

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



UNIVERSITE DE M'SILA  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE  
MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME  
DU MASTER EN GENIE ELECTRIQUE  
COMMANDE DES SYSTEMES ELECTRIQUE

## THEME

Commande des onduleurs multiniveaux de tension  
à diode flottante

Proposé et dirigé par :

- Mr : Benslimane Tarak

Présenté par:

- Ammiche Abd ennour

**Année Universitaire: 2012/2013**

N° d'ordre: 077



الحمد لله

## Remerciements

Je tiens de remercier **ALLAH** que me donne la force de faire ce modeste travail.

Je tiens à exprimer toute mes respectes à mes parents, mes frères et mes sœurs qui m'ont toujours encouragé.

Je remercie à tous les professeurs de départements d'Electrotechnique.

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

Avec tout l'amour et le respect pour ma fiancée .

**Ammiche Abd ennour**

**MERCI**





# Table des matières

# Table des matières

## Chapitre I : Généralités sur les onduleurs multi niveaux

I.1. Introduction .....	5
I.2. Principe de l'ondeur multiniveaux.....	6
I.3. Différentes topologies des onduleurs multiniveaux.....	7
I.3.1. Onduleur de tension à diodes de bouclage.....	7
I.3.2. Onduleur de tension à condensateurs flotteurs.....	9
I.3.3. Onduleurs multiniveaux en cascade.....	10
I.4. Autres topologies.....	12
I.5. Comparaison entre les trois principaux convertisseurs multiniveaux.....	12
I.6. Différentes stratégies de modulation.....	13
I.7. Conclusion.....	15

## Chapitre II : Description et modélisation des onduleurs 3 et 5 niveaux à diodes flottantes

II.1. Onduleur à trois niveaux de type diode flottante.....	17
II.1.1. Description.....	17
II.1.2. Principe de fonctionnement.....	18
II.2. Onduleur à cinq niveaux de type diode flottante.....	20
II.2.1. Description.....	20
II.2.2. Principe de fonctionnement.....	21
II.3. Généralisation de la structure à diode flottante à N niveaux.....	24
II.3.1. Description.....	24
II.3.2. Principe de fonctionnement.....	25
II.4. Modélisation d'un ondeur à trois et cinq niveaux à diode flottante.....	27
II.4.1. Introduction.....	27
II.4.2. Modélisation d'un ondeur à trois niveaux à diode flottante.....	27
II.4.2.1. Structure de l'ondeur à trois niveaux à structure diode flottante.....	27

II.4.2.2. Modélisation du fonctionnement d'un bras d'onduleur à diode flottante à trois niveaux.....	28
II.4.2.3. Différentes configurations d'un bras d'onduleur à trois niveaux.....	29
II.4.2.4. Hypothèse.....	31
II.4.2.5. Commandes complémentaires des onduleurs à trois niveaux.....	31
II.4.2.5.1. Fonction de connexion des interrupteurs.....	32
II.4.2.5.2. Fonction de connexion des demi –bras.....	32
II.4.2.5.3. Fonctions de conversion.....	33
II.4.3. Modélisation du bras de l'onduleur à cinq niveaux à diode flottante.....	35
II.4.3.1. Commande complémentaire.....	37
II.5. Conclusion.....	38

## **Chapitre III : Stratégie de Commande des onduleurs multiniveaux**

III.1. Introduction.....	41
III.2. Techniques de commande de l'onduleur triphasée.....	41
III.2.1. Généralités sur les MLI.....	41
III.2.2. Objectif de la Technique MLI.....	41
III.3. Techniques de commande MLI : .....	42
III.4. Structures de MLI.....	42
III.5. Différentes stratégies de commande.....	43
III.5.1. Commande en pleine onde.....	43
III.5.2. Commande MLI sinusoïdale.....	44
III.5.2.1. MLI à porteuses alternées (APOD).....	44
III.5.2.1. 1. Algorithme de commande.....	44
III.5.2.2. MLI à porteuses en phases (PD).....	45
III.5.2.2. 1. Algorithme de commande.....	45
III.5.2.3. MLI à porteuses en oppositions (POD).....	45
III.5.2.2. 1. Algorithme de commande.....	46
I.6. CONCLUSION.....	46

## **Chapitre IV : Simulation et interprétation des résultats**

IV. Simulation et interprétation des résultats.....	48
IV.1. Introduction.....	48
IV.2. Commande pleine onde.....	48
IV.3. Commande MLI avec porteuses en opposition de phase deux par deux décalées verticalement.....	51
IV.4. Commande MLI avec porteuses en phase décalées verticalement.....	56
IV.5. Conclusion.....	61
Conclusion générale.....	63
Bibliographie	



**Liste des figures et Liste  
des tableaux**

# Liste des figures

Figure I. 1 : Onduleur à niveaux multiples à deux (a), à trois (b) et à m niveaux (c).....	6
Figure I. 2 : Différentes topologies des convertisseurs multiniveaux.....	7
Figure I. 3 : Schéma d'un onduleur à diode flottante à 3 niveaux.....	8
Figure I. 4 : Schéma d'un onduleur à diode flottante à 5 niveaux.....	8
Figure I. 5 : schéma d'onduleur cellules imbriquées à 3 niveaux.....	9
Figure I. 6 : schéma d'onduleur cellules imbriquées à 5 niveaux.....	10
Figure I. 7: structure d'un convertisseur N niveaux en cascade.....	11
Figure I. 8: structure d'un convertisseur polygonale N niveaux.....	11
Figure II. 1: Schéma d'un onduleur à diode flottante à trois niveaux.....	17
Figure II. 2: Bras d'un onduleur à diode flottante à trois niveaux.....	18
Figure II. 3 : Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé à diode flottante à trois niveaux..	20
Figure II. 4 : Schéma d'un onduleur à diode flottante à cinq niveaux .....	21
Figure II. 5 : Bras d'un onduleur à diode flottante à cinq niveaux.....	22
Figure II. 6 : Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé à diode flottante à cinq niveaux .	24
Figure II. 7: Bras d'onduleur à diode flottante à N niveaux de tension .....	25
Figure II. 8 : Structure de l'onduleur triphasé à trois niveaux à structure diode flottante .....	28
Figure II. 9 : Structure d'un bras d'onduleur triphasé à trois niveaux .....	28
Figure II. 10 : Interrupteur bidirectionnel équivalent de la paire diode-transistor.. .....	29
Figure II. 11 : Différentes configurations possibles pour un bras d'onduleur.....	30
Figure II. 12 : Structure de l'onduleur triphasé à trois niveaux à structure à diode flottante ..	35
Figure II. 13 : Différentes configurations possibles pour un bras d'onduleur à cinq niveaux.....	37
Figure III. 1 : Les différentes stratégies de modulation pour la commande des onduleur.....	45
Figure III. 2 : porteuse alternée.....	47

Figure III. 3 : porteuse en opposition.....	48
Figure III. 4 : porteuse en phase.....	49
figure IV.1: Signaux de la commande pleine onde, tensions de sortie et analyse spectral de la tension de sortie de la première phase ( $v_{ao}$ ) (Amplitude du fondamental de $v_{ao}=350$ V, fréquence du fondamental de $v_{ao}=50$ Hz et <b>THD</b> = 25.5 % ).....	53
figure IV. 2: Tensions simples de la charge, analyse spectrale de la tension de la première phase de la charge ( $v_{an}$ ) (Amplitude du fondamental de $v_{an}=350$ V fréquence du fondamental de $v_{an}=50$ Hz et <b>THD</b> = 18 %) et courants de charge.....	54
figure IV.3: Signaux de référence avec porteuses en opposition de phase deux par deux, analyse spectrale d'un des trois signaux de référence, tensions de sortie et analyse spectral de la tension de sortie de la première phase ( $v_{ao}$ ) (Amplitude du fondamental de $v_{ao}=350$ V , fréquence du fondamental de $v_{ao}=50$ Hz et fréquence des porteuses $f_p=21*50$ Hz ) .....	56
figure IV.4: Tensions simples de la charge, analyse spectrale de la tension de la première phase de la charge ( $v_{an}$ ) (Amplitude du fondamental de $v_{an}=350$ V fréquence du fondamental de $v_{an}=50$ Hz et et fréquence des porteuses $f_p=21*50$ Hz ) et courants de charge.....	57
figure IV.5: Signaux de référence avec porteuses en opposition de phase deux par deux, analyse spectrale d'un des trois signaux de référence, tensions de sortie et analyse spectral de la tension de sortie de la première phase ( $v_{ao}$ ) ( <b>THD</b> de $v_{ao}=33.5$ % , amplitude du fondamental de $v_{ao}=350$ V , fréquence du fondamental de $v_{ao}=50$ Hz et fréquence des porteuses $f_p=50*50$ Hz ) .....	58
figure IV.6: Tensions simples de la charge, analyse spectrale de la tension de la première phase de la charge ( $v_{an}$ ) ( <b>THD</b> de $v_{an}=29$ % , amplitude du fondamental de $v_{an}=350$ V fréquence du fondamental de $v_{an}=50$ Hz et et fréquence des porteuses $f_p=50*50$ Hz ) et courants de charge.....	59

figure IV.8: Signal de référence avec porteuses en phase, analyse spectrale d'un des trois signaux de référence, tensions de sortie et analyse spectral de la tension de sortie de la première phase ( vao ) ( <b>THD</b> de vao=33.3%, amplitude du fondamental de vao=355V , fréquence du fondamental de vao=50Hz et fréquence des porteuses fp=21*50Hz )	61
figure IV.9: Tensions simples de la charge, analyse spectrale de la tension de la première phase de la charge ( van ) ( <b>THD</b> de van=17 %, amplitude du fondamental de van=355 V fréquence du fondamental de van=350 Hz et et fréquence des porteuses fp=21*50Hz ) et courants de charge	62
figure IV.10: Signaux de référence avec porteuses en phase, analyse spectrale d'un des trois signaux de référence, tensions de sortie et analyse spectral de la tension de sortie de la première phase ( vao ) ( <b>THD</b> de vao=33.5 %, amplitude du fondamental de vao=355 V , fréquence du fondamental de vao=50Hz et fréquence des porteuses fp=50*50Hz )	63
figure IV.11: Tensions simples de la charge, analyse spectrale de la tension de la première phase de la charge ( van ) ( <b>THD</b> de van=17 %, amplitude du fondamental de van=355 V fréquence du fondamental de van=50Hz et et fréquence des porteuses fp=21*50Hz ) et courants de charge	64

# Liste des tableaux

Tableau I. 1: Comparaison entre les trois topologies de base des convertisseurs multiniveaux au niveaux de composant électronique.....	12
Tableau II. 1 : États possibles d'un bras de l'onduleur à diode flottante à trois niveaux.....	23
Tableau II. 2 : États possibles d'un bras de l'onduleur à diode flottante à cinq niveaux .....	23
Tableau II. 3 : États possibles d'un bras de l'onduleur à diode flottante à N niveaux.....	26
Tableau II. 4 : Grandeurs électriques correspondantes pour chacune des configurations d'un bras K.....	29
Tableau II. 5 : Tableaux d'excitation associée à la commande complémentaire proposée ....	32
Tableau II. 6 : Grandeurs électriques pour chacune des configurations d un bras .....	36
Tableau II. 7 : Tableau des excitations relatives des cellule .....	38

## Liste des notations

$MLI$	Modulation de Largeur d'Impulsion.
$NPC$	Neutral Point Clamping
$U_c(V)$	Source de tension continue de l'onduleur.
$V_{ABCM}(V)$	Tension de demi-bras A, B ou C
$V_{ABC}(V)$	Tension de sortie de l'onduleur A, B ou C.
$V_{réf123}(V)$	Tension de références 1, 2 ou 3 (sinusoïdal).
$V_m(V)$	Amplitude de la tension de référence.
$V_p(V)$	Porteuse triangulaire.
$V_{pm}(V)$	Amplitude de la porteuse triangulaire.
$\omega(rad/s)$	Pulsation électrique.
$f_{réf}(Hz)$	Fréquence de la tension de référence.
$f_p(Hz)$	Fréquence de la porteuse triangulaire.
$m$	Indice de modulation.
$r$	Taux de modulation.
$H_f(V)$	Harmonique fondamental.
$h_n(V)$	Harmonique de rang n.
$THD = \sqrt{\sum_{n=3}^i h_n^2} / H_f$	Taux de distorsion harmonique.



# Introduction générale

## Introduction générale :

La valeur limitée de la tension de blocage des interrupteurs réalisables jusqu'à présent est à la base du développement des onduleurs multiniveaux. Cette valeur limite est repoussée au fil de l'amélioration des techniques de réalisation, mais elle est toujours inférieure à une dizaine de kV, et ne devrait franchir cette limite qu'avec l'avènement de nouvelles technologies. Cette tension est inférieure à la tension de service des équipements haute tension. Pour aller au-delà de ces limitations, nous disposons de deux possibilités :

La réalisation de macro-interrupteurs [1, 2]. Ces macro-interrupteurs sont obtenus en associant en série des interrupteurs de tension de blocage inférieure à la tension de service souhaitée. Cette technique présente l'inconvénient de nécessiter la mise en place de résistances d'équilibrage, afin que la tension à l'état bloqué se répartisse uniformément entre les différents éléments constituant le macro-interrupteur.

La réalisation d'un convertisseur multi-niveaux. Cette méthode consiste à employer un convertisseur de topologie plus complexe. Le nombre d'interrupteurs utilisés est du même ordre que pour le convertisseur constitué de macro-interrupteurs, mais les éléments sont associés de manière différente. La commande nécessite davantage de signaux, mais le convertisseur résultant présente de meilleures performances. En plus de permettre d'obtenir une tension de service plus élevée sans recourir à des macro-interrupteurs, l'adoption d'un convertisseur multi-niveau présente d'autres avantages :

La résolution obtenue est plus élevée, le convertisseur est capable de générer plus que deux ou trois niveaux. Le réglage de la tension est plus fin, ce qui permet de réduire les contraintes imposées à la charge qui subit sans cela une tension qui commute entre ses deux valeurs maximales. La taille des filtres passifs parfois nécessaires pour limiter ces sollicitations peut être réduite. Dans le même temps, le système gagne une plus grande dynamique et cela permet un réglage plus rapide. La tension commutée est réduite à la valeur du pas du convertisseur, c'est-à-dire à la valeur de tension bloquée par ses interrupteurs. Cela réduit d'autant les pertes par commutation. D'autre part, la fréquence de pulsation de chacun de ses éléments est plus basse que la fréquence de pulsation apparente de la tension appliquée à la charge. Cela autorise une augmentation de cette fréquence de pulsation qui permet une réduction de la dimension des filtres ou une amélioration de la qualité des signaux filtrés.

En terme de production, selon la topologie choisie, il est possible de réaliser un convertisseur modulaire composé de modules identiques. Le nombre de modules peut éventuellement être adapté à la tension de service du convertisseur.

Moyennant un accroissement de complexité et de coût, il est imaginable d'avoir des modules redondants permettant la poursuite du fonctionnement du convertisseur en cas de défaillance de modules [3]. Il ne faut toutefois pas trop s'enthousiasmer sur le gain possible en terme de fiabilité, car l'augmentation de complexité va généralement de pair avec la diminution de la fiabilité. En effet, le nombre de défaillances possibles augmente considérablement, il est donc difficile de prévoir ce qui va se passer suite à la défaillance d'un ou de plusieurs modules. Prévoir les moyens de maîtriser la situation dans tous les cas de figure possibles est théoriquement possible, mais cela représente un sérieux défi qui ne figure pas parmi les objectifs de ce travail. Du point de vue des performances, il est donc intéressant d'utiliser des convertisseurs multi-niveaux, même lorsqu'une structure simple est réalisable sans l'aide de macro-interrupteurs. L'attrait des convertisseurs multi-niveaux est toutefois limité par quelques inconvénients.

La commande est beaucoup plus complexe et les techniques sont encore peu répandues dans l'industrie. Sauf lorsqu'on prévoit des modules redondants, l'accroissement de la complexité du système entraîne une diminution de sa fiabilité. Même à nombre de composants égal, ces convertisseurs sont plus coûteux. En effet, en utilisant des macro-interrupteurs, la commande ne diffère pas de celle d'un convertisseur simple, en revanche en utilisant une structure plus complexe, le nombre de signaux différents à gérer augmente.

Dans ce travail, nous nous pencherons surtout sur les applications basse et moyenne tension où la performance est privilégiée. Les performances nous intéressant plus particulièrement sont le rendement du convertisseur et la qualité de sa tension de sortie, celle-ci étant essentiellement exprimée en terme de résolution obtenue pour cela, nous intéressons aux convertisseurs multi-niveaux qui sont utilisés pour l'alimentation à fréquence variable des machines alternatives de forte puissance.

Plusieurs structures de ces convertisseurs multi-niveaux ont été proposées. On peut citer les onduleurs multi-niveaux à cellules imbriquées, les onduleurs multi-niveaux à diodes flottantes et ceux à structure diode flottante. Dans le cadre de notre travail, nous traitons une structure de convertisseurs multi-niveaux : onduleur de tension à trois et cinq niveaux à structure diode flottante. Ce dernier permet d'augmenter la puissance délivrée à la charge grâce à sa topologie. Ainsi, il permet de générer une tension la plus sinusoïdale possible, et d'améliorer le taux d'harmoniques grâce au nombre élevé de niveaux de tension offert par la structure de ce nouveau convertisseur. L'utilisation de ce dernier dans les domaines de haute tension et forte puissance permet de résoudre simultanément les difficultés relatives à l'encombrement et à la commande des groupements d'onduleurs à deux niveaux généralement utilisés dans ce type d'applications.

Nous citons quelques domaines d'application des onduleurs multi-niveaux :

- Production des tensions sinusoïdales de fréquences moyennes (de quelques kHz à quelques 10Khz): soudage...
- Alimentations alternatives de secours fonctionnant sur batteries d'accumulateurs, chauffage à induction....
  - Alimentation des moteurs à courant alternatif à fréquence variable.

# Chapitre I

## Généralités sur les onduleur multi niveaux

### dans le chapitre

I.1. Introduction .....	5
I.2. Principe de l'onduleur multiniveaux.....	6
I.3. Différentes topologies des onduleurs multiniveaux.....	7
I.3.1. Onduleur de tension à diodes de bouclage.....	7
I.3.2. Onduleur de tension à condensateurs flotteurs.....	9
I.3.3. Onduleurs multiniveaux en cascade.....	10
I.4. Autres topologies.....	12
I.5. Comparaison entre les trois principaux convertisseurs multiniveaux.....	12
I.6. Différentes stratégies de modulation.....	13
I.7. Conclusion.....	15

## I.1. Introduction

La technologie de conversion de l'énergie du continu vers l'alternatif en utilisant Les convertisseurs statiques est une partie de l'électronique de puissance en pleine croissance. Cela tient essentiellement à deux raisons [4] :

La première est l'étendue du domaine de leurs applications ;

La seconde vient de l'amélioration des performances des semi-conducteurs de puissance et de l'apparition de nouveaux composants permettant l'implantation de nouvelles stratégies de commande plus performantes.

La demande en puissance des applications industrielles a augmenté considérablement ces dernières années, jusqu'à atteindre l'ordre de quelque mégawatts (de l'ordre de 10MW) pour les basses et moyennes tensions. L'utilisation de convertisseurs conventionnels à deux niveaux, à grandes fréquences de commutation, est limitée à ce niveau de puissance à cause des pertes non négligeables engendrées par la commutation des interrupteurs. En plus on se trouve obligé d'associer plusieurs interrupteurs en série et en parallèle afin de respecter les limites physiques des interrupteurs utilisés. Donc l'utilisation des convertisseurs multiniveaux dans les applications de moyenne et haute puissances est proposée comme une solution à l'handicap technologique des semi-conducteurs.

Le concept de convertisseurs multiniveaux a été mis en place depuis 1975. Le terme multiniveaux a commencé avec les convertisseurs à trois niveaux. ultérieurement, plusieurs topologies de convertisseurs multiniveaux ont été développées.

L'onduleur multiniveaux présente plusieurs avantages, parmi lesquels on peut mentionner :

- La qualité d'onde : les convertisseurs multiniveaux peuvent non seulement générer les tensions de sortie avec une distorsion très faible, mais peut aussi réduire le  $dV/dt$  souligné, donc certains problèmes de compatibilité électromagnétique (CEM) peuvent être réduits.
- La tension de mode commun : les convertisseurs multiniveaux produisent une tension de mode commun plus réduite, donc une durée de vie des moteurs plus importante quand ils sont utilisés pour les entraînements électriques. En outre, la tension de mode commun peut être éliminée en utilisant des stratégies de modulation avancées telles que celle proposée dans.
- Courant d'entrée : les convertisseurs multiniveaux peuvent tirer un courant d'entrée avec une faible distorsion.

➤ Fréquence de découpage : les convertisseurs multiniveaux peuvent fonctionner à la fois à la fréquence fondamentale et à une fréquence de découpage élevée (MLI).

Il convient de noter qu'une faible fréquence de commutation signifie généralement des pertes réduites, donc un gain plus élevé dans le rendement du convertisseur.

Malheureusement, les convertisseurs multiniveaux présentent quelques inconvénients. Un désavantage particulier est un plus grand nombre de semi-conducteurs de puissance nécessaires, par rapport aux convertisseurs classiques.

## I.2. Principe de l'onduleur multiniveaux

Ce paragraphe a pour but d'introduire le principe général du comportement multiniveaux. La figure 1.1 aide à comprendre comment travaillent les convertisseurs multiniveaux [5, 6]. Un convertisseur à deux niveaux est représenté à la figure I.1.a, dans laquelle les commutateurs semi-conducteurs ont été remplacés par un interrupteur idéal.

La tension de sortie ne peut prendre que deux valeurs: 0 ou  $V_{dc1}$ . Sur la figure I.1.b, la tension de sortie de trois niveaux peut prendre trois valeurs: 0,  $V_{dc1}$  ou  $V_{dc1} + V_{dc2}$ .

dans la figure I.1.c le cas général de m niveaux est présenté [7].

