

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



Université Abderrahmane Mira de Bejaia

Faculté de Technologies

Département de Génie Electrique

Spécialité : Électrotechnique industrielle

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER en ELECTROTECHNIQUE

INDUSTRIELLE

Intitulé du thème

**Etude comparative entre les performances d'un
onduleur de tension à deux niveaux et multi-
niveaux**

Présenté par :

Mr. MOHDEB Abderrahmane

Mr. MEZIANI Abdelmalek

Encadré par :

Mr : AZIB Ahmed

Année universitaire 2020/2021

Remerciements

*Nous remercions **ALLAH** le bon dieu pour nous avoir donné la force et la volonté de dépasser tous les obstacles et finaliser ce travail.*

*Nos vifs remerciements vont à notre promoteur **Mr. AZIB** pour son aide précieuse, et sa disponibilité, nous leur exprimons notre profonde gratitude d'avoir dirigé ce travail et mis à notre disponibilité la documentation nécessaires.*

*On remercie aussi le doctorant **Mr. KERROUCHE Farid** pour son soutien, et son encouragement.*

Nous remercions les membres de jury pour nous avoir fait l'honneur d'évaluer notre travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Ma mère,

Mon père,

Ma grand-mère,

Mon frère,

Au reste de ma famille et à tous mes amis.

Mr. MOHDEB Abderrahmane

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Mes parents

*Aucune dédicace ne saurait exprimer l'affection et
l'amour que j'éprouve envers vous.*

*Puisse ce travail être la récompense de vos soutiens
moraux et sacrifices.*

*Ce modeste travail constitue une légère compensation
pour tous les nobles sacrifices que vous avez imposé pour
assurer mon bien être et mon éducation.*

A toute ma famille MEZIANI,

Et tous mes chers amis,

Et toute la promotion d'électrotechnique (2021).

Mr. MEZIANI Abdelmalek

Table des matières

REMERCIEMENTS

DEDICACES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

ABREVIATION

INTRODUCTION GENERALE..... 1

Chapitre I : Généralité sur les onduleurs à deux niveaux et multi-niveaux

I.	INTRODUCTION :	4
I.1	Définition de l'onduleur	4
I.2	Principe de fonctionnement de l'onduleur	4
I.3	Principe de fonctionnement d'un onduleur monophasé	4
I.3.1	Onduleur monophasé en demi-pont	4
I.3.2	Onduleur monophasé en pont	5
I.4	Onduleur triphasé en pont	5
I.5	Classification des onduleurs	6
I.5.1	Onduleur autonome	6
I.5.2	Onduleur non autonome (assisté)	6
I.6	Les applications des onduleurs	6
I.6.1	Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone et asynchrone	6
I.6.2	Alimentation de secours	7
I.7	Paramètre de performance de l'onduleur	7
I.7.1	Facteur de la nième harmonique	7
I.7.2	Distorsion d'harmonique total	8
I.8	Onduleurs multi-niveaux	8
I.8.1	Historique et avantage des structures de conversion multi-niveaux	8
I.8.1.1	Historique	8
I.8.1.2	Avantage	9
I.8.2	Principe de fonctionnement l'onduleur multi-niveaux	10
I.8.3	Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux	10
I.8.3.1	Onduleurs multi-niveaux à structure NPC	11
I.8.3.1.1	Avantage	11

Table des matières

I.8.3.1.2 Inconvénients	11
I.8.3.2 Onduleurs multi-niveaux à condensateurs flottants.....	11
I.8.3.2.1 Avantage	12
I.8.3.2.2 Inconvénients	12
I.8.3.3 Onduleurs multi-niveaux à structure cascadié.....	12
I.8.3.3.1 Avantage	13
I.8.3.3.2 Inconvénients	13
I.8.4 Autres topologies	13
I.8.5 Application des onduleurs multi-niveaux dans le domaine industriel.....	13
I.8.6 Domaine d'applications des onduleurs multi-niveaux.....	14
I.8.6.1 Application dans le domaine de la traction ferroviaire et véhicule électrique	14
I.8.6.2 Application dans les réseaux de bord et des bâtiments maritimes	15
I.8.6.3 Application dans le domaine des réseaux électriques	15
I.8.6.4 Application dans le domaine de l'alimentation des machines électriques	15
I.9 Conclusion.....	16

Chapitre II : Fonctionnement et modélisation des onduleurs deux niveaux et multi-niveaux

II. INTRODUCTION.....	18
II.1 Onduleurs deux niveaux	18
II.1.1 Onduleur monophasé en pont complet	18
II.1.1.1 Description.....	18
II.1.1.2 Principe de fonctionnement.....	18
II.1.2 Onduleur triphasé en pont.....	19
II.1.2.1 Description.....	19
II.1.2.2 Principe de fonctionnement.....	19
II.1.3 Modélisation d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux.....	21
II.2 Onduleurs multi-niveaux	22
II.2.1 Onduleur à trois niveaux de type diode flottante (NPC).....	22
II.2.1.1 Description.....	22
II.2.1.2 Principe de fonctionnement.....	22
II.2.2 Onduleur à cinq niveaux de type diode flottante (NPC).....	24
II.2.2.1 Description.....	24
II.2.2.2 Principe de fonctionnement.....	25
II.2.3 Onduleur à trois niveaux de type condensateur flottant (FC)	28
II.2.3.1 Description.....	28

Table des matières

II.2.3.2	Principe de fonctionnement	28
II.2.4	Onduleur à cinq niveaux de type condensateur flottant (FC)	31
II.2.4.1	Description.....	31
II.2.4.2	Principe de fonctionnement	31
II.2.5	Onduleur à trois niveaux de type H	34
II.2.5.1	Description.....	34
II.2.5.2	Principe de fonctionnement	34
II.2.6	Onduleur à cinq niveaux type H	36
II.2.6.1	Description.....	36
II.2.6.2	Principe de fonctionnement	37
II.3	Modélisation d'un onduleur à trois niveaux de type diode flottante	40
II.3.1	Structure de l'onduleur à trois niveaux à structure diode flottante	40
II.3.2	Modélisation du fonctionnement d'un bras d'onduleur à diode flottante à trois niveaux	40
II.3.3	Commande complémentaire	41
II.3.4	Fonctions de connexion	41
II.3.4.1	Relation entre les fonctions de connexion	41
II.3.4.2	Relation entre les fonctions des demi-bras	42
II.3.5	Modélisation des valeurs instantanées	42
II.3.5.1	Les potentiels V_{io}	42
II.3.5.2	Tensions de sorties.....	43
II.3.5.3	Tensions composées	43
II.3.5.4	Tensions simples.....	43
II.3.5.5	Courants d'entrée.....	44
II.4	Technique de commande des convertisseurs multi-niveaux	45
II.4.1	Commande par paliers 180°	45
II.4.2	Modulation de la largeur d'impulsion.....	46
II.4.2.1	Modulation de la largeur d'impulsion intersective.....	47
II.4.2.1.1	La modulation linéaire multiple.....	47
II.4.2.1.2	La modulation sinusoïdale partielle (modifie).....	48
II.4.2.1.3	La modulation sinusoïdale triangulaire unipolaire	49
II.4.2.1.4	La modulation sinusoïdale avec porteuse bidirectionnelle	50
II.4.2.2	La Modulation vectorielle	51
II.5	Conclusion	51

Table des matières

Chapitre III : Simulation et comparaison des résultats

III.	INTRODUCTION.....	53
III.1	Paramètres de simulation sous Psim.....	53
III.2	La commande en pleine onde	53
III.2.1	Description.....	53
III.2.2	Résultat de simulation des onduleurs à deux niveaux et multi-niveaux pour les trois topologies de base	53
III.2.2.1	Deux niveaux.....	54
III.2.2.2	Trois niveaux	54
III.2.2.3	Cinq niveaux.....	56
III.2.2.4	Sept niveaux	58
III.3	Commande MLI Sinusoïdale.....	60
III.3.1	Description.....	60
III.3.2	Résultat de simulation des onduleurs à deux niveaux et multi-niveaux pour les trois topologies de base	60
III.3.2.1	Deux niveaux.....	60
III.3.2.2	Trois niveaux	61
III.3.2.3	Cinq niveaux.....	64
III.3.2.4	Sept niveaux	66
III.4	Discussion des résultats obtenues par simulation sous Psim pour les deux techniques de commandes utilisées.....	69
III.5	Comparaisons des pertes de puissance dans les semi-conducteurs	70
III.5.1	Les pertes de puissance dans les semi-conducteurs	70
III.5.2	Résultat de simulation des pertes de puissances obtenues sous Psim.....	71
III.5.3	Discussion des résultats de simulation obtenus sous Psim	71
III.6	Conclusion.....	72
	CONCLUSION GENERALE.....	74
	BIBLIOGRAPHIE	76

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I :

Figure I.1 : Schéma bloc représentatif d'un onduleur.....	4
Figure I.2 : Onduleur monophasé en demi-pont.....	5
Figure I.3 : Onduleur monophasé en pont.....	5
Figure I.4 : Onduleur triphasé en pont.....	6
Figure I.5 : Principe de réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone.....	7
Figure I.6 : Alimentation de secours.....	7
Figure I.7 : Onduleur à niveaux multiples à deux (a), à trois (b) et à m-niveaux (c).....	10
Figure I.8 : Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux.....	10
Figure I.9 : Convertisseurs multi-niveaux dans la traction ferroviaire.....	14
Figure I.10 : Convertisseurs multi-niveaux dans les bâtiments maritimes.....	15
Figure I.11 : Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes.....	15

Chapitre II :

Figure II.1 : Structure d'un onduleur monophasé à deux niveaux.....	18
Figure II.2 : Séquences de fonctionnement d'un onduleur monophasé à deux niveaux.....	18
Figure II.3 : Formes d'ondes d'un onduleur monophasé à deux niveaux.....	19
Figure II.4 : Structure d'un onduleur triphasé à deux niveaux.....	20
Figure II.5 : Forme d'onde d'un onduleur triphasé (un seul bras) à deux niveaux.	20
Figure II.6 : Onduleur de tension triphasé.....	21
Figure II.7 : Structure d'un bras d'onduleur triphasé à trois niveaux de type NPC.....	22
Figure II.8 : Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur triphasé de type NPC à trois niveaux.....	23
Figure II.9 : Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé de type NPC à trois niveaux.....	24
Figure II.10 : Structure d'un bras d'onduleur triphasé à cinq niveaux de type NPC	25
Figure II.11 : Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur triphasé de type NPC à cinq niveaux.....	26
Figure II.12 : Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé de type NPC à cinq niveaux.....	28
Figure II.13 : Structure d'un bras d'onduleur triphasé à trois niveaux de type FC	28
Figure II.14 : Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur triphasé de type FC à trois niveaux.....	29
Figure II.15 : Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé de type FC à trois niveaux.....	31
Figure II.16 : Structure d'un bras d'onduleur triphasé à cinq niveaux de type FC	31
Figure II.17 : Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur triphasé de type FC à cinq niveaux.....	32
Figure II.18 : Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé de type FC à cinq niveaux.....	34
Figure II.19 : Structure d'un onduleur cascade en pont H à trois niveaux.....	34
Figure II.20 : Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur triphasé en pont H à trois niveaux.....	35
Figure II.21 : Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé en pont H à trois niveaux	36
Figure II.22 : Structure d'un onduleur cascade en pont H à cinq niveaux	37
Figure II.23 : Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur triphasé en pont H à cinq niveaux.....	38
Figure II.24 : Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé en pont H à cinq niveaux.....	39
Figure II.25 : Structure de l'onduleur triphasé à trois niveaux à structure diode flottante.....	40
Figure II.26 : Structure d'un bras d'onduleur triphasé à trois niveaux.....	40
Figure II.27 : Forme d'onde multi-niveau (7 niveaux) générée par une commande par paliers et tensions aux bornes de trois cellules en série sur une phase.....	45
Figure II.28 : La modulation de la largeur d'impulsions multiples.....	48
Figure II.29 : La modulation sinusoïdale modifiée.....	49

Liste des figures

Figure II.30 : MLI sinusoïdale triangulaire unipolaire.....	50
Figure II.31 : La modulation sinusoïdale avec porteuse bidirectionnelle (bipolaire).....	50

Chapitre III :

Figure III.1 : Tension de sortie et Courant de charge 2-niv-180.....	54
Figure III.2 : Spectre de la Tension de sortie 2-niv-180.....	54
Figure III.3 : Tension de sortie et Courant de charge 3-niv-npc-180.....	54
Figure III.4 : Spectre de la Tension de sortie 3-niv-npc-180.....	54
Figure III.5 : Tension composé 3-niv-npc-180.....	54
Figure III.6 : Tension de sortie et Courant de charge 3-niv-Fc-180.....	55
Figure III.7 : Spectre de la Tension de sortie 3-niv-Fc-180.....	55
Figure III.8 : Tension composé 3-niv-Fc-180.....	55
Figure III.9 : Tension de sortie et Courant de charge 3-niv-chb-180.....	55
Figure III.10 : Spectre de la Tension de sortie 3-niv-chb-180.....	55
Figure III.11 : Tension composé 3-niv-chb-180.....	56
Figure III.12 : Tension de sortie et Courant de charge 5-niv-npc-180.....	56
Figure III.13 : Spectre de la Tension de sortie 5-niv-npc-180.....	56
Figure III.14 : Tension composé 5-niv-npc-180.....	56
Figure III.15 : Tension de sortie et Courant de charge 5-niv-Fc-180.....	57
Figure III.16 : Spectre de la Tension de sortie 5-niv-Fc-180.....	57
Figure III.17 : Tension composé 5-niv-Fc-180.....	57
Figure III.18 : Tension de sortie et Courant de charge 5-niv-chb-180.....	57
Figure III.19 : Spectre de la Tension de sortie 5-niv-chb-180.....	57
Figure III.20 : Tension composé 5-niv-chb-180.....	58
Figure III.21 : Tension de sortie et Courant de charge 7-niv-npc-180.....	58
Figure III.22 : Spectre de la Tension de sortie 7-niv-npc-180.....	58
Figure III.23 : Tension composé 7-niv-npc-180.....	58
Figure III.24 : Tension de sortie et Courant de charge 7-niv-Fc-180.....	59
Figure III.25 : Spectre de la Tension de sortie 7-niv-Fc-180.....	59
Figure III.26 : Tension composé 7-niv-Fc-180.....	59
Figure III.27 : Tension de sortie et Courant de charge 7-niv-chb-180.....	59
Figure III.28 : Spectre de la Tension de sortie 7-niv-chb-180.....	59
Figure III.29 : Tension composé 7-niv-chb-180.....	60
Figure III.30 : Porteuses, Modulantés 2-niv-MLI.....	60
Figure III.31 : Tension de sortie et Courant de charge 2-niv-MLI.....	61
Figure III.32 : Spectre de la Tension de sortie 2-niv-MLI.....	61
Figure III.33 : Tension composé 2-niv-MLI.....	61
Figure III.34 : Porteuses, Modulantés 3-niv-MLI.....	61
Figure III.35 : Tension de sortie et Courant de charge 3-niv-npc-MLI.....	62
Figure III.36 : Spectre de la Tension de sortie 3-niv-npc-MLI.....	62
Figure III.37 : Tension composé 3-niv-npc-MLI.....	62
Figure III.38 : Tension de sortie et Courant de charge 3-niv-Fc-MLI.....	62
Figure III.39 : Spectre de la Tension de sortie 3-niv-Fc-MLI.....	62
Figure III.40 : Tension composé 3-niv-Fc-MLI.....	63
Figure III.41 : Tension de sortie et Courant de charge 3-niv-chb-MLI.....	63
Figure III.42 : Spectre de la Tension de sortie 3-niv-chb-MLI.....	63
Figure III.43 : Tension composé 3-niv-chb-MLI.....	63
Figure III.44 : Porteuses, Modulantés 5-niv-MLI.....	64
Figure III.45 : Tension de sortie et Courant de charge 5-niv-npc-MLI.....	64
Figure III.46 : Spectre de la Tension de sortie 5-niv-npc-MLI.....	64
Figure III.47 : Tension composé 5-niv-npc-MLI.....	64
Figure III.48 : Tension de sortie et Courant de charge 5-niv-Fc-MLI.....	65

Liste des figures

Figure III.49 : Spectre de la Tension de sortie 5-niv-Fc-MLI.....	65
Figure III.50 : Tension composé 5-niv-Fc-MLI.....	65
Figure III.51 : Tension de sortie et Courant de charge 5-niv-chb-MLI.....	65
Figure III.52 : Spectre de la Tension de sortie 5-niv-chb-MLI.....	65
Figure III.53 : Tension composé 5-niv-chb-MLI.....	66
Figure III.54 : Porteuses, Modulantés 7-niv-MLI.....	66
Figure III.55 : Tension de sortie et Courant de charge 7-niv-npc-MLI.....	66
Figure III.56 : Spectre de la Tension de sortie 7-niv-npc-MLI.....	66
Figure III.57 : Tension composé 7-niv-npc-MLI.....	67
Figure III.58 : Tension de sortie et Courant de charge 7-niv-Fc-MLI.....	67
Figure III.59 : Spectre de la Tension de sortie 7-niv-Fc-MLI.....	67
Figure III.60 : Tension composé 7-niv-Fc-MLI.....	67
Figure III.61 : Tension de sortie et Courant de charge 7-niv-chb-MLI.....	68
Figure III.62 : Spectre de la Tension de sortie 7-niv-chb-MLI.....	68
Figure III.63 : Tension composé 7-niv-chb-MLI.....	68

Liste des tableaux

Chapitre II :

Tableau II.1 : États possibles d'un onduleur monophasé à deux niveaux.....	19
Tableau II.2 : États possibles d'un onduleur triphasé (un seul bras) à deux niveaux.....	20
Tableau II.3 : États possibles d'un bras d'onduleur triphasé de type NPC à trois niveaux.....	24
Tableau II.4 : États possibles d'un bras d'onduleur triphasé de type NPC à cinq niveaux.....	27
Tableau II.5 : États possibles d'un bras d'onduleur triphasé de type FC à trois niveaux.....	30
Tableau II.6 : États possibles d'un bras d'onduleur triphasé de type FC à cinq niveaux.....	33
Tableau II.7 : États possibles d'un bras d'onduleur triphasé en pont H à trois niveaux.....	36
Tableau II.8 : États possibles d'un bras d'onduleur triphasé en pont H à cinq niveaux.....	39
Tableau II.9 : Tableau d'excitation associée à la commande complémentaire proposée.....	41

Chapitre III :

Tableau III.1 : Performance d'un onduleur triphasé à deux niveaux.....	68
Tableau III.2 : Performances des trois topologies de base triphasé à trois niveaux.....	69
Tableau III.3 : Performances des trois topologies de base triphasé à cinq niveaux.....	69
Tableau III.4 : Performances des trois topologies de base triphasé à sept niveaux.....	69
Tableau III.5 : Pertes de puissance dans les onduleurs à deux et trois niveaux.....	71
Tableau III.6 : Les pertes dans les semi-conducteurs pour un onduleur à deux niveaux.....	71

Abréviation

Abréviation

NPC : Neutral Point Clamped.

CHB : (Cascaded H-Bridge) Ponts H en cascade.

FC : Flying Capacitor.

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsions.

PWM : Pulse width modulation.

SVPWM : Space Vector Pulse Width Modulation.

m_a : Indice de modulation en amplitude.

m_f : Indice de modulation en fréquence.

A_r : Amplitude du signal de référence.

f_r : Fréquence du signal de référence.

A_c : Amplitude de la porteuse.

f_c : Fréquence de la porteuse.

m: le nombre de niveaux de tension obtenus.

THD : (Total Harmonic Distortion) Taux de Distortion harmonique totales.

DF : Facteur de Distorsion harmonique.

HFN : Facteur de la Nième Harmonique.

E : Tension principale de l'onduleur NPC.

HZ : Hertz.

Uc1 : La tension continue au borne du C1.

Uc2 : La tension continue au borne du C2.

Vao, Vbo, Vco : Les tensions simples à la sortie de l'onduleur entre les phases de la charge et le point milieu o.

Vab, Vbc, Vca : Les tensions composées aux bornes de la charge.

I_a, I_b, I_c : Les courants de charges.

I_{d0}, I_{d1}, I_{d2} : Les courants d'entrée continus de l'onduleur à trois niveaux de type diode flottante.

BK : Commande externe (l'ordre d'amorçage ou de blocage du semi-conducteur bicommandable T_i).

C1 : Condensateur de filtrage en bas de l'onduleur NPC à trois niveaux.

C2 : Condensateur de filtrage en bas de l'onduleur NPC à trois niveaux.

FKS : Fonction de connexion, avec ($k=1, 2, 3$) et ($s=1, 2, 3$).

Abréviation

FbK₀ : Fonction de connexion du demi-bras en bas.

FbK₁ : Fonction de connexion du demi-bras en haut.

O : Le point milieu entre C1, et C2.

T₁₁, T₁₂, T₂₁, T₂₂, T₃₁, T₃₂ : Sont les commutateurs en haut de l'onduleur NPC à trois niveaux de tension.

T₁₃, T₁₄, T₂₃, T₂₄, T₃₃, T₃₄ : Sont les commutateurs en bas de l'onduleur NPC à trois niveaux de tension.

K_i (i=1.....8) : Le nombre de commutateurs principaux.

D_{ai} (i=1.....8) : Le nombre de diodes principales.

D_i (i = 1.....6) : Le nombre de diodes clampées.

C_i (i=1.....4) : Le nombre de condensateurs d'équilibrage.

V_{Ki} (i = 1.....8) : Les tensions inverses appliquées aux bornes des interrupteurs bloqués.

DC : Directe Courant.

AC : Alternative Courant.

P_{sw} : Les pertes par commutation dans les semi- conducteurs.

P_{con} : Les pertes par conduction dans les semi-conducteurs.

P_{tot} : Les pertes totales dans les semi-conducteurs.

Introduction générale

Introduction générale

Dans le domaine de l'électricité, l'électronique de puissance est un domaine vital touche plusieurs activités tels que le réseau électrique, le transport (urbain, ferroviaire, maritime), l'énergie renouvelable et l'industrie.

Dans cette époque l'énergie électrique est devenue l'une des choses importantes dans la vie quotidienne de l'homme. Alors c'est devenu nécessaire d'améliorer les performances des dispositifs de l'électronique de puissance, cette dernière peut être contribue pour la bonification de signal électrique.

