>	$S_{11} = T_s + T_y + T_z/2$ $S_{21} = T_s + T_y + T_z$	$S_{12} = T_y + T_z/2$ $S_{22} = T_s + T_y + T_z$	$S_{13} = 0$ $S_{23} = T_z/2$

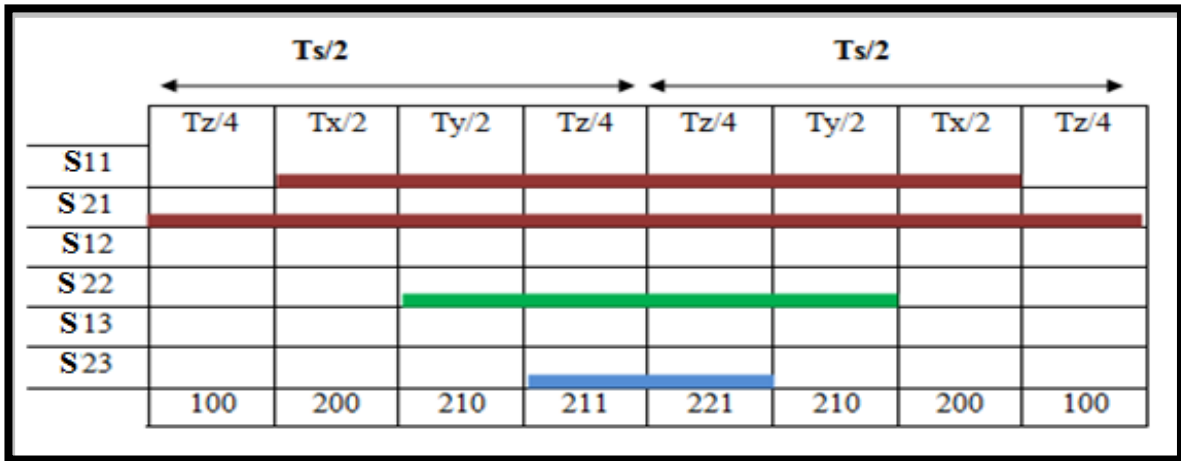
Tableau.III.6 Durées de fermeture des interrupteurs dans le cas du premier secteur.



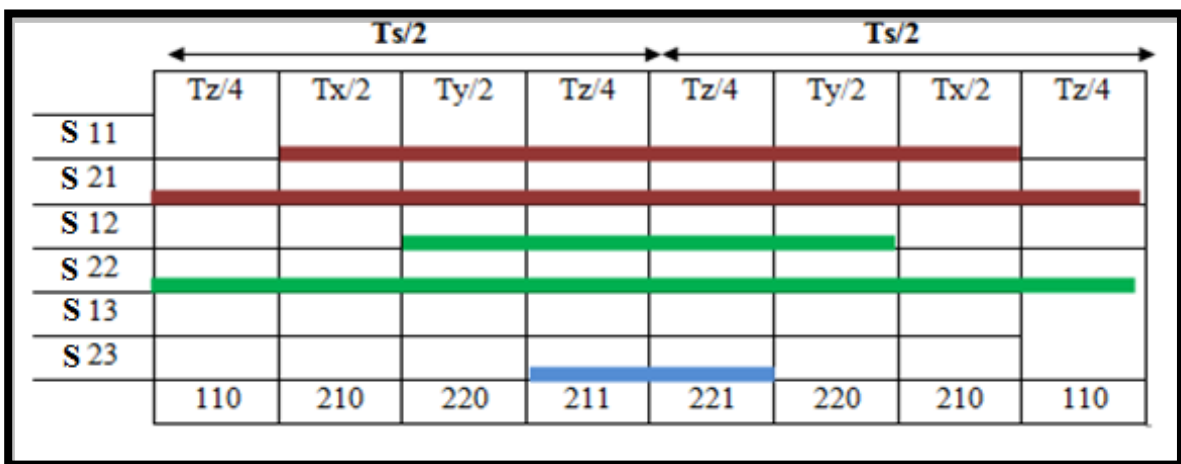
Région 1



Région 2



Région 3



Région 4

Fig.III.13 Fonctions logiques  $F_{ij}$  dans les quatre régions du premier secteur.

On résume l'algorithme de la modulation vectorielle de l'onduleur à trois niveaux. Cet algorithme consiste à effectuer les étapes suivantes :

- A partir des tensions de références  $V1^*$ ,  $V2^*$  et  $V3^*$  on déduit le vecteur tension de référence  $V_s^*$  et ces composantes  $V^*d$  et  $V^*q$  ainsi que ses coordonnées polaires  $m$  et  $\theta$  (équation (III.29)).
- A partir de  $m$  et  $\theta$  on déduit le secteur  $s$  (équation (III.11) et la région (équation (III.12) du diagramme vectoriel contenant le vecteur  $V^*s$ .
- On déduit (Fig.III.11) les états  $X$ ,  $Y$  et  $Z$  qu'on doit appliquer pour générer les tensions de sortie.
- On déduit (tableau .III.3) la durée d'application de chaque état.
- A partir du (tableau.III.4), on déduit la séquence des états durant chaque période d'échantillonnage.
- A partir de cette séquence, on déduit l'état ouvert ou fermé de chaque interrupteur, à tout instant. [13]

### III-6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a étudié différentes stratégies de commande des onduleurs de tension triphasés à trois niveaux à structure NPC.

La modulation vectorielle a l'avantage par rapport à les autres modulations, en ce qui concerne le déchet de tension ou le résidu harmonique. La SVM ne s'appuie pas sur des calculs séparés des modulations par chacun des bras de l'onduleur comme la MLI sinusoïdale, elle génère les signaux d'impulsion simultanément avec la rotation du vecteur de référence.

Dans le domaine des entraînements à vitesse variable avec moteur asynchrone ou synchrone, alimentés par les onduleurs de tension, on donne de plus en plus fréquemment, la préférence à la modulation vectorielle, c'est par ce que ce type de MLI s'intègre de façon naturelle dans les systèmes de régulation de ces entraînements.

Dans le IV chapitre on va étudier l'application de la MLI vectorielle à l'onduleur triphasé à trois niveaux de tension de type NPC.

# **Chapitre IV**

## **Simulation et interprétation des résultats**

## IV.1 Introduction

Actuellement, plusieurs outils de simulation parmi les quels MATLAB/simulink sont utilisés dans les milieux universitaires.

La simulation de ce travail est faite par l'utilisation d'un logiciel MATLAB/simulink 6.5 et 7.7 qui est destiné principalement au calcul scientifique, de la modélisation et de la simulation, le noyau de calcul est associé à l'environnement SIMULINK permettant une modélisation basée sur des schémas blocs.

A l'aide de la simulation on a pu visualiser les courbes de réponse. L'exploitation des courbes ultérieur est réalisée à l'aide des blocs 'To Workspace'.