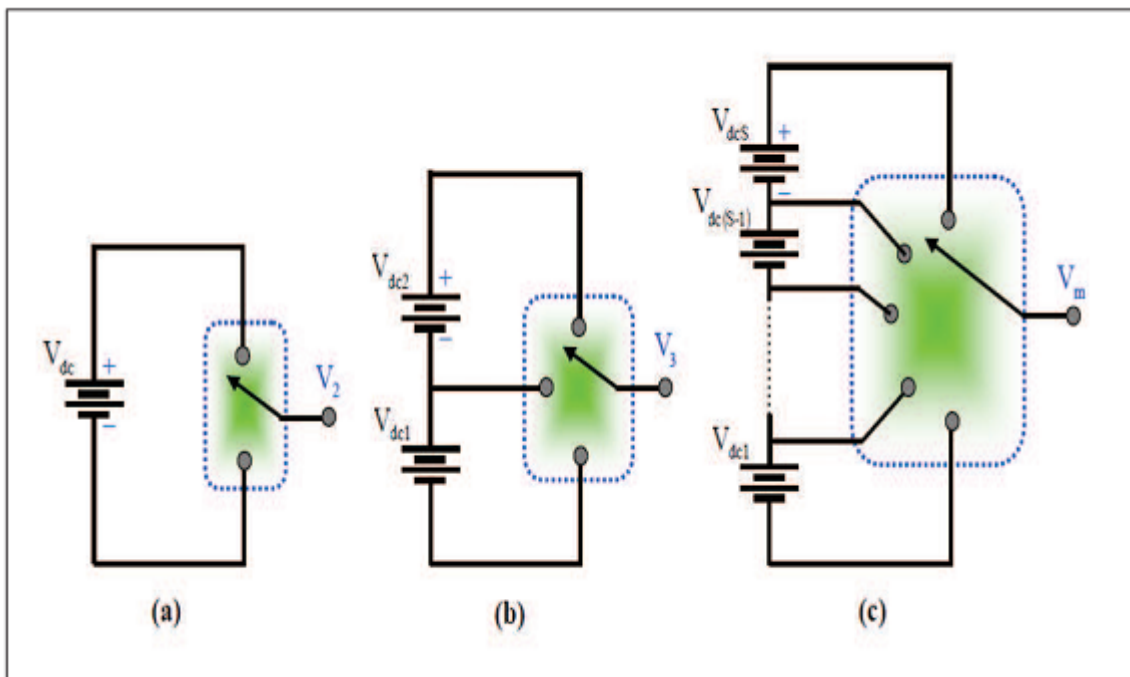


Figure I. 1 : Onduleur à niveaux multiples à deux (a), à trois (b) et à m niveaux (c)

En général, les convertisseurs multiniveaux peuvent être vus comme des synthétiseurs de tension, dans lesquels la tension de sortie est synthétisée à partir de plusieurs niveaux de tension discrets.

### I.3. Différentes topologies des onduleurs multiniveaux

La figure 1.2 représente les topologies des onduleurs multiniveaux les plus récentes

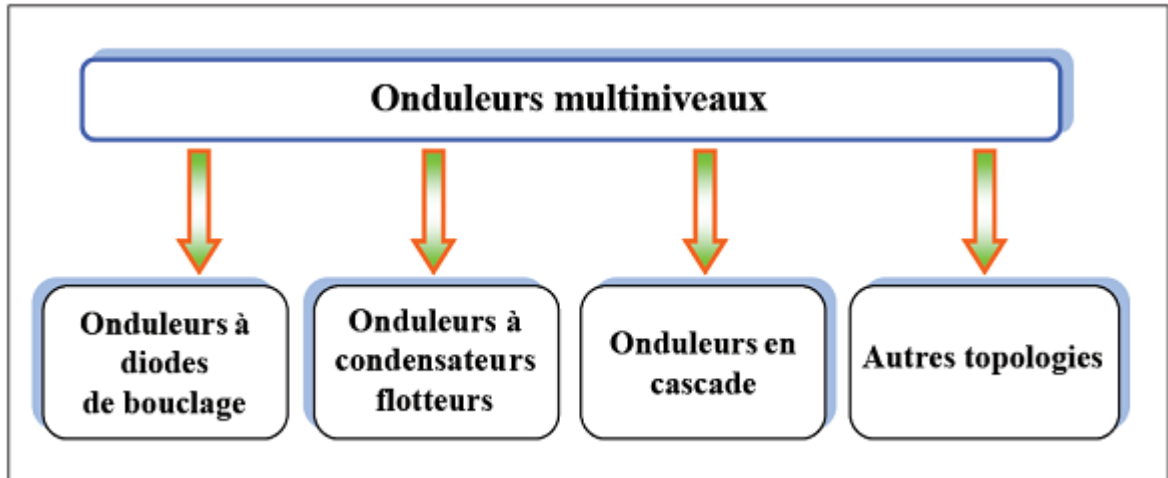


Figure I. 2 : Différentes topologies des convertisseurs multiniveaux

#### I.3.1. Onduleur de tension à diodes flottante

La structure de ce type d'onduleurs est la plus utilisée. On associe à chaque phase des diodes appelées diodes flottantes, qui sert à appliquer les différents niveaux de tension de la source continue. Par rapport à l'onduleur à capacités flottantes, on n'a pas besoin d'utiliser des capacités pour chaque phase, ce qui élimine les risques des résonances parasites. Néanmoins, Il se pose le problème d'équilibrage des tensions aux bornes des capacités de source continue.

La résolution de ce problème est plus simple dans le cas de l'onduleur à diodes flottantes par rapport au cas de l'onduleur à capacités flottantes, vu le nombre réduit des capacités utilisées. A la suite de ce travail, on se limite à l'étude de l'onduleur multi-niveaux à diodes flottantes.

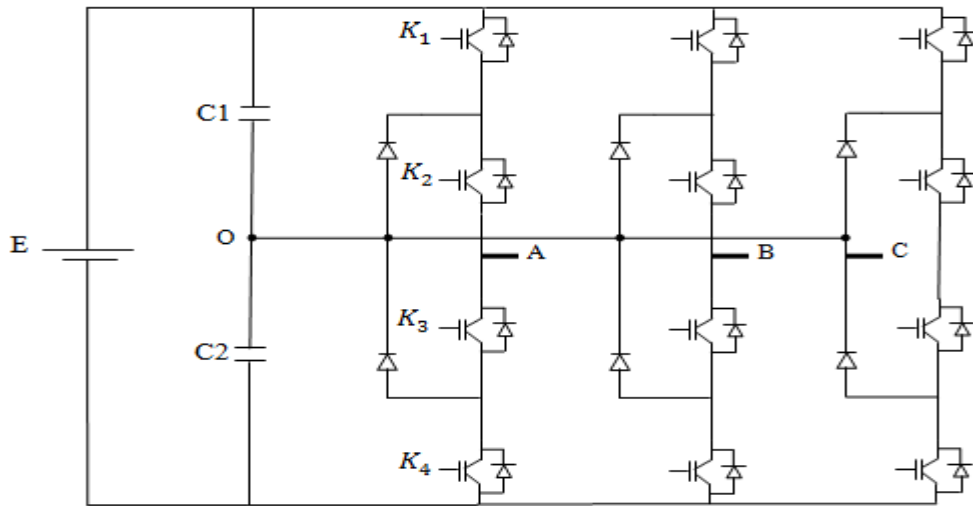


Figure I. 3 : Schéma d'un onduleur à diode flottante à 3 niveaux

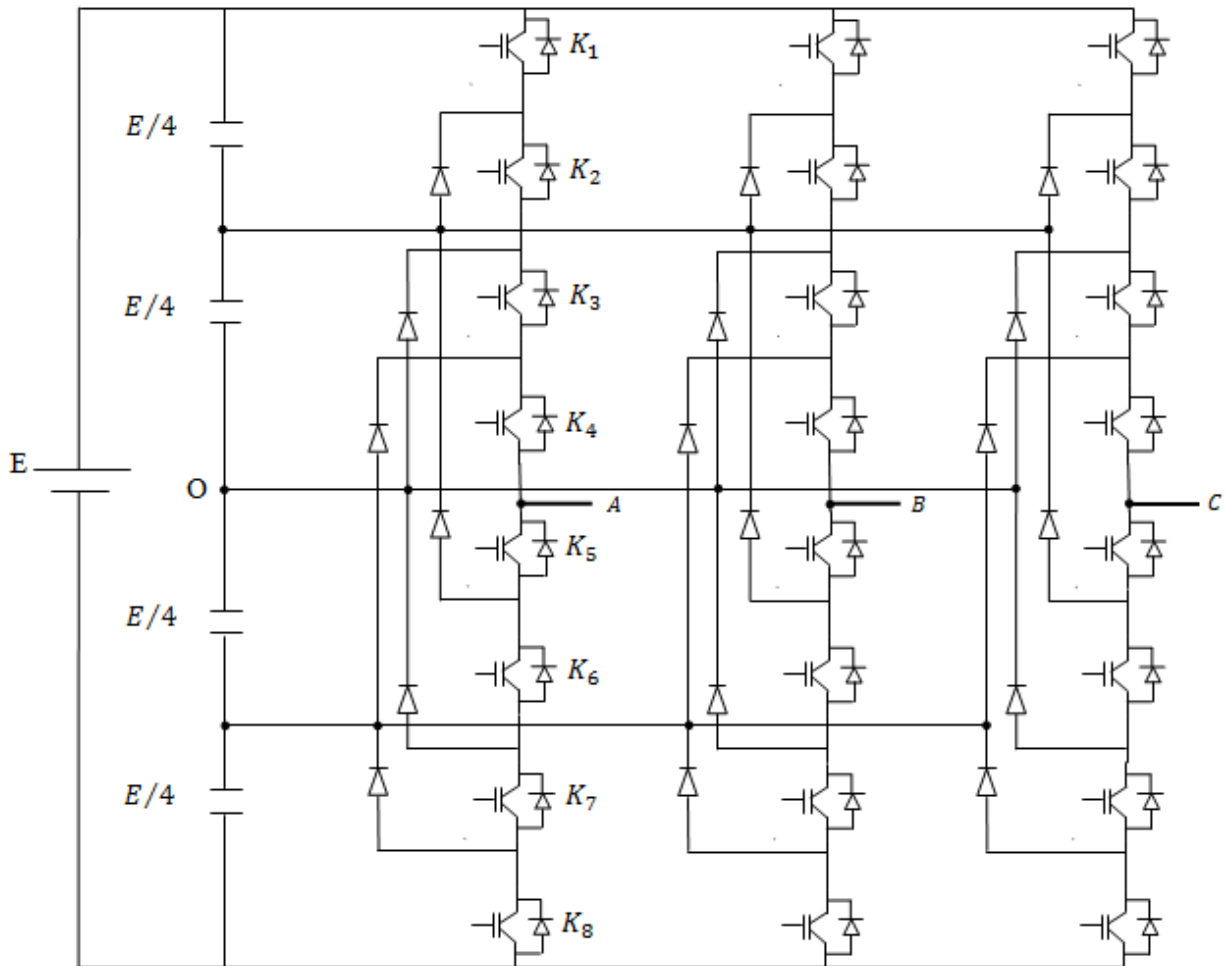


Figure I. 4 : Schéma d'un onduleur à diode flottante à 5 niveaux

### I.3.2. Onduleur de tension à condensateurs flottants

La topologie de l'onduleur multi-niveaux à condensateur flotteur (flying capacitor Multilevel inverter), donnée par la figure 1.5, a été proposée en 1992 [8]. Elle est considérée comme l'alternative la plus sérieuse à la topologie de l'onduleur à diode flottante. L'avantage de cette topologie est qu'elle élimine le problème des diodes de bouclage présents dans les topologies des onduleurs à diode flottante multi-niveaux.

En plus, cette topologie limite naturellement les contraintes en tension imposées aux composants de puissance (faible valeur de  $dv/dt$  aux bornes des composants) et introduit des états de commutation additionnelles qui peuvent être utilisés pour aider à maintenir l'équilibre des charges dans les condensateurs.

La topologie de l'onduleur à condensateur flotteur a assez d'états de commutation pour contrôler l'équilibre des charges dans chaque bras d'onduleur ayant n'importe quel nombre de niveaux, ce qui n'est pas le cas dans l'onduleur à diode flottante.

Actuellement il semble que cette topologie a quelques inconvénients. Néanmoins, quelques points faibles doivent toujours être explorés :

le contrôleur de la charge du condensateur ajoute la complexité au contrôle du circuit entier.

La topologie de l'onduleur à condensateur flotteur à multi-niveaux peut exiger plus de condensateurs que la topologie de l'onduleur à diode flottante. 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.

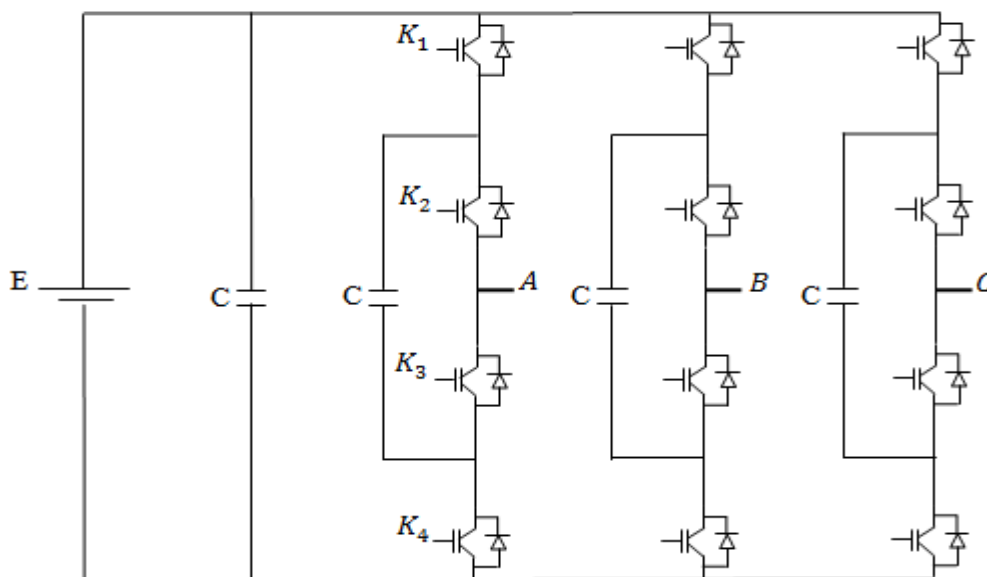


Figure I. 5 : Schéma d'onduleur cellules imbriquées à 3 niveaux

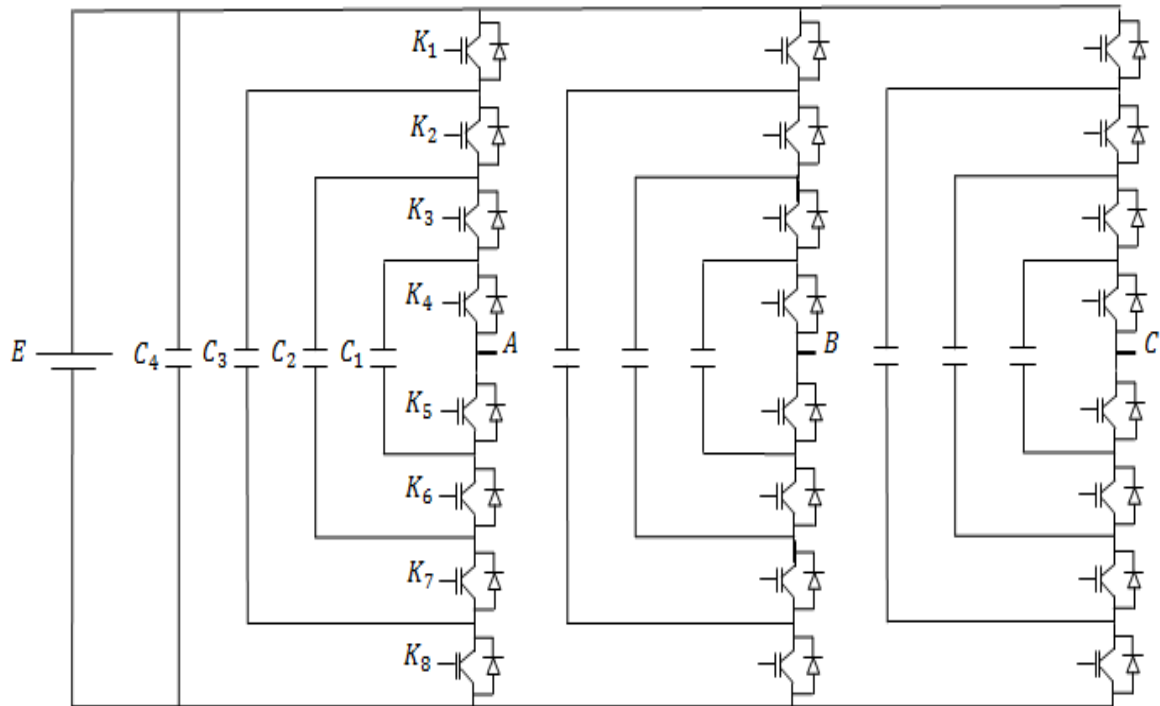


Figure I. 6 : Schéma d'onduleur cellules imbriquées à 5 niveaux

### I.3.3. Onduleurs multiniveaux en cascade

En 1975, dans les auteurs ont proposé un convertisseur multiniveaux en cascade qui consistait en la mise en série de plusieurs ponts à deux niveaux monophasé ; ces ponts étant connectés à des sources de tension continues séparées. La figure (I.7) Montre le schéma de base d'un convertisseur  $N$  niveaux en cascade formé par l'association en série de  $N-1/2$  ponts à deux niveaux. La tension  $V_s$  en sortie d'une telle structure est donnée par la somme des  $N-1/2$  tensions en sortie des ces ponts.

Une autre alternative consiste à envisager de mettre en série plusieurs ponts monophasé alimentés par une même source de tension continue  $E_c$  figure (I.8). Cette structure est appelée polygonale et l'utilisation d'un transformateur d'isolement à la sortie de chaque pont est obligatoire pour connecter les sortie alternative de chaque pont.

Il est à noter cependant que pour ces deux structures, l'encombrement (et par conséquent l'augmentation du coût) de l'installation reste des handicaps pénalisants. En effet, pour l'obtention d'une tension de sortie à  $N$  niveaux, il faudra disposer de  $(N-1)/2$  pont monophasé par bras. Chaque à la valeur doit être dimensionné pour le courant de charge et pour une tension continue égale à la valeur maximal de la tension en sortie du bras divisée par  $N$  (ceci est valable dans le cas des onduleurs polygonaux pour un rapport de transformation unitaire).

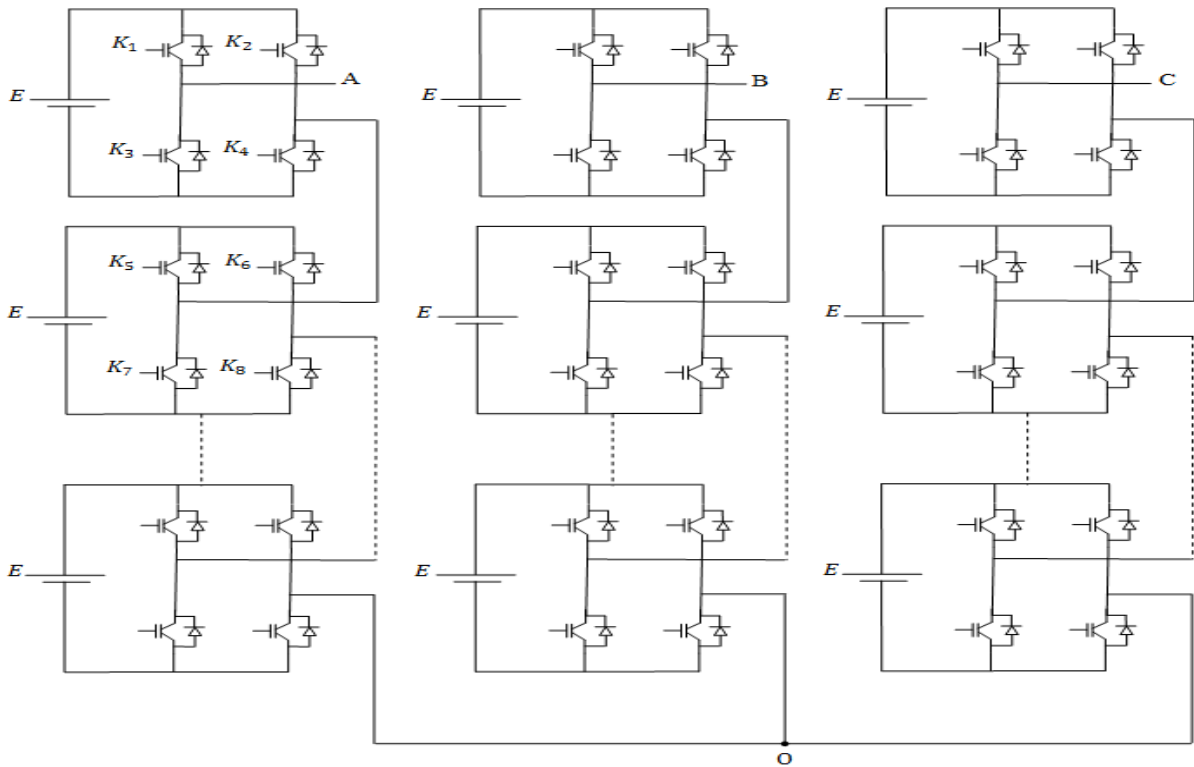


Figure I. 7: Structure d'un convertisseur N niveaux en cascade

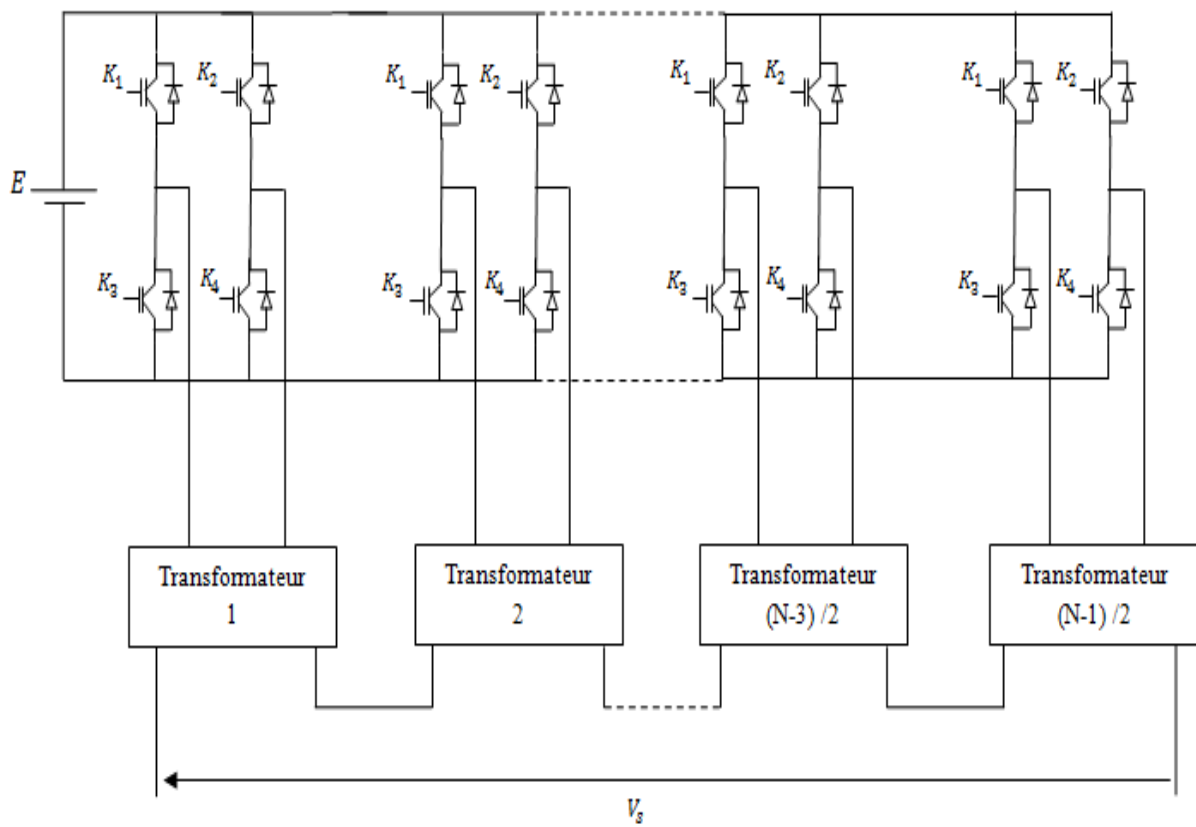


Figure I. 8: Structure d'un convertisseur polygonale N niveaux

#### I.4. Autres topologies

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

- a) Le convertisseur asymétrique hybride,
- b) Le convertisseur avec des ponts en cascade et sources CC/CC avec isolement,
- c) Le convertisseur avec des topologies multiniveaux en cascade,
- d) Le convertisseur avec commutation douce,
- e) Les convertisseurs reliés par transformateur,
- f) Le convertisseur Diode/Capacitor-Clamped : variante de l'onduleur NPC,
- g) Le convertisseur New Diode-Clamped : autre variante de l'onduleur NPC,
- h) Le convertisseur multiniveaux généralisé .