Les convertisseurs électriques sont des dispositifs basés en principe sur les composants semi-conducteurs, ainsi que des éléments passifs comme les résistances et les condensateurs et les inductances. La combinaison entre elle permet de convertir la forme de signal électrique soit tension ou courant a une autre forme cette conversion utiliser dans les activités industrielles actuellement.

Il existe quatre types des convertisseurs statiques, on cite :

- DC/ DC : hacheur qui permet de convertir le signal continu à un signal continu commandable.
- DC/AC : onduleur qui permet de convertir un signal continu à un signal alternatif.
- AC/DC : redresseur qui permet de convertir le signal alternatif a un signal continu.
- AC/AC : gradateur qui permet de convertir le signal alternatif a un signal alternatif variable.

Les onduleurs de tension constituent une fonction incontournable de l'électronique de puissance. Ils sont présents dans les domaines d'application les plus variés, dont le plus connu 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 des composants à semi-conducteur entièrement commandables, puissants, robuste et rapides et d'autre part, sur l'utilisation quasi-généralisée des techniques dites de modulation de largeur d'impulsion [1], ainsi que le progrès réalisé dans le domaine de la micro-informatique.

Malgré leurs nombreux avantages, les onduleurs conventionnels présentent certains inconvénients tels que :

- L'usage limité aux applications de faibles et de moyennes puissances seulement
- La détérioration prématurée des roulements causée par l'apparition des tensions homopolaires à l'arbre du moteur.

Pour surmonter ces problèmes, un nouveau type d'onduleur a été introduit, en l'occurrence, l'onduleur multi-niveaux. Ce type d'onduleur présente plusieurs avantages, parmi les plus importants on mentionne [2] :

- Il peut générer des tensions très proche de la sinusoïde avec une fréquence de commutation égale à celle de la fondamentale.
- Les performances spectrales des formes d'ondes des grandeurs de sortie d'un onduleur multi-niveau sont supérieures à celles d'un onduleur à deux niveaux [3]

Introduction générale

- Les formes d'ondes des grandeurs de sortie d'un onduleur multi-niveau limitent naturellement les problèmes des surtensions.
- Il est bien adapté aux moteurs de moyennes et de grandes puissances.

Dans ce travail nous intéressons à l'étude des convertisseurs à deux niveaux et à multi-niveaux et on essaye de faire une comparaison entre ces deux structures en termes de performance (Qualité de tension, courant, le taux de distorsion harmonique). Tout en indiquant les différentes stratégies de commande (par palier, MLI (triangle sinusoïdale)) pour chaque structure.

Ce travail se subdivise en trois chapitres :

Le premier chapitre présentera la revue de la littérature concernant les onduleurs deux niveaux et les différentes topologies multi-niveaux, leurs avantages et Inconvénients et leurs domaines d'applications industrielles.

Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude de principe de fonctionnement des onduleurs deux, trois et cinq niveaux et à la modélisation du l'onduleur multiniveaux NPC (Neutral Point Clamped) trois niveaux et l'onduleur triphasé à deux niveaux.

Le troisième chapitre, sera dédié à la présentation des résultats de simulation des onduleurs deux, trois, cinq et sept niveaux pour les trois topologies de base (NPC, FC, CHB) de la conversion multi-niveaux et interprétation des résultats obtenus par les deux techniques de commandes (par palier, MLI (triangle sinusoïdale) utilisées.

Cette étude est basée sur la simulation sous logiciel Psim qui a été utilisée pour effectuer les simulations mentionnées.

Finalement, on termine notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I :

Généralité sur les onduleurs à deux niveaux et multi-niveaux

I. Introduction :

L'énergie électrique est généralement distribuée sous forme de tensions alternatives sinusoïdales. L'électronique de puissance permet de modifier la présentation de l'énergie électrique pour l'adapter aux différents besoins.

Grace aux progrès technologique réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance, les convertisseurs statiques voient progressivement leur champ d'application s'élargir. L'onduleur est utilisé pour produire des grandeurs de sorties (courants et tension) alternatives à partir d'une source continue, il peut être à fréquence fixe ou à fréquence variable [4].

Ce chapitre sera divisé en deux partie la première partie consiste à une brève description sur les onduleurs à deux niveaux (constitution physique, élémentaire, fonctionnement ...), ainsi leurs domaines d'applications et leurs paramètres de performances.

La deuxième partie est consacrée à la description des principales topologies de la conversion multi-niveaux avec leurs avantages et inconvénients et leurs domaines d'applications industrielles.

I.1 Définition de l'onduleur

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

L'onduleur de tension est constitué de cellules de commutations généralement à transistor ou thyristor pour les grandes puissances.

I.2 Principe de fonctionnement de l'onduleur

Le principe de fonctionnement d'un onduleur est basé sur l'électronique de commutation, on génère une onde de tension alternative à partir d'une tension continue comme le montre la figure I.1 [5], [6].

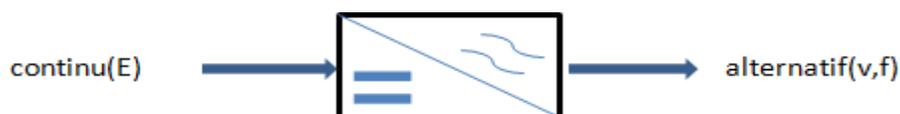


Figure I.1 : Schéma bloc représentatif d'un onduleur.

I.3 Principe de fonctionnement d'un onduleur monophasé

I.3.1 Onduleur monophasé en demi-pont

Le principe de l'onduleur monophasé en demi-pont peut être expliqué à partir de la figure I.2, on dispose d'une source de tension continue à point milieu et de 2 interrupteurs [6], et une charge.

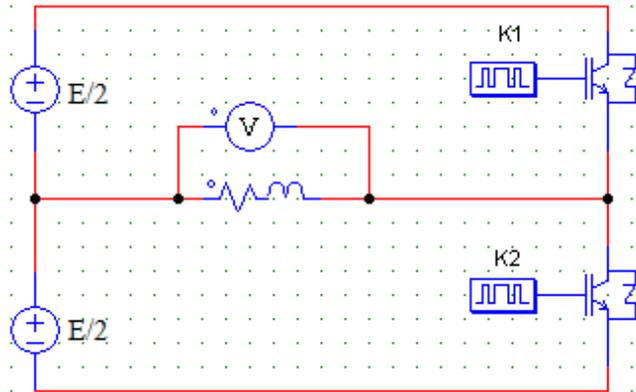


Figure I.2 : Onduleur monophasé en demi-pont.

I.3.2 Onduleur monophasé en pont

Pour éviter la nécessité d'une source à point milieu et doubler la tension de sortie, on utilise un onduleur en pont figure I.3, dans ce cas. On commande sur une demi-période les interrupteurs K1, K4 et K2, K3 sur le reste de la période.

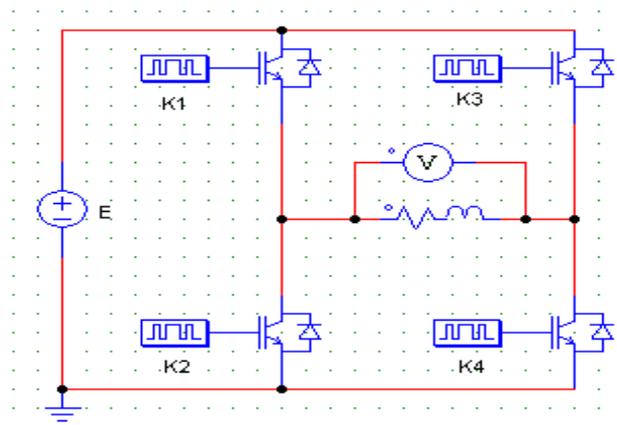


Figure I.3: Onduleur monophasé en pont.

I.4 Onduleur triphasé en pont

L'onduleur triphasé en pont est constitué de trois cellules de commutation comme le montre la figure I.4. On retrouve évidemment une structure différentielle dans laquelle les tensions triphasées sont obtenues de façon composée sur les trois bornes de sortie.

L'onduleur triphasé doit évidemment, en régime nominal, délivrer un système de tension dont les composantes fondamentales forment un système équilibré.

$$V_a = V_m \sin(\omega t) \quad (\text{I.1})$$

$$V_b = V_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{I.2})$$

$$V_c = V_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (\text{I.3})$$

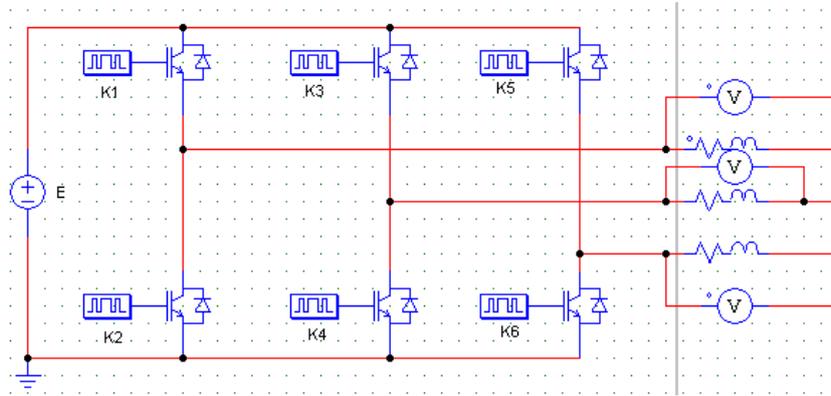


Figure I.4 : Onduleur triphasé en pont.

I.5 Classification des onduleurs

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

I.5.1 Onduleur autonome

C'est un système qui nécessite des composants commandés à la fois à la fermeture et à l'ouverture, de fréquence variable, dont les instants de commutation sont imposés par la commande, la charge est quelconque [7].

I.5.2 Onduleur non autonome (assisté)

Un onduleur non autonome est un montage redresseur tout thyristors, qui en commutation naturelle assistée par le réseau auquel il est raccordé permet un fonctionnement en onduleur.

I.6 Les applications des onduleurs

Parmi les nombreux domaines d'emploi des onduleurs autonomes, on trouve principalement les onduleurs à fréquence fixe à commutation forcée : Alimentés le plus souvent par une batterie d'accumulateur, ils jouent d'ordinaire le rôle d'alimentation de sécurité [8] [9].

Les onduleurs à fréquence variable à commutation forcés : Alimentés à partir du réseau industriel par l'intermédiaire d'un montage redresseur, ils délivrent une tension de fréquence et de valeur efficace nécessaire pour faire tourner à vitesse variable un moteur à courant alternatif.

I.6.1 Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone et asynchrone

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

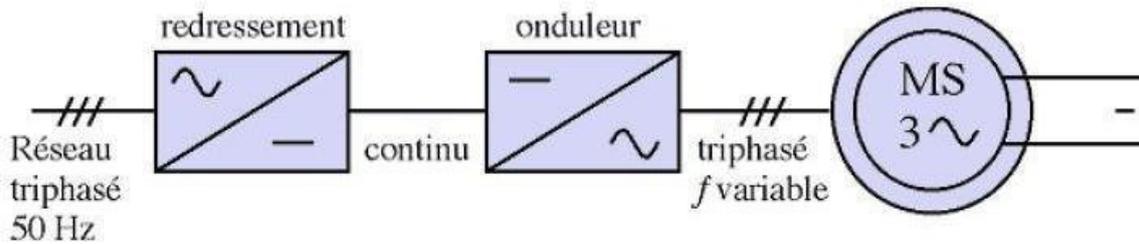


Figure I.5 : Principe de réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone.

I.6.2 Alimentation de secours

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

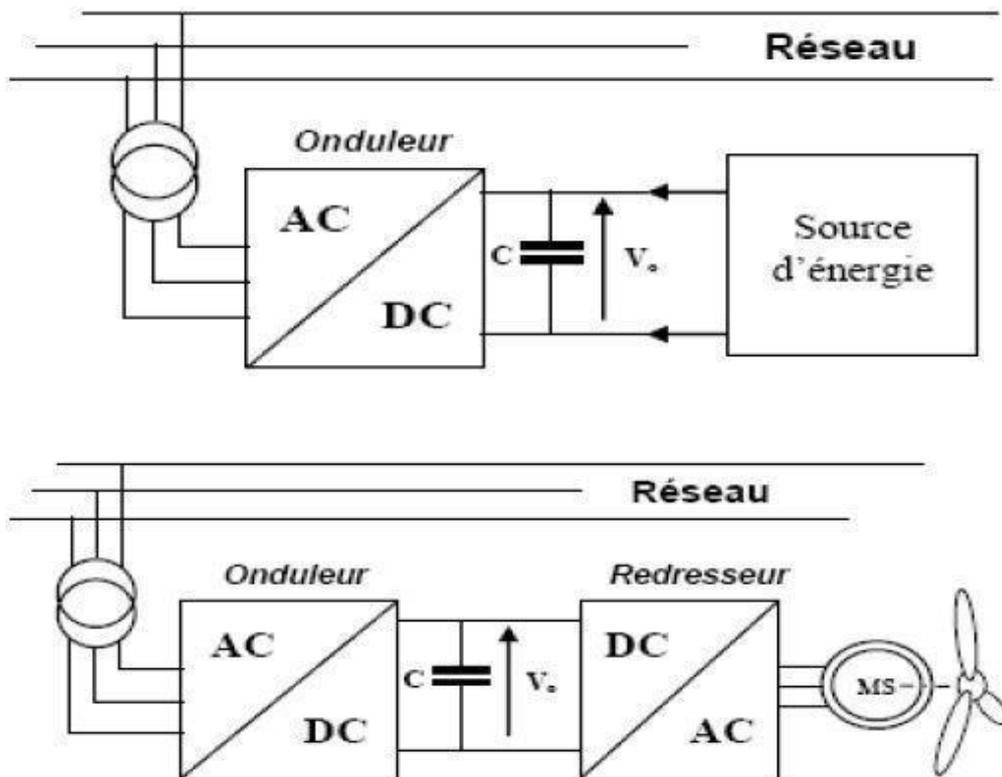


Figure I.6 : Alimentation de secours.

I.7 Paramètre de performance de l'onduleur

La qualité de l'énergie fournie par un onduleur est évaluée suivant les paramètres de performance suivants :

I.7.1 Facteur de la nième harmonique

C'est la mesure de la contribution individuelle des harmoniques définie comme suit :

$$\text{HFN} = \frac{V_{\text{eff}n}}{V_{\text{eff}1}} \quad (\text{I.4})$$

I.7.2 Distorsion d'harmonique total

Le taux de distorsion, encore appelé distorsion harmonique totale est défini comme le rapport de la valeur efficace globale des harmoniques (c'est-à-dire leur somme quadratique) à la valeur efficace de la composante fondamentale.

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{V_{\text{eff}}^2 - V_{\text{eff1}}^2}}{V_{\text{eff1}}} \quad (\text{I.5})$$

On va couramment jusqu'au 40ème ou 50ème rang d'harmoniques. Cette grandeur permet d'évaluer à l'aide d'un nombre unique la perturbation d'un courant ou d'une tension en un point d'un réseau, voire de comparer deux réseaux jugés à des harmoniques de rangs différents. Le THD représente sensiblement l'augmentation de l'effet Joule dans les lignes et les dispositifs.

Un appareil de mesure qui n'effectue pas une analyse spectrale ne mesure pas le THD mais une valeur approchée appelée le facteur de distorsion, ou DF.

Ce facteur, inférieur à 100 % est défini par le rapport de la valeur efficace des harmoniques à la valeur efficace du signal total.

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{H^2 + H^3^2 + \dots}}{\sqrt{F^2 + H^2 + H^3^2 + \dots}} \quad (\text{I.6})$$

Lorsque la distorsion est faible, les deux valeurs THD et DF sont équivalentes. Si le DF dépasse les 15 %, il est possible de corriger la mesure pour obtenir le taux de distorsion harmonique total.

$$\text{THD} = \frac{DF}{\sqrt{1 + DF^2}} \quad (\text{I.7})$$

Un bon appareil d'analyse de réseaux donne la valeur efficace du signal sans son fondamental mais certains appareils ne mesurent que la valeur moyenne des signaux redressés et non pas les valeurs efficaces.

La mesure peut être alors inférieure à DF, et aucune correction ne permet de retrouver THD. La distorsion de l'onde de tension est proportionnelle à l'impédance du réseau et à l'amplitude des courants harmoniques.

I.8 Onduleurs multi-niveaux

I.8.1 Historique et avantage des structures de conversion multi-niveaux

I.8.1.1 Historique

L'histoire de la conversion multi-niveaux commence au début des années 70 [10]. La première structure décrite est une mise en série de pont en H pour synthétiser une tension de sortie alternative sous forme d'escalier [10]. Puis au début des années 80 est apparu le convertisseur clampé par le neutre (NPC) [11]. Cette structure est considérée comme le premier

convertisseur multi-niveau pour des applications de moyennes puissances. Puisque l'onduleur NPC double effectivement le niveau de tension sans exiger une tension assorti précise, la topologie NPC a régné dans les années 80. L'application de l'onduleur NPC et de son extension aux convertisseurs multi-niveaux a été publiée par [12]. Depuis, de nombreuses études ont été proposées pour étudier ses propriétés et les évolutions possibles de cette structure.

Bien que l'onduleur multi-niveau en cascade ait été inventé le premier, ses applications n'ont pas régné jusqu'au milieu des années 90 [13]. Deux brevets importants [14] [15] ont été publiés pour indiquer la supériorité des onduleurs en cascade pour l'entraînement des moteurs.

En raison de la grande demande des onduleurs de haute puissance et de moyenne tension, l'onduleur multi-niveau en cascade a tiré d'énorme intérêt.

Dans les années 90, les recherches sont tournées vers de nouvelles structures et ils sont portées vers les convertisseurs multicellulaires série [16], aussi connus dans la littérature sous le nom de Flying Capacitor (FC). Et c'est à la fin des années 90 qu'est né le convertisseur multicellulaire superposé, cette structure est une suite de la réflexion sur les convertisseurs multicellulaires série [17].

Ces structures peuvent être considérées comme les structures de base de la conversion multi-niveaux. Beaucoup de propriétés de ces structures de base sont communes avec les nouvelles structures découvertes [17].

I.8.1.2 Avantage

Un convertisseur multi-niveau à plusieurs avantages par rapport à un convertisseur conventionnel à deux niveaux qui utilisent la modulation de largeur d'impulsion (MLI) à haute fréquence de commutation. Les caractéristiques techniques attrayantes d'un convertisseur multi-niveau peuvent être brièvement récapitulées comme suit :

- Qualité de forme d'onde en escalier : les convertisseurs multi-niveaux non seulement peuvent générer des tensions de sortie avec de très faible déformation, mais également peuvent réduire les efforts (dv/dt) ; pour cette raison les problèmes d'électromagnétique peuvent être réduits.
- Mode commun de tension (MC) : les convertisseurs multi-niveaux produisent une plus petite tension de MC ; pour cette raison, l'effort dans les roulements d'un moteur connecté à un onduleur multi-niveau peut être réduit. En outre, on peut éliminer la tension de MC en employant des stratégies de modulation avancées [18] [19] [20].
- Courant d'entrée : les convertisseurs multi-niveaux peuvent dessiner un courant d'entrée avec un faible taux de déformation.
- Fréquence de commutation : les convertisseurs multi-niveaux peuvent fonctionner à la fréquence fondamentale et à haute fréquence de commutation MLI. Il est convenu a noté qu'une faible fréquence de commutation signifie habituellement une faible perte par commutation donc le rendement est plus élevé.

Malheureusement, les convertisseurs multi-niveaux ont quelques inconvénients. Un inconvénient particulier est le grand nombre d'interrupteurs semi-conducteur requis. Bien que des commutateurs évalués à tension réduite puissent être utilisés dans un convertisseur multi-

niveau, chaque commutateur exige un circuit relatif de commande de gâchettes. Ceci peut rendre le système général plus cher et complexe.

I.8.2 Principe de fonctionnement l'onduleur multi-niveaux

Ce paragraphe a pour but d'introduire le principe général du comportement multi-niveaux, la figure I.7 montre un diagramme schématique d'une phase d'un convertisseur avec différents nombres de niveaux, pour lesquels l'action des semi-conducteurs de puissance est représentée par un commutateur idéal avec plusieurs positions. Un convertisseur à deux niveaux génère une tension de sortie avec deux valeurs (niveaux) par rapport à la borne négative de la source figure I.7.a : position P1 : $V_{NO} = E$, Position P2 : $V_{NO} = 0$, tandis que le convertisseur à trois niveaux génère trois tensions, les trois positions (P1, P2 et P3) de l'interrupteur de la figure I.7.b, permettent d'avoir respectivement trois niveaux de tension (E , $-E$ et 0) et ainsi de suite [21].

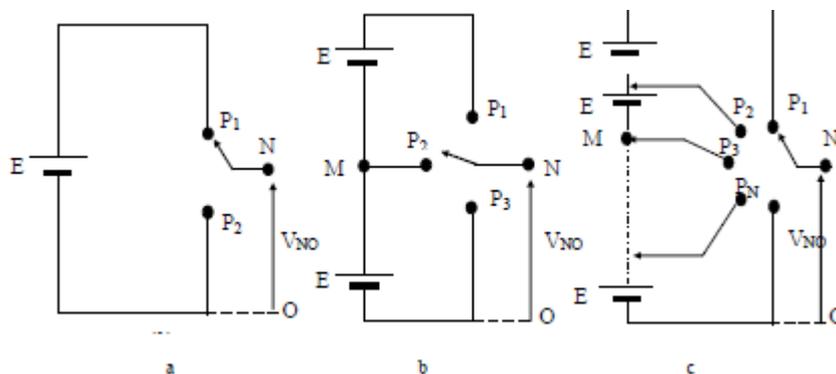


Figure I.7 : Onduleur à niveaux multiples à deux (a), à trois (b) et à m-niveaux (c).