Dans notre travail nous avons simulé l'onduleur de tension à trois niveaux de type NPC commandé par des différentes techniques de commandes, Le deux technique sont :

- La commande MLI sinusoïdal.
- La commande MLI vectorielle.

## IV.2 Simulation de l'onduleur de tension à trois niveaux de type NPC

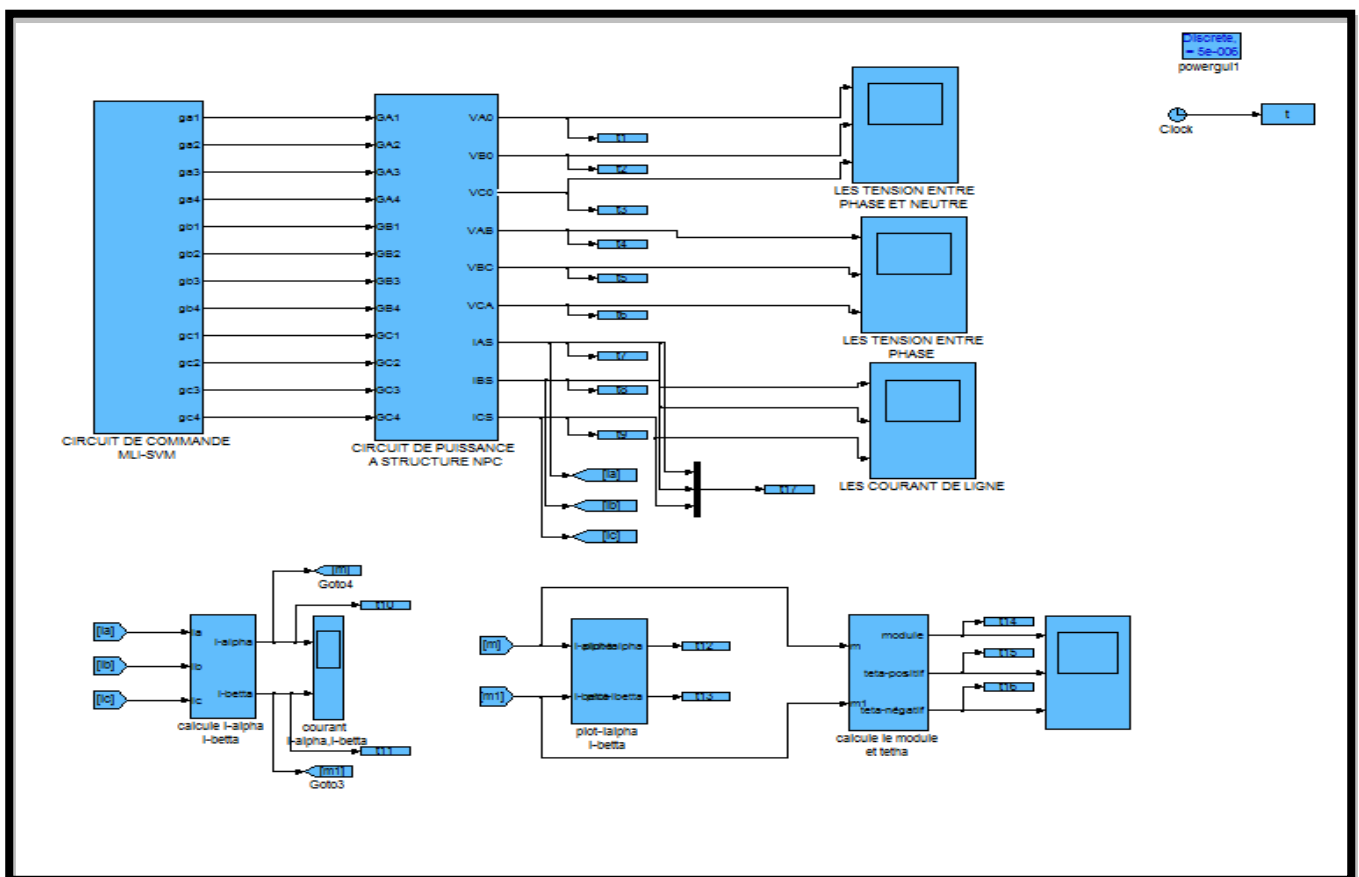
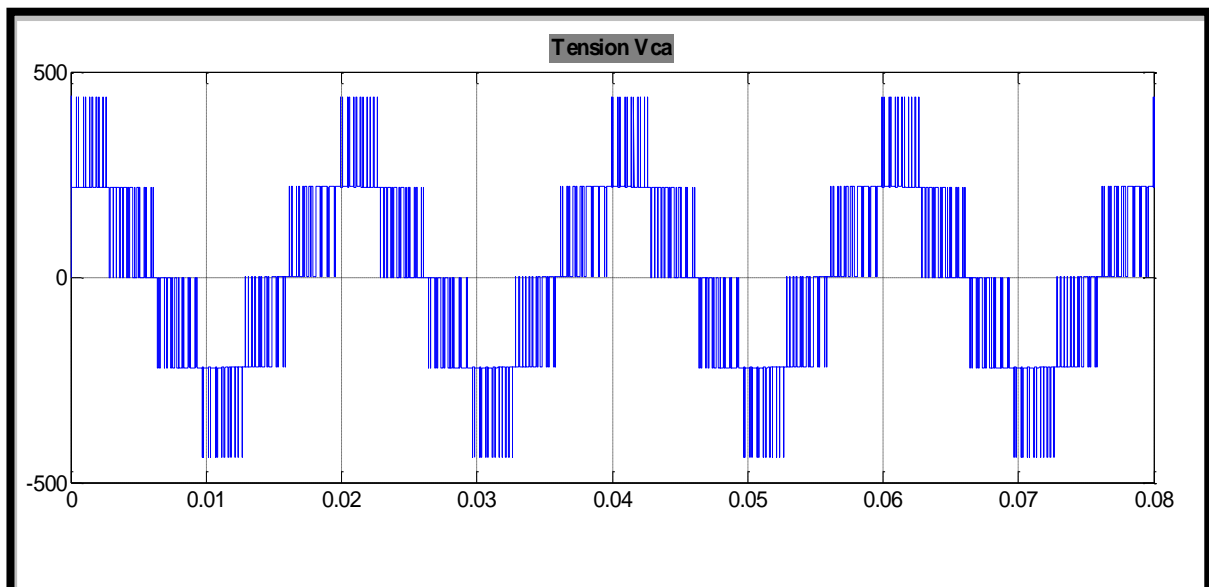
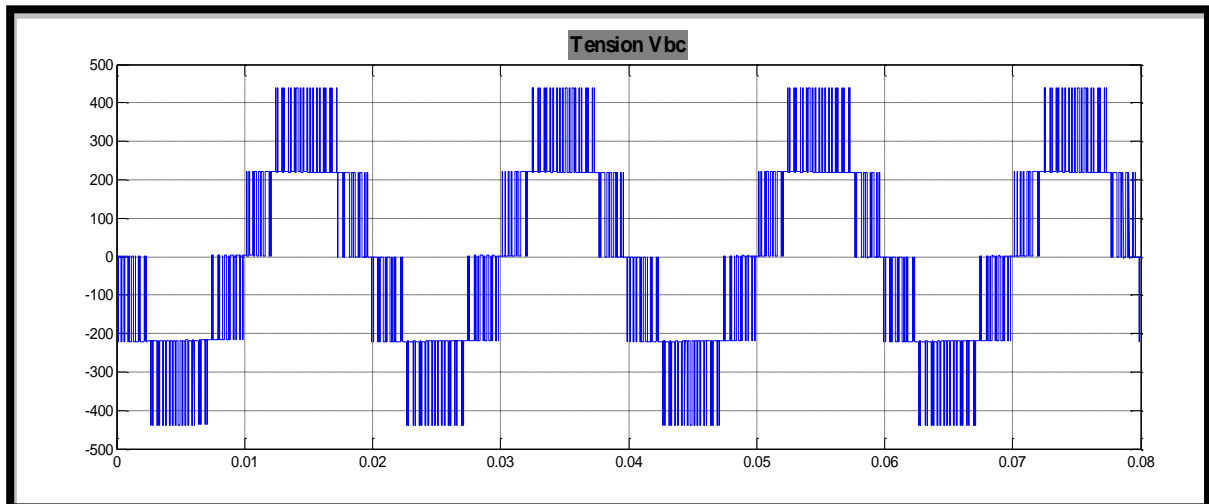
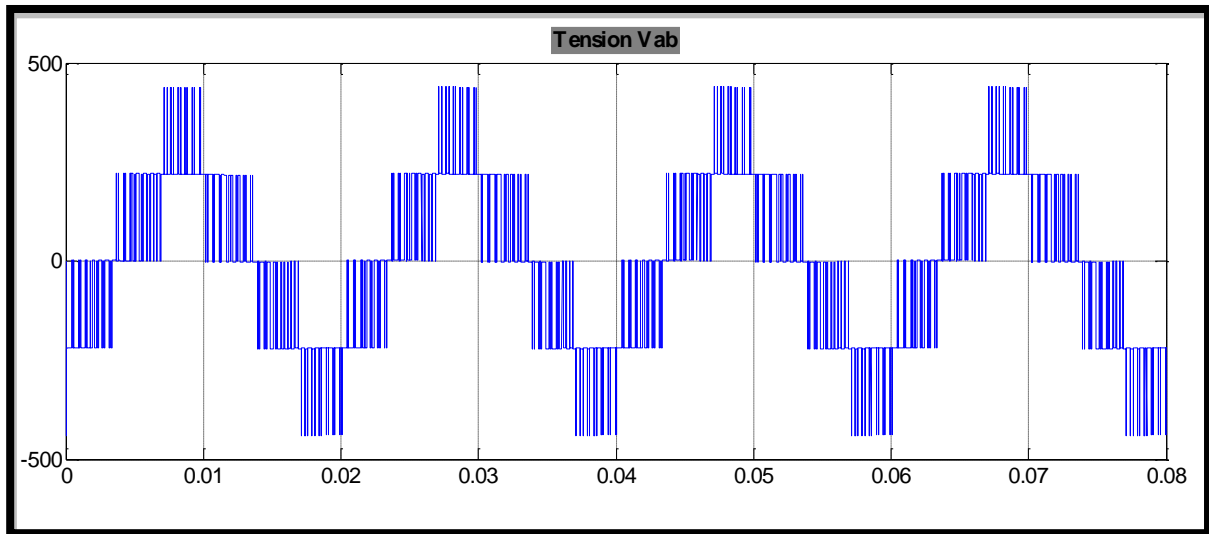