#### I.5. Comparaison entre les trois principaux convertisseurs multiniveaux

On peut trouver dans la littérature des descriptions intéressantes des trois topologies de base, avec leurs avantages et inconvénients, comme celle offerte par Lai et Peng dans ou par Shakwek et Lewis dans. Le tableau (I.1) montre, de manière résumée, les principales caractéristiques des trois topologies multiniveaux de base pour un convertisseur de  $m$  niveaux. La sélection de la topologie multiniveaux la plus adéquate pour chaque application n'est pas évidente, jusqu'à présent c'est un défi non résolu dans la littérature.

Configuration	Les trois topologies de base des onduleurs multiniveaux		
	Diodes de bouclage	Condensateurs Flotteurs	En cascade
Dispositifs principaux de commutation	$2(m-1)$	$2(m-1)$	$2(m-1)$
Diode antiparallèle	$2(m-1)$	$2(m-1)$	$2(m-1)$
Diode de bouclage	$(m-1)(m-2)$	0	0
Condensateur de bus continu	$(m-1)$	$(m-1)$	$(m-1)/2$
Condensateur d'équilibrage	0	$(m-1)(m-2)/2$	0
Total	$m^2 + 2m - 3$	$(m^2 + 8m - 8)/2$	$(9/2)(m-1)$

Tableau I. 1: Comparaison entre les trois topologies de base des convertisseurs multiniveaux au niveaux de composant électronique

Du point de vue du nombre de composants, l'onduleur en cascade paraît être la solution multiniveaux la plus avantageuse, surtout lorsque le nombre de niveaux devient important. Dans la suite de notre étude, on utilisera cette topologie.

## I.6. Différentes stratégies de modulation

A la sortie d'un onduleur, alimenté par une source de tension continue, on obtient une tension alternative formée de créneaux rectangulaires. Le filtrage de cette tension rectangulaire permet son approximation à une tension sinusoïdale. Si la tension à filtrée est à la fréquence industrielle, le filtrage sera lourd, coûteux et le résultat obtenus seront médiocres. D'où la nécessité d'une technique permettant le découpage d'une alternance en plusieurs créneaux. La modulation de largeur d'impulsion (MLI) est introduite pour résoudre ce problème. Cependant, l'essor de la modulation MLI n'a été possible que grâce aux progrès sur les semi-conducteurs.

La modulation MLI consiste alors à former chaque alternance d'une tension de sortie d'une succession de créneaux de largeur convenable, en adaptant une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie de l'onduleur.

Ainsi, elle permet de repousser, vers des fréquences élevées, les harmoniques de la tension de sortie; ce qui facilite. Aussi, la multiplication du nombre des impulsions, formant chacune des alternances d'une tension de sortie, offre la possibilité de moduler la forme de cette tension et d'obtenir une forme d'onde approximant au mieux la sinusoïde.

La génération des signaux de commande de la modulation MLI se fait le plus souvent en temps réel. On détermine ainsi les instants d'ouverture et de fermeture des interrupteurs à l'aide d'une électronique de commande analogique ou numérique ou éventuellement une combinaison des deux.

Pour assurer la détermination en temps réel des instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs, on distingue deux techniques de modulation de largeur d'impulsion : la modulation sinusoïdale et la modulation vectorielle.

La modulation sinusoïdale consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante, généralement sinusoïdale, avec une onde de modulation ou porteuse, généralement triangulaire. Cette technique exige une commande séparée pour chacune des phases de l'onduleur.

La modulation vectorielle consiste à représenter la tension sinusoïdale de sortie que l'on désire par un seul vecteur. La transformation de Clarke permet d'approcher au mieux ce vecteur pendant chaque intervalle de modulation.

La génération des signaux de commande des interrupteurs se fait de façon à suivre au mieux le vecteur défini par la composante de Clarke du système de tensions de sortie de l'onduleur.

Contrairement à la modulation sinusoïdale la modulation vectorielle permet d'assurer, d'une manière globale, la commande de l'ensemble des interrupteurs constituant l'onduleur.

## **I.7. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes topologies de la famille des onduleurs multi-niveaux. le principe de base de toutes ces topologies est l'association de plusieurs cellules de commutation à caractéristiques spécifiques.

Le développement d'architectures et de techniques basées sur la combinaison série/parallèle de semi-conducteurs est donc profitable à condition de résoudre deux principaux problèmes : l'équilibrage des tensions et la possibilité d'entrelacement des commandes. de cette étude, nous concluons que ces deux conditions sont satisfaites de différentes manières. ce qui a donné naissance à plusieurs structures : structure capacités flottantes, à diodes flottantes et la structure en H.

Nous avons vu aussi, le large domaine d'applications industrielles de ce type de convertisseurs. Le plus connue est celui de la variation de vitesse des machines à courant alternatif.

Le chapitre suivant sera consacré à l'étude de l'onduleur de tension à diode flottante. L'étude d'un cas d'onduleur triphasé à trois et cinq niveaux sera exposée.

# Chapitre II

## Description et modalisation des onduleurs 3et 5 niveaux à diodes flottantes

dans le chapitre

II.1. Onduleur à trois niveaux de type diode flottante.....	17
II.1.1. Description.....	17
II.1.2. Principe de fonctionnement.....	18
II.2. Onduleur à cinq niveaux de type diode flottante.....	20
II.2.1. Description.....	20
II.2.2. Principe de fonctionnement.....	21
II.3. Généralisation de la structure à diode flottante à N niveaux.....	24
II.3.1. Description.....	24
II.3.2. Principe de fonctionnement.....	25
II.4. Modélisation d'un onduleur à trois et cinq niveaux à diode flottante.....	27
II.4.1. Introduction.....	27
II.4.2. Modélisation d'un onduleur à trois niveaux à diode flottante.....	27
II.4.2.1. Structure de l'onduleur à trois niveaux à structure diode flottante.....	27
II.4.2.2. Modélisation du fonctionnement d'un bras d'onduleur à diode flottante à trois niveaux.....	28
II.4.2.3. Différentes configurations d'un bras d'onduleur à trois niveaux.....	29
II.4.2.4. Hypothèse.....	31
II.4.2.5. Commandes complémentaires des onduleurs à trois niveaux.....	31
II.4.2.5.1. Fonction de connexion des interrupteurs.....	32
II.4.2.5.2. Fonction de connexion des demi –bras.....	32
II.4.2.5.3. Fonctions de conversion.....	33
II.4.3. Modélisation du bras de l'onduleur à cinq niveaux à diode flottante.....	35
II.4.3.1. Commande complémentaire.....	37
II.5. Conclusion.....	38

## II.1. Onduleur à trois niveaux de type diode flottante

### II.1.1. Description

L'onduleur à diode flottante à trois niveaux est représenté sur la figure (II.1). Le bus continu d'entrée est composé de deux capacités en série (C1 et C2), formant un point milieu noté (O) qui permet à l'onduleur d'accéder à un niveau de tension supplémentaire par rapport à l'onduleur classique à deux niveaux [9].

La tension totale du bus continu vaut  $E$ , dans les conditions normales de fonctionnement, celle-ci est uniformément répartie sur les deux capacités qui possèdent alors une tension  $\frac{E}{2}$  à leurs bornes.

Chacun des trois bras (a, b et c) de l'onduleur est composé de quatre interrupteurs commandés ( $K_1, K_2, K_3$  et  $K_4$  pour le bras a) et deux diodes de maintien connectées au point milieu du bus continu. Les interrupteurs commandés sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant : il s'agit d'associations classiques d'un transistor et d'une diode en antiparallèle.

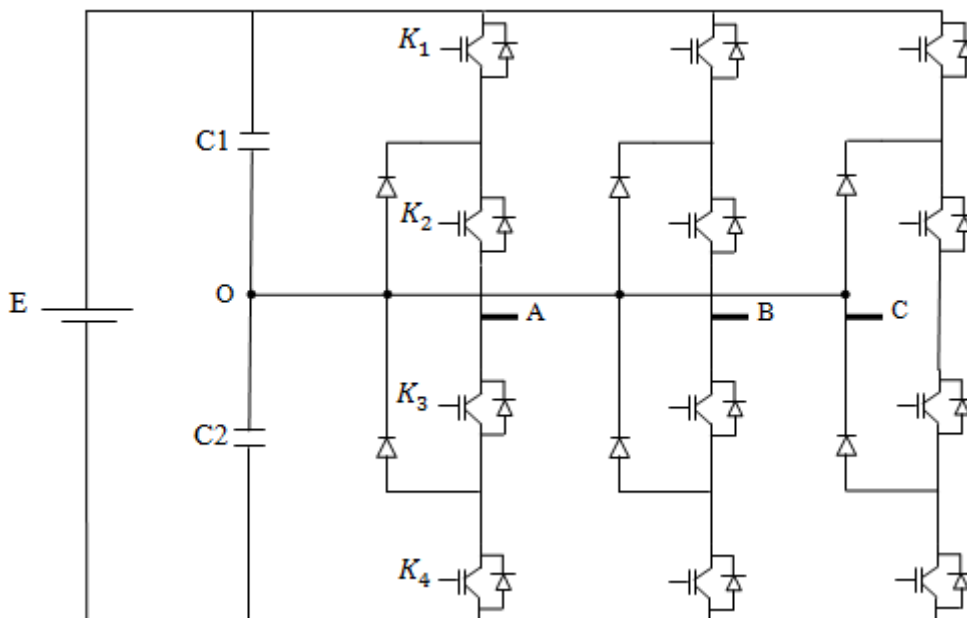


Figure II. 1: Schéma d'un onduleur à diode flottante à trois niveaux

**II.1.2. Principe de fonctionnement**

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

Le sens positif ou négatif des courants  $I_{d0}, I_{d1}$ , et  $I_{d2}$  fixe le sens du transfert de l'énergie du convertisseur. Lorsque la source de tension est génératrice et la charge est réceptrice, le courant passe à travers les transistors. Lorsque le transfert d'énergie s'effectue de la charge vers la source d'entrée, ce sont les diodes antiparallèles qui assurent le passage du courant figure (II.2).

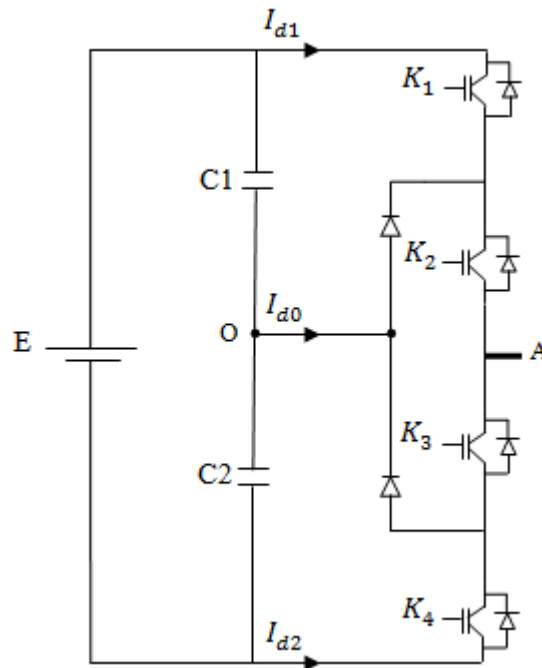


Figure II. 2: Bras d'un onduleur à diode flottante à trois niveaux

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

- **Séquences 1:** Génération du niveau maximum Dans ce cas, les interrupteurs  $K_1, K_2$  sont passants et  $K_3, K_4$  sont bloqués comme le montre la figure 1.4-a. et la tension de sortie

$V_{ao}$  est:  $V_a = +\frac{E}{2}$

la tension inverse appliquée aux interrupteurs  $K_4, K_3$  vaut:  $V_{K3} = V_{K4} = +\frac{E}{2}$ .

- **Séquences 2:** Génération du niveau intermédiaire

Les interrupteurs  $K_2, K_3$  sont passants et  $K_1, K_4$  sont bloqués, dans ce cas le point a est relié directement au point O à travers l'une des diodes de maintien, comme le montre la figure 1.4-b. Et la tension de sortie  $V_{ao}$  est donc nulle,  $V_{ao} = 0$ .

La tension inverse appliquée aux interrupteurs  $K_1, K_4$  vaut:  $V_{K1} = V_{K4} = +\frac{E}{2}$

- **Séquences 3:** Génération du niveau minimum

Dans ce cas, les interrupteurs  $K_1, K_2$  sont bloqués et  $K_3, K_4$  sont passants comme le montre la figure 1.4-c. et la tension de sortie  $V_{ao}$  est:  $V_{ao} = -\frac{E}{2}$ .

la tension inverse appliquée aux interrupteurs  $K_1, K_2$  vaut:  $V_{K1} = V_{K2} = +\frac{E}{2}$ .

les 3 états ou séquences de commutation possibles sont résumés au tableau II.1

$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$V_{ao}$
1	1	0	0	$\frac{E}{2}$
0	0	1	1	$-\frac{E}{2}$
0	1	1	0	0

Tableau II. 1 : États possibles d'un bras de l'onduleur à diode flottante à trois niveaux

Les séquences de fonctionnement, la forme d'onde de la tension de sortie et les états des interrupteurs sont représentés sur la figure (II.3).

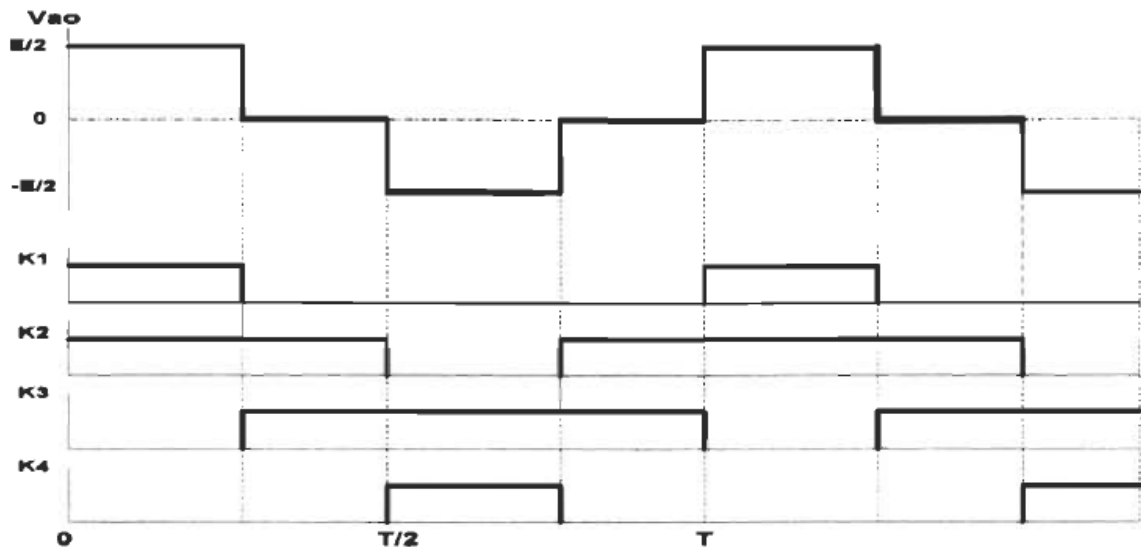


Figure II. 3 : Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé à diode flottante à trois niveaux

**Commentaire :** Nous remarquons que le temps de conduction de chaque interrupteur est réduit par rapport à celui des interrupteurs d'un convertisseur classique à deux niveaux, chaque interrupteur bloque une tension de  $\frac{E}{2}$  dans le cas à diode flottante à trois niveaux au lieu de pour l'onduleur classique deux niveaux. A chaque changement de niveau de tension, on a deux interrupteurs qui commutent.

## II.2. Onduleur à cinq niveaux de type diode flottante

### II.2.1. Description

Chaque phase de l'onduleur triphasé à diode flottante à cinq niveaux de tensions est composée de huit interrupteurs commandés qui sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant (il s'agit d'associations classiques d'un transistor et d'une diode en antiparallèle) et de six diodes de maintien connectées tout au long du bus continu.

L' onduleur est alimenté par une source continue  $E$ , que quatre condensateurs de valeurs égales se partagent pour donner quatre sources distinctes de tension  $\frac{E}{4}$ .

La structure triphasée de l'onduleur à diode flottante à cinq niveaux de tensions est présentée sur Figure (II.4)

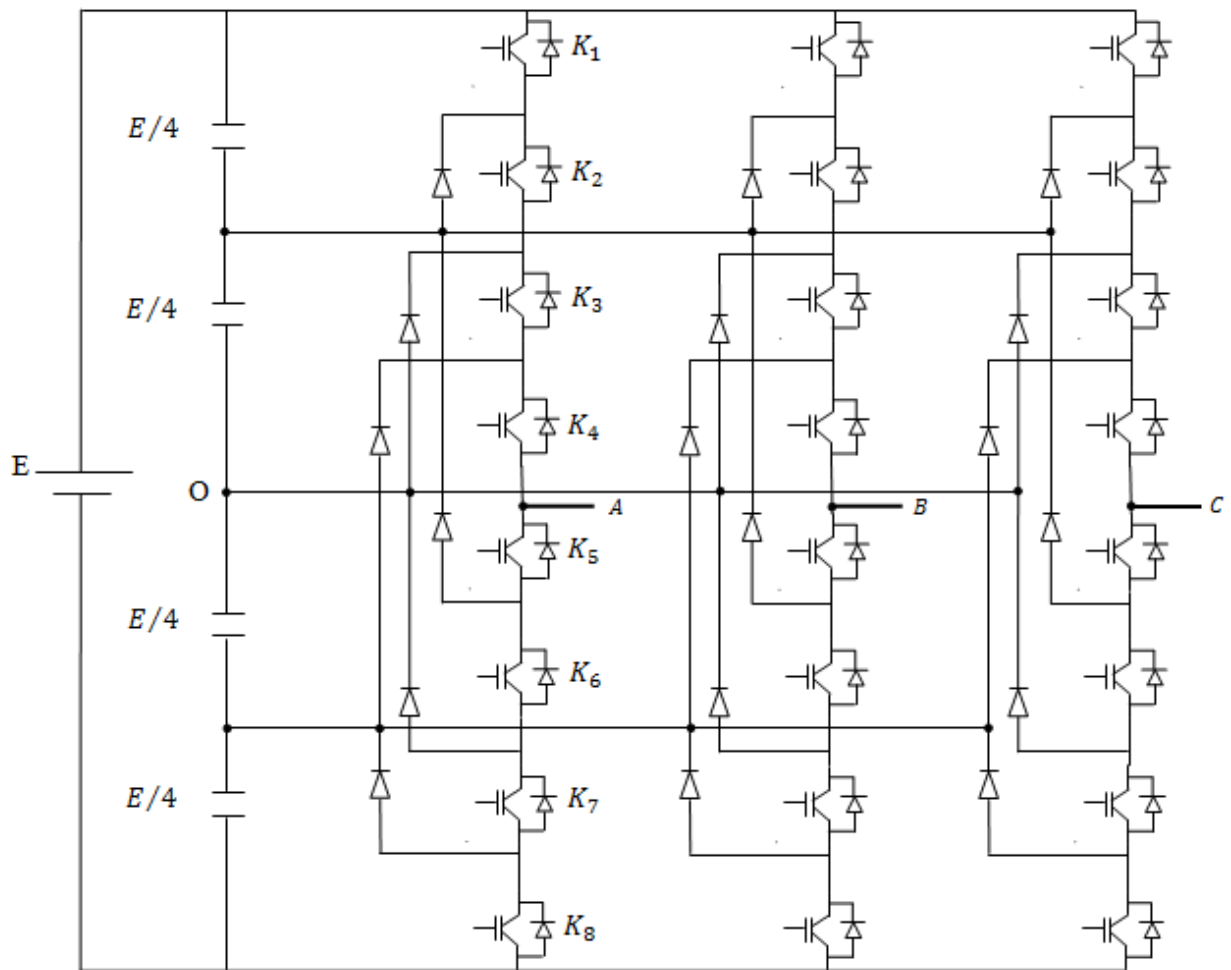


Figure II. 4 : Schéma d'un onduleur à diode flottante à cinq niveaux

### II.2.2. Principe de fonctionnement

Nous limiterons l'étude à un bras d'onduleur à diode flottante de cinq niveaux, figure (II.5) L'objectif visé est de déterminer les valeurs que peut prendre la tension  $V_{ao}$  pour les différents états possibles des interrupteurs statiques, de montrer les séquences de conceptions des interrupteurs.