I.8.3 Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux

Onduleur de tension multi-niveau possède trois ou plusieurs niveaux. Le but de cette partie est de donner une vue générale des trois topologies de base des onduleurs multi-niveaux :

- ✓ La topologie a diode de bouclage (NPC)
- ✓ La topologie au condensateur flotteur (à cellules imbriquées),
- ✓ La topologie en cascade (pont H)

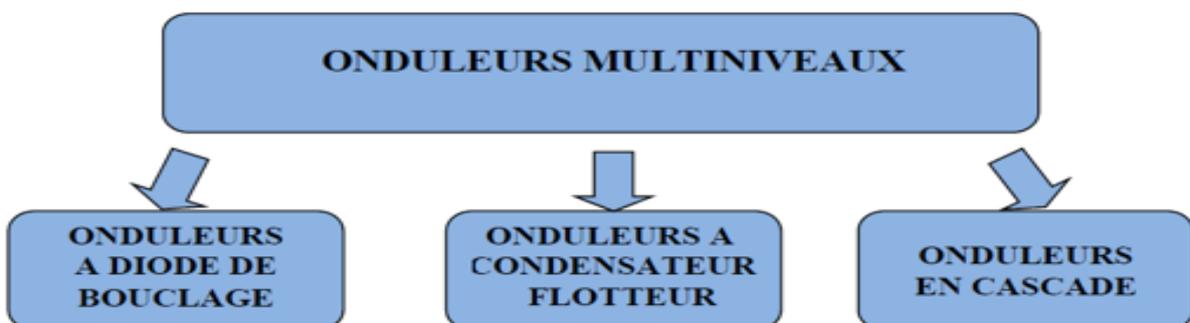


Figure I.8 : Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux.

I.8.3.1 Onduleurs multi-niveaux à structure NPC

Cette structure d'onduleur multi-niveaux a été introduite par A. Nabae et H. Akagi en 1981 [24]. L'objectif était de réduire l'amplitude des harmoniques injectés par l'onduleur dans la charge pour des applications de type alimentation des moteurs. Cette structure, connue sous le nom de convertisseur clampé par le neutre, n'utilise pas de transformateur d'isolement et la répartition de la tension d'entrée continue sur les différents interrupteurs en série est assurée par les diodes (clamps) connectée à des points milieu capacitifs.

I.8.3.1.1 Avantage

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

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

I.8.3.1.2 Inconvénients

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

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

Le maintien de l'équilibre de la charge des condensateurs demeure toujours une question ouverte pour les topologies des onduleurs NPC avec plus de trois niveaux. Bien que l'onduleur NPC à trois niveaux fonctionne avec un facteur de puissance élevé, il est employé surtout dans les circuits de compensation. Cela est dû au problème d'équilibrage des capacités. [23].

I.8.3.2 Onduleurs multi-niveaux à condensateurs flottants

Dans la topologie multi-niveau proposée par T. Meynard et H. Foch en 1992. La structure de ce convertisseur est similaire à celle de l'onduleur à diode de bouclage mais au lieu d'utiliser des diodes de blocage, l'onduleur utilise des condensateurs à leur place. D'où l'appellation «

Onduleur à Condensateurs Flottants ». Cette structure est proposée pour résoudre d'une part le problème de balancement de tension, et d'autre part le nombre excessif des diodes.

I.8.3.2.1 Avantage

Ce type de convertisseur présente plusieurs avantages :

- Le concept de condensateur Flottant peut être appliquée à un certain nombre de convertisseurs de différents types, DC /AC ou AC/ DC.
- La plupart des stratégies de modulation sont facilement appliquée à cette topologie.
- Les tensions sur les condensateurs sont automatiquement équilibrées par cette stratégie de modulation conventionnelle. Si désiré, les tensions de condensateur peuvent être activement contrôlées par une modification appropriée des signaux de commande.
- Le concept peut être facilement appliqué à d'autres types de convertisseurs, aussi bien pour un transfert unidirectionnel de la puissance que bidirectionnel.
- Sa modularité permet une extension et une adaptation aisées des stratégies de commande à un nombre élevé de niveaux.
- Les condensateurs n'étant jamais mis en série entre niveaux différents, le problème du déséquilibre de leur tension n'existe plus. [24]

I.8.3.2.2 Inconvénients

Cette topologie présente quelque inconvénient, tel que :

- La topologie exige beaucoup de condensateurs à haute tension beaucoup plus nombreux que d'autres topologies. Ces condensateurs doivent conduire le courant de pleine charge pendant au moins une partie du cycle de commutation. Heureusement si la fréquence de commutation est élevée, ces condensateurs peuvent généralement être relativement faibles en valeur de la capacité.
- La topologie n'en est pas intrinsèquement tolérante aux pannes. [22]
- Contrairement au premier cas qui ne nécessite que $(N-1)$ capacité. De plus il est évident que des courants de grandes valeurs efficaces circuleront à travers ces condensateurs.
- Il y a un potentiel de résonance parasite entre les condensateurs découplés.

I.8.3.3 Onduleurs multi-niveaux à structure cascadié

Cette famille est la première décrite dans la littérature comme une structure de conversion multi-niveaux [26] [27]. En effet la mise en cascade de plusieurs structures à trois niveaux permet d'avoir en sortie une forme d'onde de tension multi-niveaux. [28]

Les cellules y sont connectées en étoile, cependant il est également possible de les connecter en triangle [29]. Chaque cellule de l'onduleur est alimentée par une source continue E et elle est composée de quatre interrupteurs qui sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant : il s'agit d'associations classiques d'un transistor et d'une diode en antiparallèle.

Les sources doivent être galvaniquement isolées les unes des autres, afin d'éviter un court-circuit lors de leur mise en série [29].

I.8.3.3.1 Avantage

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

- Pour atteindre le même nombre de niveaux de tension, ce type de convertisseur nécessite moins de composants.
- Contrairement à l'onduleur à diode de bouclage et à condensateur flottant, aucune diode supplémentaire n'est nécessaire.
- La tension de sortie totale de phase est une sommation des tensions produites par chaque onduleur monophasé.
- Les petites sources à courant continu sont généralement impliquées, ce qui entraîne moins de problèmes de sécurité.
- Le nombre de niveaux possibles de tension de sortie est plus du double du nombre de sources à courant continu ($N=2s+1$).

I.8.3.3.2 Inconvénients

- Pour un système à trois phases, il faudra plus de commutateurs que dans un onduleur traditionnel.
- Nécessité d'équilibrer les sources DC entre les différents niveaux.
- Besoin de plusieurs connecteurs/câbles pour connecter les sources DC [22].

I.8.4 Autres topologies

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

- Le convertisseur asymétrique hybride.
- Le convertisseur avec des ponts en cascade et sources CC/CC avec isolement.
- Le convertisseur avec commutation douce.
- Les convertisseurs reliés par transformateur.
- Le convertisseur Diode/Capacitor-Clamped : variante de l'onduleur NPC.
- Le convertisseur multi-niveau généralisé. [25]

I.8.5 Application des onduleurs multi-niveaux dans le domaine industriel

Les convertisseurs multi-niveaux trouvent une attention importante dans l'industrie et le milieu universitaire en tant qu'un des choix privilégiés de la conversion pour les applications de haute puissance [30][31]. Ils ont façonné avec succès leur voie en milieu industrielle et peuvent pour cette raison être considérés comme une technologie mature et prouvée.

Actuellement, ils sont commercialisés dans les normes et qui actionnent une large gamme d'applications, tel que les compresseurs, les extrudeuses, les pompes, les ventilateurs, les fraises, les laminoirs, les convoyeurs, les broyeurs, les souffleries de fourneau, les démarreurs de turbine à gaz, les mélangeurs, les élévateurs, la compensation d'énergie réactive, la propulsion marine, boîte de vitesses à courant continu (HVDC) à haute tension, le stockage

hydro pompé, l'énergie éolienne, et la traction ferroviaire [30][31]. Les convertisseurs de ces applications sont commercialement offerts par un ensemble d'entreprises croissant dans le domaine, tel que : ABB, SIEMENS, Schneider-Electric, Alstom, TMEIC-GE... [31].

I.8.6 Domaine d'applications des onduleurs multi-niveaux

I.8.6.1 Application dans le domaine de la traction ferroviaire et véhicule électrique

Dans la traction ferroviaire par exemple, certains réseaux de transport européens fournissent une alimentation de 15KV, 50 Hz. On y utilise un transformateur à basse fréquence afin d'adapter cette tension aux convertisseurs statiques. Puisque, Le problème de l'isolation galvanique est contourné. Pour cela, des onduleurs sont mis en parallèle du côté continu, leurs côtés alternatifs allant sur des enroulements primaires distincts d'un transformateur basse fréquence (à la fréquence de fonctionnement de la charge). Les contributions des différentes cellules sont ajoutées au niveau magnétique du noyau du transformateur, le secondaire étant constitué d'un seul enroulement haute-tension par phase.

Ce type de convertisseur a été réalisé industriellement pour une puissance de 100 MVA [32]. D'autres variantes utilisant des transformateurs basse fréquence ou des enroulements de moteur pour additionner les tensions ont été étudiées, parmi lesquelles on trouve [33].

Dans une locomotive typique de 28 tonnes par exemple, le poids du transformateur représente 8 à 12 tonnes, avec un rendement de 97% à pleine charge, avec 1.5 à 3% de pertes. Le convertisseur représente 2 à 4% de pertes et le moteur 4 à 5% [34]. A la figure I.9, nous avons représenté un exemple de connexion des convertisseurs multi-niveaux à la caténaire.

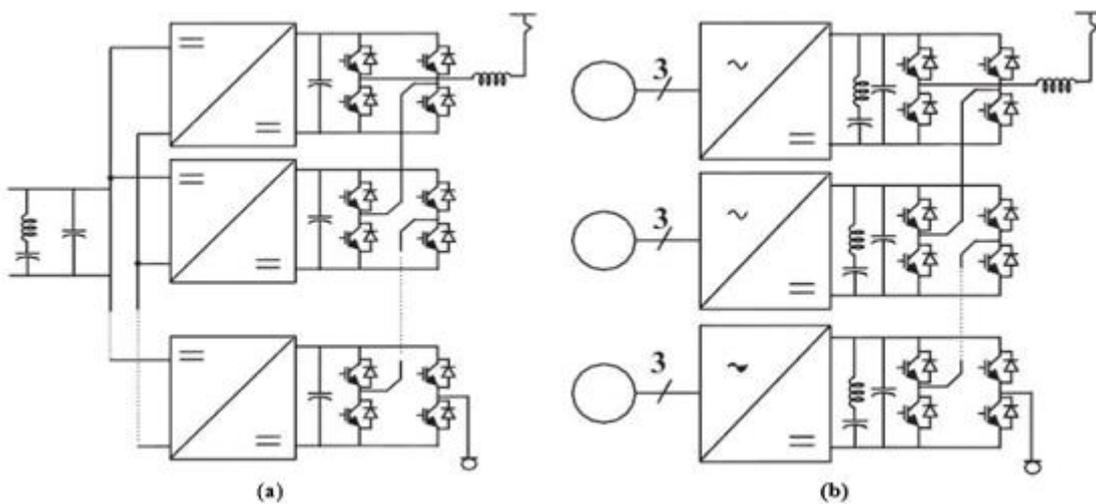


Figure I.9 : Convertisseurs multi-niveaux dans la traction ferroviaire.

Dans les véhicules électriques, l'utilisation des convertisseurs multi-niveaux est également possible. L'exploitation de la topologie basée sur la mise en série d'onduleurs partiels, devient relativement aisée, puisque chaque onduleur est alimenté par une batterie de 48V, assurant ainsi l'isolation galvanique requise entre toutes les sources [35][36][37]. On trouve aussi le convertisseur multi-niveau back-to-back à structure NPC pour l'usage dans des

Chapitre I : Généralité sur les onduleurs à deux niveaux et multi-niveaux

grands entrainements des véhicules hybride-électrique pour les camions lourds et les véhicules militaires [36].

I.8.6.2 Application dans les réseaux de bord et des bâtiments maritimes

Dans les bâtiments maritimes, il est possible d'exploiter les techniques de conversion multi-niveaux pour assurer l'alimentation des navires (par exemple alimenter un réseau de bord). La figure I.10

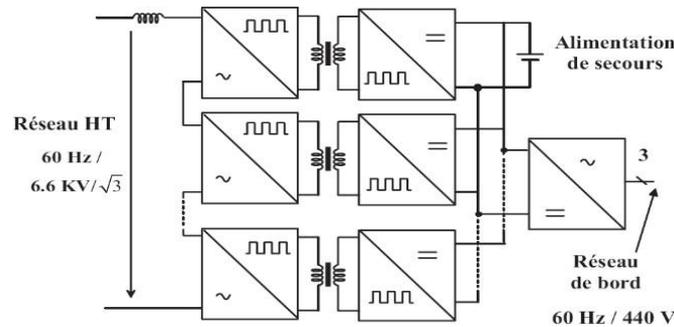


Figure I.10 : Convertisseurs multi-niveaux dans les bâtiments maritimes.

I.8.6.3 Application dans le domaine des réseaux électriques

Les convertisseurs multi-niveaux sont aussi adaptés pour l'amélioration de la qualité de la tension des réseaux électriques parce qu'ils peuvent fournir une moyenne ou une haute tension. Notamment sur les lignes de transmission de longue distance, il est souvent nécessaire de compenser la puissance réactive. Lorsqu'ils sont contrôlés de façon adéquate, ils offrent dans ce cas, la possibilité de régler l'amplitude de la tension et son déphasage, mais aussi l'impédance de la ligne de transmission. Ils peuvent donc jouer le rôle de compensateurs statiques. La figure I.11

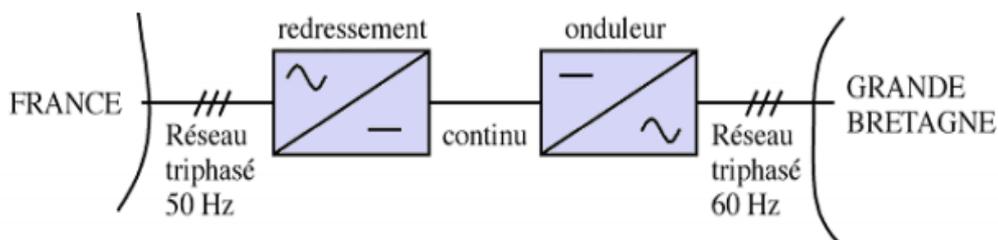


Figure I.11 : Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes.

I.8.6.4 Application dans le domaine de l'alimentation des machines électriques

Les machines électriques de moyenne et fortes puissances nécessitent une alimentation à moyenne tension. Sachant que les semi-conducteurs ne supportent qu'une faible tension par rapport à celle exigée par la machine. Dans ce cas l'utilisation des convertisseurs multi-niveaux est mieux adaptée, car la qualité de la tension en termes d'harmonique est meilleure ainsi les effets néfastes sur la durée de vie de la machine et celle de réseau éventuel est réduite [38] [39] [40]. En plus à partir de cellules de petite tension (comme des batteries, des piles à combustible ou des cellules photovoltaïques), il devient possible d'alimenter une machine à moyenne tension.

I.9 Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre nous avons présenté la théorie sur les onduleurs à deux niveaux, sa constitution physique élémentaire, son fonctionnement, leurs principales applications. Ainsi les différentes structures de ces onduleurs et leurs principales contraintes.

La deuxième partie est consacrée sur l'historique, description des principales topologies des convertisseurs multi-niveaux avec leurs avantages et inconvénients et leurs domaines d'applications industrielles.

Le chapitre suivant sera consacré au principe de fonctionnement et à la modélisation des onduleurs deux niveaux et multi-niveaux.

Chapitre II :
Fonctionnement et
modélisation des onduleurs
deux niveaux et multi-
niveaux.

II. Introduction

Dans ce chapitre, Nous allons étudier en détail le fonctionnement du l'onduleur de tension à deux, trois, jusqu'à cinq niveaux pour les trois topologies de base de la conversion multi-niveaux (structure et principe de fonctionnement).

La modélisation est une technique nécessaire à l'étude, l'analyse, la synthèse, le diagnostic et le contrôle des systèmes ou des unités industrielles. Dans le cadre de cette étude nous établissons le modèle mathématique de l'onduleur à trois niveaux de tension de type NPC en mode commandable, en utilisant la notion de fonctions de connexion des interrupteurs et des demi-bras. Ainsi que la modélisation d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux.

II.1 Onduleurs deux niveaux

II.1.1 Onduleur monophasé en pont complet

II.1.1.1 Description

Dans un premier temps nous allons étudier la forme de la tension et du courant aux bornes de la charge si les interrupteurs sont commandés périodiquement par paire. La figure II.1

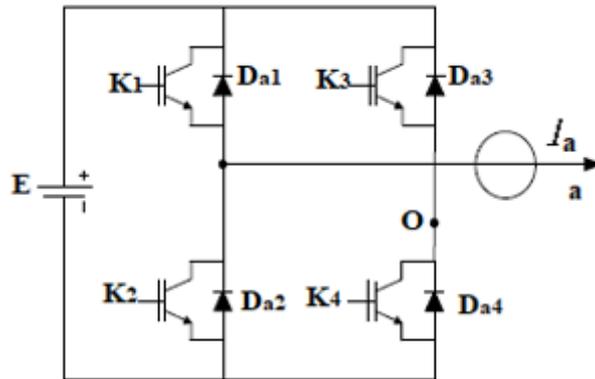


Figure II.1 : Structure d'un onduleur monophasé à deux niveaux.

II.1.1.2 Principe de fonctionnement

Pour un convertisseur à deux niveaux de tensions. Nous avons deux séquences de fonctionnement possible permettant de générer les deux niveaux de tensions :

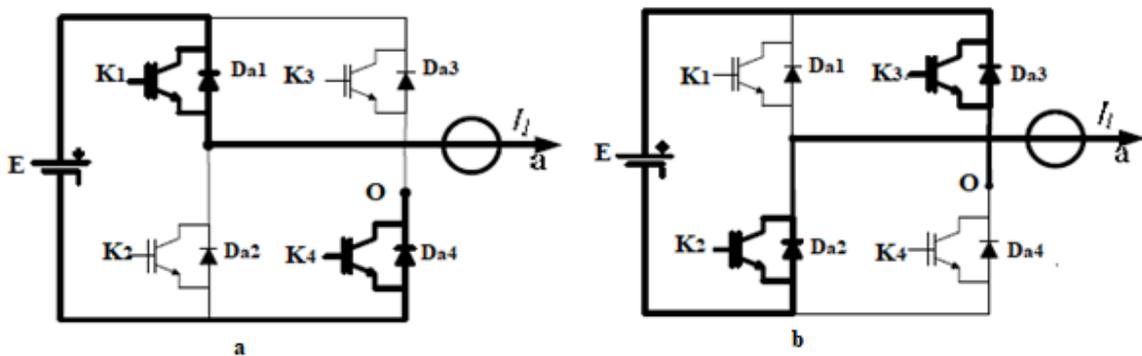


Figure II.2 : Séquences de fonctionnement d'un d'onduleur monophasé à deux niveaux.

Chapitre II : Fonctionnement et modélisation des onduleurs deux niveaux et multi-niveaux

- **Séquence 1 : Génération de niveau maximum**

Dans ce cas, les interrupteurs K1, K4 sont passants et K2, K3, sont bloqués comme le montre la figure II.2.a. Et la tension de sortie est : $V_{oa} = +E$

La tension inverse appliquée aux interrupteurs K2, K3 vaut : $V_{K2} = V_{K3} = +E$

- **Séquence 2 : Génération de niveau minimum**

Dans ce cas, les interrupteurs K2, K3 sont passants et K1, K4 sont bloqués comme le montre la figure II.2. b. Et la tension de sortie est : $V_{ao} = -E$

La tension inverse appliquée aux interrupteurs K1, K4 vaut : $V_{K1} = V_{K4} = +E$

Le tableau ci-dessous résume les états de commutation des interrupteurs lors des deux séquences de fonctionnement :

K1	K2	K3	K4	V_{ao}
1	0	0	1	+E
0	1	1	0	-E

Tableau II.1 : États possibles d'un onduleur monophasé à deux niveaux.

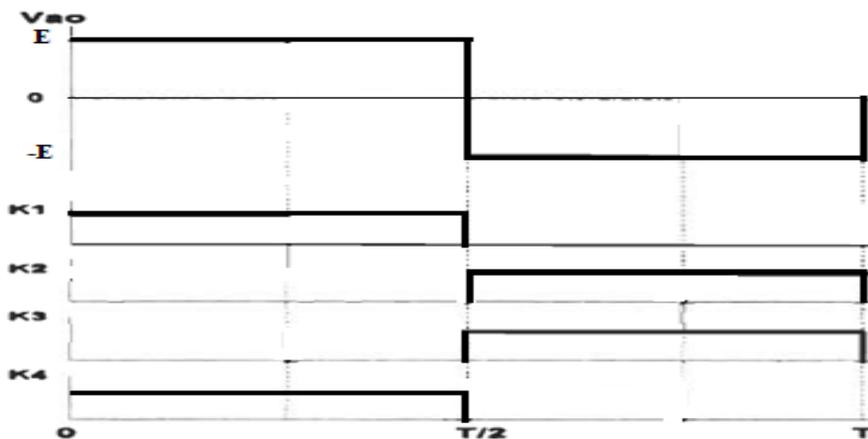


Figure II.3: Formes d'ondes d'un onduleur monophasé à deux niveaux.

II.1.2 Onduleur triphasé en pont

II.1.2.1 Description

L'onduleur classique à deux niveaux de tension est représenté sur la figure II.4. Il est constitué de trois bras de commutation à transistors. Chaque bras composé de deux cellules comportant chacune une diode et un transistor qui travaillent en commutation forcée. Tous ces éléments sont considérés comme des interrupteurs idéaux. En mode commandable, le bras d'onduleur est un commutateur à deux positions qui permet d'obtenir à la sortie deux niveaux de tension [41] [42].

II.1.2.2 Principe de fonctionnement

Pour un convertisseur à deux niveaux de tensions. Nous avons deux séquences de fonctionnement possible permettant de générer les deux niveaux de tensions :

Chapitre II : Fonctionnement et modélisation des onduleurs deux niveaux et multi-niveaux

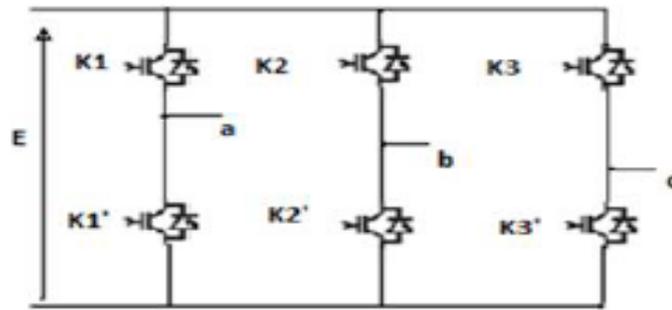


Figure II.4 : Structure d'un onduleur triphasé à deux niveaux.