Figure IV.1 Schéma bloc de simulation d'un onduleur de tension à trois niveaux de type NPC commandé par SVM

## IV.2.1 Commande MLI Sinusoïdal de l'onduleur de tension à trois niveaux

### IV.2.1.1 Pour $r = 0.8$ $m = 40$



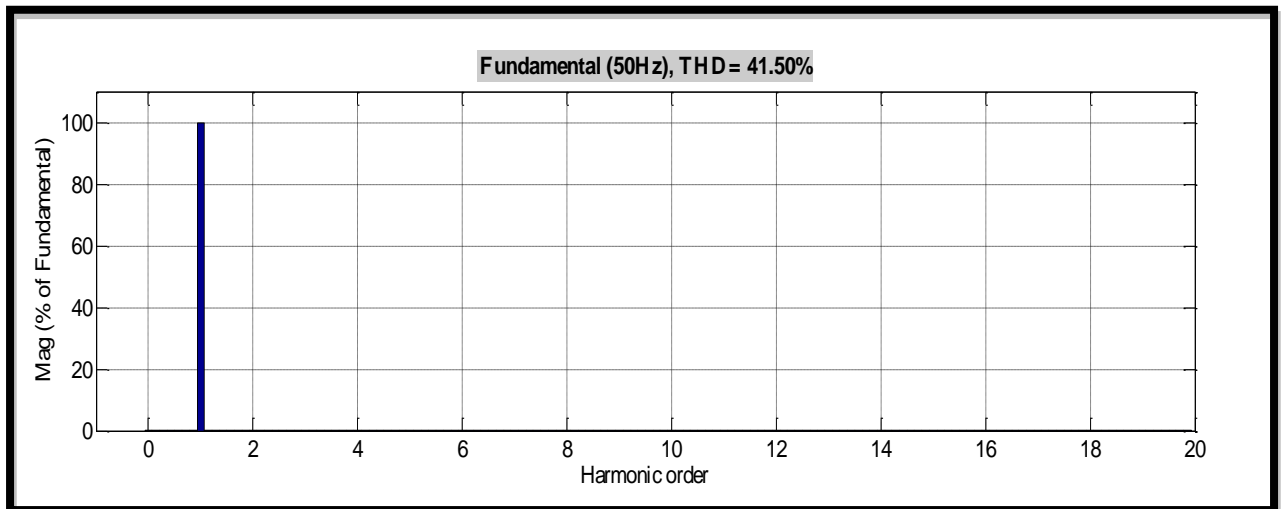
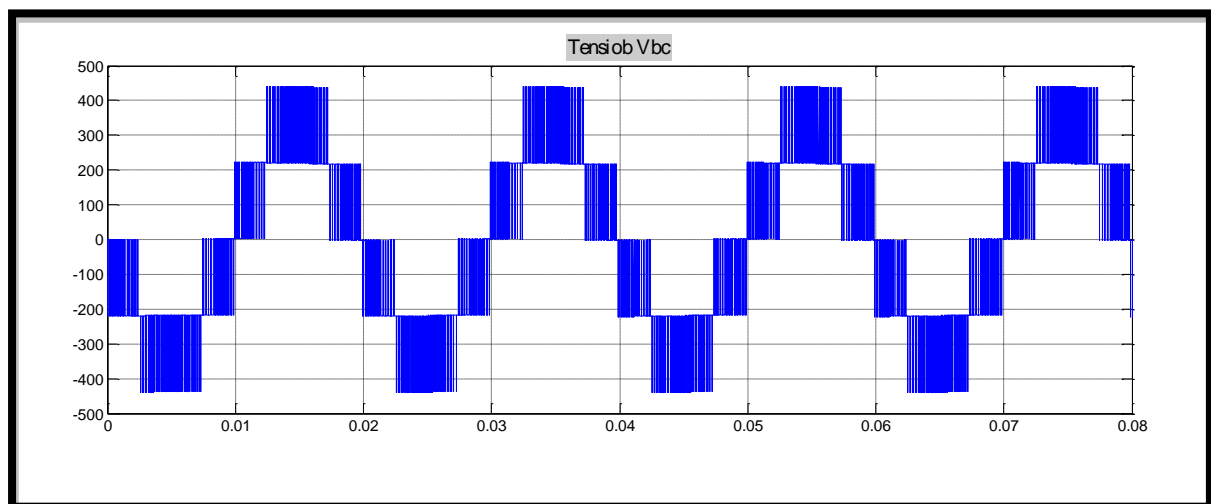
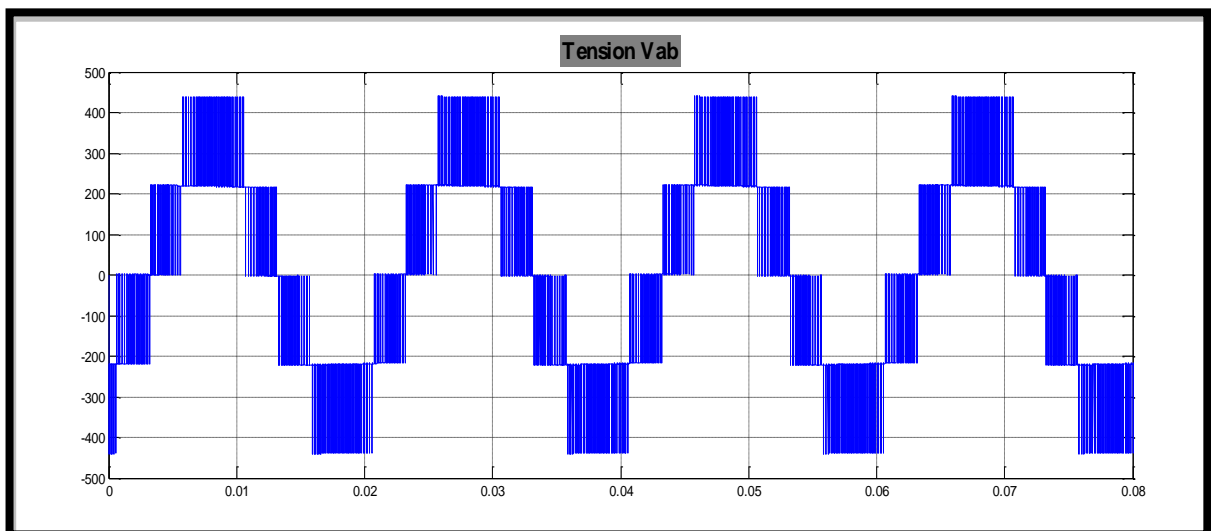
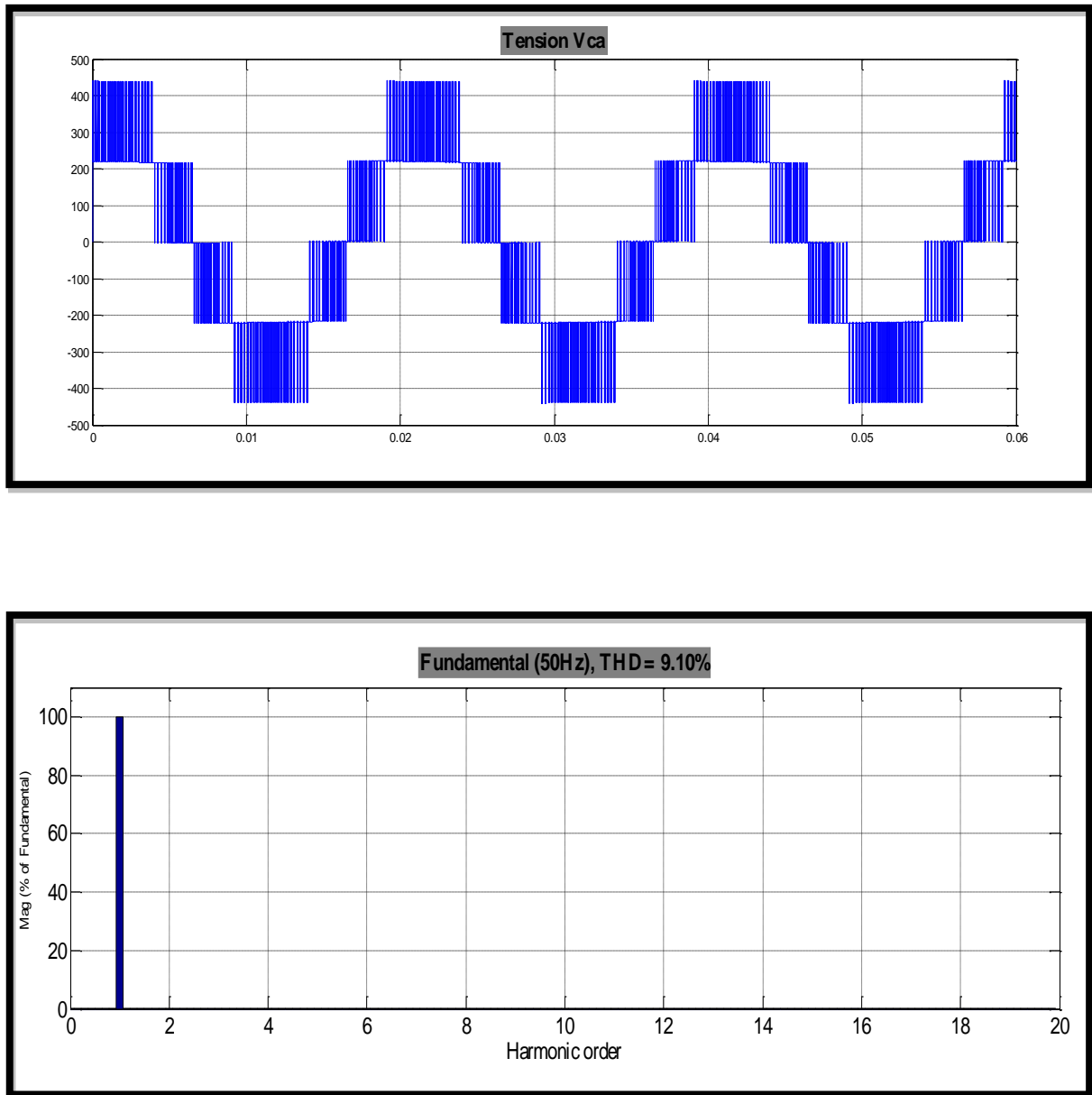