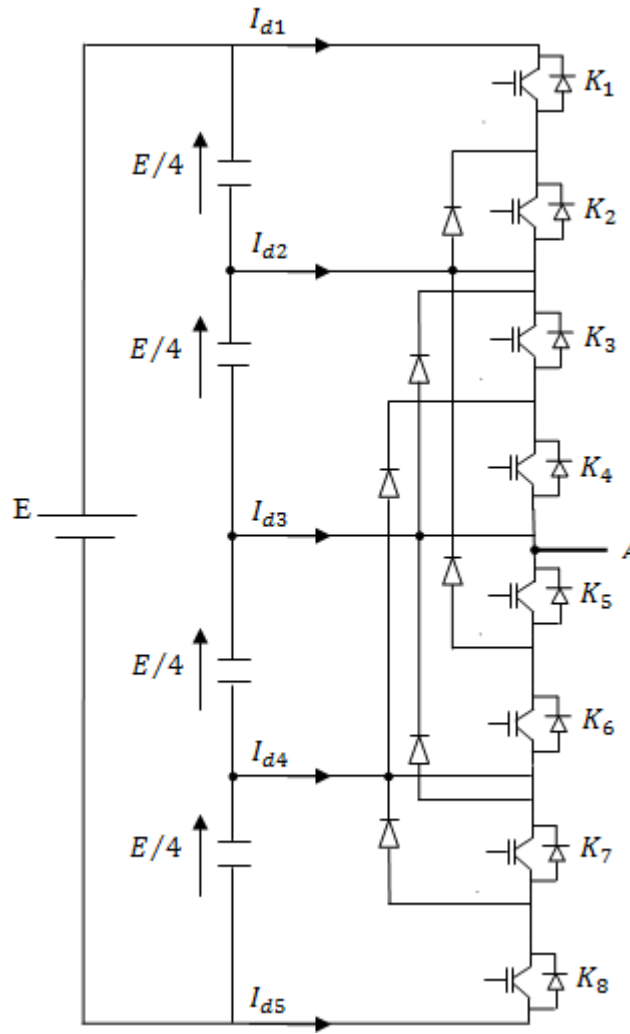


Figure II. 5 : Bras d'un onduleur à diode flottante à cinq niveaux

Dans ce cas, nous avons cinq séquences de fonctionnement possible :

- **Séquence 1:**  $K_1, K_2, K_3$  et  $K_4$  sont passants et  $K_5, K_6, K_7$  et  $K_8$  sont bloqués Alors, le point **a** est reliée directement à la borne positive du premier étage de tension  $\frac{E}{4}$  et le point **O** est relié à la borne négative du deuxième étage de tension  $\frac{E}{4}$  ce qui implique que la tension de sortie vaut:  $v_{ao} = + \frac{E}{4}$
- **Séquence 2:**  $K_2, K_3, K_4$  et  $K_5$  sont passants et  $K_6, K_7, K_8$  et  $K_1$  sont bloqués, on a: la tension de sortie est:  $V_{ao} = + \frac{E}{4}$

- **Séquence 3:**  $K_3, K_4, K_5$  et  $K_6$  sont passants et  $K_7, K_8, K_1$  et  $K_2$  sont bloqués, on a:

La tension de sortie est:  $V_{ao} = 0$

- **Séquence 4:**  $K_4, K_5, K_6$  et  $K_7$  sont passants et  $K_8, K_1, K_2$  et  $K_3$  sont bloqués, on a: la tension

de sortie est:  $V_{ao} = -\frac{E}{4}$

- **Séquence 5:**  $K_5, K_6, K_7$  et  $K_8$  sont passants et  $K_1, K_2, K_3$  et  $K_4$  sont bloqués, on a:

la tension de sortie est :  $V_{ao} = -\frac{E}{2}$

**Remarque :** Les tensions bloquées par les différents interrupteurs au cours des Séquences de fonctionnement valent toutes

$$V_{Ki} = +\frac{E}{4} \quad i = 1..8$$

Les différentes séquences de fonctionnement et l'état des interrupteurs commandés sont regroupés dans le tableau (II.2.)

$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$	$K_7$	$K_8$	$V_{ao}$
1	1	1	1	0	0	0	0	$\frac{E}{2}$
0	1	1	1	1	0	0	0	$\frac{E}{4}$
0	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	0	$-\frac{E}{4}$
0	0	0	0	1	1	1	1	$-\frac{E}{2}$

Tableau II. 2 : États possibles d'un bras de l'onduleur à diode flottante à cinq niveaux

Les séquences de fonctionnement, la forme d'onde de la tension de sortie et les états des interrupteurs sont représentés sur la figure (II.6).

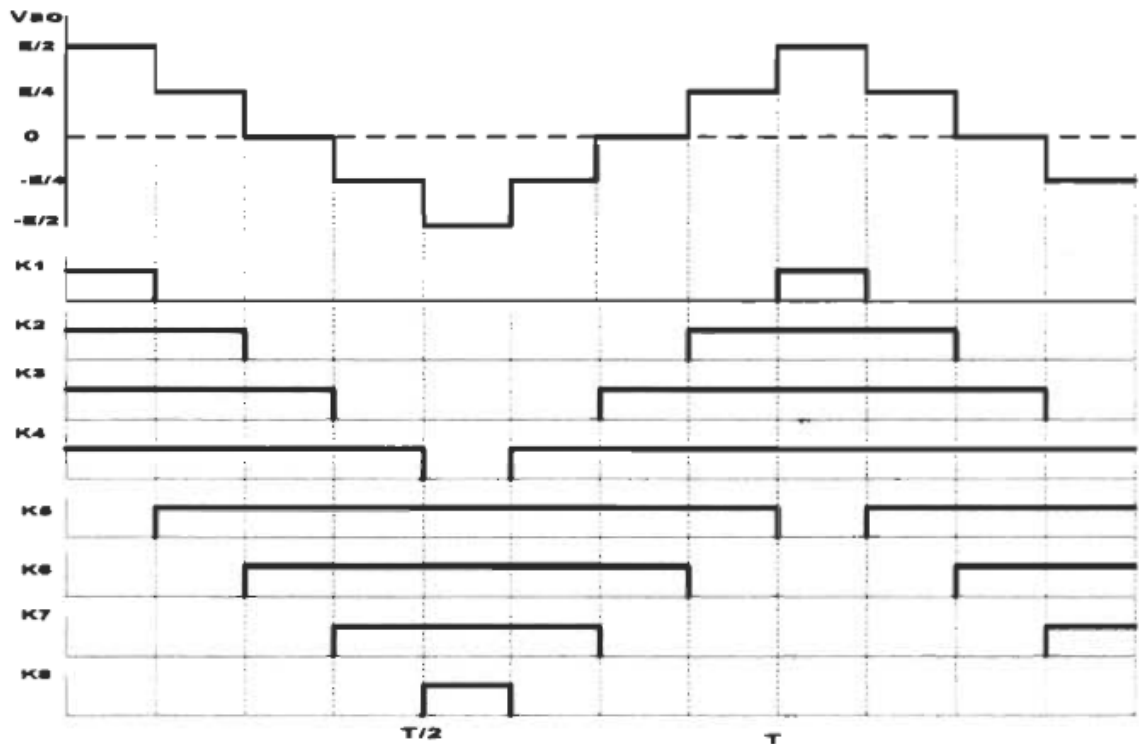


Figure II. 6 : Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé à diode flottante à cinq niveaux

**Commentaire :** On remarque que plus le nombre de niveaux augmente, la tension de sortie en forme d'escalier possède de paliers. Ceci permet de mieux approcher la sinusoïde. Donc la tension de sortie du convertisseur à diode flottante 5 niveaux est meilleure du point de vue taux de distorsion harmonique que celle d'un diode flottante à trois niveaux. Un autre avantage du diode flottante à cinq niveaux les interrupteurs commandés bloque une tension  $(V_{K1} = + \frac{E}{4})$  deux fois plus faible que celle bloquée par les interrupteurs du convertisseur à trois niveaux  $(V_{K1} = + \frac{E}{2})$ . On a deux commutations à chaque changement de niveau de la tension de sortie.

### II.3. Généralisation de la structure à diode flottante à N niveaux

#### II.3.1. Description

En se basant sur l'étude faite sur les onduleurs de tension de type diode flottante à trois et à cinq niveaux, on peut étendre notre étude à des convertisseurs à N niveaux de tensions de type diode flottante. La figure (II.7) montre un schéma possible de branche d'onduleur à diode flottante constitué de N étages. Les condensateurs C1 à CN permettent



$K_1$	$K_2$	...	$K_{(N+1)/2}$	...	$K_{N-1}$	$K_N$	...	$K_{3(N-1)/2}$	...	$K_{2N-3}$	$K_{2(N-1)}$	$V_{\omega}$
1	...	...		...	1	0	...			...	0	$\frac{E}{2}$
0	1	...			...	1	0			...	0	$\frac{(N-3)E}{2(N-1)}$
...	0											...
												$\frac{E}{N-1}$
...		0	1	...	...	...		1	0	...	0	0
...			0	1	...			...	1	0	0	$-\frac{E}{N-1}$
												...
0	...	0			1	...	...			1	0	$-\frac{(N-3)E}{2(N-1)}$
0	...	...			0	1	...			...	1	$-\frac{E}{2}$

Tableau II. 3 : États possibles d'un bras de l'onduleur à diode flottante à N niveaux

La  $m^{\text{ème}}$  séquence de fonctionnement correspondra à l'état où, les interrupteurs  $K_m$  jusqu'à  $K_{N+m-2}$  sont fermés et les autres interrupteurs ouverts.

## II.4. Modélisation d'un onduleur à trois et cinq niveaux à diode flottante

### II.4.1. Introduction

Les onduleurs de tension constituent une fonction incontournable de l'électronique de puissance. ils sont présents dans des domaines d'application les plus variés, dont le plus connu est sans doute celui de la variation de vitesse des machines à courant alternatif.

La forte évolution de cette fonction s'est appuyée, d'une part, sur le développement de composants à semi-conducteurs entièrement commandables, puissants, robustes et rapides, et d'autre part, sur l'utilisation quasi-généralisée des techniques dites de modulation de largeurs d'impulsions.

Dans les applications de fortes puissances, la structure des onduleurs à trois niveaux est plus adaptée, par rapport à la structure classique, du fait que les tensions et courants de sortie présentent un taux d'harmoniques nettement inférieur. La tension aux bornes de chaque interrupteur est divisée par deux et la fréquence de hachage est plus basse.

### II.4.2. Modélisation d'un onduleur à trois niveaux à diode flottante :

#### II.4.2.1. Structure de l'onduleur à trois niveaux à structure diode flottante :

La structure choisie dans cette étude est celle de l'onduleur de tension triphasé à trois niveaux à structure diode flottante. Plusieurs études sont faites sur les onduleurs à deux niveaux, aussi bien du point de vue modélisation que stratégie de commande. On va essayer surtout d'approfondir les parties concernant les onduleurs multi-niveaux. et plusieurs structures sont possibles pour l'onduleur à trois niveaux. nous avons choisi d'étudier la structure diode flottante, cet onduleur est dit à trois niveaux parce qu'il délivre trois niveaux de tension ( $+U_c$ ,  $0$ ,  $-U_c$ ). Cette structure est présentée à la figure (II.8) [10].

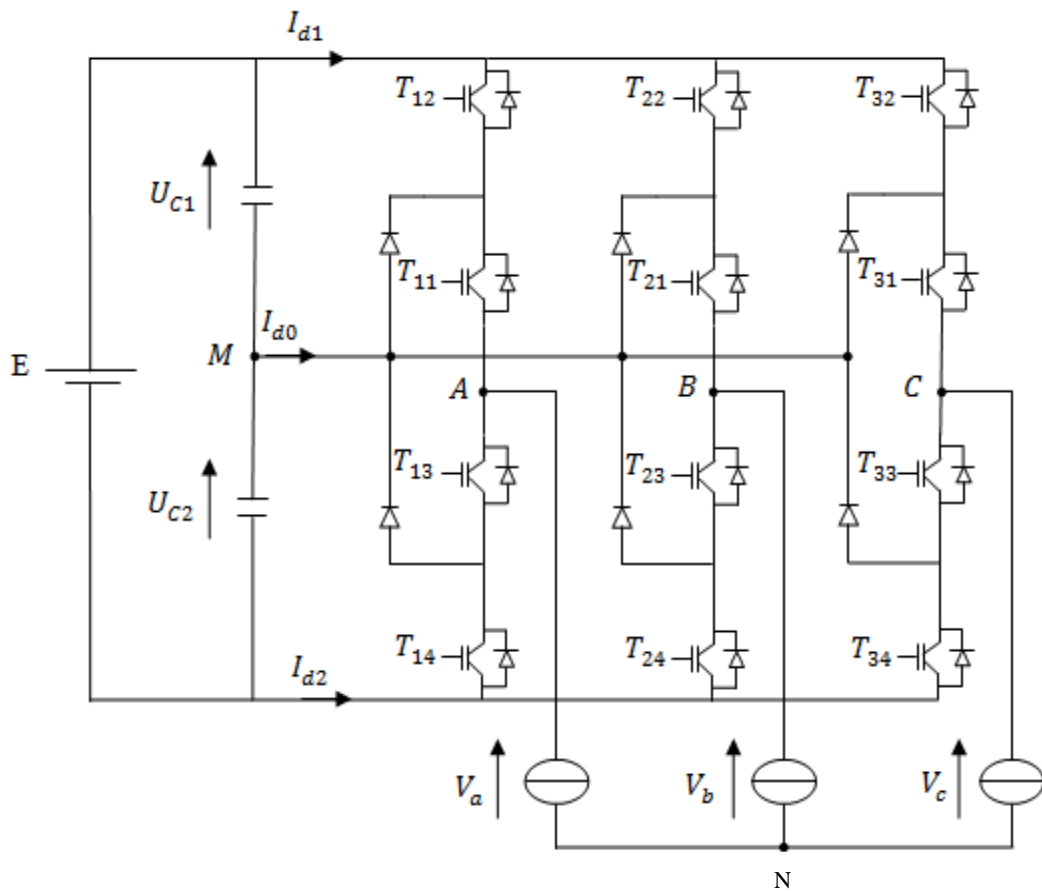


Figure II. 8 : Structure de l'onduleur triphasé à trois niveaux à structure diode flottante

**II.4.2.2. Modélisation du fonctionnement d'un bras d'onduleur à diode flottante à trois niveaux**

L'onduleur à trois niveaux a une structure symétrique. Donc on procède par bras (figure (II.9)), ainsi, on définit en premier lieu un modèle global d'un bras sans à priori sur la commande.

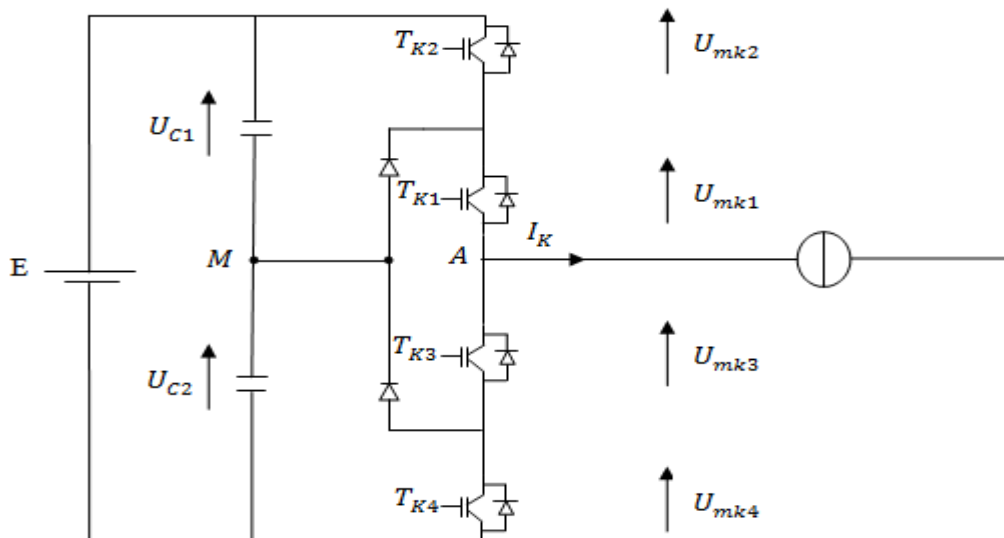


Figure II. 9 : Structure d'un bras d'onduleur triphasé à trois niveaux

**II.4.2.3. Les Différentes configurations d'un bras d'onduleur à trois niveaux**

A fin d'élaborer un modèle du fonctionnement de ces onduleurs à trois niveaux sans a priori sur la commande ; on représente chaque paire transistor diode par un seul interrupteur bidirectionnel (figure (II.10)) et on procède par bras (grâce à la symétrie de l'onduleur triphasé) [10] [11].

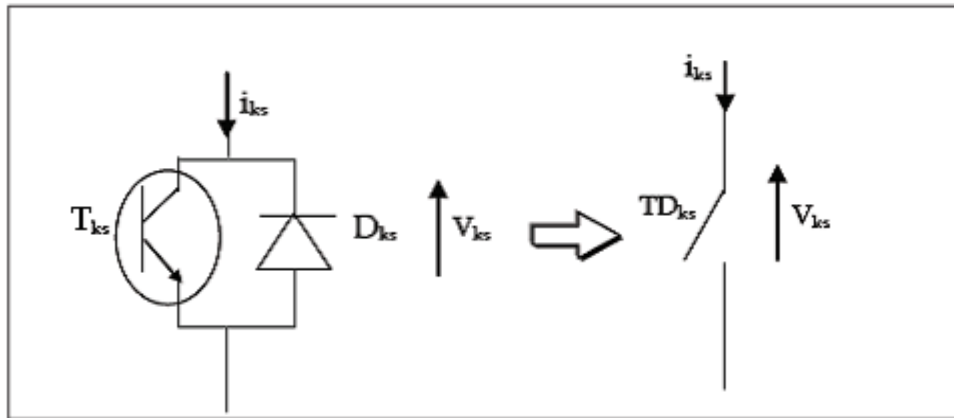


Figure II. 10 : Interrupteur bidirectionnel équivalent de la paire diode-transistor

Une analyse topologique d'un bras montre trois configurations possibles pour ce dernier. Ces différentes configurations sont présentées à la figure (II.11).

Les grandeurs électriques caractérisant chacune de ces configurations sont données dans le tableau (II.4) (avec **O** origine des potentiels et  $V_k$  le potentiel du nœud **k** du bras **k**). Pour les configurations **E0** le potentiel  $V_k$  dépend de la source d'énergie alternative.

La Configuration	La grandeur électrique qui la caractérise	Les état des interrupteurs
E1	$V_{AM} = U_{c1}$	$TD_{k1}, TD_{k2}$ sont fermée et $TD_{k3}$ et $TD_{k4}$ sont ouvert
E2	$V_{AM} = 0$	$TD_{k2}, TD_{k3}$ sont fermée et $TD_{k1}$ et $TD_{k4}$ sont ouvert
E3	$V_{AM} = -U_{c2}$	$TD_{k1}, TD_{k2}$ sont ouvert et $TD_{k3}$ et $TD_{k4}$ sont fermée

Tableau II. 4 : Grandeurs électriques correspondantes pour chacune des configurations d'un bras k

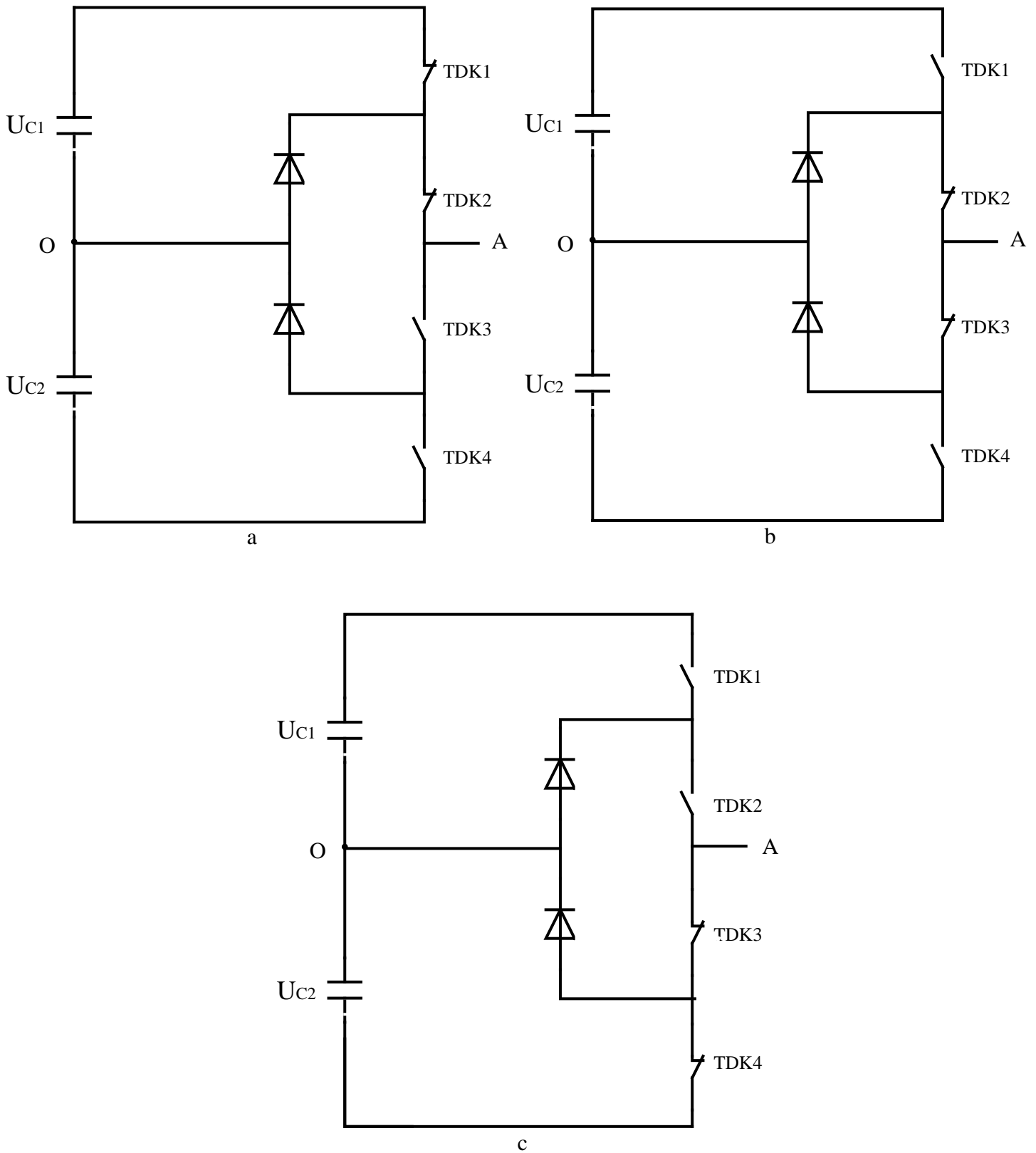


Figure II. 11 : Différentes configurations possibles pour un bras d'onduleur

à trois niveaux

**II.4.2.4. Hypothèse**

Les tensions d’entrée de l’onduleur sont supposées parfaites. En pratique, cela se traduit par le fait que, quel que soit le courant  $I_k$ , délivré par cette alimentation, la tension à ses bornes reste constante  $UC1 = UC2$ . La chute de tension aux bornes des semi-conducteurs est négligeable devant la tension d’alimentation qui est de l’ordre de quelques centaines de volts.

**II.4.2.5. Commandes complémentaires des onduleurs à trois niveaux**

Pour l’onduleur à trois niveaux, la condition de Commandabilité implique que les transitions entre les configurations ne dépendent plus de la commande interne (grandeurs électriques), mais uniquement des transitions (commande externe) [12].

Dans la suite de ce chapitre, on suppose que cette condition est toujours vérifiée. Pour éviter la conduction simultanée des quatre interrupteurs d’un bras, ce qui peut causer leur destruction par croissance du courant lors du court-circuit, ou une surtension dans le cas de l’ouverture de tous les interrupteurs, on définit trois commandes complémentaires, pouvant être appliquées sur un bras de l’onduleur .

L’interrupteur TDK1, par exemple, peut être commandé de façon complémentaire avec chacun des trois autres interrupteurs du même bras : TDK2, TDK3, TDK4.

Ainsi, on écrit :

$$\left\{ \begin{array}{l} B_{k1} = \overline{B_{k2}} \\ B_{k3} = \overline{B_{k4}} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} B_{k1} = \overline{B_{k3}} \\ B_{k2} = \overline{B_{k4}} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} B_{k1} = \overline{B_{k4}} \\ B_{k2} = \overline{B_{k3}} \end{array} \right. \quad (2.1)$$

Où :  $B_{KS}$  étant le signal de commande du transistor  $TD_{KS}$  du bras k .