- **Séquences 1 : Génération du niveau maximum**

Dans ce cas, l'interrupteur K1 est passant et K1' est bloqué. La tension de sortie V_a est : $V_a = +E$.

La tension inverse appliquée à l'interrupteur K1' vaut : $V_{K1'} = +E$.

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

Dans ce cas, l'interrupteur K1 est bloqué et K1' est passant. La tension de sortie V_a est : $V_a = 0$.

La tension inverse appliquée à l'interrupteur K1 vaut : $V_{K1} = +E$.

Les 2 états ou séquences de commutation possibles sont résumés au tableau suivant :

K1	K1'	V_a
1	0	E
0	1	0

Tableau II.2: États possibles d'un onduleur triphasé (un seul bras) à deux niveaux.

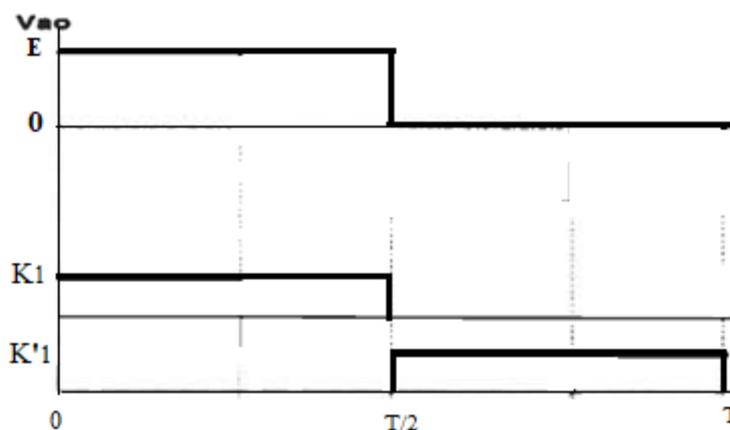


Figure II.5 : Forme d'onde d'un onduleur triphasé (un seul bras) à deux niveaux.

II.1.3 Modélisation d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux

L'onduleur de tension représente aujourd'hui la « brique de base » dans les systèmes d'interfaçage avec le réseau. Il permet entre autres de contrôler les puissances (active et réactive) échangées avec le réseau. Il peut être utilisé en mode onduleur ou en mode redresseur mais la modélisation reste la même dans les deux cas.

L'onduleur est constitué de trois branches où chacune est composée de deux paires d'interrupteurs supposés parfaits et dont les commandes sont disjointes et complémentaires ; chaque interrupteur est représenté par une paire transistor-diode qui est modélisé par deux états définis par la fonction de connexion logique suivante :

$$f_i = \begin{cases} 1 & \text{l'interrupteur } i \text{ est fermé } (K_i \text{ conduit, } \bar{k}_i \text{ bloqué)} \\ 0 & \text{l'interrupteur } i \text{ est ouvert } (K_i \text{ bloqué, } \bar{k}_i \text{ conduit)} \end{cases}$$

Avec : $f_i + \bar{f}_i = 1$ et $i= 1...3$.

La figure II.6 représente le schéma de l'onduleur triphasé :

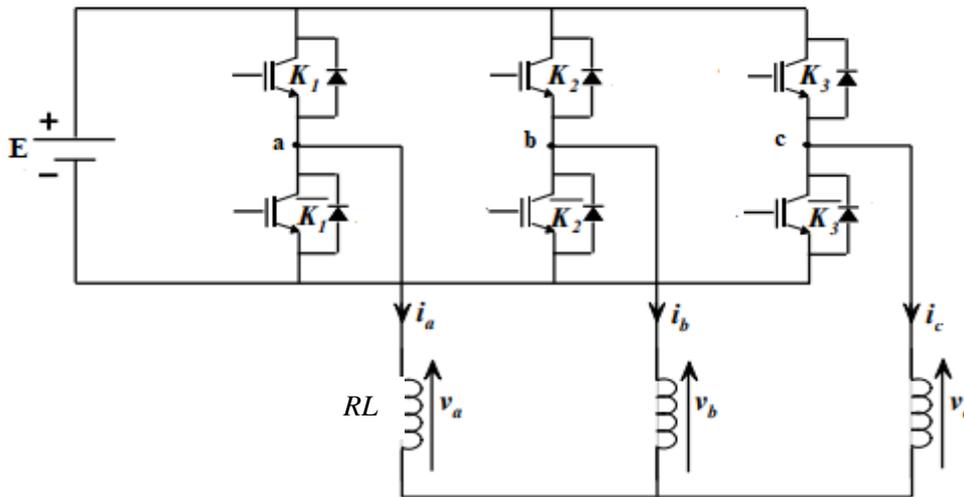


Figure II.6: Onduleur de tension triphasé.

Les tensions composées sont :

$$U_{AB} = v_a - v_b = E * (f_1 - f_2) \tag{II.1}$$

$$U_{BC} = v_b - v_c = E * (f_2 - f_3) \tag{II.2}$$

$$U_{CA} = v_c - v_a = E * (f_3 - f_1) \tag{II.3}$$

Les tensions simples v_a, v_b, v_c forment un système triphasé équilibré, tel que:

$$v_a + v_b + v_c = 0 \tag{II.4}$$

La résolution des équations (1) –(4) nous donne :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{E}{3} * \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \tag{II.5}$$

II.2 Onduleurs multi-niveaux

II.2.1 Onduleur à trois niveaux de type diode flottante (NPC)

II.2.1.1 Description

L'onduleur NPC à trois niveaux est représenté sur la figure II.7. Le bus continu d'entrée est composé de deux capacités en série (C_1 et C_2), 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 [43]. 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 $E/2$ à leurs bornes.

Chacun des trois bras de l'onduleur est composé de quatre interrupteurs commandés (K1, K2, K3 et K4). Pour chaque bras les 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.

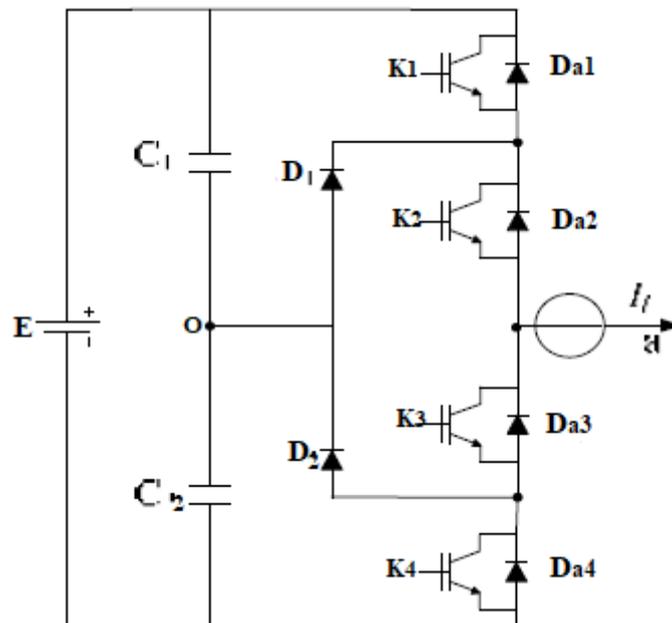


Figure II.7: Structure d'un bras d'onduleur triphasé à trois niveaux de type NPC.

II.2.1.2 Principe de fonctionnement

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

Le sens positif ou négatif des courants 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.

Le bras d'un convertisseur à trois niveaux à structure NPC est illustré sur la figure II.8 il se compose de :

Chapitre II : Fonctionnement et modélisation des onduleurs deux niveaux et multi-niveaux

- (m-1) sources de tension (Condensateur) = (3-1) =2.
 - 2 (m-1) dispositifs de commutation = 2 (3-1) =4.
 - 2 [(m-1) + (m-2)] diodes = 2 [(3-1) + (3-2)] =6
- m : représente le nombre de niveaux.

Pour un convertisseur NPC à N-niveaux de tensions, nous avons N séquences de fonctionnement possible permettant de générer les N niveaux de tensions.

Et en particulier pour le NPC à trois niveaux on a trois séquences de fonctionnement :

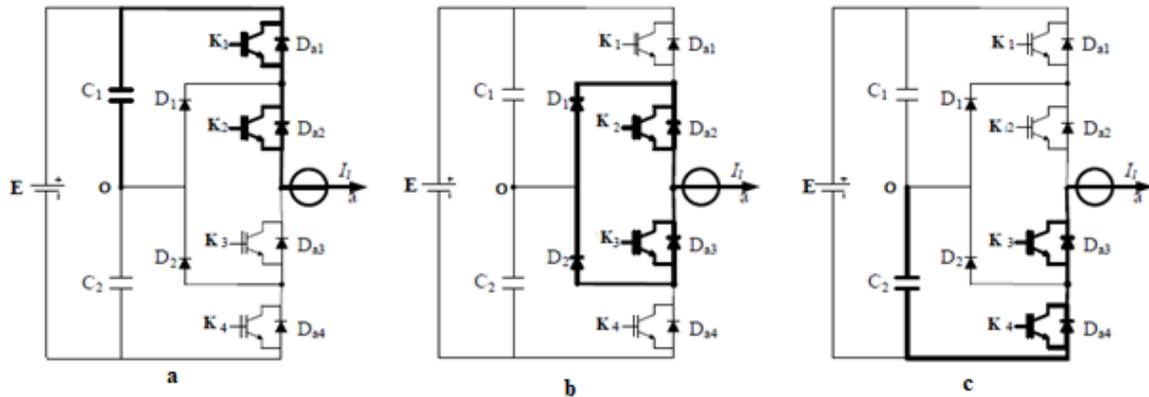


Figure II.8: Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur triphasé de type NPC à trois niveaux.

- **Séquences 1 : Génération du niveau maximum**

Dans ce cas, les interrupteurs K1, K2 sont passants et K3, K4, sont bloqués comme le montre la figure II.8.a. Et la tension de sortie V_{ao} est : $V_{ao} = +\frac{E}{2}$.

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

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

Les interrupteurs K2, K3 sont passants et K1, K4 sont bloqués, dans ce cas le point a est relié directement au point 0 à travers l'une des diodes de maintien, comme le montre la figure II.8.b. Et la tension de sortie V_{ao} est donc nulle, $V_{ao} = 0$.

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

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

Dans ce cas, les interrupteurs K1, K2 sont bloqués et K3, K4 sont passants comme le montre la figure II.8.c. Et la tension de sortie V_{ao} est : $V_{ao} = -\frac{E}{2}$

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

Les 3 états ou séquences de commutation possibles sont résumés au tableau suivant :

K1	K2	K3	K4	V_{ao}
1	1	0	0	$+\frac{E}{2}$
0	1	1	0	0
0	0	1	1	$-\frac{E}{2}$

Tableau II.3: États possibles d'un bras d'onduleur triphasé de type NPC 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.9.



Figure II.9: Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé de type NPC à trois niveaux.

II.2.2 Onduleur à cinq niveaux de type diode flottante (NPC)

II.2.2.1 Description

Chaque phase de l'onduleur triphasé NPC 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 toutes au long du bus continu.

L'onduleur est alimenté par une source continue E , et quatre condensateurs de valeurs égales se partagent pour donner quatre sources distinctes de tension $E/4$.

La structure de l'onduleur NPC à cinq niveaux de tensions est présentée sur la figure II.10.

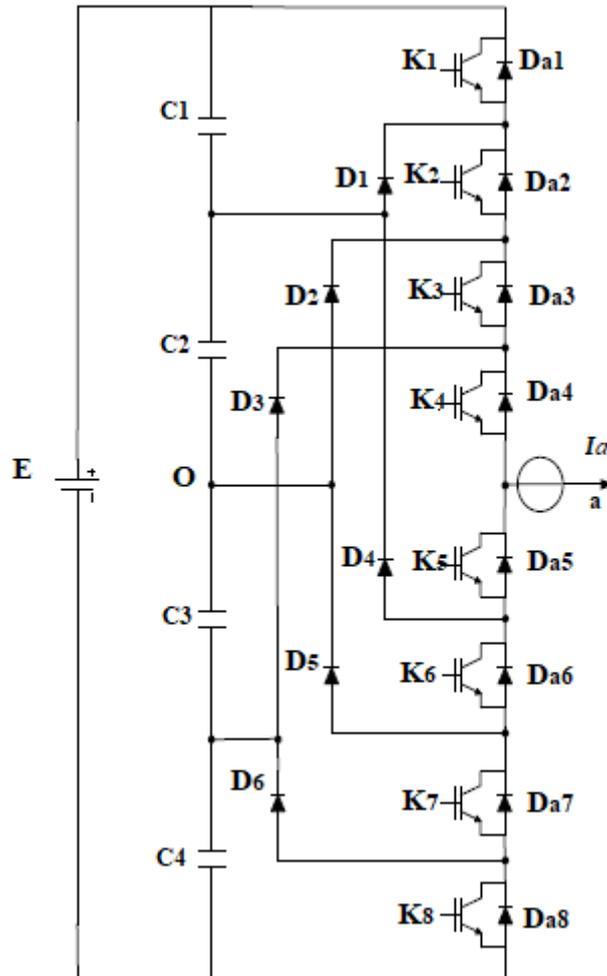


Figure II.10 : Structure d'un bras d'onduleur triphasé à cinq niveaux de type NPC.

II.2.2.2 Principe de fonctionnement

Nous limiterons l'étude à un bras d'onduleur NPC de cinq niveaux, figure II.11. 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 bras d'un convertisseur à cinq niveaux à structure NPC est illustré sur la figure II.11, il se compose de :

- $(m-1)$ sources de tension (Condensateur) = $(5-1) = 4$.
 - $2(m-1)$ dispositifs de commutation = $2(5-1) = 8$.
 - $2[(m-1) + (m-2)]$ diodes = $2[(5-1) + (5-2)] = 14$.
- m : représente le nombre de niveaux.

Chapitre II : Fonctionnement et modélisation des onduleurs deux niveaux et multi-niveaux

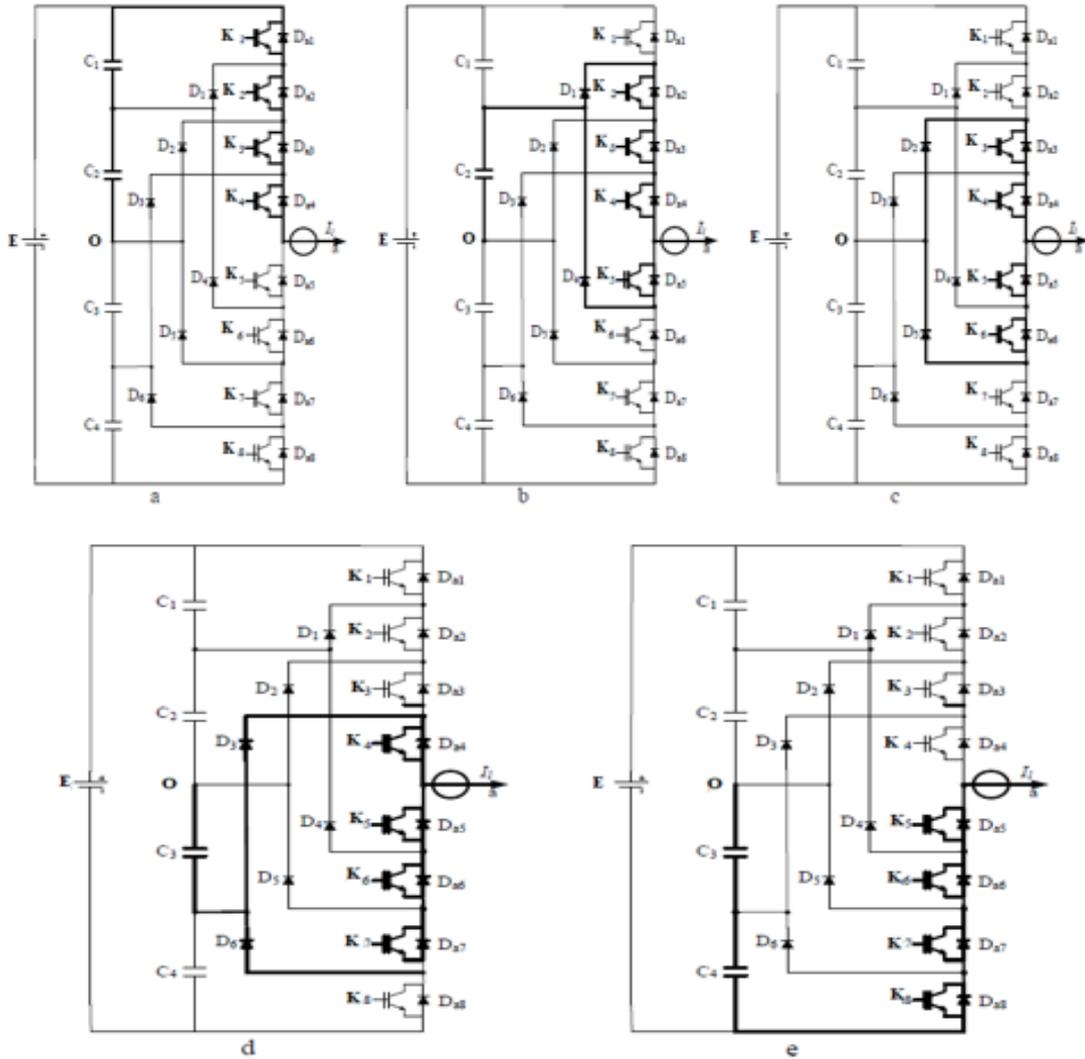


Figure II.11: Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur triphasé de type NPC à cinq niveaux.

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

- **Séquence 1**

K1, K2, K3 et K4 sont passants et K5, K6, K7 et K8 sont bloqués, comme le montre la figure II.11.a Alors, le point a est relié 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 : $V_{oa} = +\frac{E}{2}$

- **Séquence 2**

K2, K3, K4 et K5 sont passants et K6, K7, K8 et K1 sont bloqués, comme le montre la figure II.11.b Alors, on a : la tension de sortie vaut : $V_{ao} = +\frac{E}{4}$

- **Séquence 3**

K3, K4, K5 et K6 sont passants et K7, K8, K1 et K2 sont bloqués, comme le montre la figure II.11.c Alors, on a : la tension de sortie vaut : $V_{ao} = 0$

Chapitre II : Fonctionnement et modélisation des onduleurs deux niveaux et multi-niveaux

- **Séquence 4**

K4, K5, K6 et K7 sont passants et K8, K1, K2 et K3 sont bloqués, comme le montre la figure II.11.d Alors, on a : la tension de sortie vaut : $V_{ao} = -\frac{E}{4}$

- **Séquence 5**

K5, K6, K7 et K8 sont passants et K1, K2, K3 et K4 sont bloqués, comme le montre la figure II.11.e Alors, on a : la tension de sortie vaut : $V_{ao} = -\frac{E}{2}$

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

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

Les différentes séquences de fonctionnement et l'état des interrupteurs commandés sont regroupés dans le tableau suivant :

K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	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.4: États possibles d'un bras d'onduleur triphasé de type NPC 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.12.

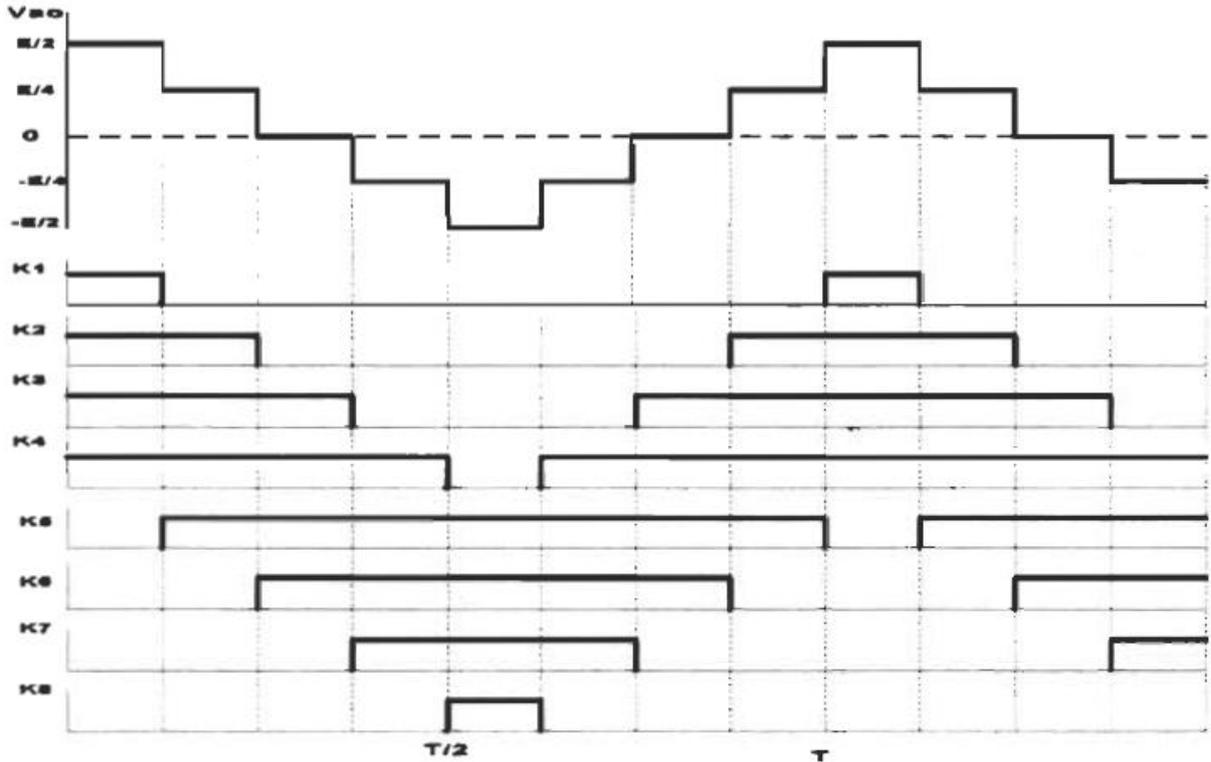


Figure II.12 : Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé de type NPC à cinq niveaux.

II.2.3 Onduleur à trois niveaux de type condensateur flottant (FC)

II.2.3.1 Description

La structure principale de cette topologie est similaire à la topologie précédente mais on utilise des condensateurs au lieu de diodes de blocage. La figure II.13 montre la phase d'un convertisseur à trois niveaux.