Figure IV.2 Signaux de la commande MLI sinusoïdal, tensions de sortie et analyse spectral de la tension de sortie  
 Pour  $m = 40$   $r = 0.8$  (fréquence du fondamental = 50 HZ et THD = 41.50 %)

IV.2.1.2 Pour  $r = 0.8$   $m = 96$

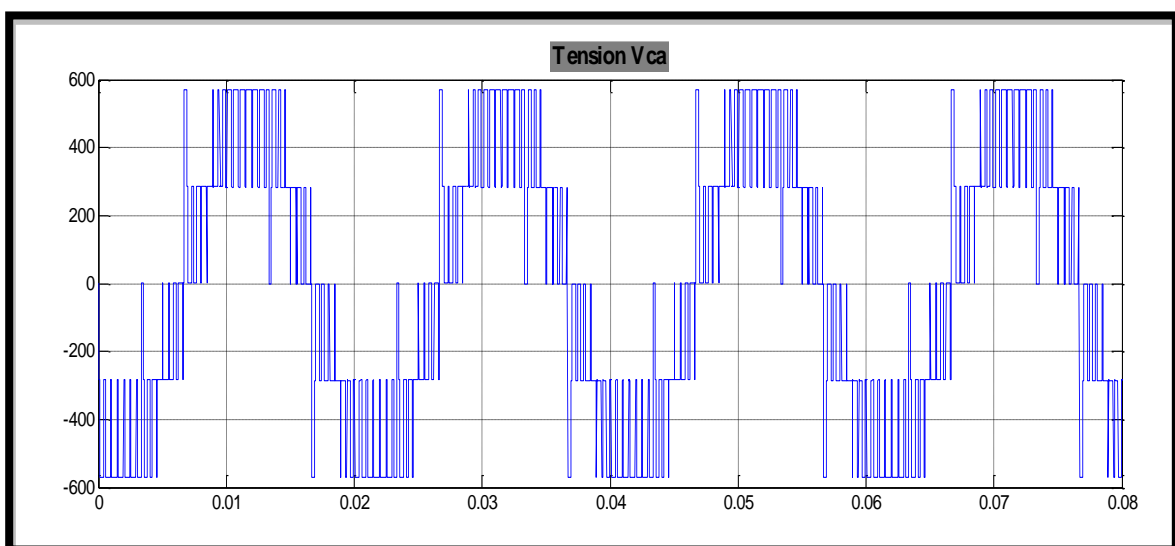
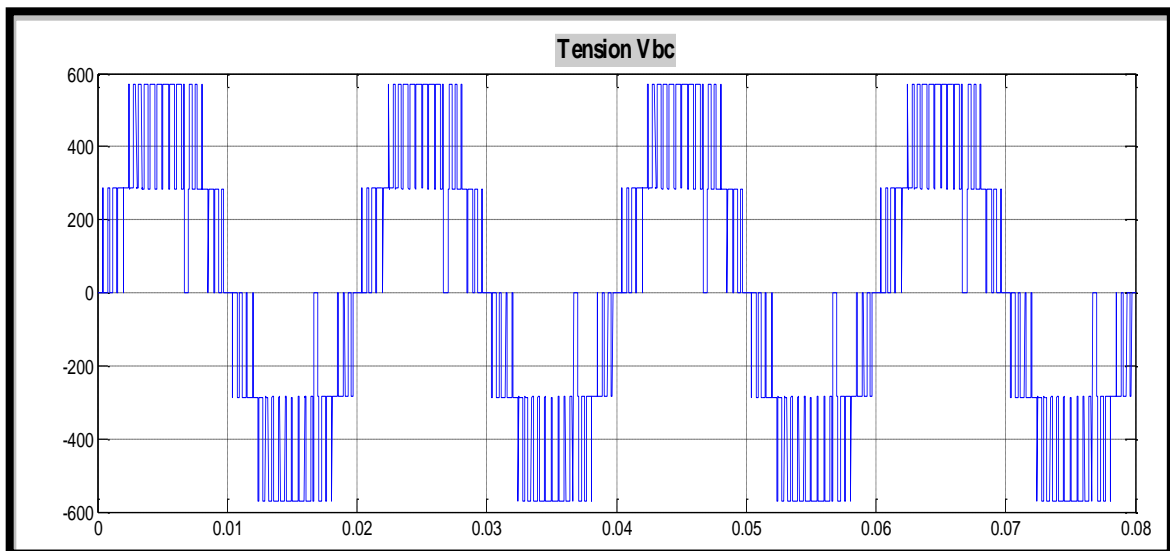
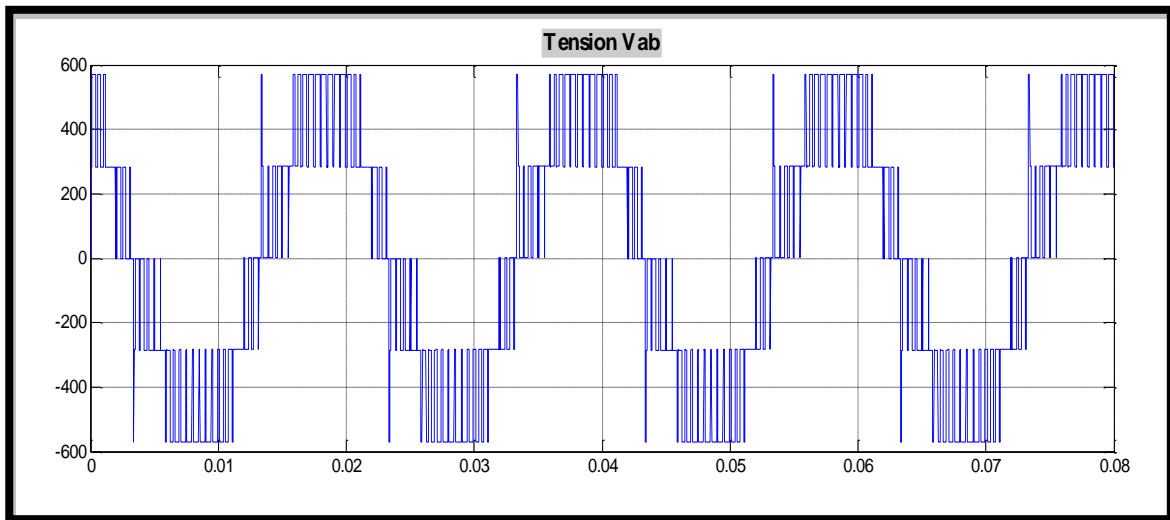