Parmi les commandes précédentes, celle qui permet d’avoir les trois tensions:  $Uc1, 0, Uc2$ , est la suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} B_{k1} = \overline{B_{k3}} \\ B_{k2} = \overline{B_{k4}} \end{array} \right. \quad (2.2)$$

$B_{K1}$	$B_{K2}$	$B_{K3}$	$B_{K4}$	$V_K$
0	0	1	1	$-U_{C2}$
0	1	1	0	0
1	1	0	0	$U_{C1}$

Tableau II. 5 : Tableaux d'excitation associée à la commande complémentaire proposée

### II.4.2.5.1. Fonction de connexion des interrupteurs

La fonction de connexion définit l'état ouvert ou fermé de l'interrupteur  $TD_{ki}$  du bras  $k$  ; elle vaut 1 lorsque l'interrupteur est fermé et 0 dans le cas contraire.

$$F_{KS} = \begin{cases} 1 & \text{si } TD_{KS} \text{ est fermé} \\ 0 & \text{si } TD_{KS} \text{ est ouvert} \end{cases} \quad (2.3)$$

En traduisant la commande complémentaire par les fonctions de connexion des interrupteurs, du bras  $k$ , on obtient :

$$\begin{cases} F_{k1} = \overline{F_{k3}} \\ F_{k2} = \overline{F_{k4}} \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} F_{k1} = 1 - F_{K3} \\ F_{k2} = 1 - F_{K4} \end{cases} \quad (2.4)$$

Avec cette commande complémentaire, tout se passe comme si pour chaque bras de l'onduleur on a seulement deux cellules de commutations à deux interrupteurs chacune. La commande complémentaire pour les trois bras est exprimée par les trois relations suivantes :

$$\begin{cases} F_{k11} = 1 - F_{K13} \\ F_{k12} = 1 - F_{K14} \end{cases} \quad \begin{cases} F_{k21} = 1 - F_{K23} \\ F_{k22} = 1 - F_{K24} \end{cases} \quad \begin{cases} F_{k31} = 1 - F_{K33} \\ F_{k32} = 1 - F_{K34} \end{cases} \quad (2.5)$$

### II.4.2.5.2. Fonction de connexion des demi-bras

Pour l'onduleur à trois niveaux, on définit une fonction de connexion des demi-bras, qu'on note comme suit :  $F_{Km}^b$

Où  $k$  désigne le numéro du bras ( $k=1, 2,3$ ) et  $m$  indique la position du demi-bras ( $m=1$  pour le demi-bras du haut et  $m=0$  pour le demi-bras du bas)

Les fonctions de connexion des demi-bras s'expriment au moyen de fonctions de connexion des interrupteurs comme suit :

$$\begin{cases} F_{K1}^b = F_{K1} \cdot F_{K2} \\ F_{K0}^b = F_{K3} \cdot F_{K4} \end{cases} \quad (2.6)$$

$F_{K1}^b$  est associée au demi-bras du haut (la paire  $T_{K1}, T_{K2}$ ) et  $F_{K0}^b$  est associée au demi-bras du bas (la paire  $T_{K3}, T_{K4}$ ). Le système d'équation (I.6) montre que la fonction de connexion des demi bras  $F_{Km}^b$  vaut 1 dans le cas où les deux interrupteurs associés aux demi bras  $F_{Km}^b$  sont tous fermés et nulle dans tous les autres cas.

### II.4.2.5.3. Fonctions de conversion :

On appelle fonction de conversion, la fonction qui permet de passer de la tension d'entrée de l'onduleur à sa tension de sortie .

Notations :

On désigne par

- **VA , VB , VC** : Tensions simples aux bornes de chaque phase de la charge.
- **VAO, VBO, VCO** : Tensions de chaque phase de l'onduleur par rapport au point milieu "O" de l'alimentation continue de l'onduleur.

Pour l'onduleur triphasé à trois niveaux, les potentiels des noeuds : A, B, C par rapport au point O s'expriment à l'aide des fonctions de connexions comme suit :

$$\begin{cases} \mathbf{VAO} = F_{11} \cdot F_{12} \cdot U_{C1} - F_{13} \cdot F_{14} \cdot U_{C2} \\ \mathbf{VBO} = F_{21} \cdot F_{22} \cdot U_{C1} - F_{23} \cdot F_{24} \cdot U_{C2} \\ \mathbf{VCO} = F_{31} \cdot F_{32} \cdot U_{C1} - F_{33} \cdot F_{34} \cdot U_{C2} \end{cases} \quad (2.7)$$

Dans le cas où  $U_{C1} = U_{C2} = U_C$ , le système (III.7) s'écrit :

$$\begin{cases} \mathbf{VAO} = F_{11} \cdot F_{12} \cdot U_{C1} - F_{13} \cdot F_{14} \cdot U_{C2} = (F_{11} \cdot F_{12} - F_{13} \cdot F_{14}) \cdot U_C \\ \mathbf{VBO} = F_{21} \cdot F_{22} \cdot U_{C1} - F_{23} \cdot F_{24} \cdot U_{C2} = (F_{21} \cdot F_{22} - F_{23} \cdot F_{24}) \cdot U_C \\ \mathbf{VCO} = F_{31} \cdot F_{32} \cdot U_{C1} - F_{33} \cdot F_{34} \cdot U_{C2} = (F_{31} \cdot F_{32} - F_{33} \cdot F_{34}) \cdot U_C \end{cases} \quad (2.8)$$

On constate d'après le système (2.8) que l'onduleur de tension à trois niveaux est équivalent à deux onduleurs à deux niveaux en série [12].

Fonctions de connexion des demi bras :

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{11}^b = F_{11} \cdot F_{12} \\ F_{10}^b = F_{13} \cdot F_{14} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} F_{21}^b = F_{21} \cdot F_{22} \\ F_{20}^b = F_{23} \cdot F_{24} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} F_{31}^b = F_{31} \cdot F_{32} \\ F_{30}^b = F_{33} \cdot F_{34} \end{array} \right. \quad (2.9)$$

En introduisant les expressions de ces dernières fonctions dans le système (III.7) on obtient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{VAO} = F_{11}^b \cdot U_{C1} - F_{10}^b \cdot U_{C2} = (F_{11}^b - F_{10}^b) \cdot U_C \\ \mathbf{VBO} = F_{21}^b \cdot U_{C1} - F_{20}^b \cdot U_{C2} = (F_{21}^b - F_{20}^b) \cdot U_C \\ \mathbf{VCO} = F_{31}^b \cdot U_{C1} - F_{30}^b \cdot U_{C2} = (F_{31}^b - F_{30}^b) \cdot U_C \end{array} \right. \quad (2.10)$$

Les tensions composées sont données par le système suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{AB} = V_{AO} - V_{BO} \\ U_{BO} = V_{BO} - V_{CO} \\ U_{CA} = V_{CO} - V_{AO} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} U_{AB} = (F_{11} \cdot F_{12} - F_{21} \cdot F_{22}) \cdot U_{C1} - (F_{13} \cdot F_{14} - F_{23} \cdot F_{24}) \cdot U_{C2} \\ U_{BC} = (F_{21} \cdot F_{22} - F_{31} \cdot F_{32}) \cdot U_{C1} - (F_{23} \cdot F_{24} - F_{33} \cdot F_{34}) \cdot U_{C2} \\ U_{CA} = (F_{31} \cdot F_{32} - F_{11} \cdot F_{12}) \cdot U_{C1} - (F_{33} \cdot F_{34} - F_{13} \cdot F_{14}) \cdot U_{C2} \end{array} \right. \quad (2.11)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{AN} = V_A = \frac{U_{AB} - U_{CA}}{3} \\ V_{BN} = V_B = \frac{U_{BC} - U_{AB}}{3} \\ V_{CN} = V_C = \frac{U_{CA} - U_{BC}}{3} \end{array} \right. \quad (2.12)$$

Avec N : le point neutre de charge

En introduisant les fonctions de connexions des demi bras, on obtient :

$$\left( \begin{array}{c} V_A \\ V_B \\ V_C \end{array} \right) = \frac{1}{3} \left( \begin{array}{ccc} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{array} \right) \cdot \left\{ \left( \begin{array}{c} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{array} \right) \cdot U_{C1} - \left( \begin{array}{c} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{array} \right) \cdot U_{C2} \right\} \quad (2.13)$$

**II.4.3. Modélisation du bras de l'onduleur à cinq niveaux à diode flottante**

Grâce à la symétrie de l'onduleur triphasé à cinq niveaux à structure diode flottante , on procède par bras .Ainsi ,on définit un modèle global d'un bras sans a priori sur la commande ,ensuite ,on déduit celui de l'onduleur Complet [13][14][15]. Comme pour l'onduleur à deux niveaux et a trois niveaux ,on représente chaque paire semi conducteur (transistor (Tks)-diode (Dks )) par un seul interrupteur bidirectionnel TDks .

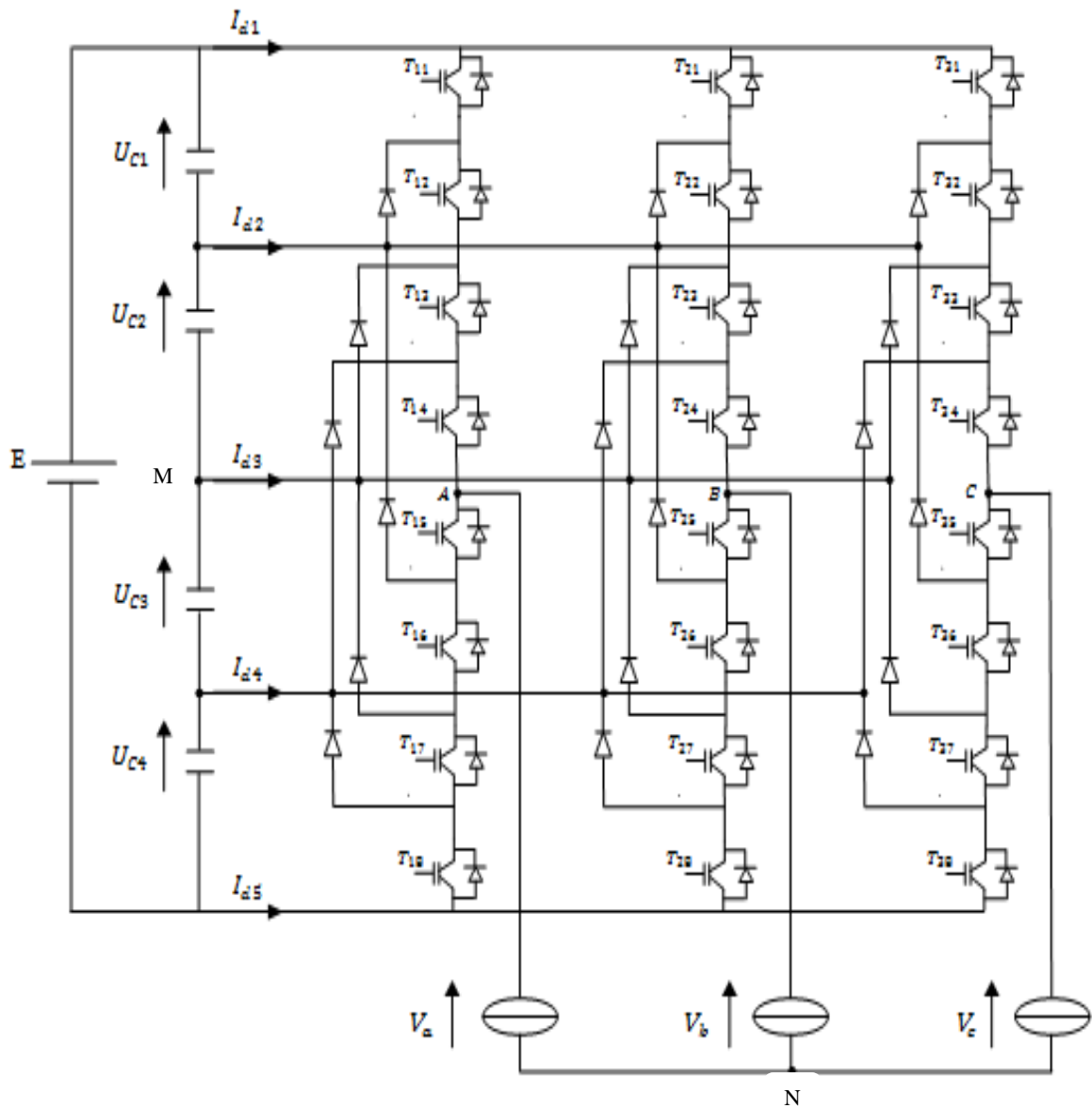


Figure II. 12 : Structure de l'onduleur triphasé à trois niveaux à structure à diode flottante

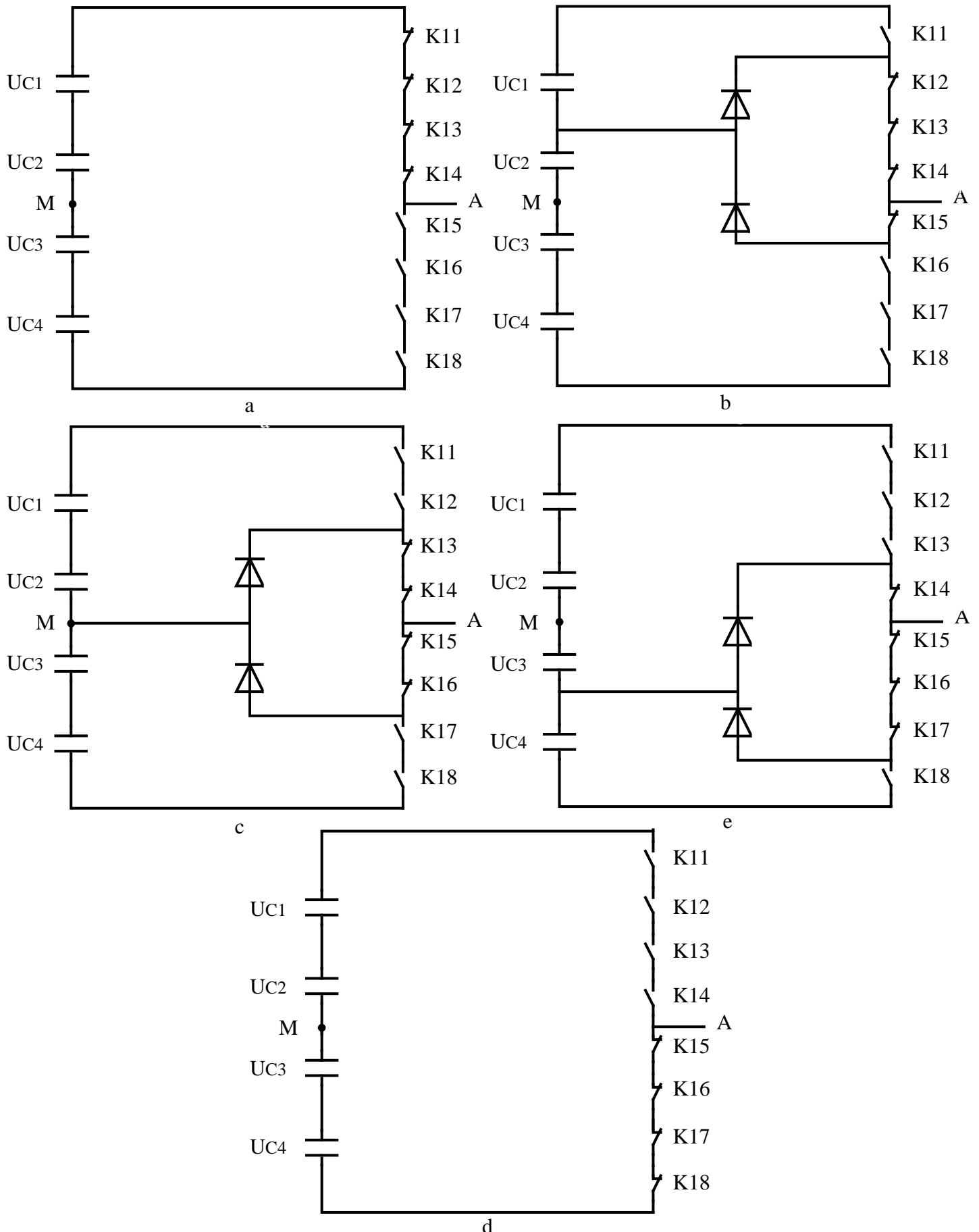


Figure II. 13 : Les Différentes configurations possibles pour un bras d'onduleur à cinq niveaux

**II.4.3.1. Commande complémentaire :**

Pour éviter des courts-circuits de sources de tension par conduction de plusieurs interrupteurs et pour que le convertisseur soit totalement commandable, on adopte la commande complémentaire pour un bras k de l'onduleur triphasé à cinq niveaux sachant qu'il existe plusieurs commandes complémentaires [16] .

$F_{11}$	$F_{12}$	$F_{13}$	$F_{14}$	$F_{15}$	$F_{16}$	$F_{17}$	$F_{18}$	V <sub>km</sub>
1	1	1	1	0	0	0	0	$2U_c$
0	1	1	1	1	0	0	0	$U_c$
0	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	0	$-U_c$
0	0	0	0	1	1	1	1	$-U_c$

Tableau II. 6 : Tableau des excitations relatives des cellules

(Onduleur à diodes flottants à 5niveaux)

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{K1} = 1 - F_{K5} \\ F_{K2} = 1 - F_{K6} \\ F_{K3} = 1 - F_{K7} \\ F_{K4} = 1 - F_{K8} \end{array} \right. \quad (2.14)$$

Comme l'onduleur à trois niveaux, on définit les fonctions du demi bras

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{K1}^b = F_{K1} \cdot F_{K2} \cdot F_{K3} \cdot F_{K4} \\ F_{K0}^b = F_{K5} \cdot F_{K6} \cdot F_{K7} \cdot F_{K8} \end{array} \right. \quad (2.15)$$

Pour l'onduleur à cinq niveaux ,les potentiels des noeuds **A B** et **C** par rapport au point milieu **M** s'expriment comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{AM} = F_{11} \cdot F_{12} \cdot F_{13} \cdot F_{14} (U_{C1} + U_{C2}) - F_{15} \cdot F_{16} \cdot F_{17} \cdot F_{18} (U_{C3} + U_{C4}) + F_{12} \cdot F_{13} \cdot F_{14} \cdot F_{15} U_{C2} - F_{14} \cdot F_{15} \cdot F_{16} \cdot F_{17} \cdot F_{18} \cdot U_{C3} \end{array} \right.$$

$$V_{BM} = F_{21} \cdot F_{22} \cdot F_{23} \cdot F_{24} (U_{C1} + U_{C2}) - F_{25} \cdot F_{26} \cdot F_{27} \cdot F_{28} (U_{C3} + U_{C4}) + F_{22} \cdot F_{23} \cdot F_{24} \cdot F_{25} U_{C2} - F_{24} \cdot F_{25} \cdot F_{26} \cdot F_{27} \cdot U_{C3} \quad (2.16)$$

$$V_{CM} = F_{31} \cdot F_{32} \cdot F_{33} \cdot F_{34} (U_{C1} + U_{C2}) - F_{35} \cdot F_{36} \cdot F_{37} \cdot F_{38} (U_{C3} + U_{C4}) + F_{32} \cdot F_{33} \cdot F_{34} \cdot F_{35} \cdot U_{C2} - F_{34} \cdot F_{35} \cdot F_{36} \cdot F_{37} \cdot U_{C3}$$

Dans le cas où  $U_{C1} = U_{C2} = U_{C3} = U_{C4} = U_C$ , le système (2.16) s'écrit :

$$\begin{cases} V_{AM} = [(2F_{11} \cdot F_{12} \cdot F_{13} \cdot F_{14} - 2F_{15} \cdot F_{16} \cdot F_{17} \cdot F_{18}) + F_{12} \cdot F_{13} \cdot F_{14} \cdot F_{15} - F_{14} \cdot F_{15} \cdot F_{16} \cdot F_{17}] U_C \\ V_{BM} = [(2F_{21} \cdot F_{22} \cdot F_{23} \cdot F_{24} - 2F_{25} \cdot F_{26} \cdot F_{27} \cdot F_{28}) + F_{22} \cdot F_{23} \cdot F_{24} \cdot F_{25} - F_{24} \cdot F_{25} \cdot F_{26} \cdot F_{27}] U_C \\ V_{CM} = [(2F_{31} \cdot F_{32} \cdot F_{33} \cdot F_{34} - 2F_{35} \cdot F_{36} \cdot F_{37} \cdot F_{38}) + F_{32} \cdot F_{33} \cdot F_{34} \cdot F_{35} - F_{34} \cdot F_{35} \cdot F_{36} \cdot F_{37}] U_C \end{cases} \quad (2.17)$$

D'après les équations des systèmes (2.16) et (2.17), on aboutit qu'un onduleur à cinq niveaux est équivalent à la mise en série de deux onduleurs à trois niveaux ou à la mise en série de quatre onduleurs à deux niveaux.

On exprime les différentes tensions composées de l'onduleur à cinq niveaux à l'aide des fonctions de connexion des interrupteur de la manière suivante :

$$\begin{cases} U_{AB} = V_{AM} - V_{BM} \\ U_{BC} = V_{BM} - V_{CM} \\ U_{CA} = V_{CM} - V_{AM} \end{cases} \quad (2.18)$$

Les tensions simples sont liées aux tensions composées par la relation (2.18) ce qui donne les tensions suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{U_{AB} - U_{CA}}{3} \\ \frac{U_{BC} - U_{AB}}{3} \\ \frac{U_{CA} - U_{BC}}{3} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

### II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par la description et la présentation du modèle de fonctionnement de l'onduleur triphasé à trois et cinq niveaux à diodes flottantes.

Le modèle de l'onduleur de tension à trois niveaux à structure diodes flottantes, a permis de constater que l'onduleur à trois niveaux est la mise en série de deux onduleurs à deux niveaux.

On a démontré également que l'onduleur triphasé à cinq niveaux est la mise en série de quatre onduleurs à deux niveaux et donc de deux onduleurs à trois niveaux.

En générale, ce chapitre permet de donner une idée globale sur la description et modélisation de tous les onduleurs à niveaux multiples à diodes flottantes.

L'objectif général du chapitre suivant est d'étudier généralement les technique de la commande de l'onduleur triphasée et expliquer Les différentes stratégies de commende des onduleurs multiniveau .

# Chapitre III

## Stratégie de Commande des onduleurs multi-niveaux

dans le chapitre

III.1. Introduction.....	41
III.2. Techniques de commande de l'onduleur triphasée.....	41
III.2.1. Généralités sur les MLI.....	41
III.2.2. Objectif de la Technique MLI.....	41
III.3. Techniques de commande MLI : .....	42
III.4. Structures de MLI.....	42
III.5. Différentes stratégies de commande.....	43
III.5.1. Commande en pleine onde.....	43
III.5.2. Commande MLI sinusoïdale.....	44
III.5.2.1. MLI à porteuses alternées (APOD).....	44
III.5.2.1. 1. Algorithme de commande.....	44
III.5.2.2. MLI à porteuses en phases (PD).....	45
III.5.2.2. 1. Algorithme de commande.....	45
III.5.2.3. MLI à porteuses en oppositions (POD).....	45
III.5.2.2. 1. Algorithme de commande.....	46
I.6. CONCLUSION.....	46

### III.1. Introduction

Les machines à courant alternatif sont souvent alimentées par des groupements d'onduleurs à deux ou à trois niveaux. Cependant, ces derniers sont limités en tension et en puissance. Afin de contourner ce problème, plusieurs structures de convertisseurs ont été proposées, notamment les onduleurs multi-niveaux à structure diode flottante. L'alimentation des machines à courant alternatif de puissance par ce type d'onduleurs, permet non seulement de contrôler la tension et la fréquence de ces machines mais aussi, de réduire les contraintes sur les interrupteurs électroniques. De plus, le courant et la tension fournis ont un spectre de meilleur qualité.