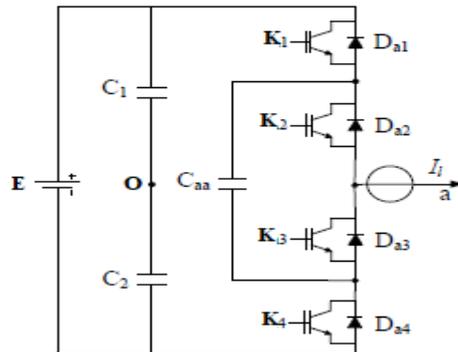


Figure II.13 : Structure d'un bras d'onduleur triphasé à trois niveaux de type FC.

II.2.3.2 Principe de fonctionnement

Pour un convertisseur FC à N-niveaux de tensions, nous avons N séquences de fonctionnement possible permettant de générer les N niveaux de tensions.

Le bras d'un convertisseur à trois niveaux à structure FC est illustré sur la figure II.14, il se compose de :

Chapitre II : Fonctionnement et modélisation des onduleurs deux niveaux et multi-niveaux

- (m-1) sources de tension (Condensateur) = (3-1) = 2.
 - 2 (m-1) dispositifs de commutation = 2 (3-1) = 4.
 - 2 (m-1) diodes = 2 (3-1) = 4.
 - [(m-1) (m-2)/2] capacités auxiliaires = [(3-1) (3-2)/2] = 1
- m : représente le nombre de niveaux.

Et en particulier pour le FC à trois niveaux on a quatre séquences de fonctionnement :

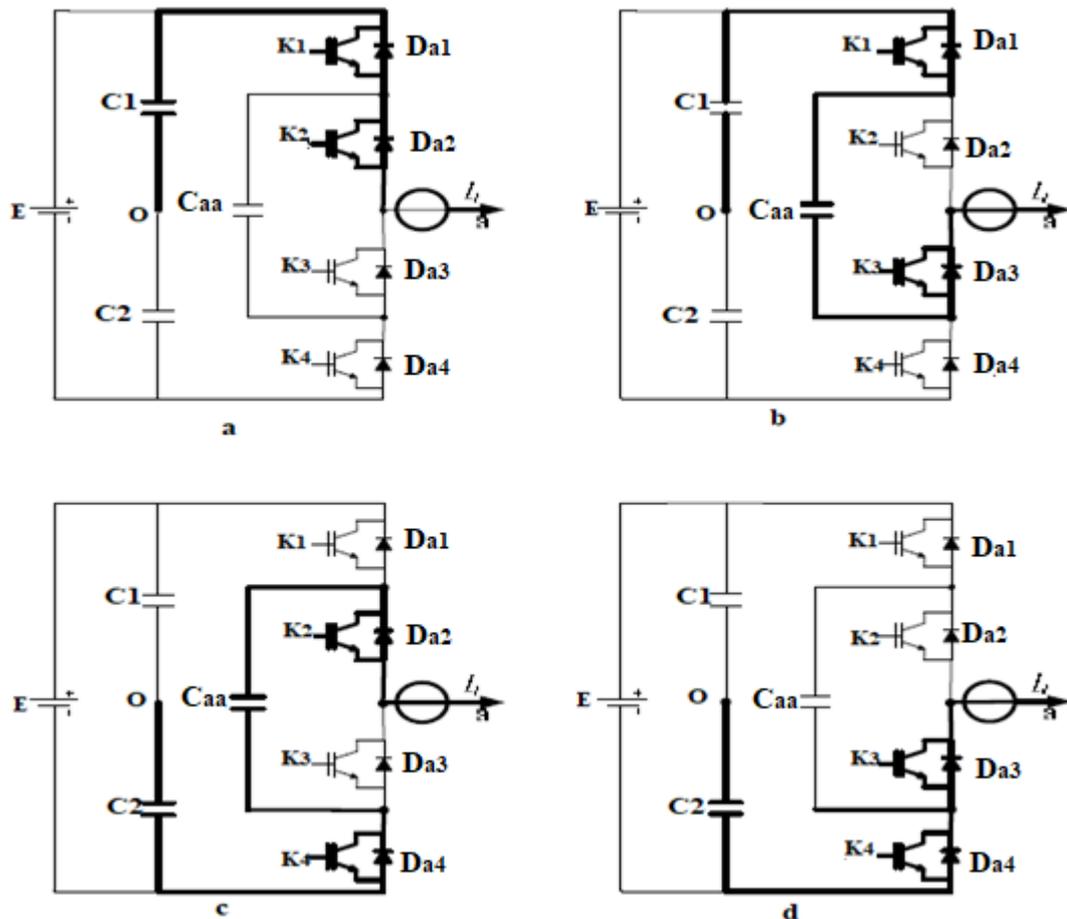


Figure II.14 : Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur triphasé de type FC à trois niveaux.

- **Séquences 1 : Génération du niveau maximum**

Dans ce cas, les interrupteurs K1, K2 sont passants et K3, K4, sont bloqués comme le montre la figure II.14.a. Et la tension de sortie V_{ao} est : $V_{ao} = +\frac{E}{2}$

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

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

✓ Génération du niveau intermédiaire (passage par un zéro positive)

Les interrupteurs K1, K3 sont passants et K2, K4 sont bloqués, comme le montre la figure II.14.b La tension de sortie V_{ao} est donc nulle, $V_{ao} = 0^+$

$$\frac{E}{2} - \frac{E}{2} = 0^+$$

Chapitre II : Fonctionnement et modélisation des onduleurs deux niveaux et multi-niveaux

La tension inverse appliquée aux interrupteurs K2, K4 vaut : $V_{K2} = V_{K4} = +\frac{E}{2}$

✓ Génération du niveau intermédiaire (passage par un zéro négative)

Les interrupteurs K2, K4 sont passants et K1, K3 sont bloqués, comme le montre la figure II.14.c La tension de sortie V_{ao} est donc nulle, $V_{ao} = 0^-$

$$\frac{E}{2} - \frac{E}{2} = 0^-$$

La tension inverse appliquée aux interrupteurs K1, K3 vaut : $V_{K1} = V_{K3} = +\frac{E}{2}$

• Séquences 3 : Génération du niveau minimum

Dans ce cas, les interrupteurs K1, K2 sont bloqués et K3, K4 sont passants, comme le montre la figure II.14.d La tension de sortie V_{ao} est : $V_{ao} = -\frac{E}{2}$

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

Les 3 états ou séquences de commutation possibles sont résumés au tableau suivant :

K1	K2	K3	K4	V_{ao}
1	1	0	0	$+\frac{E}{2}$
1	0	1	0	0^+
0	0	1	1	$-\frac{E}{2}$
0	1	0	1	0^-

Tableau II.5: États possibles d'un bras d'onduleur triphasé de type FC 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.15.



Figure II.15 : Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé de type FC à trois niveaux.

II.2.4 Onduleur à cinq niveaux de type condensateur flottant (FC)

II.2.4.1 Description

La structure principale de cette topologie est similaire à la topologie précédente mais on utilise des condensateurs au lieu de diodes de blocage. La figure II.16 montre une phase d'un convertisseur à cinq niveaux à structure FC.

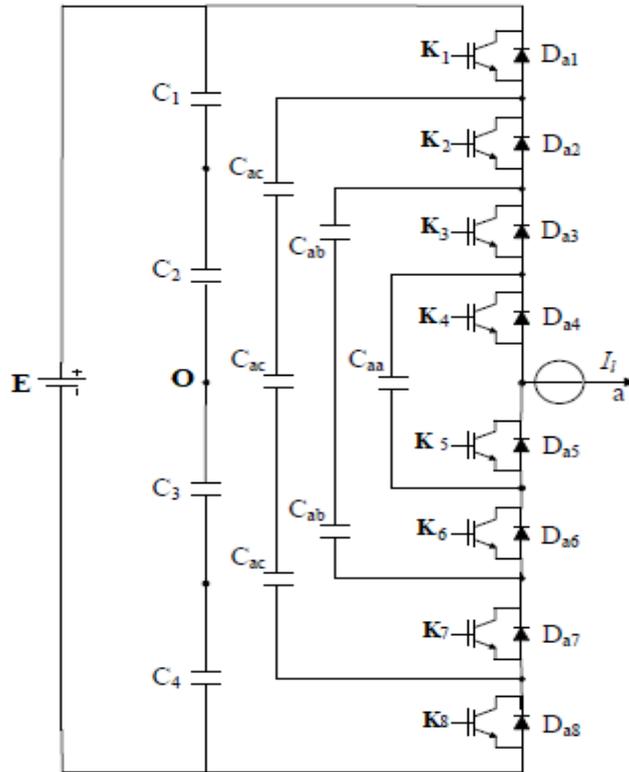


Figure II.16 : Structure d'un bras d'onduleur triphasé à cinq niveaux de type FC.

II.2.4.2 Principe de fonctionnement

Le bras d'un convertisseur à cinq niveaux à structure FC est illustré sur la figure II.17, il se compose de :

- $(m-1)$ sources de tension (Condensateur) = $(5-1) = 4$.
 - $2(m-1)$ dispositifs de commutation = $2(5-1) = 8$.
 - $2(m-1)$ diodes = $2(5-1) = 8$.
 - $[(m-1)(m-2)/2]$ capacités auxiliaires = $[(5-1)(5-2)/2] = 6$.
- m : représente le nombre de niveaux.

Chapitre II : Fonctionnement et modélisation des onduleurs deux niveaux et multi-niveaux

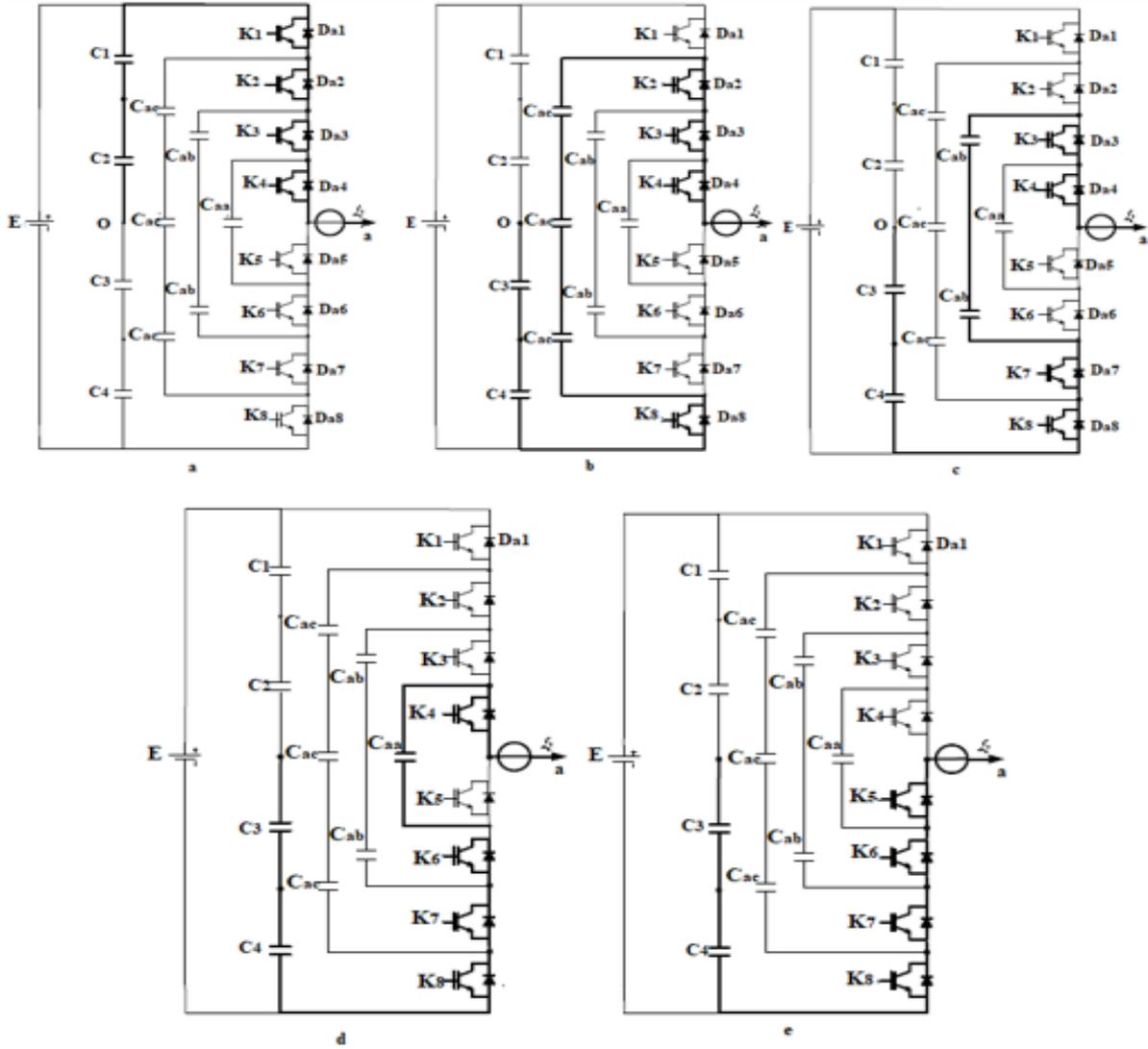


Figure II.17: Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur triphasé de type FC à cinq niveaux.

Et en particulier pour le FC à cinq niveaux on a cinq séquences de fonctionnement :

- **Séquence 1**

K1, K2, K3 et K4 sont passants et K5, K6, K7 et K8 sont bloqués, comme le montre la figure II.17.a Alors, le point a est relié directement à la borne positive du premier étage de tension $\frac{E}{4}$ et le point 0 est relié à la borne négative du deuxième étage de tension $\frac{E}{4}$ ce qui implique que la tension de sortie vaut : $V_{a0} = +\frac{E}{2}$

- **Séquence 2**

K2, K3, K4 et K8 sont passants et K5, K6, K7 et K1 sont bloqués, comme le montre la figure II.17.b. Alors, on a : la tension de sortie vaut : $V_{a0} = +\frac{E}{4}$

Chapitre II : Fonctionnement et modélisation des onduleurs deux niveaux et multi-niveaux

- **Séquence 3**

K3, K4, K7 et K8 sont passants et K1, K2, K5 et K6 sont bloqués, comme le montre la figure II.17.c. Alors, on a : la tension de sortie vaut : $V_{ao} = 0$

- **Séquence 4**

K4, K6, K7 et K8 sont passants et K1, K2, K3 et K5 sont bloqués, comme le montre la figure II.17.d. Alors, on a : la tension de sortie vaut : $V_{ao} = -\frac{E}{4}$

- **Séquence 5**

K5, K6, K7 et K8 sont passants et K1, K2, K3 et K4 sont bloqués, comme le montre la figure II.17.e. Alors, on a : la tension de sortie vaut : $V_{ao} = -\frac{E}{2}$

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

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

Les différentes séquences de fonctionnement et l'état des interrupteurs commandés sont regroupés dans le tableau suivant :

K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	V_{ao}
1	1	1	1	0	0	0	0	$\frac{E}{2}$
0	1	1	1	0	0	0	1	$\frac{E}{4}$
0	0	1	1	0	0	1	1	0
0	0	0	1	0	1	1	1	$-\frac{E}{4}$
0	0	0	0	1	1	1	1	$-\frac{E}{2}$

Tableau II.6: États possibles d'un bras d'onduleur triphasé de type FC 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.18.

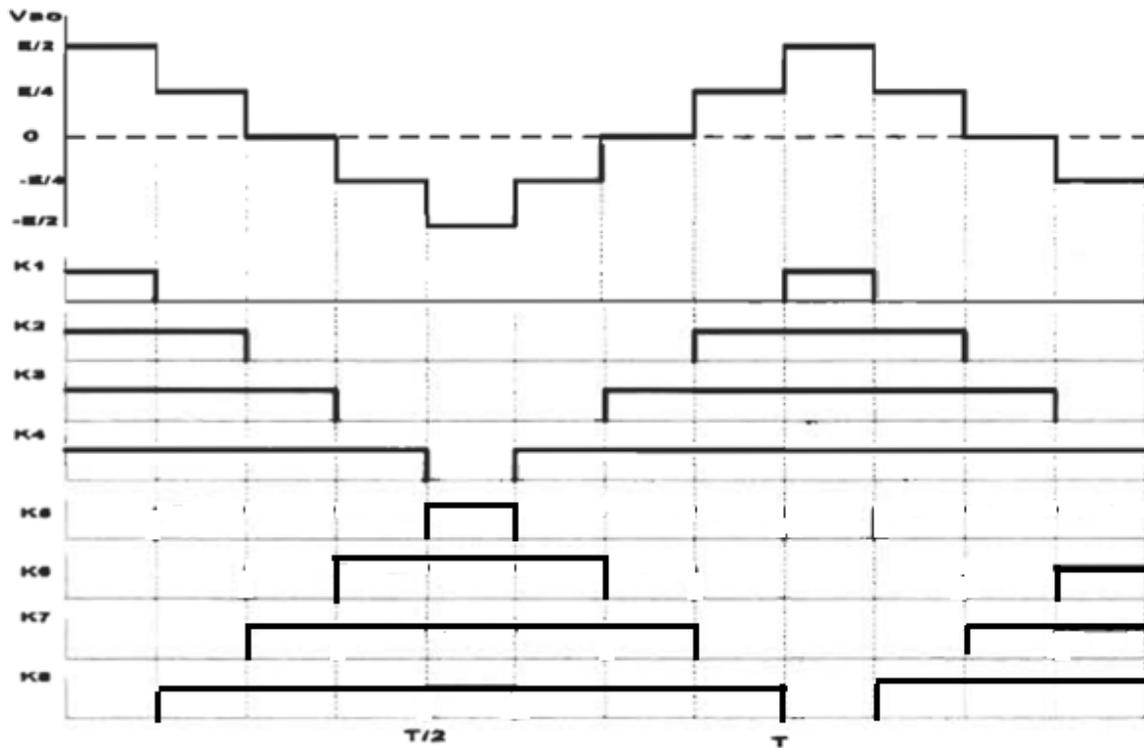


Figure II.18: Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé de type FC à cinq niveaux.

II.2.5 Onduleur à trois niveaux de type H

II.2.5.1 Description

La structure d'un convertisseur multi-niveau basée sur la mise en série d'onduleurs monophasés (ou pont en H, ou cellule partielle) est montrée sur la figure II.19.

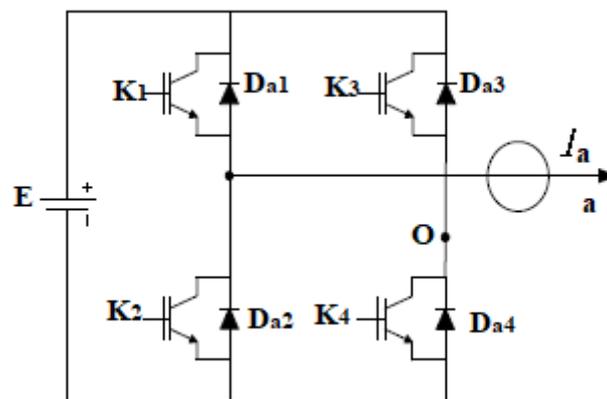


Figure II.19 : Structure d'un onduleur cascade en pont H à trois niveaux.

II.2.5.2 Principe de fonctionnement

Pour mieux comprendre le fonctionnement de la structure cascade en pont H à trois niveaux de tension, nous allons nous limiter notre étude à sa structure monophasée, figure II.20.

La structure d'un bras d'onduleur trois niveaux de type cascade en pont H est identique à celui d'un onduleur classique monophasé en pont complet.

Chapitre II : Fonctionnement et modélisation des onduleurs deux niveaux et multi-niveaux

Cependant la technique de commande est différente ce qui permettra d'avoir les trois niveaux de tension.

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

Le bras d'un convertisseur à trois niveaux à structure pont H est illustré sur la figure II.20, il se compose de :

- 2 (m-1) dispositifs de commutation = 2 (3-1) = 4.
- 2 (m-1) diodes = 2 (3-1) = 4.
- (m-1)/2 source DC séparée = (3-1)/2 = 1.

m : représente le nombre de niveaux.

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

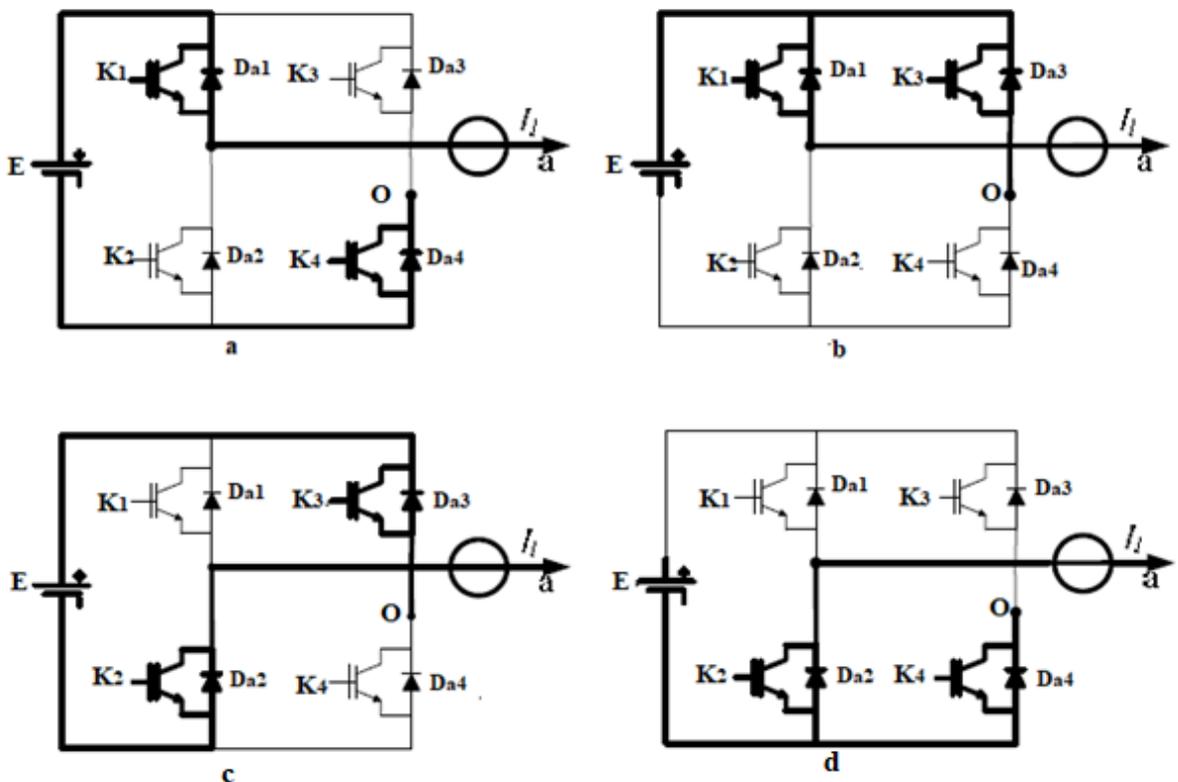


Figure II.20: Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur triphasé en pont H à trois niveaux.