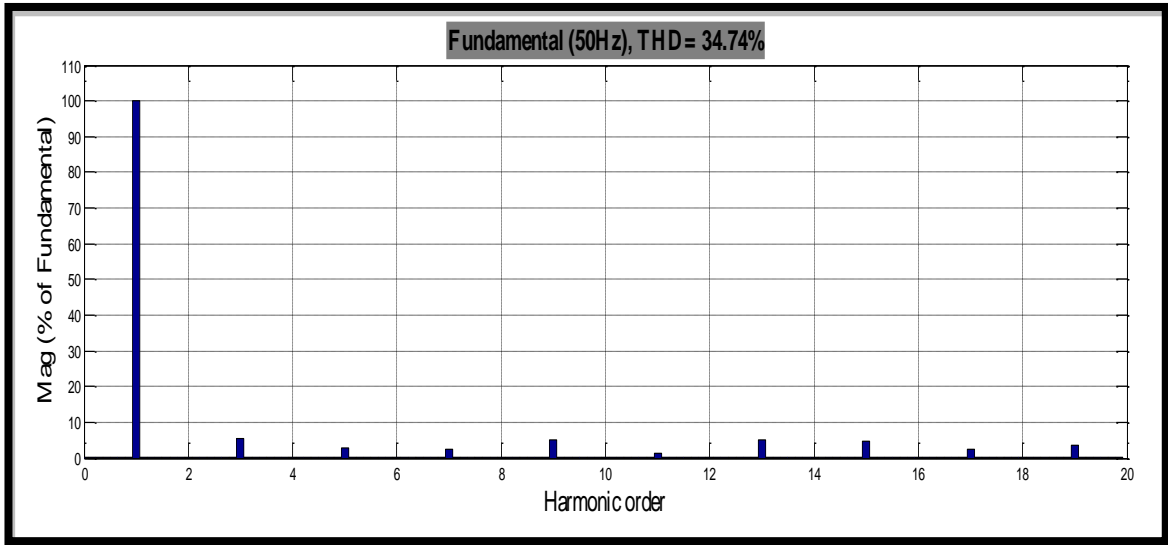


**Figure IV.3** Signaux de la commande MLI vectorielle, tensions de sortie et analyse spectral de la tension de sortie  
 Pour  $r = 0.8$   $m = 96$  (fréquence du fondamental = 50 HZ et THD = 9.10 %)

## IV.2.2 Commande MLI vectorielle de l'onduleur de tension à trois niveaux

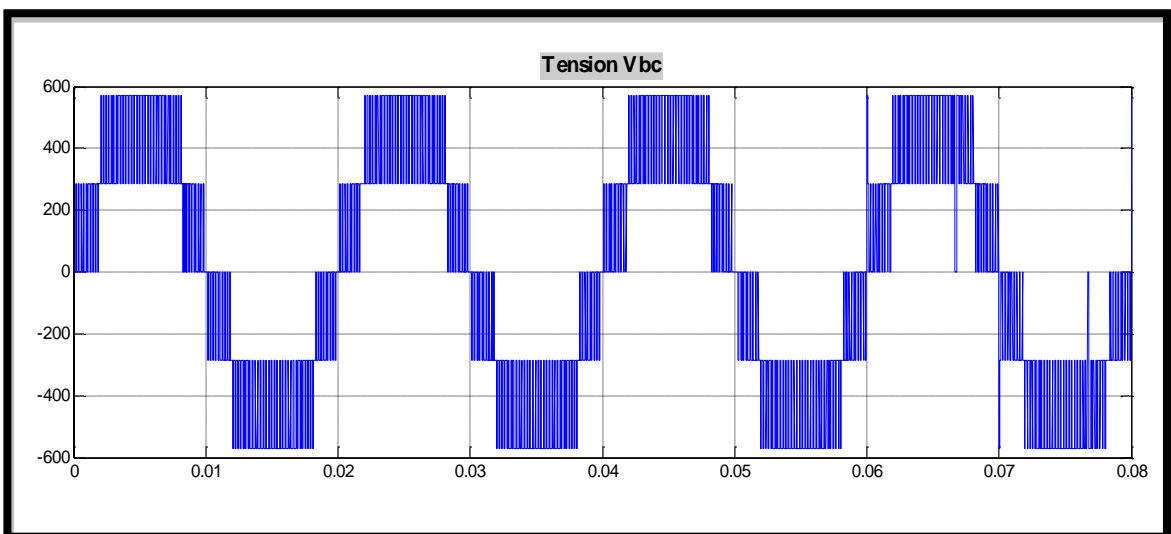
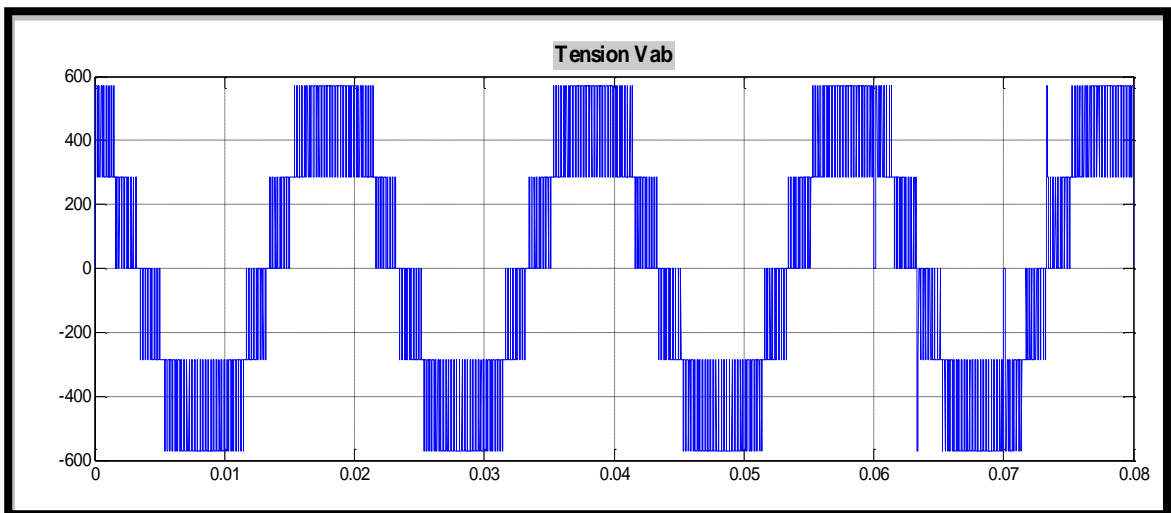
### IV.2.2.1 Pour $r = 0.8$ $m = 40$