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 triangle-sinusoïdale 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.

Dans ce chapitre, nous essayons d'étendre les notions connues pour la stratégie citée ci-dessus aux onduleurs à cinq et trois niveaux. Pour cela, Ensuite, pour la commande ce dernier, nous développons l'algorithme général correspondant à la stratégie triangle sinusoïdale. L'analyse des performances de cet algorithme est réalisée à travers des tests effectués sur les onduleurs à trois et cinq niveaux.

### III.2. Techniques de commande de l'onduleur triphasée

#### III.2.1. Généralités sur les MLI

Le choix d'une technique dépend du type de machine à commander, de la gamme de puissance, des semi-conducteurs utilisés pour l'onduleur et de la simplicité d'implantation de l'algorithme. Ce sont finalement des critères de coût et de performance qui vont déterminer ce choix. Les critères de performances permettent d'évaluer et de comparer les qualités des différentes techniques de MLI.

#### III.2.2. Objectif de la Technique MLI

Les objectifs principaux d'une MLI sont les suivants :

- Obtenir dans la charge électrique des courants dans la variation est proche de la sinusoïdale par le contrôle de l'évolution des rapports cycliques et grâce à une fréquence élevée des commutations des interrupteurs par rapport à la fréquence des tensions de sortie

- Imposer à l'entrée de l'onduleur un courant de type continu avec des composantes alternatives d'amplitudes réduites et de fréquences élevées.
- Permettre un contrôle fin de l'amplitude du fondamentale des tensions de sortie généralement sur la plus grande plage possible et pour une fréquence de sorties larges variable

Les paramètres essentiels de **MLI** sont par conséquent :

La fréquence de modulation :  $f_m$  ;

L'indice de modulation:  $m = f_m / f_s$

Où  $f_s$  est la fréquence des fondamentaux des grandeurs de sortie de l'onduleur;

- Coefficient de réglage:

$$r = \frac{\text{valeur crête du fondamental de la tension de charge souhaitée}}{\text{amplitude des créneaux de la tension de sortie}}$$

On cherche généralement à obtenir une valeur maximale de "**r**" la plus élevée possible.

### III.3. Techniques de commande MLI

#### III.4. Structures de MLI

La technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) permet de commander la tension de sortie de l'onduleur en amplitude et en fréquence à partir des signaux de commandes des interrupteurs de l'onduleur tout en limitant l'effet des harmoniques. Il existe différentes structures de Modulation de Largeur d'Impulsion permettant de gérer les trois courants d'alimentation de la machine asynchrone à partir des courants de référence calculés au niveau de la commande .Trois types de MLI sont généralement utilisés [15]:

- **La MLI précalculée** : consiste à calculer les instants de commutation des interrupteurs de puissance de manière à éliminer certaines harmoniques non désirables. Ces séquences sont alors enregistrées dans une mémoire et restituées cycliquement pour assurer la commande des interrupteurs. L'implantation de cette technique de MLI sur circuit intégré spécifique est alors envisageable. Plusieurs travaux d'intégration ont d'ailleurs été réalisés pour ce type de structure.
- **La MLI dent scie** : est basée sur la comparaison entre une onde modulante, de forme sinusoïdale à faible fréquence, et une autre onde porteuse de forme dent scie à fréquence plus élevée. Les points d'intersection entre la porteuse et la modulante déterminent les instants de commutation. Ce genre de MLI est surtout bien adapté à l'électronique analogique mais est difficilement utilisable en numérique. En effet, il est, par exemple,

difficile de reproduire une tension de référence sinusoïdale parfaite à partir d'informations numériques.

➤ **La MLI vectorielle** : utilisée dans les commandes modernes des machines asynchrones pour obtenir des formes d'ondes arbitraires non nécessairement sinusoïdales. Le principe de la MLI vectorielle consiste à reconstruire le vecteur tension statorique  $V_s$  à partir de huit vecteur tension. Chacun de ces vecteurs correspond à une combinaison des états des interrupteurs d'un onduleur de tension triphasé, Cette méthode de MLI peut désormais être implantée dans des circuits intégrés numériques. Elle nécessite toute fois des calculs numériques rapides et précis. De ce fait, la fonction MLI est séparée des fonctions de "commande algorithmique" et implantée dans un circuit intégré spécifique .

### III.5. Différentes stratégies de commande

Dans cette partie, nous élaborons quelques stratégies de commande de l'onduleur à trois niveaux qui permettent de générer une source de tension la plus sinusoïdale possible et qui sont :

- La commande en plein onde.
- La commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) [19] .

#### III.5.1. Commande en pleine onde

La commande en pleine onde est une commande classique souvent utilisé pour la commande des onduleurs. Plusieurs cas qui se différencient par les manières d'élaborer la séquence de commande des interrupteurs et de régler la valeur de la tension à la sortie de l'onduleur pour alimenter la machine asynchrone.

Plusieurs commandes pleines ondes sont possibles pour cet onduleur. Cette stratégie consiste à générer un système de tension dans les fondamentaux constituent un système triphasés équilibré.

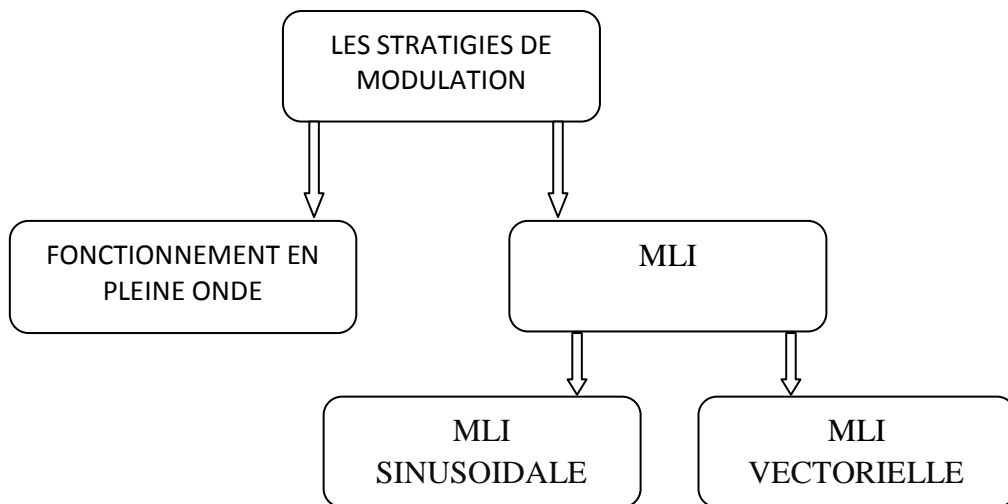


Figure III. 1 : Différentes stratégies de modulation pour la commande des onduleur

### III.5.2. Commande MLI sinusoidale

Ce chapitre présente les principes de la MLI basée sur les porteuses décalées verticalement qui sont utilisé pour les convertisseurs multi-niveaux. à savoir :

- MLI à porteuses alternées : (APOD) - chaque porteuse est déphasée  $180^0$  par rapport à celle au dessous (fig III.2)
- MLI à porteuses en opposition (POD) : Toutes les porteuses au-dessus de zéro sont déphasée de  $180^0$  par rapport à celle au dessous de zéro (fig III.3)
- MLI à porteuses en phase (PD) : Tout les porteuses sont en phase. fig III.4

#### III.5.2.1. MLI à porteuses alternées (APOD)

chaque porteuse est déphasée  $180^0$  par rapport à la porteuse au dessus ( fig III.2 )

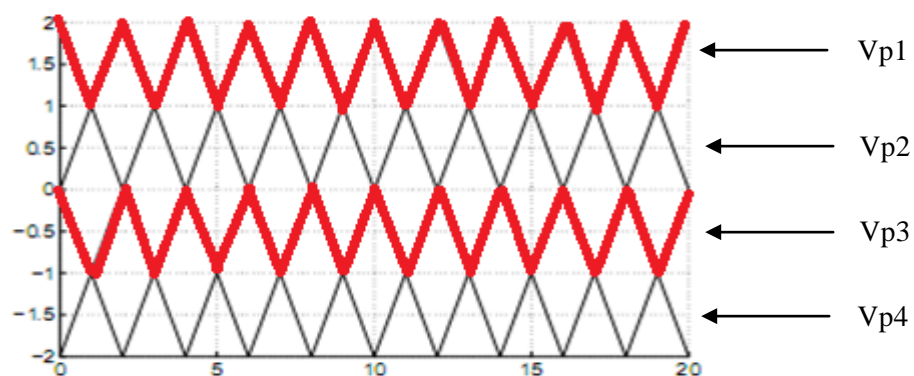


Figure III. 2 : Porteuses alternées

##### III.5.2.1. 1. Algorithme de commande

L'algorithme de commande de la stratégie MLI sinusoidale à porteuses alternée pour un bras  $k$  de l'onduleur triphasé à cinq niveaux est donné par le système suivant :

$$si (V_{ref} > V_{p1}) \Rightarrow F_{k1} = 1 \text{ sinon } F_{k1} = 0$$

$$si (V_{ref} > V_{p2}) \Rightarrow F_{k2} = 1 \text{ sinon } F_{k2} = 0$$

$$si (V_{ref} > V_{p3}) \Rightarrow F_{k3} = 1 \text{ sinon } F_{k3} = 0$$

$$si (V_{ref} > V_{p4}) \Rightarrow F_{k4} = 1 \text{ sinon } F_{k4} = 0$$

### III.5.2.2. MLI à porteuses en phases (PD) :

Toutes les porteuses décalées verticalement sont en phase fig III.3

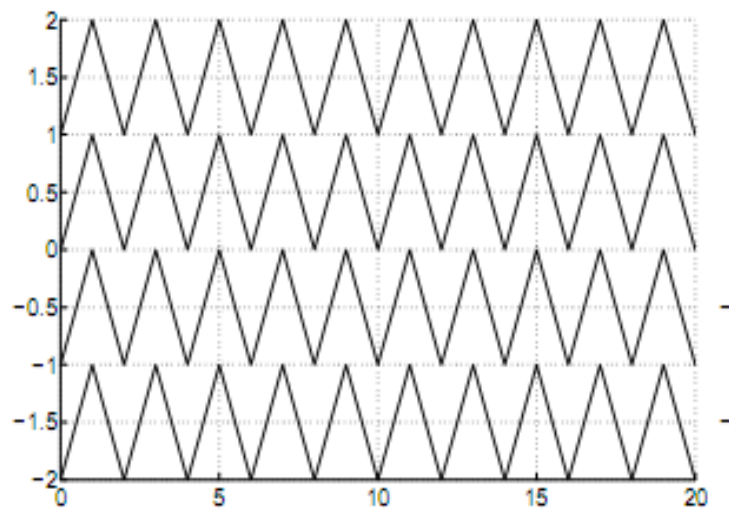


Figure III. 3 : Porteuse en phase

#### III.5.2.2. 1. Algorithme de commande

L'algorithme de la commande MLI sinusoidale à porteuse en phase se résume pour un bras k de l'onduleur comme suit :

$$si (V_{ref} > V_{p1}) \Rightarrow F_{k1} = 1 \text{ sinon } F_{k1} = 0$$

$$si (V_{ref} > V_{p2}) \Rightarrow F_{k2} = 1 \text{ sinon } F_{k2} = 0$$

$$si (V_{ref} > V_{p3}) \Rightarrow F_{k3} = 1 \text{ sinon } F_{k3} = 0$$

$$si (V_{ref} > V_{p4}) \Rightarrow F_{k4} = 1 \text{ sinon } F_{k4} = 0$$

### III.5.2.3. MLI à porteuses en oppositions (POD) :

Les porteuses en dessous sont en phase l'une par rapport à l'autre et en opposition de phase par rapport à celles au dessus de zéro fig III.4

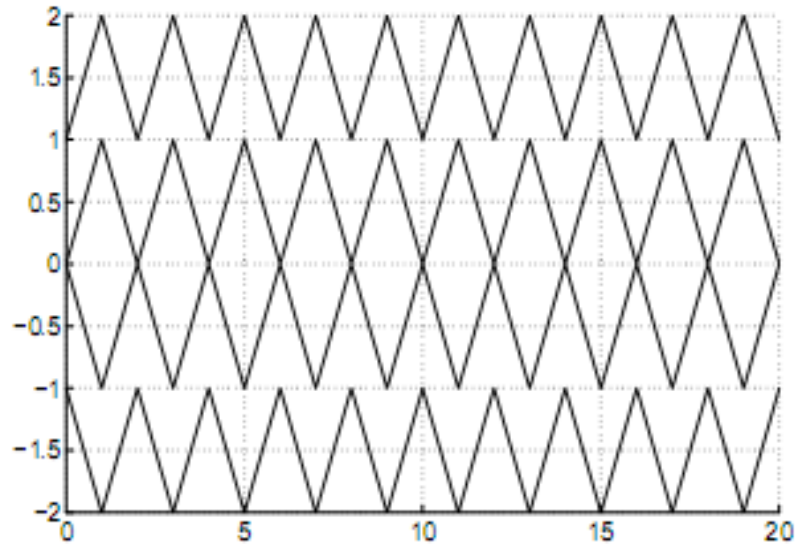


Figure III. 4: porteuse en opposition .

### III.5.2.2. 1. Algorithme de commande

L'algorithme de commande d'un bras  $k$  de l'onduleur se résume comme suivantes :

$$si (V_{ref} > V_{p1}) \Rightarrow F_{k1} = 1 \text{ sinon } F_{k1} = 0$$

$$si (V_{ref} > V_{p2}) \Rightarrow F_{k2} = 1 \text{ sinon } F_{k2} = 0$$

$$si (V_{ref} > V_{p3}) \Rightarrow F_{k3} = 1 \text{ sinon } F_{k3} = 0$$

$$si (V_{ref} > V_{p4}) \Rightarrow F_{k4} = 1 \text{ sinon } F_{k4} = 0$$

## III.6. CONCLUSION

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté en générale les techniques de la commande MLI avec porteuses décalées verticalement appliquées à l'onduleur de tension à 5 niveaux à diodes flottantes, l'objectif de la technique MLI et la construction de sa structure .

Dans le quatrième chapitre, nous allons exposée les différents résultats de simulation pour mettre en œuvre la commande en pleine onde à MLI sinusoïdale de l'onduleur à cinq niveau à diodes flottantes .

# Chapitre IV

## Simulation et interprétation des résultats

dans le chapitre

IV. Simulation et interprétation des résultats.....	48
IV.1. Introduction.....	48
IV.2. Commande pleine onde.....	48
IV.3. Commande MLI avec porteuses en opposition de phase deux par deux décalées verticalement.....	51
IV.4. Commande MLI avec porteuses en phase décalées verticalement.....	56
IV.5. Conclusion.....	61

## IV. Simulation et interprétation des résultats :

### IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, trois techniques de commande appliquées sur un onduleur de tension à diodes flottantes à 5 niveaux sont simulées en utilisant le logiciel Matlab/Simulink.

Les performances des trois techniques sont comparées en terme de qualité de forme d'onde de tension de sortie est faite tout en assurant la même amplitude de la composante fondamentale de cette tension de sortie. Les trois techniques sont :

- La commande pleine onde,
- La commande MLI avec porteuses en phase décalées verticalement,
- La commande MLI avec porteuses en opposition de phase deux par deux décalées verticalement.

### IV.2. Commande pleine onde :

Dans cette commande, quatre signaux continus de référence sont comparés avec un signal alternatif qui peut être de forme triangulaire ou même sinusoïdale pour générer les signaux de commande des différents interrupteurs électroniques constituant l'onduleur (figure IV.1). La tension sortie par rapport au point milieu du bus continu ( $v_{ao}$ ) aura une fréquence égale à la fréquence du signal alternatif avec 5 niveaux de tension (figure IV.1).

Les paramètres de simulation sont :

- Tension du bus continu :  $V_{dc1} = V_{dc2} = V_{dc3} = V_{dc4} = 200V$ .
- Charge triphasée équilibrée :  $R=10\text{ Ohm}$ ,  $L=510^{-3}H$ .
- Signal alternatif de la commande pleine onde : Signal sinusoïdal d'amplitude 1 et fréquence 50Hz.
- Signaux continus de la commande pleine onde :  $+/- 0.9$  et  $+/- 0.3$ .

Selon son analyse spectral, la tension sortie par rapport au point milieu du bus continu ( $v_{ao}$ ) a un fondamental d'amplitude de 350V et une fréquence de 50Hz plus des harmoniques basse fréquence relativement considérables (figure IV.1).

La même remarque est constatée pour la tension simple de la charge triphasée ( $v_{an}$ ) avec la différence que cette dernière ( $v_{an}$ ) est moins polluée que ( $v_{ao}$ ) (**THD** de  $v_{ao}=25.5\%$  et **THD** de  $v_{an}=25.5\%$ ) (figure IV.1 et figure IV.2).

Les courants de charge sont de forme alternative relativement loin de la sinusoïde.

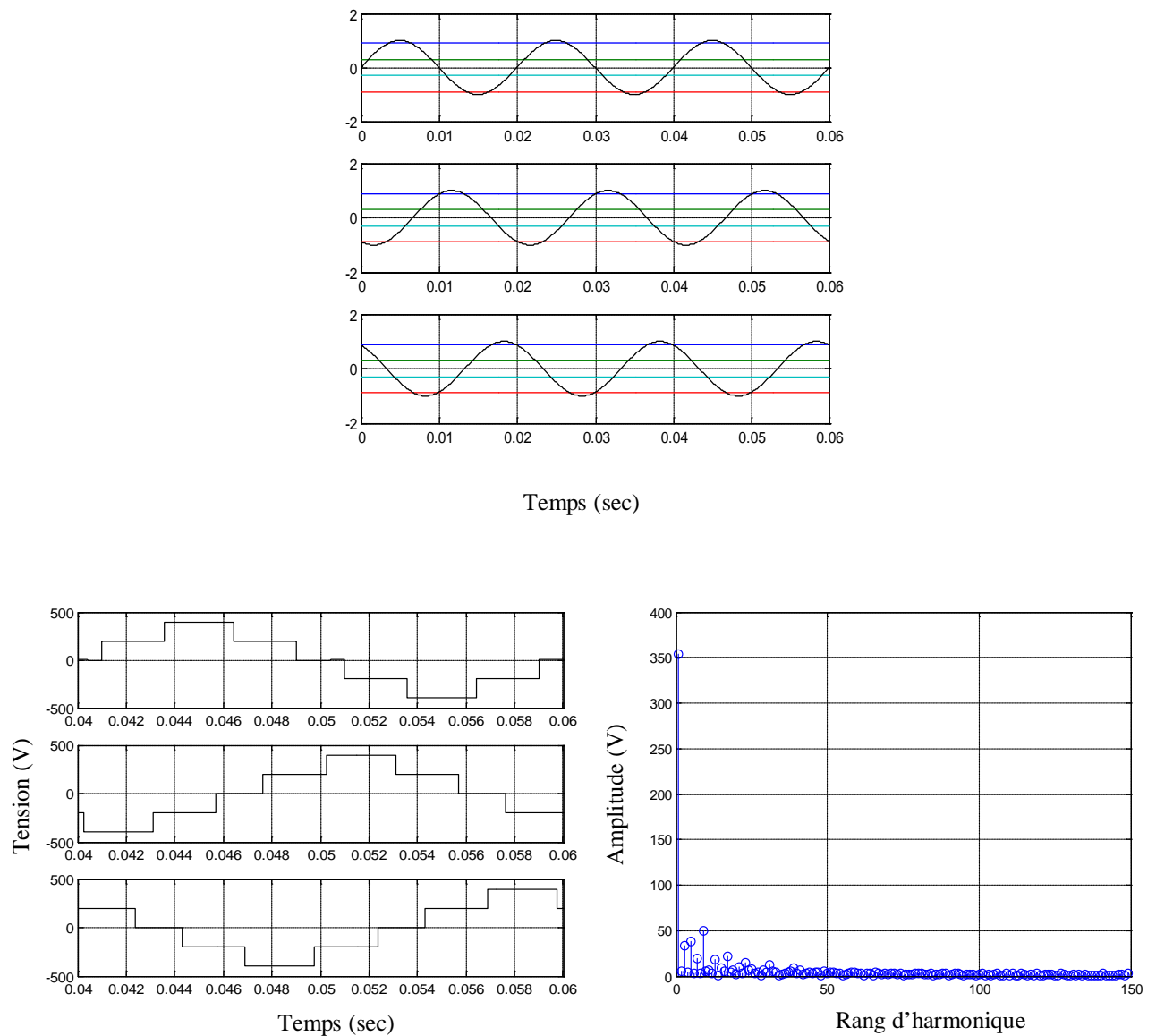


figure IV.1: Signaux de la commande pleine onde, tensions de sortie et analyse spectral de la tension de sortie de la première phase ( $v_{ao}$ ) (Amplitude du fondamental de  $v_{ao}=350$  V, fréquence du fondamental de  $v_{ao}=50$  Hz et **THD** = 25.5 %)

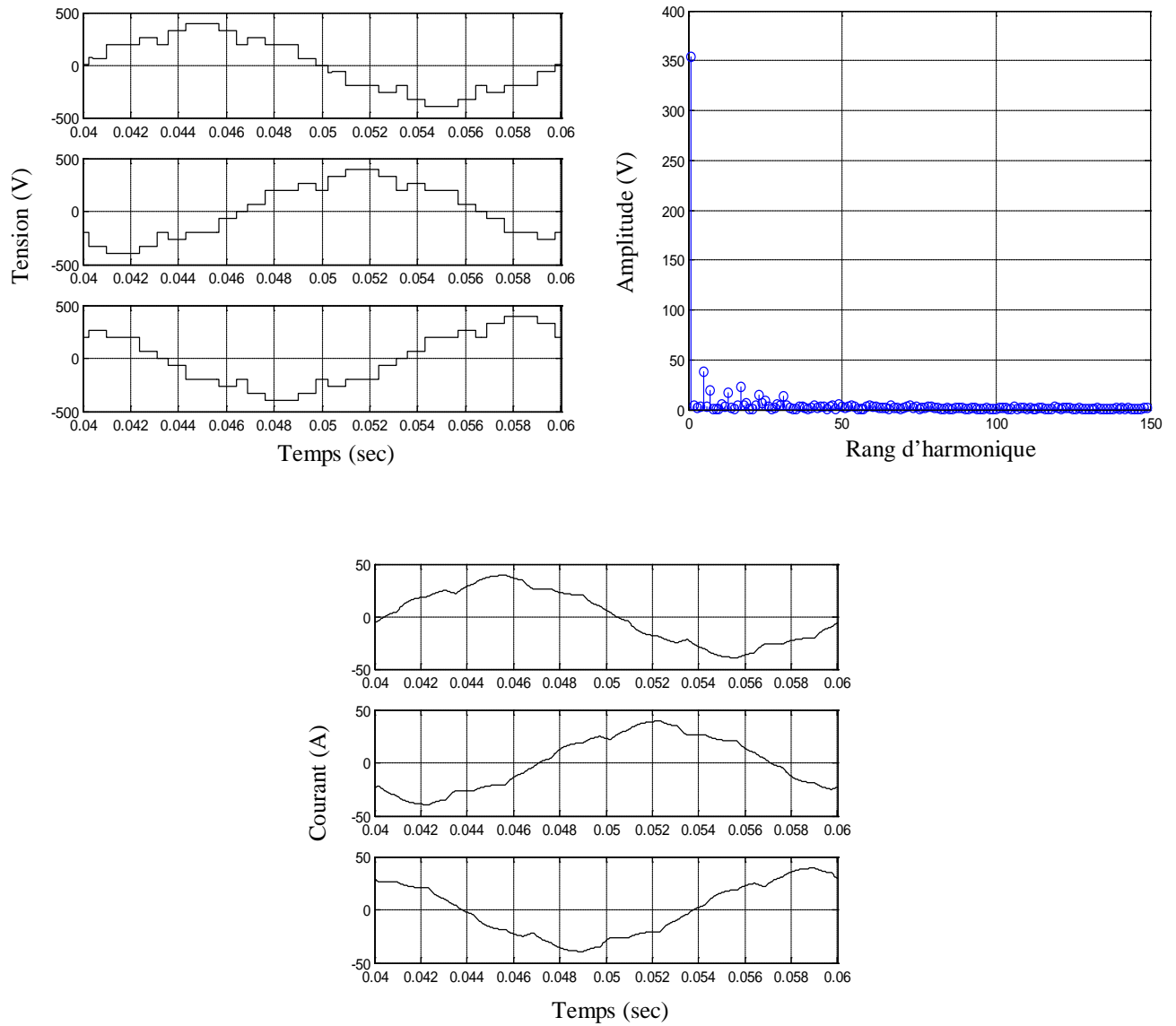


figure IV. 2: Tensions simples de la charge, analyse spectrale de la tension de la première phase de la charge (van) (Amplitude du fondamental de van=350 V fréquence du fondamental de van=50 Hz et **THD** = 18 %) et courants de charge .