- **Séquences 1 : Génération du niveau maximum**

Dans ce cas, les interrupteurs K1, K4 sont passants et K2, K3 sont bloqués comme le montre la figure II.20.a. Et la tension de sortie V_{ao} est : $V_{ao} = +E$

La tension inverse appliquée aux interrupteurs K2, K3 vaut : $V_{K2} = V_{K3} = +E$

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

Dans ce cas, les interrupteurs K1, K3 sont passants et K2, K4 sont bloqués comme le montre la figure II.20.b, ou bien K2, K4 sont passants et K1, K3 sont bloqués comme le montre la figure II.20.d. Et la tension de sortie V_{ao} est : $V_{ao} = 0$

La tension inverse appliquée aux interrupteurs vaut : $V_{Ki} = E \quad i=1..4.$

Chapitre II : Fonctionnement et modélisation des onduleurs deux niveaux et multi-niveaux

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

Dans ce cas, les interrupteurs K2, K3 sont passants et K1, K4 sont bloqués comme le montre la figure II.20.c. Et la tension de sortie V_{ao} est : $V_{ao} = -E$

La tension inverse appliquée aux interrupteurs K1, K4 vaut : $V_{K1} = V_{K4} = +E$

Les trois états ou séquences de commutation possibles sont résumés au tableau suivant :

K1	K2	K3	K4	V_{ao}
1	0	0	1	+E
0	1	0	1	0
1	0	1	0	0
0	1	1	0	-E

Tableau II.7: États possibles d'un bras d'onduleur triphasé en pont H 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.21.

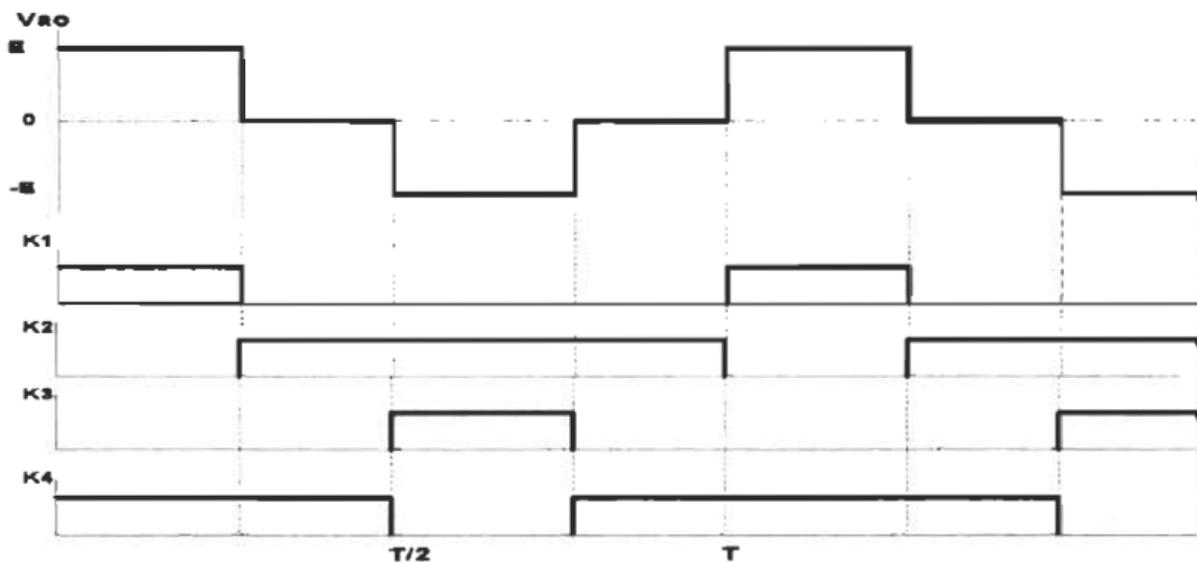


Figure II.21: Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé en pont H à trois niveaux.

II.2.6 Onduleur à cinq niveaux type H

II.2.6.1 Description

La structure d'un convertisseur multi-niveaux basée sur la mise en série d'onduleurs monophasés (ou pont en H, ou cellule partielle) est montrée sur la figure II.22.

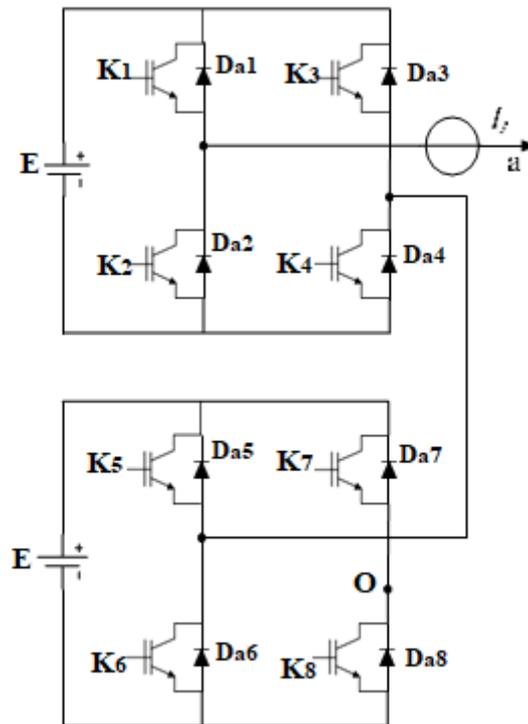


Figure II.22: Structure d'un onduleur cascade en pont H à cinq niveaux.

II.2.6.2 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement du convertisseur cascade en pont H à cinq niveaux de tension, sera illustré par sa structure monophasée, figure II.23.

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

Le bras d'un convertisseur à cinq niveaux à structure pont H est illustré sur la figure II.23, il se compose de :

- $2(m-1)$ dispositifs de commutation = $2(5-1) = 8$.
 - $2(m-1)$ diodes = $2(5-1) = 8$.
 - $(m-1)/2$ source DC séparée = $(5-1)/2 = 2$.
- m : représente le nombre de niveaux.

Comme pour le cas précédent, nous avons les cinq séquences de fonctionnements suivantes pour le convertisseur cascade en pont H à cinq niveaux de tensions.

Chapitre II : Fonctionnement et modélisation des onduleurs deux niveaux et multi-niveaux

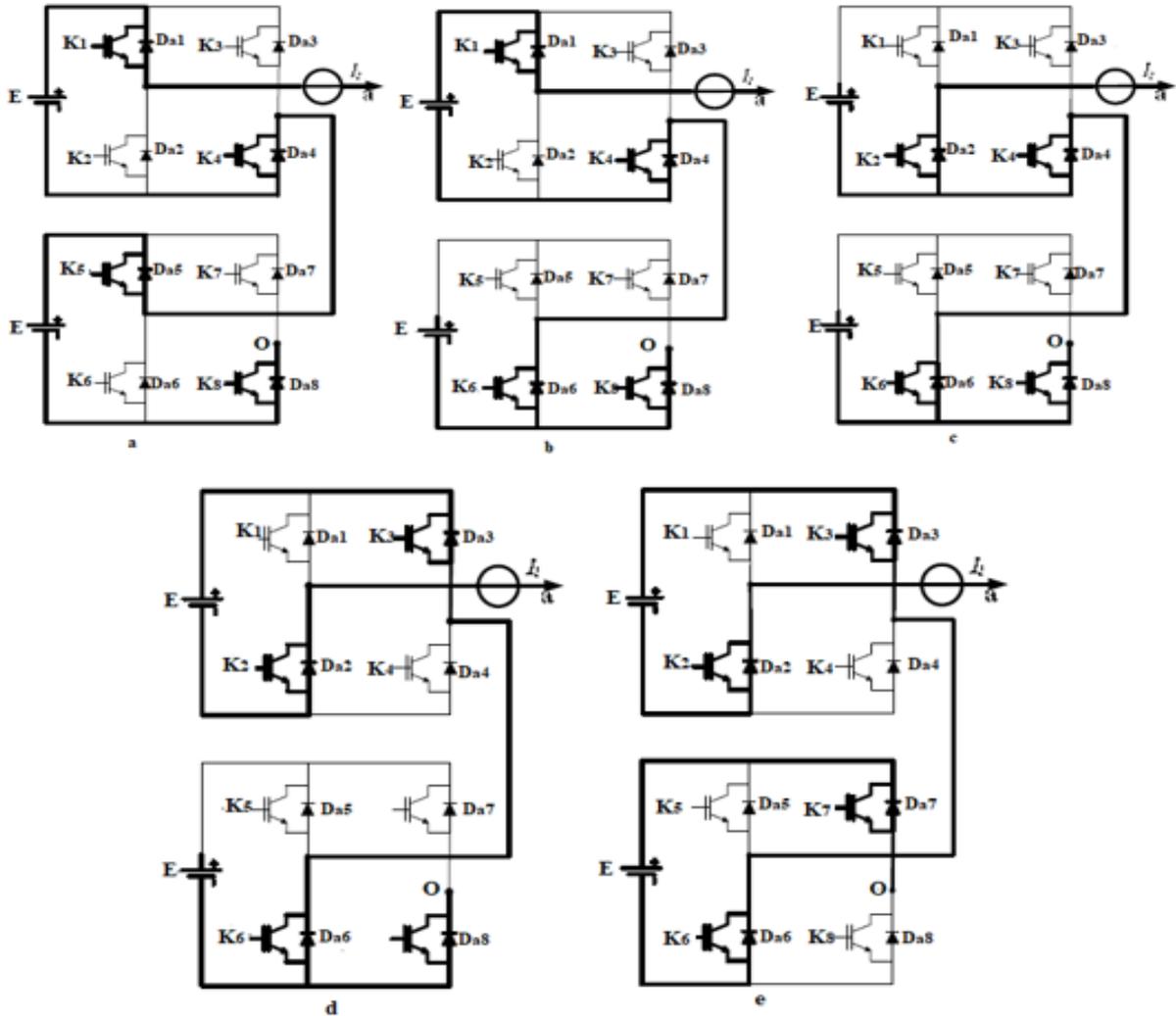


Figure II.23: Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur triphasé en pont H à cinq niveaux.

- **Séquences 1 :**

K1, K4, K5 et K8 sont passants et K2, K3, K6 et K7 sont bloqués, comme le montre la figure II.23.a. Dans ce cas le premier pont monophasé (celui du haut) donne une tension de sortie E et second pont monophasé (celui du bas) donne également E comme tension de sortie.

D'où la tension de sortie du convertisseur en cascadié H à cinq niveaux de tensions :

$$V_{a0} = E + E = 2E$$

- **Séquences 2 :**

K1, K4, K6 et K8 sont passants et K2, K3, K5 et K7 sont bloqués, comme le montre la figure II.23.b. On a toujours E à la sortie du premier pont, mais cette fois-ci 0 à la sortie du second pont. D'où la tension $V_{a0} = E$

- **Séquences 3 :**

K2, K4, K6 et K8 sont passants et K1, K3, K5 et K7 sont bloqués, comme le montre la figure II.23.c. On a alors 0 comme tension de sortie dans les deux ponts monophasés montés en cascade. Et la tension de sortie du pont en H obtenue vaut : $V_{a0} = 0$.

Chapitre II : Fonctionnement et modélisation des onduleurs deux niveaux et multi-niveaux

- **Séquences 4 :**

K2, K3, K6 et K8 sont passants et K1, K4, K5 et K7 sont bloqués, comme le montre la figure II.23.d. Dans ce cas, la tension de sortie est : $V_{ao} = -E$.

- **Séquences 5 :**

K2, K3, K6 et K7 sont passants et K1, K4, K5 et K8 sont bloqués, comme le montre la figure II.23.e. On a alors la tension de sortie $V_{ao} = -E - E = -2E$.

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

$$V_{Ki} = E, i=1\dots 8.$$

Les cinq états ou séquences de commutation possibles sont résumés au tableau suivant :

K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	V_{ao}
1	0	0	1	1	0	0	1	2E
1	0	0	1	0	1	0	1	E
0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	1	1	0	0	1	0	1	-E
0	1	1	0	0	1	1	0	-2E

Tableau II.8: États possibles d'un bras d'onduleur triphasé en pont H 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.24.

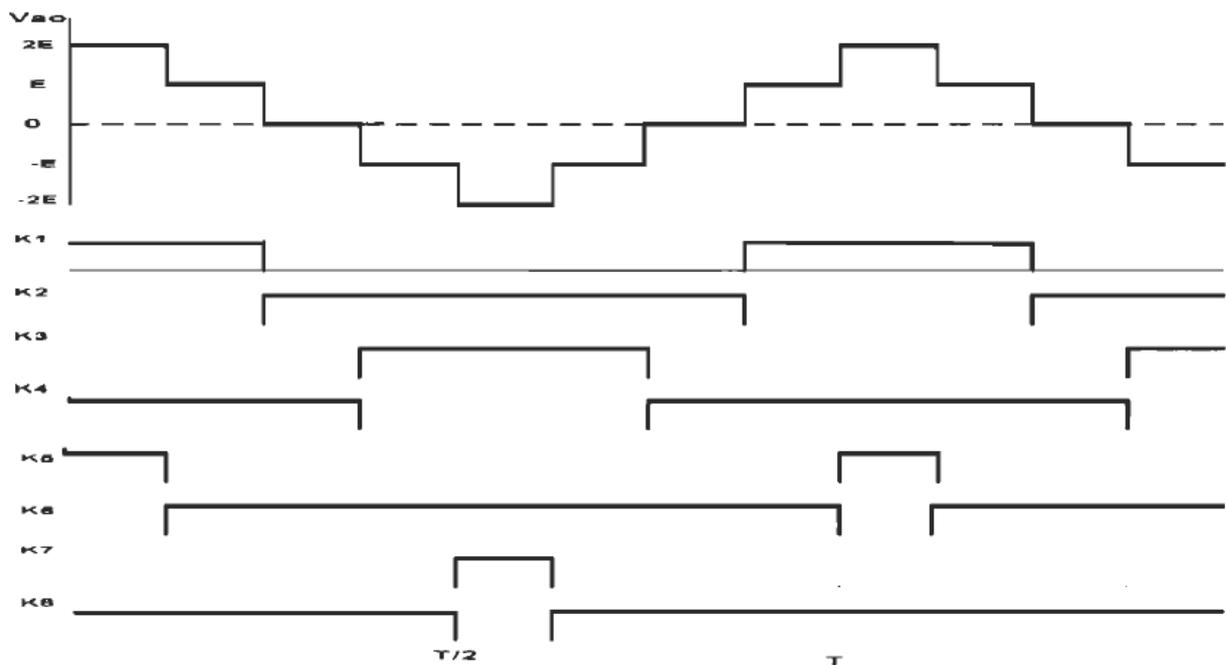


Figure II.24 : Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé en pont H à cinq niveaux.

II.3 Modélisation d'un onduleur à trois niveaux de type diode flottante

II.3.1 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.25 [44].

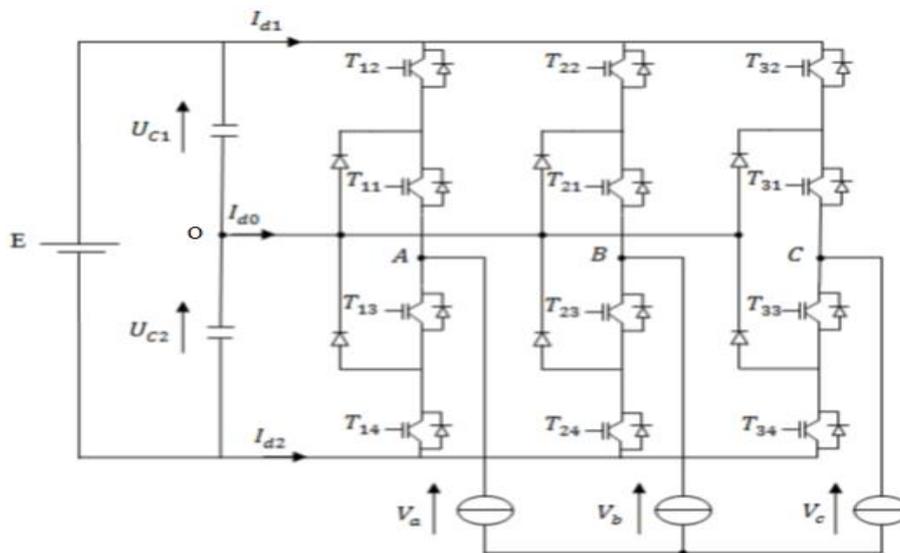


Figure II.25 : Structure de l'onduleur triphasé à trois niveaux à structure diode flottante.

II.3.2 Modélisation du fonctionnement d'un bras d'onduleur à diode flottante à trois niveaux

L'onduleur à trois niveaux à une structure symétrique. Donc on procède par bras figure II.26, ainsi, on définit en premier lieu un modèle global d'un bras sans à priori sur la commande.

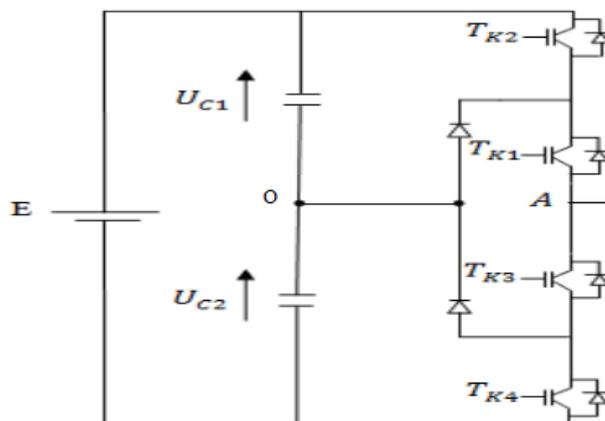


Figure II.26 : Structure d'un bras d'onduleur triphasé à trois niveaux.

II.3.3 Commande complémentaire

Pour éviter le court-circuit des sources de tension par conduction de plusieurs interrupteurs, et pour que le convertisseur soit totalement commandable, on adopte une commande complémentaire.

Pour un bras K de l'onduleur triphasé à trois niveaux, et en mode commandable, on définit les trois commandes complémentaires comme suit, [45].

$$\begin{cases} B_{k1} = \overline{B_{K2}} \\ B_{K3} = \overline{B_{K4}} \end{cases} \quad \begin{cases} B_{k1} = \overline{B_{K3}} \\ B_{K2} = \overline{B_{K4}} \end{cases} \quad \begin{cases} B_{k1} = \overline{B_{K4}} \\ B_{K2} = \overline{B_{K3}} \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

On utilise une seule commande adéquate qui nous donne des meilleurs résultats, parmi les commandes précédentes, celle qui permet d'avoir les trois tensions : U_{c1} , 0, U_{c2} , est la suivant :

$$\begin{cases} B_{k1} = \overline{B_{K3}} \\ B_{K2} = \overline{B_{K4}} \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

B_{k1}	B_{k2}	B_{k3}	B_{k4}	V_{ao}
Off	Off	On	On	$-U_{c2}$
Off	On	On	Off	0
On	On	Off	Off	U_{c1}

Tableau II.9 : Tableau d'excitation associée à la commande complémentaire proposée.

Cette commande complémentaire rend le système totalement commandable à trois niveaux.

Elle est la seule qui permet d'exploiter les trois niveaux de tension de sortie possible pour un bras (U_{c1} , 0, $-U_{c2}$), avec $U_{c1} = -U_{c2} = E/2$.

C'est cette commande qui va être adopté pour la modélisation de l'onduleur à trois niveaux.

II.3.4 Fonctions de connexion

La fonction de connexion FKS traduit l'état ouvert ou fermé de l'interrupteur TD_{KS} .

Chaque interrupteur T_{KS} ($K \in (1, 2, 3)$, $S \in (1, 2, 3)$), supposé idéal introduit une fonction de connexion F_{KS} .

$$FKS = \begin{cases} 1 & \text{si l'interrupteur TKS est fermé} \\ 0 & \text{si l'interrupteur TKS est ouvert} \end{cases}$$

II.3.4.1 Relation entre les fonctions de connexion

Ainsi les fonctions de connexion des interrupteurs du bras K sont liées par les relations suivantes :

$$\begin{cases} F_{K1} = 1 - F_{K3} \\ F_{K2} = 1 - F_{K4} \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

Chapitre II : Fonctionnement et modélisation des onduleurs deux niveaux et multi-niveaux

II.3.4.2 Relation entre les fonctions des demi-bras

On définit la fonction de connexion du demi-bras qu'on notera F_K^b avec K : numéro du bras, M = 1 pour le demi-bras du haut et M = 0 pour le demi-bras du bas.

Pour un bras K, les fonctions de connexions des demi-bras s'expriment au moyen des fonctions de connexion des interrupteurs comme suit :

$$\begin{cases} F_{K1}^b = F_{K1} * F_{K2} \\ F_{K0}^b = F_{K4} * F_{K3} \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

F_{K1}^b : est associé au demi-bras du haut (la paire (T_{K1}, T_{K2})).

F_{K0}^b : est associé au demi-bras du haut (la paire (T_{K3}, T_{K4})).

II.3.5 Modélisation des valeurs instantanées

- Cette modélisation sera effectuée en considérant l'association de l'onduleur de tension triphasé avec une charge triphasé équilibrée.
- Tension simple aux bornes de chaque phase de la charge : V_a, V_b, V_c .
- Tension entre le point milieu « i » de chaque bras de l'onduleur et le point neutre «O» de l'alimentation continue de l'onduleur : V_{ao}, V_{bo}, V_{co} .
- Charge triphasée équilibrée couplée en étoile.