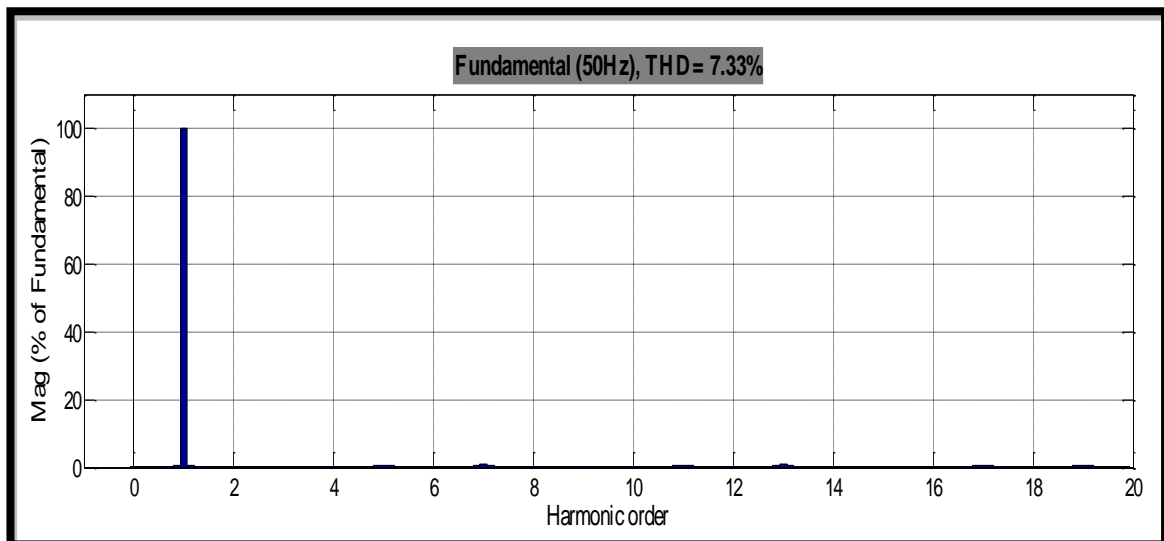
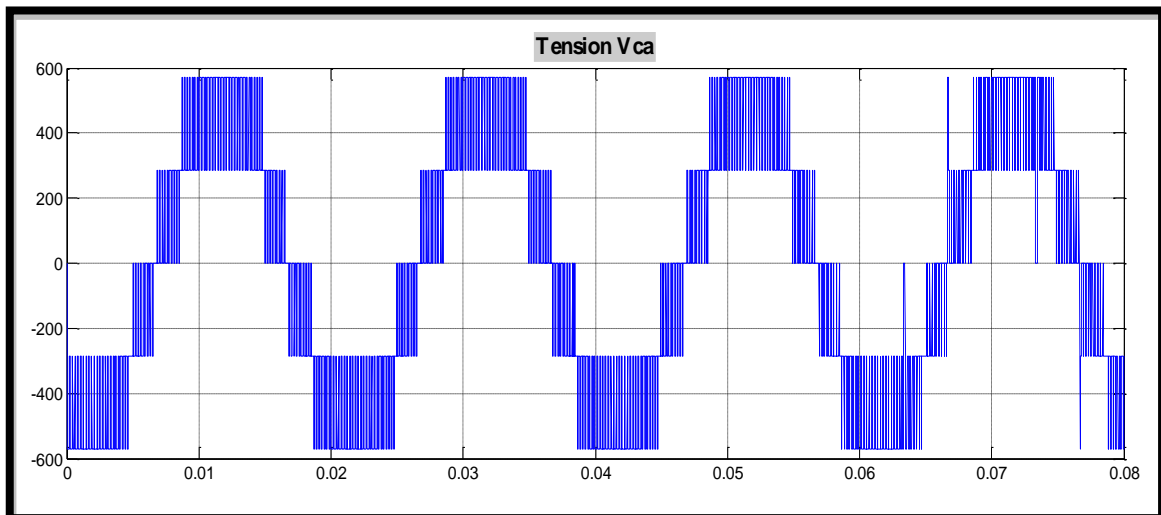




**Figure IV.4** Signaux de la commande MLI vectorielle, tensions de sortie et analyse spectral de la tension de sortie pour  $r = 0.8$   $m = 40$  (fréquence du fondamental = 50 HZ et THD = 34.74 %)

**IV.2.2.2 Pour  $r = 0.8$   $m = 96$**





**Figure IV.5 Signaux de la commande MLI vectorielle, tensions de sortie et analyse spectral de la tension de sortie pour  $r = 0.8$   $m = 96$  (fréquence du fondamental = 50 HZ et THD = 7.33 %)**

Les valeurs de distorsion totale des harmoniques obtenus, pour les tensions composées sont résumées dans le tableau suivant:

Les différentes techniques de commande Pour $r = 0.8$	THD de l'onduleur de tension à trois niveaux
Commande MLI sinusoïdal pour $m= 40$	41.50%
Commande MLI sinusoïdal pour $m= 96$	9.10%
Commande MLI Vectorielle pour $m= 40$	34.74%
Commande MLI Vectorielle pour $m= 96$	7.33%

Tableau. IV.1 Les valeurs de THD pour les différentes techniques de commande

### IV.3. Interprétation des résultats

après ces essais de simulation, On remarque que :

- A chaque fois en varie les valeurs de l'indice et le temps de modulation nous trouve que :
- Pour les faibles Valeurs de  $m$  leur allure n'est pas parfaitement sinusoïdale, mais avec l'augmentation de  $m$ , avec une petite réduction de  $r$  on commence à avoir un signal plus proche du signal sinusoïdale
- La qualité de la tension de sortie s'améliore avec l'augmentation de l'indice  $m$ .
- Pour une nette diminution du THD en augmente l'indice de modulation  $m$  jusqu'à  $m=96$  et le coefficient de réglage jusqu'à  $r=0.8$ .
- Pour les tensions composées et son spectre harmonique de l'onduleur à trois niveaux à MLI vectorielle, on constate que le taux de distorsion harmonique a diminué par rapport à l'onduleur à deux niveaux.

En comparant les performances obtenues dans le cas de l'onduleur à trois niveaux avec celles de l'onduleur à deux à niveaux, on constate que sous les mêmes conditions de fonctionnement (même indice de modulation et même taux de modulation), l'onduleur à trois niveaux produit une tension de sortie contenant moins d'harmoniques

## IV.4 Conclusion

Dans ce dernier chapitre, on a simulé l'onduleur de tension à trois niveaux contrôlé par la commande MLI sinusoïdale et vectorielle.