### IV.3. Commande MLI avec porteuses en opposition de phase deux par deux décalées verticalement :

Dans cette commande, quatre porteuses sont comparés avec un signal de référence généralement sinusoïdal pour générer les signaux de commande des différents interrupteurs électroniques constituant l'onduleur (figure IV.3). La tension sortie par rapport au point milieu du bus continu (vao) aura une fréquence égale à la fréquence du signal de référence avec 5 niveaux de tension (figure IV.3).

Les paramètres de simulation sont :

- Tension du bus continu :  $V_{dc1} = V_{dc2} = V_{dc3} = V_{dc4} = 200V$ .
- Charge triphasée équilibrée :  $R=10\text{ Ohm}$ ,  $L=510^{-3}H$ .
- Signal de référence de la commande **MLI** : 1 signal sinusoïdal par phase d'amplitude de 1.8 et de fréquence  $f_{ref}=50\text{ Hz}$  (figure IV.3).
- Porteuses de la commande **MLI** : 4 porteuses triangulaires d'amplitude de 0.5 et de fréquence  $f_{p1}=m_1*f_{ref}=21*50\text{ Hz}$  (figure IV.3) et  $f_{p2}=m_2*f_{ref}=50*50\text{ Hz}$  (figure IV.5).

Selon son analyse spectral, la tension sortie par rapport au point milieu du bus continu (vao) a un fondamental d'amplitude de 350V et une fréquence de 50 Hz plus des harmoniques basse fréquence quasiment nulles et des harmoniques haute fréquence largement répartis autour du rang égal à l'indice de modulation  $m=21$  (figure IV.3) et  $m=50$  (figure IV.5).

La même remarque est constatée pour la tension simple de la charge triphasée (van) avec la différence que cette dernière (van) est moins polluée que (vao) (**THD** de vao=33.5 % et **THD** de van=29 %) (figure IV.5 et figure IV.6).

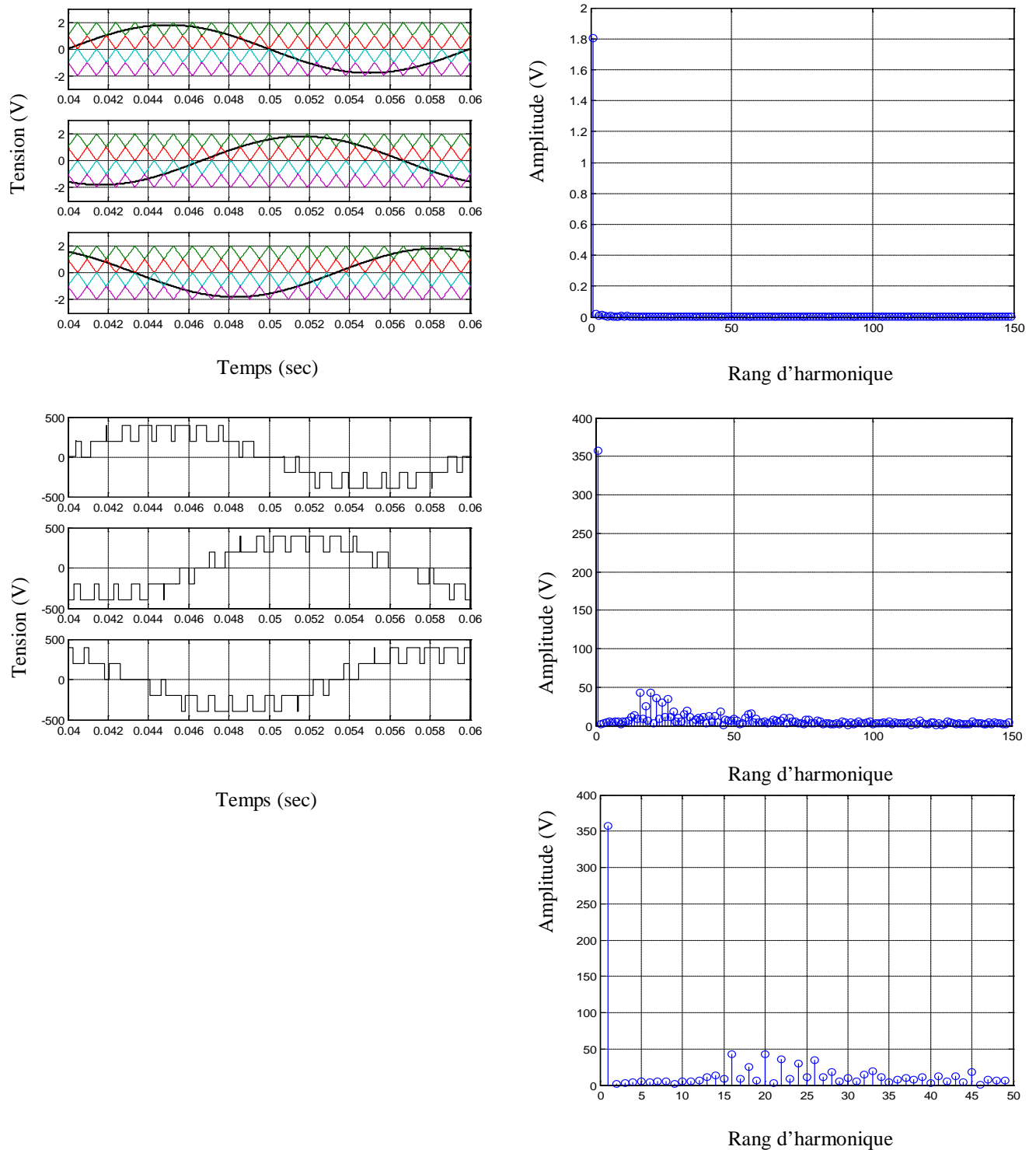


figure IV.3: Signaux de référence avec porteuses en opposition de phase deux par deux, analyse spectrale d'un des trois signaux de référence, tensions de sortie et analyse spectral de la tension de sortie de la première phase ( vao ) (Amplitude du fondamental de vao=350 V , fréquence du fondamental de vao=50 Hz et fréquence des porteuses  $f_p=21 \cdot 50 \text{ Hz}$  ) .

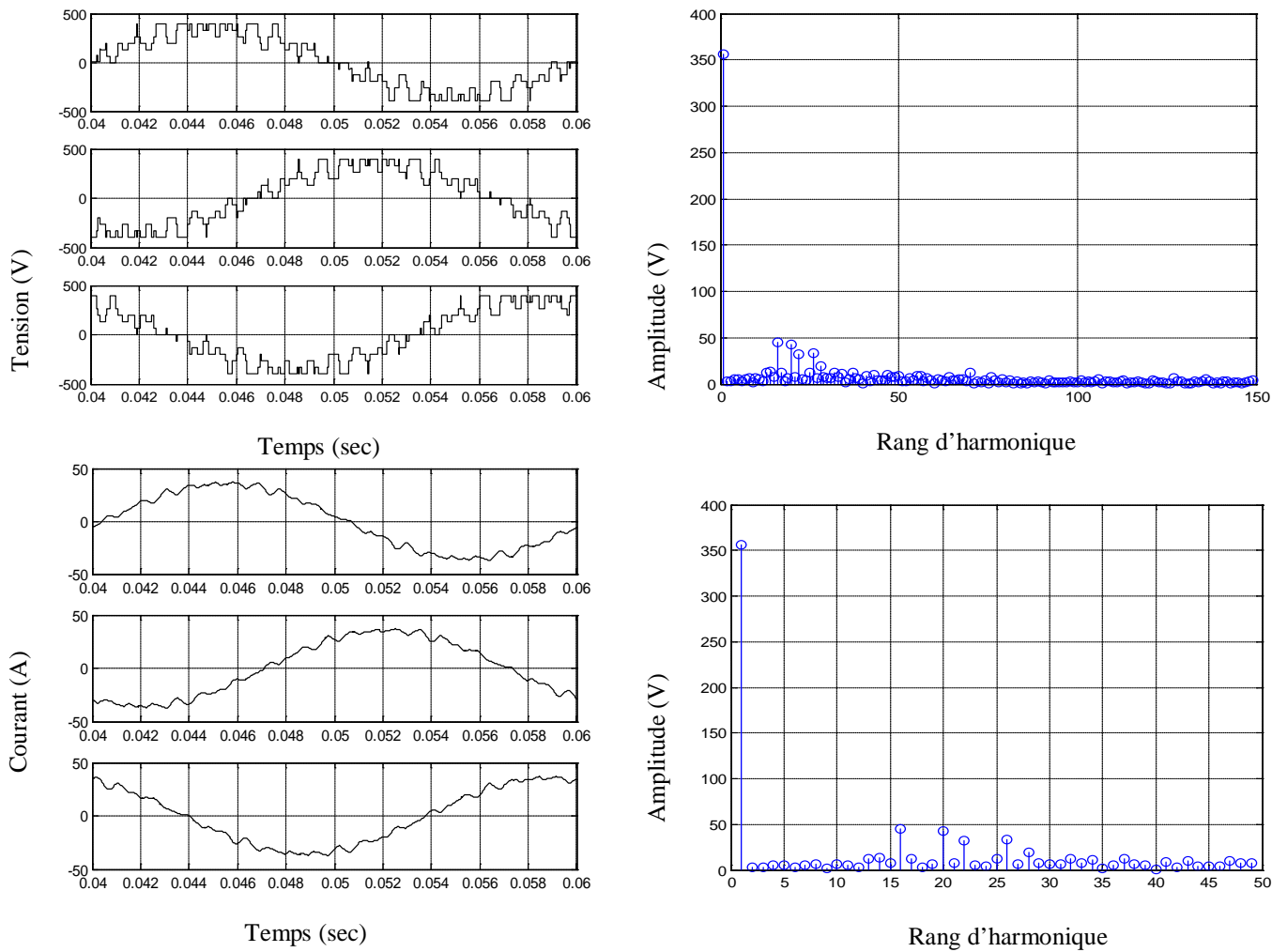


figure IV.4: Tensions simples de la charge, analyse spectrale de la tension de la première phase de la charge ( $v_{an}$ ) (Amplitude du fondamental de  $v_{an}=350$  V fréquence du fondamental de  $v_{an}=50$  Hz et fréquence des porteuses  $f_p=21*50$  Hz) et courants de charge

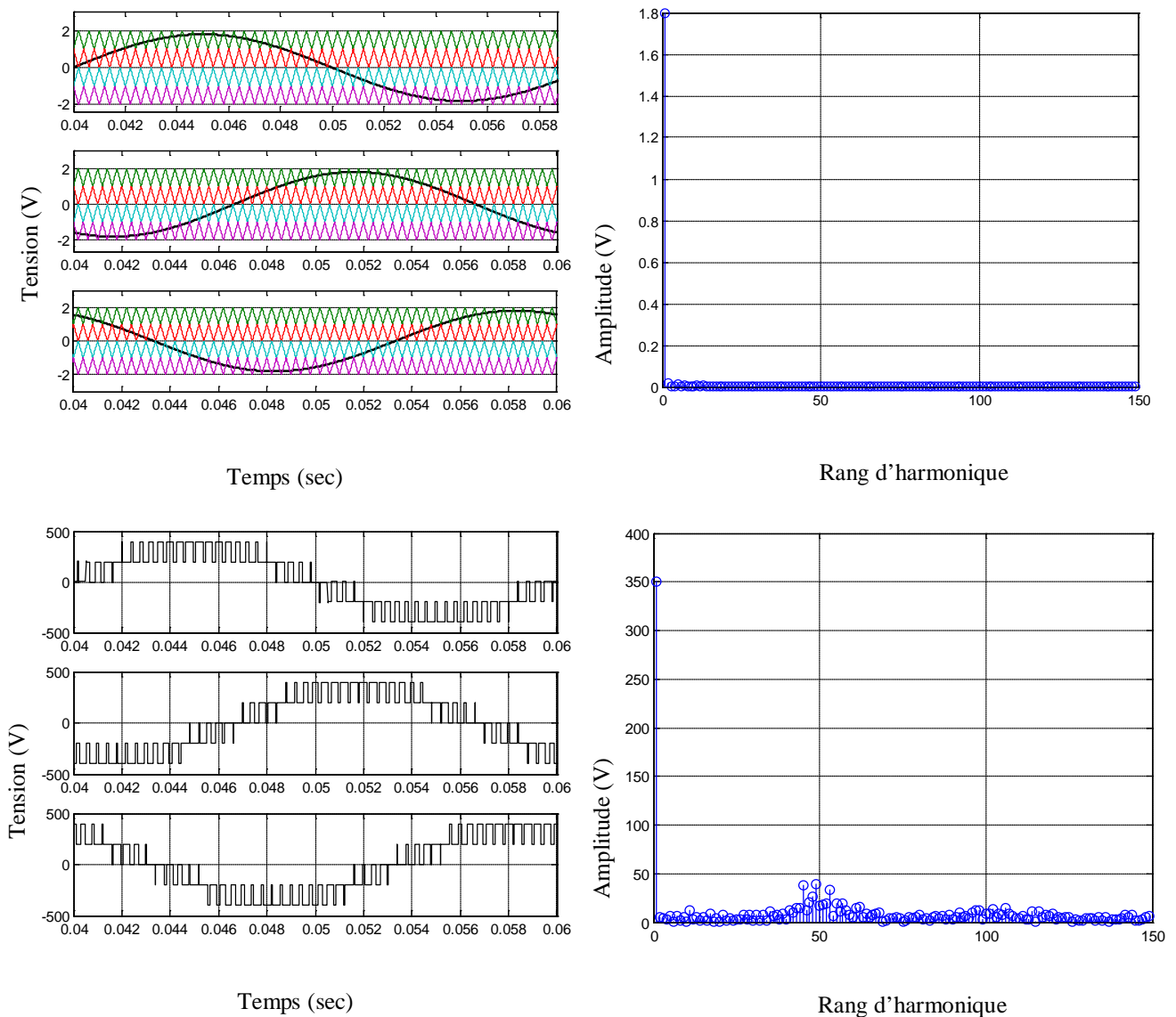


figure IV.5: Signaux de référence avec porteuses en opposition de phase deux par deux, analyse spectrale d'un des trois signaux de référence, tensions de sortie et analyse spectral de la tension de sortie de la première phase (  $v_{ao}$  ) ( **THD** de  $v_{ao}=33.5\%$  , amplitude du fondamental de  $v_{ao}=350\text{ V}$  , fréquence du fondamental de  $v_{ao}=50\text{ Hz}$  et fréquence des porteuses  $f_p=50*50\text{ Hz}$  ) .

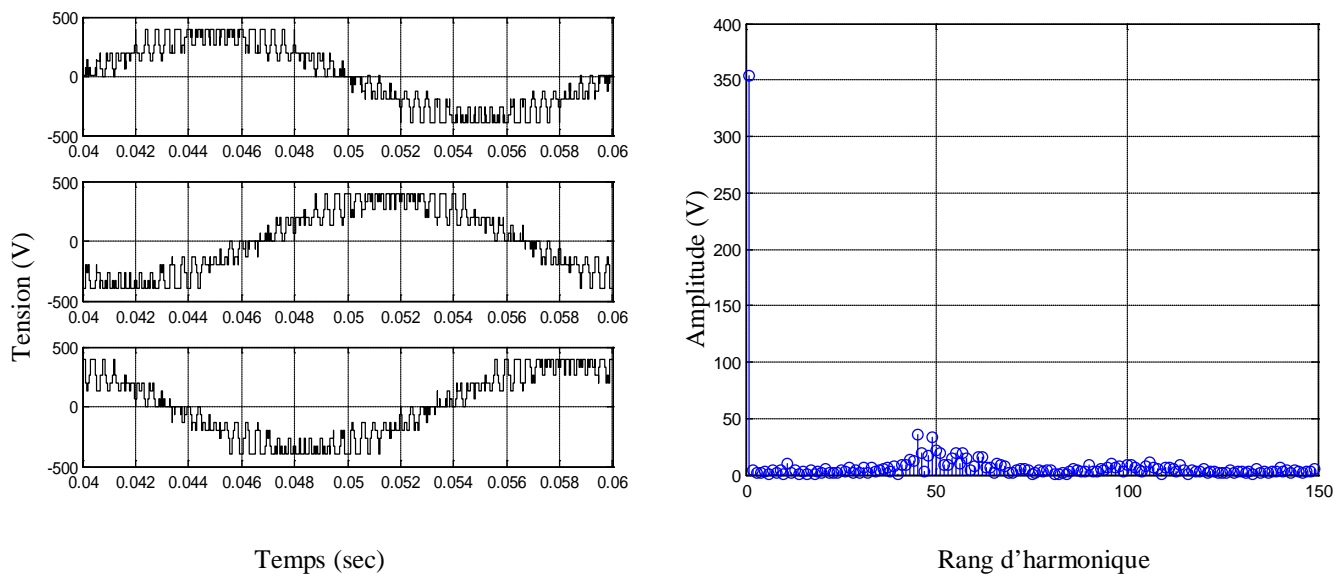


figure IV.6: Tensions simples de la charge, analyse spectrale de la tension de la première phase de la charge ( $v_{an}$ ) (**THD** de  $v_{an}=29\%$ , amplitude du fondamental de  $v_{an}=350\text{ V}$  fréquence du fondamental de  $v_{an}=50\text{ Hz}$  et fréquence des porteuses  $f_p=50*50\text{ Hz}$ ) et courants de charge .

#### IV.4. Commande MLI avec porteuses en phase décalées verticalement :

Dans cette commande, quatre porteuses en phase et décalées verticalement sont comparés avec un signal de référence généralement sinusoïdal pour générer les signaux de commande des différents interrupteurs électroniques constituant l'onduleur (figure IV.7).

La tension sortie par rapport au point milieu du bus continu ( $v_{ao}$ ) aura une fréquence égale à la fréquence du signal de référence avec 5 niveaux de tension (figure IV.7).

Les paramètres de simulation sont :

- Tension du bus continu :  $V_{dc1} = V_{dc2} = V_{dc3} = V_{dc4} = 200V$  .
- Charge triphasée équilibrée :  $R=10\text{ Ohm}$ ,  $L=510^{-3}H$  .
- Signal de référence de la commande **MLI** : 1 signal sinusoïdal par phase d'amplitude de 1.8 et de fréquence  $f_{ref}=50\text{ Hz}$  figure IV.7).
- Porteuses de la commande **MLI** : 4 porteuses triangulaires d'amplitude de 0.5 et de fréquence  $f_{p1} = m_1 * f_{ref} = 21 * 50\text{ Hz}$  (figure IV.3) et  $m_1 * f_{ref}$   $f_{p2}=m_2 * f_{ref}=50 * 50\text{ Hz}$  (figure IV.7).

Selon son analyse spectral, la tension sortie par rapport au point milieu du bus continu ( $v_{ao}$ ) a un fondamental d'amplitude de 350V et une fréquence de 50Hz plus des harmoniques basse fréquence quasiment nulles et des harmoniques haute fréquence étroitement répartis autour du rang égal à l'indice de modulation  $m=21$  (figure IV.8) et  $m=50$  (figure IV.10).

Pour la tension simple de la charge triphasée ( $v_{an}$ ), on constate que les harmoniques sont de faibles amplitudes y comprises celles autour de du rang égal à l'indice de modulation  $m=21$  (figure IV.9) et  $m=50$  (figure IV.11.) ce qui conduit à un **THD** de  $v_{an}=17\%$ . Ce dernier est plus faible que le **THD** de la même tension avec commande **MLI** basée sur de porteuses en opposition de phase deux par deux. Pour la commande pleine onde, on peut réduire le **THD** de la tension de charge à la même valeur en utilisant la commande par élimination d'harmonique mais il y aura toujours des harmoniques basse fréquence difficile à filtrer sans perturber le fondamental.