II.3.5.1 Les potentiels V_{io}

Les potentiels des nœuds A, B, C de l'onduleur triphasé à trois niveaux par rapport au point milieu O, s'expriment comme suit :

$$\begin{cases} V_{ao} = F_{11} * F_{12} * U_{c1} - F_{13} * F_{14} * U_{c2} = (F_{11} * F_{12} - F_{13} * F_{14}) * \frac{E}{2} \\ V_{bo} = F_{21} * F_{22} * U_{c1} - F_{23} * F_{24} * U_{c2} = (F_{21} * F_{22} - F_{23} * F_{24}) * \frac{E}{2} \\ V_{co} = F_{31} * F_{32} * U_{c1} - F_{33} * F_{34} * U_{c2} = (F_{31} * F_{32} - F_{33} * F_{34}) * \frac{E}{2} \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

Pour l'onduleur triphasé à trois niveaux, les fonctions de connexions des demi-bras sont définies selon les relations suivantes :

$$\begin{cases} F_{11}^b = F_{11} * F_{12} & F_{21}^b = F_{21} * F_{22} & F_{31}^b = F_{31} * F_{32} \\ F_{10}^b = F_{13} * F_{14} & F_{20}^b = F_{23} * F_{24} & F_{30}^b = F_{33} * F_{34} \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

En traduisant ces fonctions de connexions des demi-bras dans le système on aboutit à :

$$\begin{cases} V_{ao} = F_{11}^b * U_{c1} - F_{10}^b * U_{c2} = (F_{11}^b - F_{10}^b) * \frac{E}{2} \\ V_{bo} = F_{21}^b * U_{c1} - F_{20}^b * U_{c2} = (F_{21}^b - F_{20}^b) * \frac{E}{2} \\ V_{co} = F_{31}^b * U_{c1} - F_{30}^b * U_{c2} = (F_{31}^b - F_{30}^b) * \frac{E}{2} \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

II.3.5.2 Tensions de sorties

Le système d'équation nous permet d'avoir les tensions de sortie de l'onduleur à trois niveaux qui s'expriment en fonction des deux tensions d'entrées U_{c1} et U_{c2} .

On peut considérer l'onduleur à trois niveaux comme étant l'association en série de deux onduleurs à deux niveaux et chaque bras de l'un de ces onduleurs sera un demi-bras de l'onduleur à trois niveaux.

Dans ces conditions, nous pourrions définir le modèle liant les fonctions des demi-bras et les tensions aux bornes de la charge V_A, V_B, V_C .

II.3.5.3 Tensions composées

Les différentes tensions composées de l'onduleur triphasé à trois niveaux s'expriment à l'aide des fonctions de connexions des interrupteurs comme suit :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} - V_{bo} = (F_{11} * F_{12} - F_{21} * F_{22}) * U_{c1} - (F_{13} * F_{14} - F_{23} * F_{24}) * U_{c2} \\ V_{bc} = V_{bo} - V_{co} = (F_{21} * F_{22} - F_{31} * F_{32}) * U_{c1} - (F_{23} * F_{24} - F_{33} * F_{34}) * U_{c2} \\ V_{ca} = V_{co} - V_{ao} = (F_{31} * F_{32} - F_{11} * F_{12}) * U_{c1} - (F_{33} * F_{34} - F_{13} * F_{14}) * U_{c2} \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

Dans le cas où $U_{c1} = U_{c2} = E/2$ le système devient :

$$\begin{cases} V_{ab} = [(F_{11} * F_{12} - F_{21} * F_{22}) - (F_{13} * F_{14} - F_{23} * F_{24})] * \frac{E}{2} \\ V_{bc} = [(F_{21} * F_{22} - F_{31} * F_{32}) - (F_{23} * F_{24} - F_{33} * F_{34})] * \frac{E}{2} \\ V_{ca} = [(F_{31} * F_{32} - F_{11} * F_{12}) - (F_{33} * F_{34} - F_{13} * F_{14})] * \frac{E}{2} \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

Les différentes tensions composées de l'onduleur triphasé à trois niveaux s'expriment à l'aide des fonctions des demi-bras comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \left\{ \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} * U_{c1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} * U_{c2} \right\} \quad (\text{II.15})$$

Dans le cas où $U_{c1} = U_{c2}$, cette relation se réduit à :

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} F_{11}^b - F_{10}^b \\ F_{21}^b - F_{20}^b \\ F_{31}^b - F_{30}^b \end{bmatrix} * \frac{E}{2} \quad (\text{II.16})$$

II.3.5.4 Tensions simples

Les tensions simples de sorties de l'onduleur se déduisent en fonction des potentiels des nœuds par rapport au point milieu par la relation suivante :

$$V_a + V_b + V_c = 0 \quad (\text{II.17})$$

$$\begin{cases} V_a = (2V_{ao} - V_{bo} - V_{co})/3 \\ V_b = (-V_{ao} + 2V_{bo} - V_{co})/3 \\ V_c = (-V_{ao} - V_{bo} + 2V_{co})/3 \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

Chapitre II : Fonctionnement et modélisation des onduleurs deux niveaux et multi-niveaux

Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} * \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} F_{11}^b - F_{10}^b \\ F_{21}^b - F_{20}^b \\ F_{31}^b - F_{30}^b \end{bmatrix} * \frac{E}{2} \quad (\text{II.19})$$

II.3.5.5 Courants d'entrée

En utilisant les fonctions de connexion des interrupteurs pour trouver des courants d'entrée continus (I_{d1} , I_{d2} , I_{d0}) de l'onduleur à trois niveaux en fonctions des courants alternatifs de la charge I_a , I_b , I_c , s'expriment comme suit :

$$\begin{cases} I_{d1} = F_{11} * F_{12} * I_a + F_{21} * F_{22} * I_b + F_{31} * F_{32} * I_c \\ I_{d2} = F_{13} * F_{14} * I_a + F_{23} * F_{24} * I_b + F_{33} * F_{34} * I_c \\ I_{d0} = F_{12} * F_{13} * I_a + F_{22} * F_{23} * I_b + F_{32} * F_{33} * I_c \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

Le système devient en remplaçant les fonctions de connexion des interrupteurs par les fonctions de connexion de demi-bras :

$$\begin{cases} I_{d1} = F_{11}^b * I_a + F_{21}^b * I_b + F_{31}^b * I_c \\ I_{d2} = F_{10}^b * I_a + F_{20}^b * I_b + F_{30}^b * I_c \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

Le courant I_{d0} s'exprime en fonction des courants d'entrées (I_{d1} , I_{d2}) et des courants de charges I_a , I_b , I_c par la relation :

$$I_{d0} + I_{d1} + I_{d2} = I_a + I_b + I_c \quad (\text{II.22})$$

$$I_{d0} = (I_a + I_b + I_c) - (F_{11}^b + F_{10}^b) * I_a - (F_{21}^b + F_{20}^b) * I_b - (F_{31}^b + F_{30}^b) * I_c \quad (\text{II.23})$$

On aboutit à la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} I_{d1} \\ I_{d2} \\ I_{d0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11}^b & F_{21}^b & F_{31}^b \\ F_{10}^b & F_{20}^b & F_{30}^b \\ 1 - F_{11}^b - F_{10}^b & 1 - F_{21}^b - F_{20}^b & 1 - F_{31}^b - F_{30}^b \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

Remarque

- On peut déduire de l'étude précédent que l'onduleur à cinq niveaux est une mise en série de quatre onduleurs à deux niveaux ou de deux onduleurs à trois niveaux.
- Pour le cas d'un onduleur à sept niveaux c'est la mise en série de six onduleurs à deux niveaux ou de quatre onduleurs à trois niveaux.
- Pour un onduleur de N-niveaux c'est la mise en série de N-1 onduleurs à deux niveaux ou de N-3 onduleurs à trois niveaux.

II.4 Technique de commande des convertisseurs multi-niveaux

II.4.1 Commande par paliers 180 °

La méthode de commande par paliers consiste à quantifier la grandeur de référence (L'image du fondamental), en un nombre déterminé de paliers, comme l'illustre la figure II.27. [46][47].

Cette méthode de commande offre deux degrés de liberté à l'utilisateur :

- Le convertisseur peut être à pas uniforme, dans ce cas les tensions $E_1, E_2, E_3 = E$.
- Les angles de commutations α_i sur une période ($\alpha_i, i = 1 \dots \alpha / 2$) peuvent donc être choisis de façon à atteindre certaines performances.
- Le pas de la tension et les angles de commutation peuvent être choisis afin de pouvoir obtenir la minimisation du taux de distorsion harmonique, la suppression de certaines harmoniques à basses fréquences entre autres.

Cette commande est facile à implémenter et pour passer d'un niveau de tension à l'autre les angles de commutation peuvent être déterminés à l'avance.

Dans cette technique de commande, on constate que les différentes cellules n'ont pas une même durée de conduction. Il en résulte donc un déséquilibre dans la répartition des pertes par commutation et par conduction. Par une rotation adéquate des commutations, ces pertes peuvent être équilibrées entre les différentes cellules, sans modification de l'onde de tension générée à la sortie du convertisseur, [46] [48].

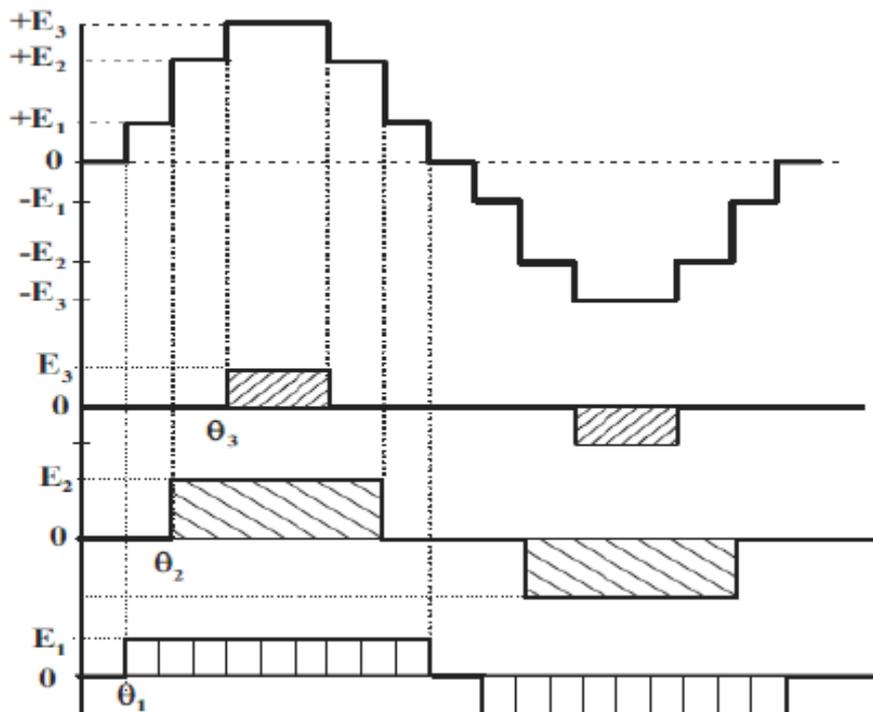


Figure II.27 : Forme d'onde multi-niveaux (7 niveaux) générée par une commande par paliers et tensions aux bornes de trois cellules en série sur une phase.

II.4.2 Modulation de la largeur d'impulsion

Plusieurs méthodes de commande pour générer les signaux PWM (pulse width modulation) des convertisseurs multi-niveaux ont été étudiées au cours des deux dernières décennies, et un bon nombre de résultats sont publiés. Nous distinguons deux techniques de PWM : la technique de modulation intersective et les techniques numériques d'espace vectoriel [49].

Récemment, avec le développement de la technologie numérique, le SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation) est largement utilisé, non seulement en raison de sa mise en œuvre relativement facile, mais aussi de la qualité des signaux obtenus par cette méthode, notamment la faible ondulation du courant. Mais l'inconvénient majeur de cette méthode est que, le contrôle de l'algorithme permettant de générer les signaux de commande devient trop complexe pour les convertisseurs de niveau supérieur à trois [49]. Et des recherches ont montré qu'en plus de la simplicité de la commande MLI, cette commande donne aussi de signaux de qualité [49][50]. Il est donc raisonnable d'adopter la technique de MLI intersective.

Pour générer les impulsions de commande MLI d'un convertisseur à N-niveaux de tensions, N-1 porteuses triangulaires sont nécessaires. Ces porteuses ont la même fréquence f_c et la même amplitude A_c . Les porteuses peuvent être horizontalement ou verticalement décalées. Si elles le sont horizontalement, le déphasage entre deux signaux consécutifs est donné par $\frac{2}{N-1}$. Et si elles sont décalées verticalement, les signaux triangulaires peuvent être en phase ou non et occupent une bande continue avec le même décalage vertical. Ils sont ensuite comparés au signal de référence d'amplitude A_r et de fréquence f_r . Chaque comparaison donne 1 si une porteuse est inférieure ou égale à la référence, et 0 dans le cas contraire. A la sortie du modulateur, la somme des résultats issus des comparaisons est ensuite décodée, et donne la valeur correspondant à chaque niveau de tension [51].

Pour un convertisseur de N-niveaux, l'indice de modulation en amplitude m_a et l'indice de modulation en fréquence m_f sont définies comme suit :

- L'indice de modulation en amplitude m_a :

$$m_a = \frac{A_r}{(N - 1) * A_c} \quad (\text{II.25})$$

- L'indice de modulation en fréquence m_f :

$$m_f = \frac{f_c}{f_r} \quad (\text{II.26})$$

Les méthodes de modulation de largeur d'impulsion sont classées selon la disposition des porteuses triangulaires et les plus utilisées sont : [50].

- Les porteuses triangulaires disposées en phase «Phase Disposition» (PD). Cette méthode est applicable aussi bien à la structure NPC qu'à la topologie en cascade en pont H. Pour

les valeurs de l'indice de modulation proches de 1, la méthode PD présente le plus faible taux de distorsion harmonique (TDH) comparée aux autres méthodes MLI [50].

- Si les porteuses triangulaires sont disposées en opposition de phase, alors la méthode est connue sous le nom « Phase Opposition Disposition » (POD). Cette méthode est plus performante que la méthode PD du point de vue harmonique pour les faibles valeurs de l'indice de modulation. Un autre avantage est que pour la fréquence porteuse et ses multiples il n'y a pas d'harmoniques et la dispersion des harmoniques se produit autour d'eux [50].
- La troisième méthode classique de MLI connue est l'APOD « Alternative Phase Opposite Disposition ». Dans ce cas, chaque porteuse triangulaire est décalée de 180° par rapport à son adjacent. Cette méthode donne les mêmes résultats que celle POD. La différence majeure pour cette méthode est que l'harmonique d'ordre 3 est plus grand, mais ceci n'est pas un problème car elle est éliminée dans la tension de ligne. Cette méthode permet d'obtenir une meilleure TDH pour la tension phase-phase par rapport à la méthode POD [50].
- Dans la méthode de la phase décalée, « phase shifted » (PS) toutes les porteuses ont la même amplitude et la même fréquence, mais ont leur phase décalée de 90° les unes des autres. Le TDH de la tension de sortie de l'onduleur commandée par cette méthode est faible pour toutes les valeurs de l'indice de modulation [50].

II.4.2.1 Modulation de la largeur d'impulsion intersective

II.4.2.1.1 La modulation linéaire multiple

Dans cette technique on compare une porteuse triangulaire avec un signal de référence linéaire. L'onde de sortie est sous la forme d'un train d'impulsion en créneaux de largeurs égales figure II.28. Si l'indice de modulation est égal à 1, on obtient la modulation singulière, dans laquelle le signal de sortie est formé d'une seule impulsion par demi-période. [42].

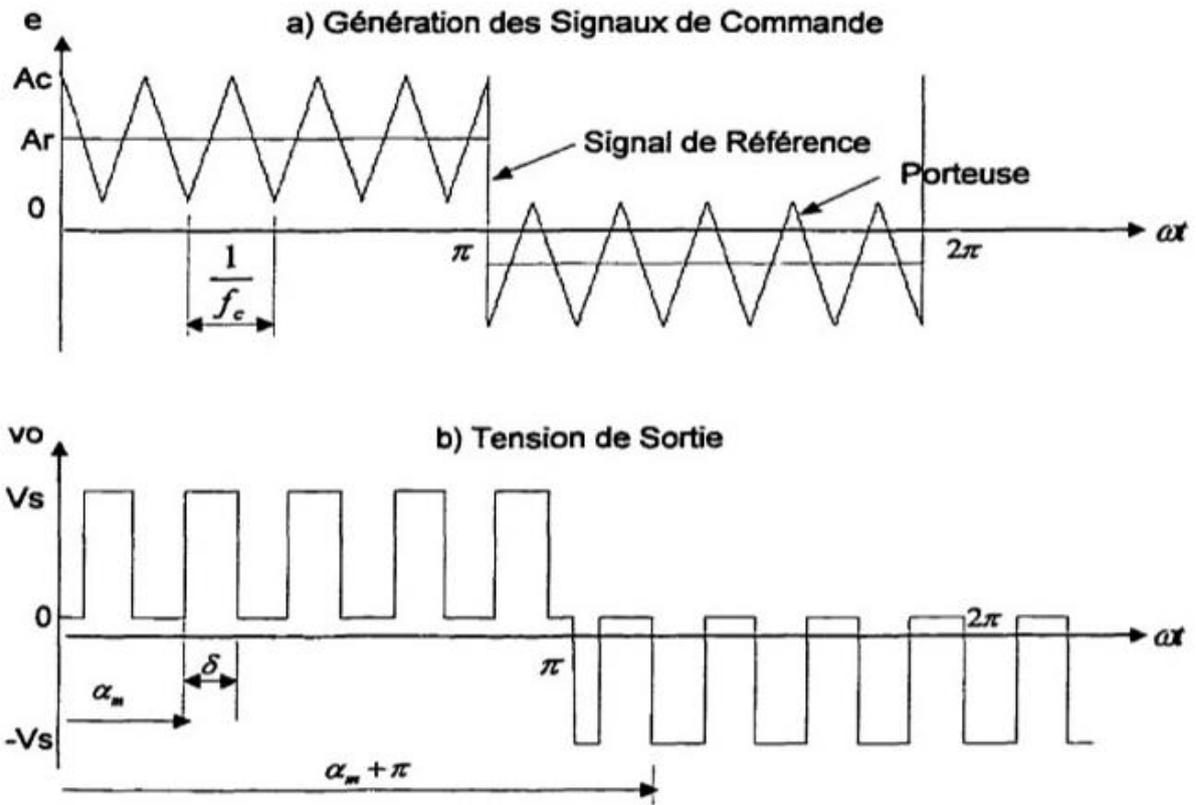


Figure II.28 : La modulation de la largeur d'impulsions multiples.

II.4.2.1.2 La modulation sinusoïdale partielle (modifie)

Le signal référence est toujours sinusoïdal, mais dans cette technique la porteuse n'est pas appliquée au milieu des alternances de la sinusoïde figure II.29.

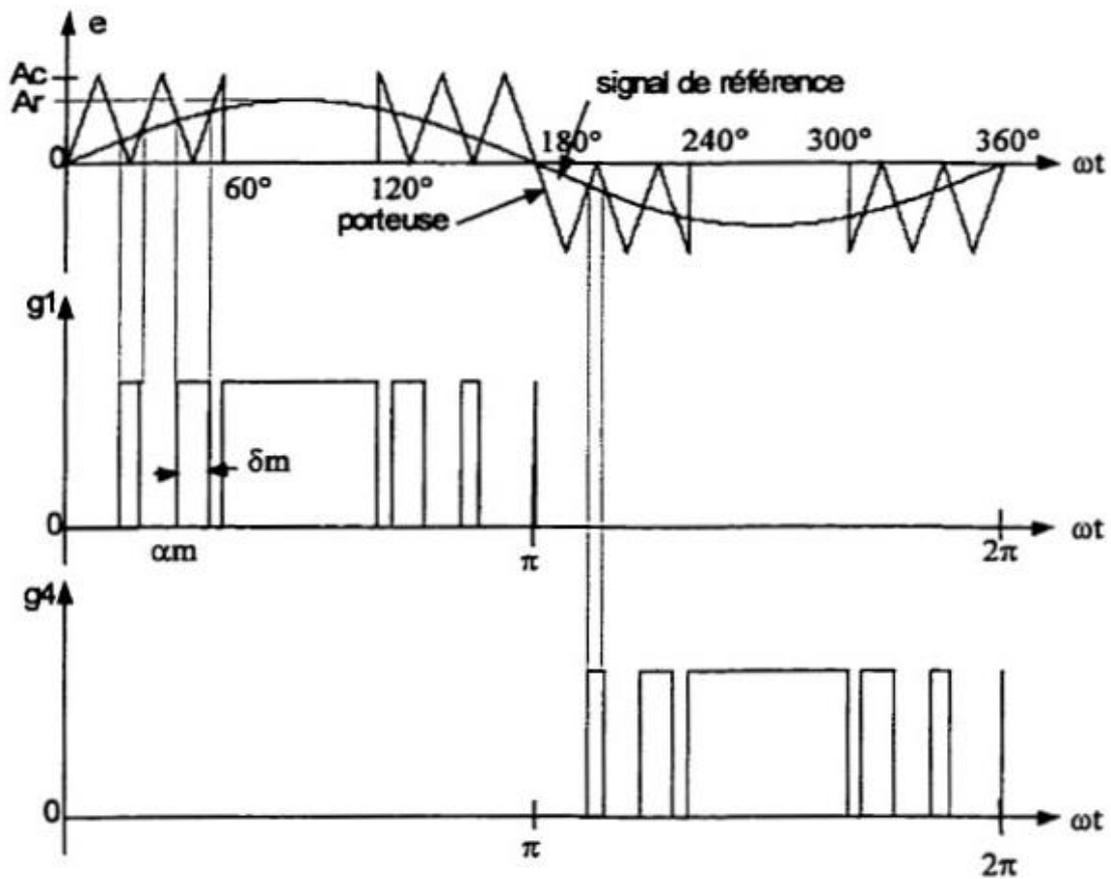


Figure II.29 : La modulation sinusoïdale modifiée.

II.4.2.1.3 La modulation sinusoïdale triangulaire unipolaire

Dans ce cas, le signal de référence est sinusoïdal, on obtient à la sortie de l'onduleur une onde formée d'un train d'impulsion de largeur variable figure II.30.

Les instants de commutations sont déterminés par des points d'intersection entre la porteuse et la modulante.

La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse [52]. Ce type de MLI est la plus utilisée dans les applications industrielles, car elle s'est avérée la plus efficace pour la neutralisation des harmoniques.