On remarque que la qualité du signal de sortie dans les deux cas s'améliore dans le cas des onduleurs multiniveaux. Néanmoins, l'algorithme de la modulation vectorielle se complique de plus en plus pour les onduleurs de niveaux plus élevés

On remarque aussi que la qualité de l'onde de tension à la sortie d'un onduleur de tension à trois niveaux de type NPC commandé par la MLI vectorielle est la meilleure par rapport à celle de la commande sinusoïdale

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

L'utilisation des convertisseurs statiques dans l'industrie est devenue un champ extrêmement vaste, car les équipements industriels utilisent de plus en plus d'entraînement à vitesse variable. Les onduleurs de tension sont largement utilisés pour la commande des moteurs asynchrones.

Nous avons commencé par la présentation de la généralité sur les onduleurs, différents types monophasés et triphasés, ainsi que leurs applications, principe de fonctionnement et une description des principales topologies des convertisseurs multiniveau avec leurs avantages et inconvénients. Ces topologies comprennent principalement la technique des onduleurs NPC à potentiels distribués.

L'utilisation de l'onduleur classique à deux niveaux dans le domaine des applications de forte puissance ne convient pas, car elle exige plusieurs limites, Pour contourner ces limites, on a proposé dans la littérature, les onduleurs multiniveaux qui permettent de générer une tension de sortie plus proche à la sinusoïdale. Les topologies utilisés d'onduleurs multiniveaux c'est celles à diodes bouclage, vue sa structure plus simple

Il est nécessaire d'établir la stratégie de commande de ces onduleurs de façon à générer une tension plus proche de la forme sinusoïdale. Pour cela différentes stratégies de modulation de largeurs d'impulsions ont été élaborées pour les onduleurs à deux et à trois niveaux dont la plus courante est la stratégie MLI vectorielle à cause de la simplicité de sa mise en œuvre. L'adaptation de cette technique aux onduleurs de niveaux supérieurs à deux est d'une grande diversité.

Nous avons étendu les notions connues pour la stratégie citée aux onduleurs à trois niveaux. Pour cela, nous avons appliqué deux techniques de commande, une à MLI sinusoïdal et MLI vectorielle pour la commande de l'onduleur à diodes bouclage. Les techniques de commande appliquées sur un onduleur de tension à diodes bouclage à deux et trois niveaux sont simulées et leurs performances comparées en terme de qualité de forme d'onde de tension de sortie tout en assurant la même amplitude de la composante fondamentale de cette tension de charge

La forme de la tension de sortie dépend également de la méthode utilisée pour la commande de l'onduleur. Dans le but de réduire les pertes de commutation et les harmoniques, et d'assurer une commande précise, la commande utilisée dans ce travail, c'est la modulation vectorielle.

Après simulation, On remarque que la qualité de l'onde de tension à la sortie d'un onduleur de tension à trois niveaux de type NPC commandé par la MLI vectorielle est la meilleure par rapport à celle de la commande sinusoïdale

## Référence bibliographique

- [1] **Sofiane Lallam** «Etude et réalisation d'un onduleur de tension monophasés multi niveaux », mémoire de fin d'études pour obtention du diplôme d'ingénieur d'état. Ecole militaire polytechnique.2007
- [2] **Kamel Merabet** « Commande d'un onduleurs triphasés basée sur la dispersion de la tension Triphasée », mémoire présente à l'université du Québec a Trois-Rivières Comme Exigence Partielle de la maitrise en génie électrique Maitrise. Université du Québec.2011
- [3] **HESPUL** « Les Onduleurs pour Systèmes Photovoltaïques Fonctionnement, Etat de l'Art et Etude des Performances »,2007
- [4] **Luc Lasne** « Electronique de puissance », Livre, Dunod 2ème édition, Paris, 2011, 2015.
- [5] **Abdelkader Boukaroura** « Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé par l'Approche Bond Graph », mémoire Présenté pour l'obtention du Diplôme de magister en électrotechnique. Université Ferhat Abbas de Sétif.2009
- [6] **Bouزيد Allal El Moubarak** « commande par la stratégie d'alimentation d'harmonique SHE d'un onduleur triphasés alimentant un moteur asynchrone », thèse de Magister, Ecole normale supérieurs d'Enseignement technique -Enset Oran.2009
- [7] **Farid Berrezzek** « Etude des Différentes Techniques de Commande des Onduleurs à MLI Associés à une Machine Asynchrone », Mémoire Présenté en vue d'obtention du diplôme de Magister, Université Badji Mokhtar Annaba.2006
- [8] **EL Hella Othmane Damene Aissa** « Etude De Stratégies De Commande Pour La Régulation Des Courants De La Machine Asynchrone », Master académique, Université Kasdi Merbah-Ouargla, 2013
- [9] **Faïçal Mnif** « Etude et Réalisation des lois de commande par mode de Glissement et par approche Géométrique: Application à un Onduleur De Tension Monophasés », Thèse présente à l'université du Québec a Trois-Rivières Comme Exigence Pour l'obtention du Déplume de maitrise sciences appliquées en électronique industrielle, Université du Québec.1991
- [10] **Houria Ben Zemammouch** « Application de la MLI Vectorielle aux Onduleurs Multi niveaux à base de GTO et d'IGBT », Mémoire Présenté en vue d'obtention du diplôme de Magister, Université Badji Mokhtar Annaba.2010
- [11] **international conference on electrical engineering and its application (ICCEEA'2008)** « Commande d'un onduleur avec des approches neuromimétiques pour la compensation des courants harmoniques dans les réseaux électriques sidi bel-Abbas, Alegria 2008.
- [13] **SALMI Salem** « commande par MLI vectorielle d'un onduleur a sept niveaux alimentant un moteur a cage » mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme de master en génie électrique. Université de m'sila 2011/2012
- [14] **Boucheritte wafa** « Convertisseurs multiniveaux dans les systèmes PV Connectés au réseau » Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister en Electrotechnique 01/2013
- [15] **Ammiche Abd ennour** «Commande des onduleurs multiniveaux de tension à diode flottante » mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme de master en génie électrique. Université de m'sila 2012/2013

- [16] **KORICHE Abdelmadjid** « Modélisation et commande d'un onduleur de tension multi niveaux de type ponts en cascade », mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme de master en génie électrique. Université de m'sila 2011/2012.

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DE DIPLOME  
DE MASTER EN GENIE ELECTRIQUE

SPECIALITE : RESEAUX ELECTRIQUES

Proposé et dirigé par : **Mr. CHOUAF Fathi**

Présenté par : **MANSOURI Abdallah.**

**Thème :**

**COMMANDE DES ONDULEURS MULTINIVEAUX**

**Résumé :**

Le travail proposé dans ce mémoire est l'application des différentes techniques de commandes aux onduleurs triphasés de tensions à trois niveaux de type NPC. On appliquant la SVM et la MLI sinusoïdale aux l'onduleur. Les résultats de simulation montrent quel type de commande nous donnera un THD réduit.

**Mots clés :** Onduleurs multi niveaux, convertisseur DC/AC, Onduleurs NPC à deux et trois niveaux

**Numéro d'ordre :** REs -231