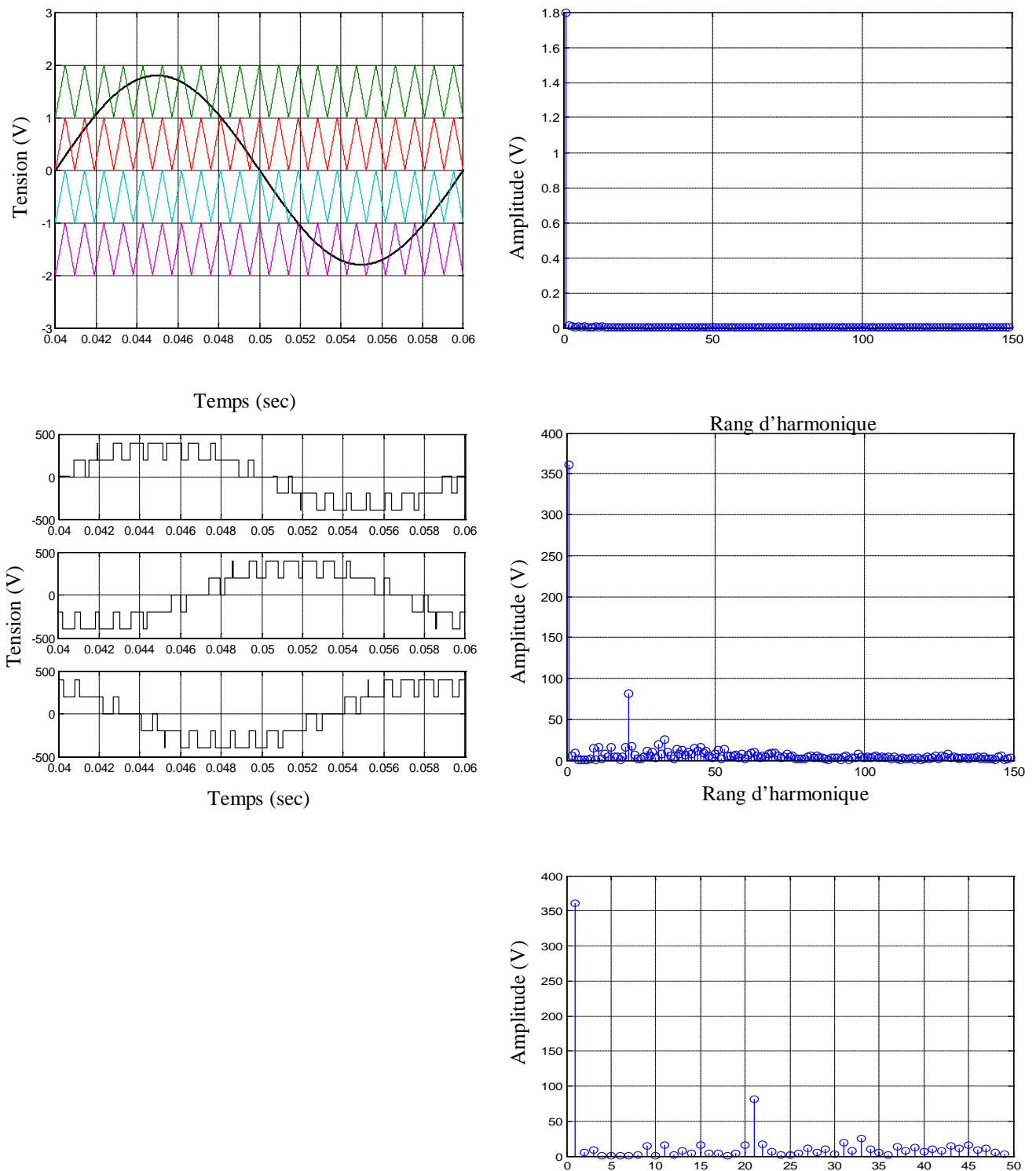


figure IV.8: Signal de référence avec porteuses en phase, analyse spectrale d'un des trois signaux de référence, tensions de sortie et analyse spectral de la tension de sortie de la première phase (vao) (**THD** de vao=33.3%, amplitude du fondamental de vao=355V , fréquence du fondamental de vao=50Hz et fréquence des porteuses  $f_p=21 \cdot 50\text{Hz}$  )

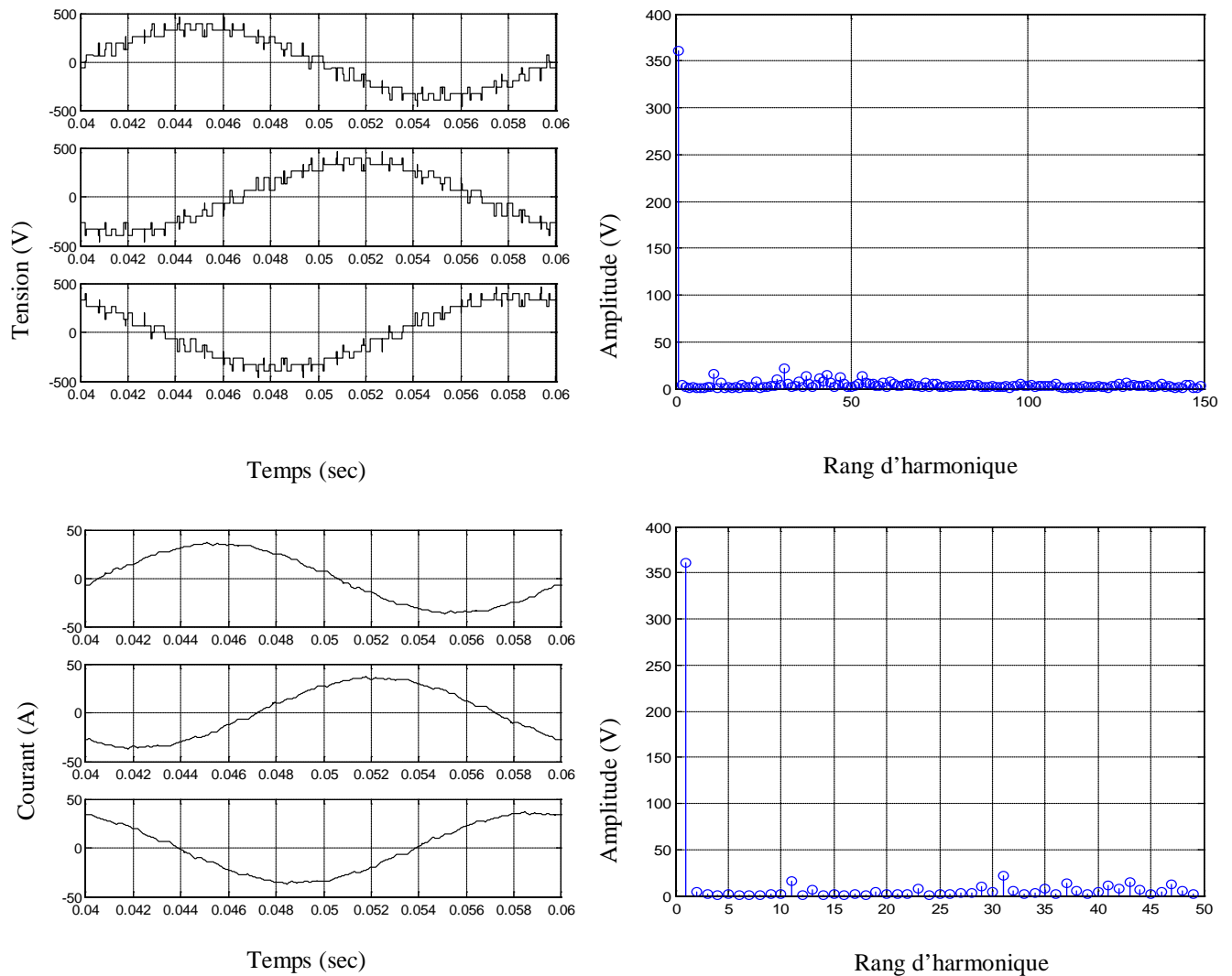


figure IV.9: Tensions simples de la charge, analyse spectrale de la tension de la première phase de la charge ( $\text{THD}$  de  $v_{an}=17\%$ , amplitude du fondamental de  $v_{an}=355\text{ V}$  fréquence du fondamental de  $v_{an}=350\text{ Hz}$  et fréquence des porteuses  $f_p=21*50\text{ Hz}$ ) et courants de charge

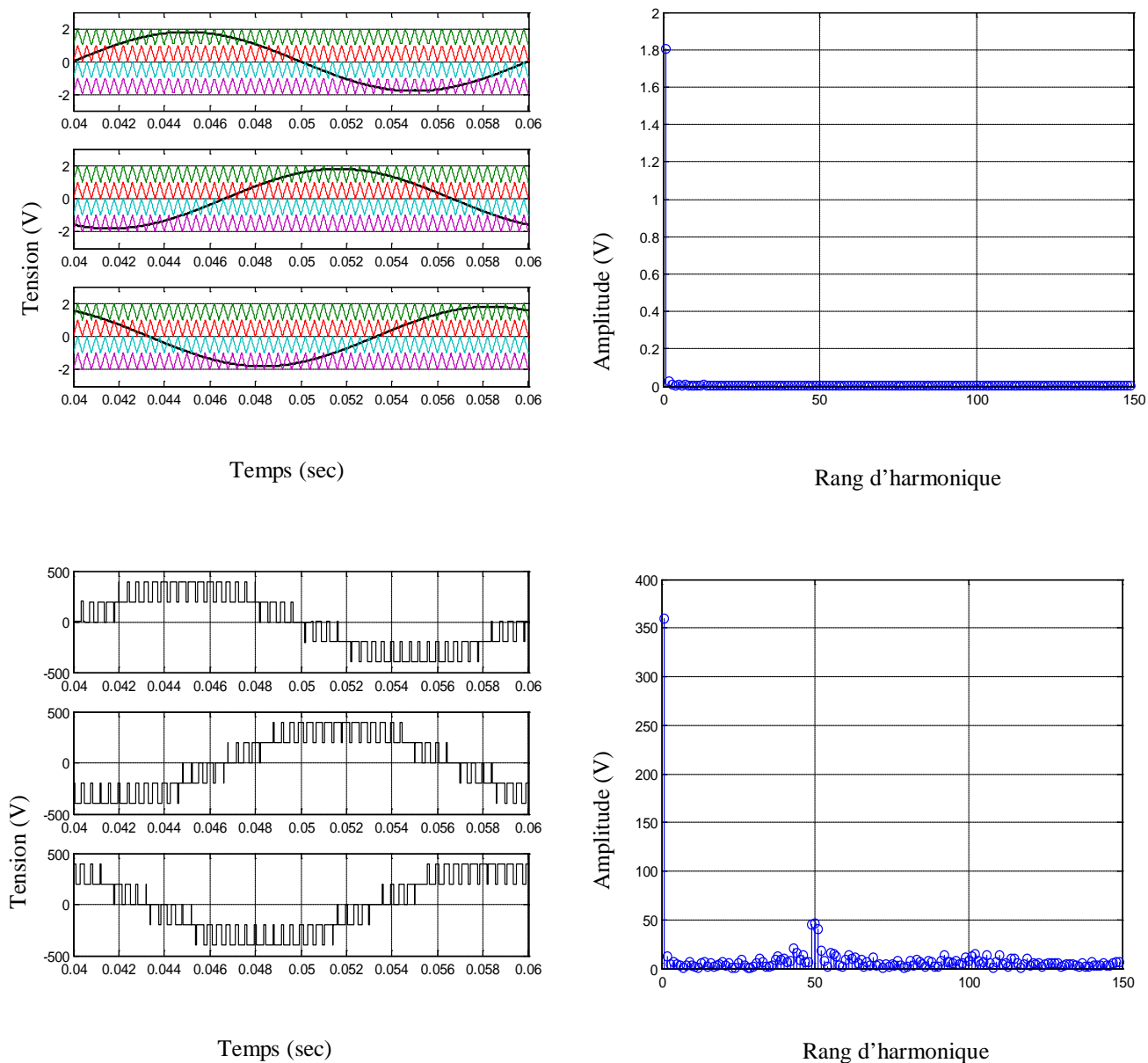


figure IV.10: Signaux de référence avec porteuses en phase, analyse spectrale d'un des trois signaux de référence, tensions de sortie et analyse spectral de la tension de sortie de la première phase (vao) (**THD** de vao=33.5 %, amplitude du fondamental de vao=355 V , fréquence du fondamental de vao=50 Hz et fréquence des porteuses  $f_p=50*50$  Hz )

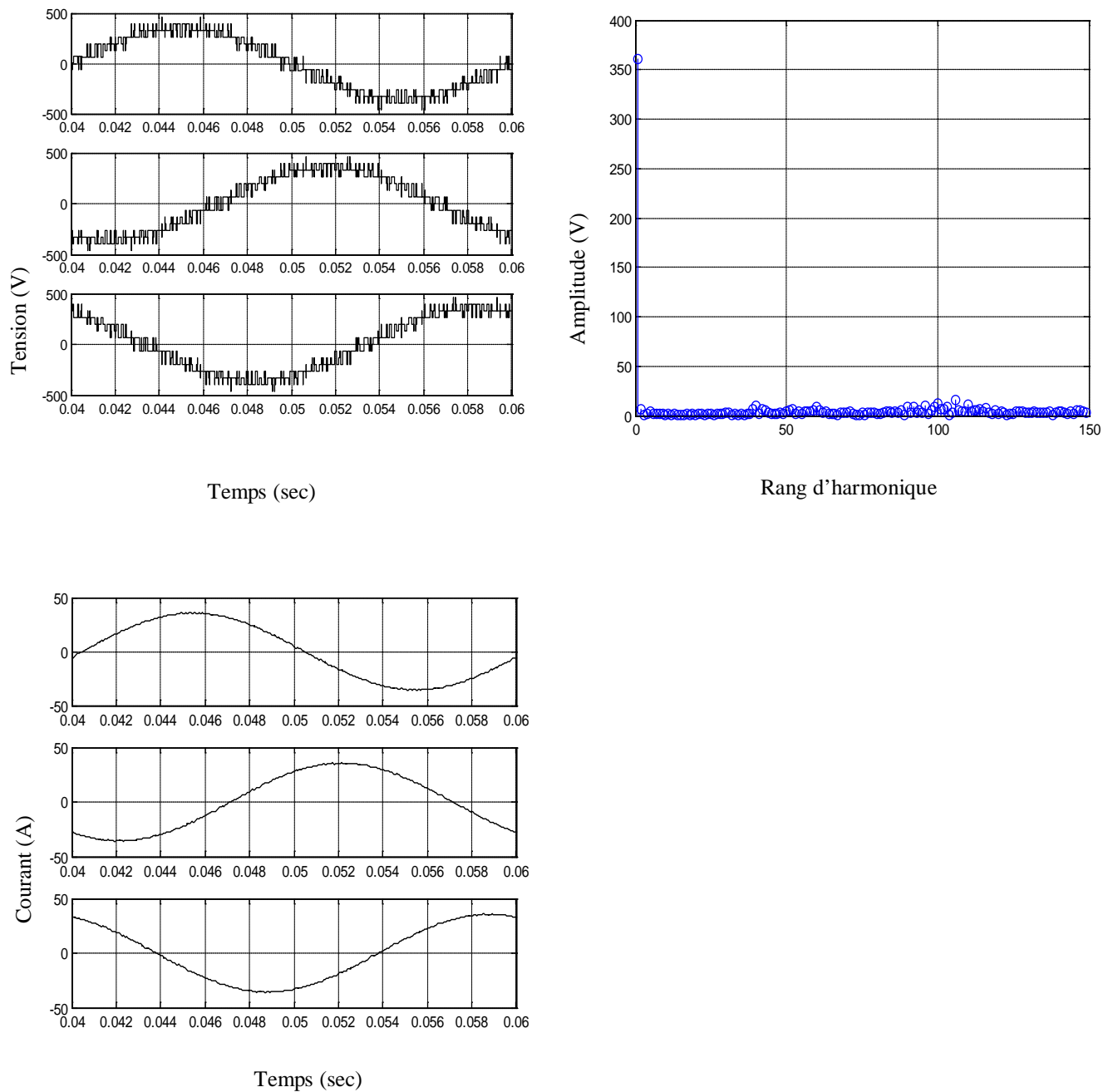


figure IV.11: Tensions simples de la charge, analyse spectrale de la tension de la première phase de la charge (van) (**THD** de van=17 %, amplitude du fondamental de van=355 V fréquence du fondamental de van=50 Hz et fréquence des porteuses  $f_p=21 \cdot 50 \text{ Hz}$ ) et courants de charge

#### IV.5. Conclusion :

Trois techniques de commande appliquées sur un onduleur de tension à diodes flottantes à 5 niveaux sont simulées et leurs performances comparées en terme de qualité de forme d'onde de tension de sortie (tension de charge) tout en assurant la même amplitude de

la composante fondamentale de cette tension de charge. Les trois techniques sont :

- ❖ La commande pleine onde,
- ❖ La commande **MLI** avec porteuses en phase décalées verticalement,
- ❖ La commande **MLI** avec porteuses en opposition de phase deux par deux décalées verticalement.

On peut conclure que la commande **MLI** avec porteuses en phase décalées verticalement offre la tension de charge la moins polluée avec des harmoniques basse fréquence quasiment nulles. La commande pleine onde présente l'inconvénient majeur lié à l'existence d'harmoniques basse fréquence difficile à filtrer sans perturber le fondamental .

# Conclusion générale

## Conclusion générale :

Les machines à courant alternatif sont souvent alimentées par des convertisseurs DC-AC à deux ou à trois niveaux. Cependant, ces derniers sont limités en tension et en puissance. Afin de contourner ce problème, plusieurs structures de convertisseurs ont été proposées, notamment les onduleurs multi-niveaux à structure diode flottante. L'alimentation des machines à courant alternatif de puissance par ce type d'onduleurs, permet non seulement de contrôler la tension et la fréquence de ces machines mais aussi, de réduire les contraintes sur les interrupteurs électroniques. De plus, le courant et la tension fournis ont un spectre de meilleure qualité.

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 triangle-sinusoïdale 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.

Dans ce mémoire, nous avons étendu les notions connues pour la stratégie citée ci-dessus aux onduleurs à cinq et trois niveaux. Pour cela, nous avons appliqué trois techniques de commande, une à pleine onde et deux stratégies triangulo-sinusoïdales pour la commande de l'onduleur à diodes flottantes. L'analyse des performances de ces algorithmes est réalisée à travers des tests effectués sur les onduleurs à cinq niveaux. Les techniques de commande appliquées sur un onduleur de tension à diodes flottantes à 5 niveaux sont simulées et leurs performances comparées en terme de qualité de forme d'onde de tension de sortie (tension de charge) tout en assurant la même amplitude de la composante fondamentale de cette tension de charge. Les trois techniques sont :

- ❖ La commande pleine onde,
- ❖ La commande MLI avec porteuses en phase décalées verticalement,
- ❖ La commande MLI avec porteuses en opposition de phase deux par deux décalées verticalement.

On a pu conclure que la commande MLI avec porteuses en phase décalées verticalement offre la tension de charge la moins polluée avec des harmoniques basse fréquence quasiment nulles. La commande pleine onde présente l'inconvénient majeur lié à l'existence d'harmoniques basse fréquence difficile à filtrer sans perturber le fondamental.

Les perspectives de ce travail sont :

- ❖ L'application de la commande vectorielle à ce type d'onduleur.
- ❖ Application d'algorithme d'équilibrage des tensions du bus continu.
- ❖ Développement de méthodes de diagnostic pour les défaillances qui surviennent dans ce type de convertisseur.



# Bibliographie

## **Bibliographie :**

- [1] C. Gertser, P. Hofer, and N. Karrer. Gate control strategies for snubber less operation of series connected IGBT's. PESC'96, 2 :1739–1742.
- [2] J-M. Andrejak and M. Lescure. High voltage converters promising technological developments. EPE'87, pages 159–162, September.
- [3] : P.W. Hammond. Enhancing the reliability of modular medium-voltage drives. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 49(5) :948–954, October 2002.
- [4] : Emanuel Florin MOGOŞPRODUCTION DECENTRALISEE DANS LES RESEAUX DE DISTRIBUTION. ETUDE PLURIDISCIPLINAIRE DE LA MODELISATION POUR LE CONTROLE DES SOURCES. DOCTEUR Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Lille 2005.
- [5] : Jean-Paul Louis: Modélisation des machines électriques en vue de leur commande .
- [6] : L .BAGHLI: modélisation et commande de la machine asynchrone 2005.
- [7] : B.KHALIFA ; Réalisation d'un banc d'essai pour la Commande et L'Observation des Convertisseurs Multicellulaires Série : Approche Hybride. Grade de docteur Université de cergy-pontoise 2009.
- [8] N. Celanovic, "Space Vector Modulation and Control of Multilevel Converters", PhD Thesis, Virginia Polytechnic Institute, 2000.
- [9] Jean-Sébastien MARIÉTHOZ, *Étude formelle pour la synthèse de convertisseurs multiniveaux asymétriques : topologies, modulation et commande*, Thèse nO 3188 (2005), École Polytechnique Fédérale de LAUSANNE, Suisse.
- [10] K.BOULAAM , E.M.,M.S.BOUCHERIT , G.MANESSE,“ Linear beedback control of the input DC voltage of a three – levels NPC VSI Application to the speed control of PMSM fed by a three-levels NPC PWM rectifier-three-levels NPC VSI cascade”,IFAC'2000,Avril 2000,Bruxelle ,Belgique.
- [11] Michel Pinard «Convertisseurs et électronique de puissance Commande • Description Mise en œuvre » Imprimerie CHIRAT – 42540. Saint-Just-la-Pendue, Dépôt légal : avril 2007,N° 4300,Imprimé en France.
- [12] E.M.BERKOUK, “Contribution à la conduite des Machines Asynchrones Monophasées et Triphasées Alimentées par des Convertisseurs Directs et Indirects. Application aux Gradateurs et Onduleurs Multiniveaux ”, Thèse de doctorat, CNAM, 1995, PARIS.
- [13] E.M.Berkouk ,Y.B.Romdhane ,G.Manesse . «Knowledge and control models of three levels voltage inverter »IMACS, Allemagne 1995.
- [14] K.Bouaam . « Analyse et commande de la cascade redresseur triphasé à trois niveaux à MLI –onduleur triphasé à trois niveaux application à la conduite d'une MSAP » Thèse de Magister ENP Alger 2000 .

[15] R.Guedouani « Commande d'un onduleur de tension multi-niveaux ,Application à la conduite d'une machine synchrone à aimants permanents »Thèse de Magister ENP 1998,Alger.

[16] :R.CHIBANI « Modélisation et commande d'un onduleur de tension à cinq niveaux à structure NPC alimentant une machine synchrone à aimants permanent » SSA2 99 Blida 1999 .

[17] H. FOCH, F. FOREST, T. MEYNARD, "Onduleurs de tension", Techniques de l'Ingénieur, novembre 1998.

[18] B. K. Bose, 'Power Electronics And AC Drives', Edition Practice Hall, 1986.

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

**FILIERE : GENIE ELECTRIQUE**

**SPECIALITE : COMMANDE DES SYSTEMES ELECTRIQUES**

**Proposé et dirigé par : Mr. BENSLIMANE Tarak.**

**Présenté par: AMMICHE Abd ennour.**

**Thème :**

Commande d'un onduleur de tension à diode flottante

**Résumé**

L'objectif de cette mémoire est l'étude de des onduleur multiniveau et particulier les onduleur à trois et cinq niveaux à diodes flottantes .

Après une présentation des description et modalisation des onduleurs à trois et cinq niveaux à diodes flottantes .

Ensuite, présenté en générale les technique de la commande l'onduleur triphasée et les différentes stratégies de commende des onduleurs multiniveau .

La dernière partie de ce mémoire est application sur un onduleur de tension à diodes flottantes à 5 niveaux sont simulées et leurs performances comparées en terme de qualité de forme d'onde de tension de sortie .

**Mots clés** : Onduleur de tension à trois et cinq niveaux, diodes flottantes, porteuse en phase, Porteuse en opposition , porteuse alternée .

**Année 2012/2013**