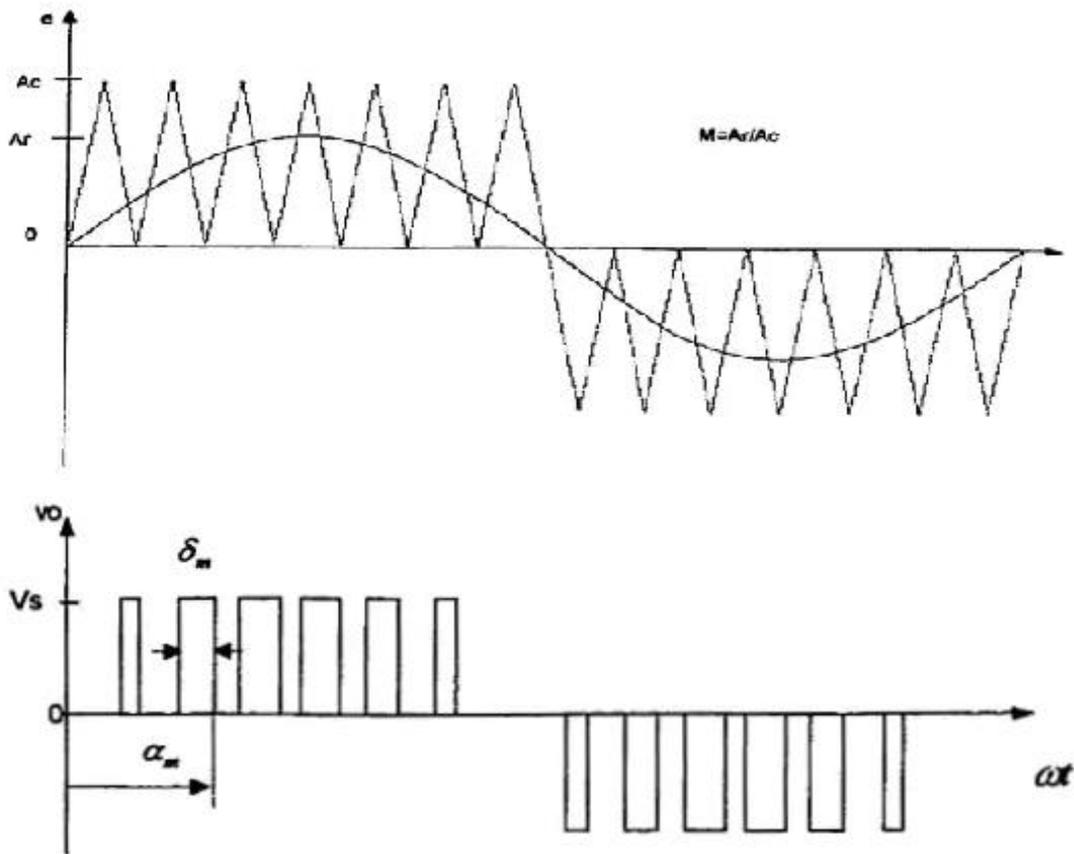


Figure II.30 : MLI sinusoidale triangulaire unipolaire.

II.4.2.1.4 La modulation sinusoidale avec porteuse bidirectionnelle

Le principe de cette technique est le même que celui de la modulation sinusoidale, mais la porteuse triangulaire est bidirectionnelle (bipolaire) figure II.31.

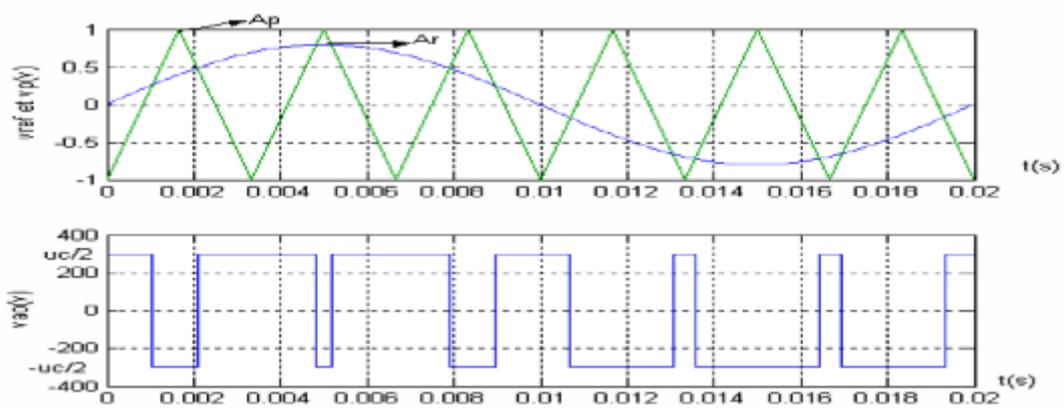


Figure II.31 : La modulation sinusoidale avec porteuse bidirectionnelle (bipolaire).

II.4.2.2 La Modulation vectorielle

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.

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé le principe de fonctionnement de l'onduleur de tension à deux niveaux et multi-niveaux pour les trois topologies de base ainsi le modèle mathématique pour un onduleur de tension triphasé à deux niveaux et trois niveaux de type diode flottante.

A la fin de ce chapitre nous avons évoqué les différentes techniques de commandes des convertisseurs multi-niveaux.

Le chapitre suivant sera consacré à la simulations et discussion des résultats obtenus sous logiciel Psim avec les deux techniques de commande utilisées (la modulation de la largeur d'impulsion sinusoïdale et la commande pleine onde).

Chapitre III :
Simulation et comparaison
des résultats

III. Introduction

Dans ce chapitre, deux techniques de commande appliquées sur un onduleur de tension à deux, trois, cinq jusqu'à sept niveaux pour les trois topologies de base (NPC, FC, CHB) de la conversion multi-niveau sont simulées en utilisant le logiciel Psim.

Les performances des deux techniques sont comparées en termes 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 deux techniques de commande utilisées sont :

- La commande pleine onde.
- La commande MLI Sinusoïdal.

III.1 Paramètres de simulation sous Psim

Toutes au long de ce travail ces résultats sont obtenus par simulation d'un convertisseur deux niveaux jusqu'à sept niveaux avec un bus continu $E = 600V$, une charge composée d'une résistance de $R=1\Omega$ et d'une inductance $L=15\text{ mH}$.

La commande utilisée pour les différentes topologies étudiées est sinusoïdale multi-porteuses modulation de largeur d'impulsion (MLI) dont les caractéristiques sont :

- Signal modulant : 50 Hz.
- Fréquence : 1000Hz.
- Modulation d'indice : 0,8.

III.2 La commande en pleine onde

III.2.1 Description

La commande en pleine onde est une commande classique souvent utilisée 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 triphasé équilibré.

III.2.2 Résultat de simulation des onduleurs à deux niveaux et multi-niveaux pour les trois topologies de base

Les résultats de simulation des onduleurs à deux niveaux et multi-niveaux pour les trois topologies de base (NPC, FC, CHB) sont obtenus pour des structures triphasées puisqu'elles nous donnent des meilleures performances (Qualité de tension, courant, le taux de distorsion harmonique), si on la compare avec celle de monophasées (un seul bras).

III.2.2.1 Deux niveaux

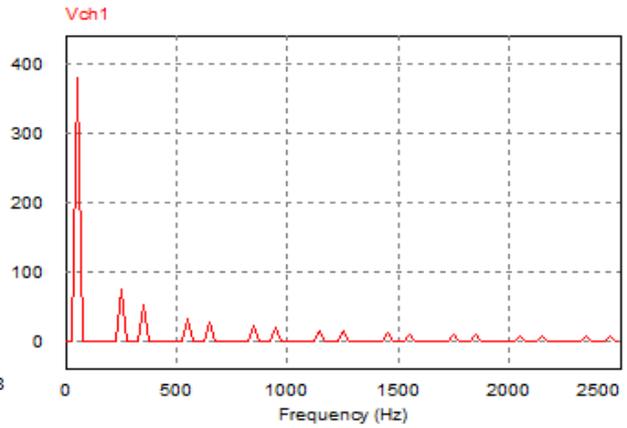
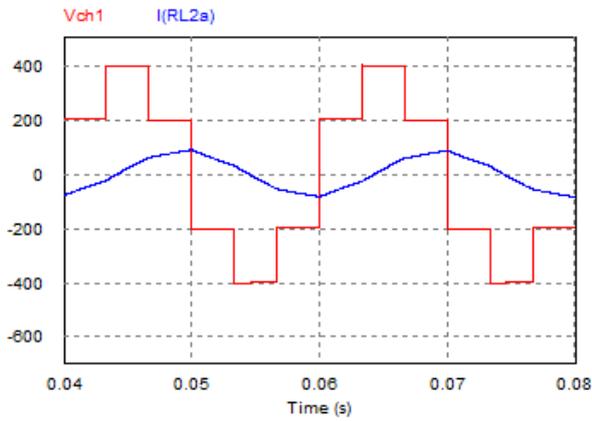


Figure III.1 : Tension de sortie et Courant de charge 2-niv-180. **Figure III.2 :** Spectre de la Tension de sortie 2-niv-180.

III.2.2.2 Trois niveaux

- NPC

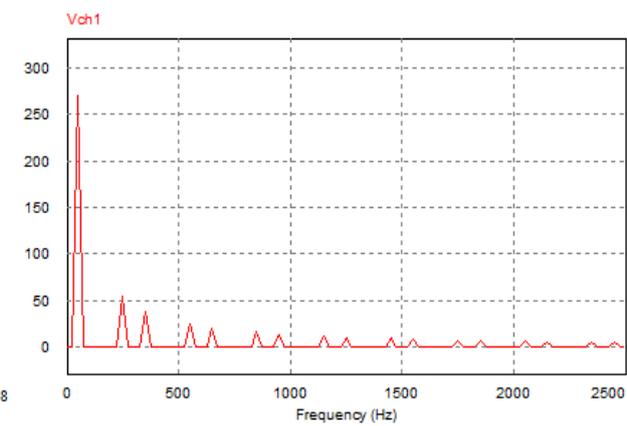
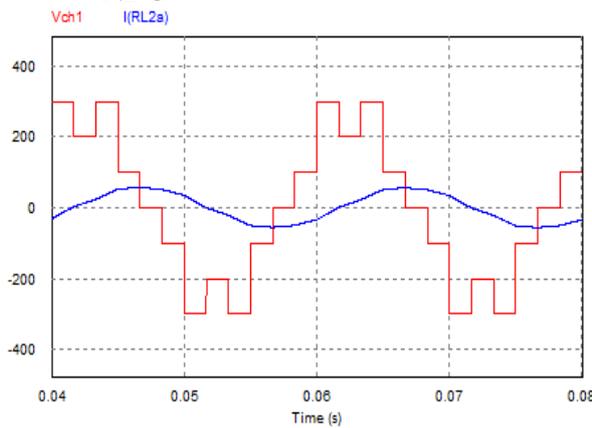


Figure III.3 : Tension de sortie et Courant de charge 3-niv-npc-180.

Figure III.4 : Spectre de la Tension de sortie 3-niv-npc-180.

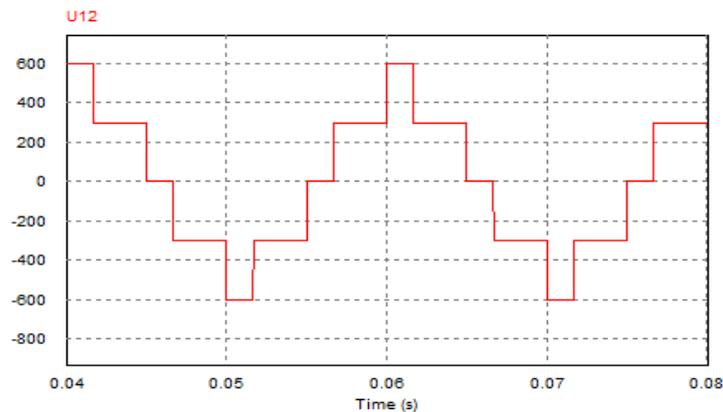


Figure III.5 : Tension composé 3-niv-npc-180.

• **FC**

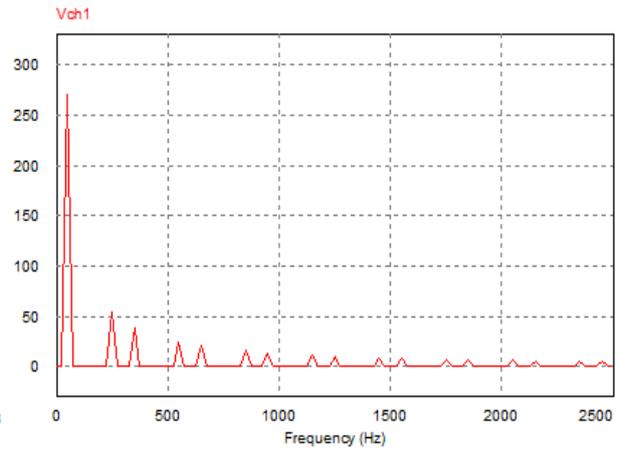
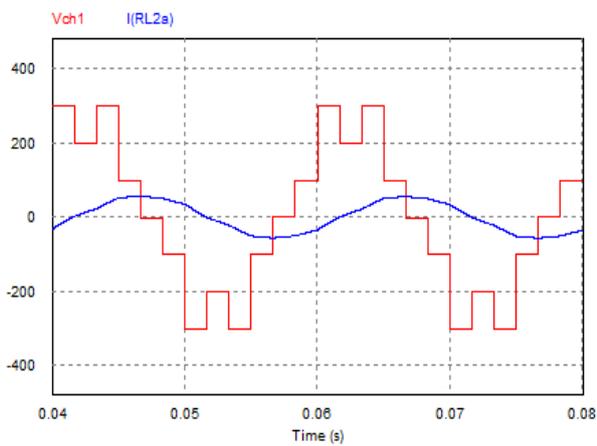


Figure III.6 : Tension de sortie et Courant de charge 3-niv-Fc-180. **Figure III.7 :** Spectre de la Tension de sortie 3-niv-Fc-180.

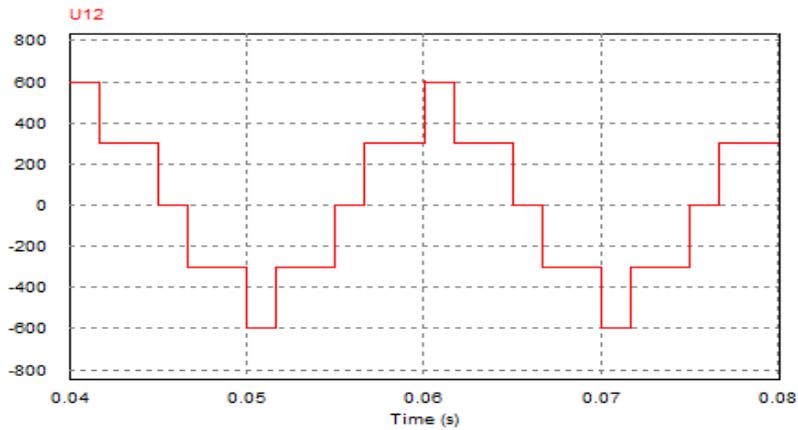


Figure III.8 : Tension composé 3-niv-Fc-180.

• **CHB**

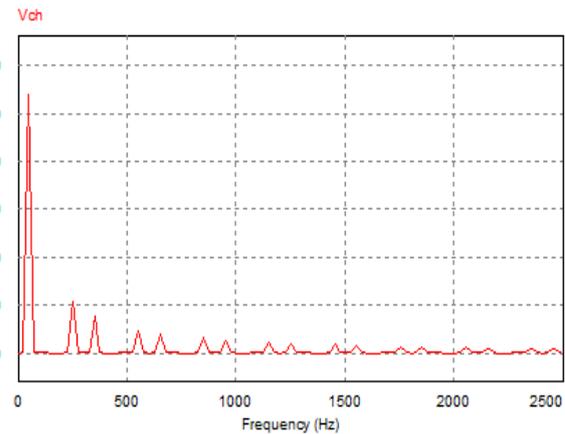
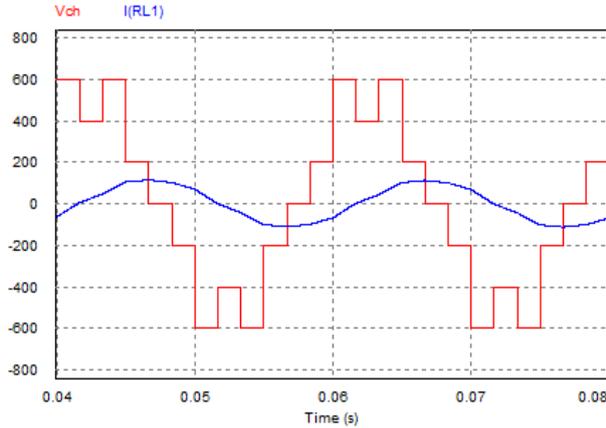


Figure III.9 : Tension de sortie et Courant de charge 3-niv-chb-180. **Figure III.10 :** Spectre de la Tension de sortie 3-niv-chb-180.

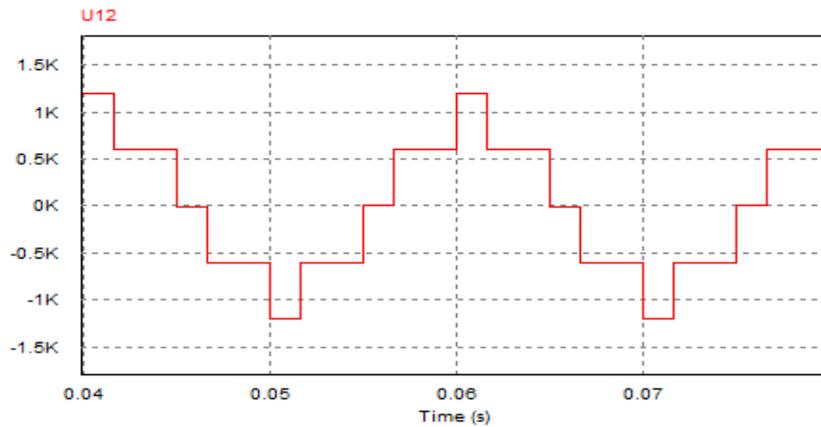


Figure III.11: Tension composé 3-niv-chb-180.

III.2.2.3 Cinq niveaux

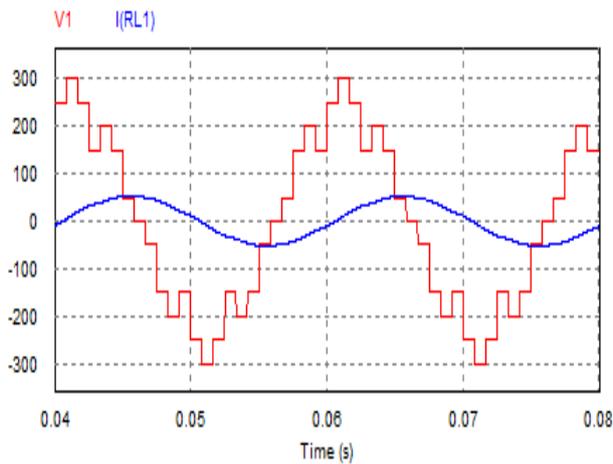


Figure III.12 : Tension de sortie et Courant de charge 5-niv-npc-180.

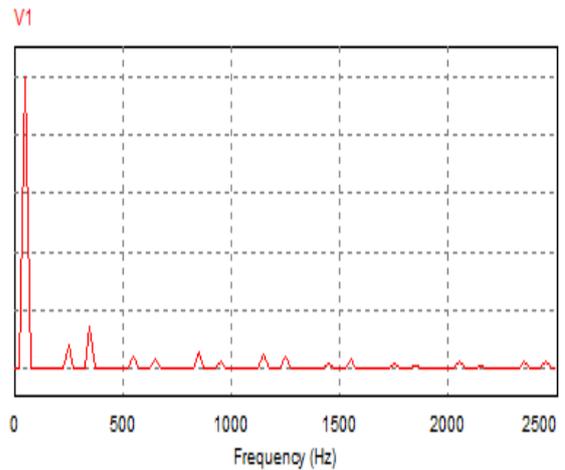


Figure III.13 : Spectre de la Tension de sortie 5-niv-npc-180.

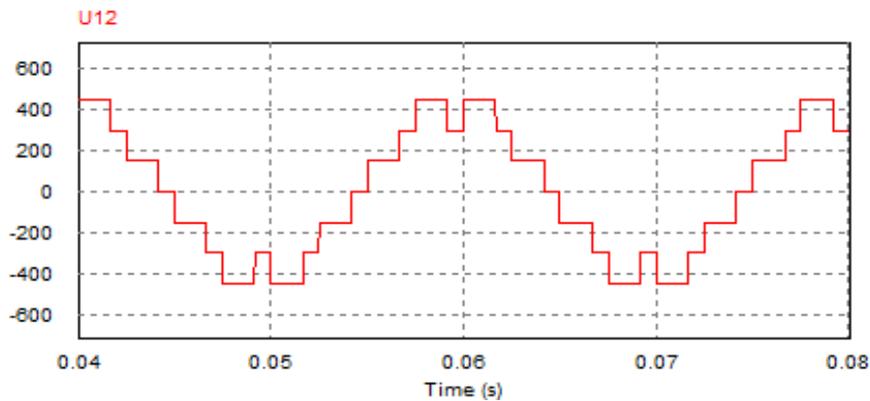


Figure III.14 : Tension composé 5-niv-npc-180.

• FC

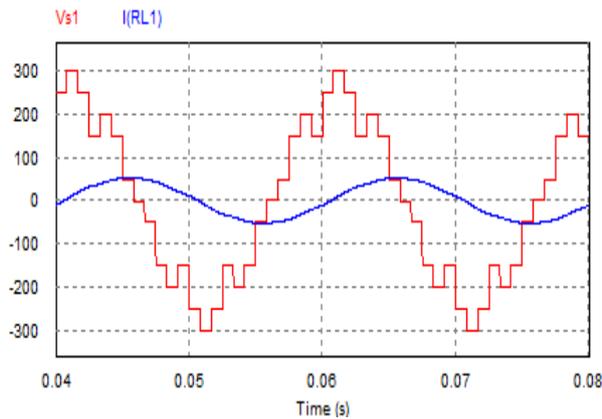


Figure III.15 : Tension de sortie et Courant de charge 5-niv-Fc-180.

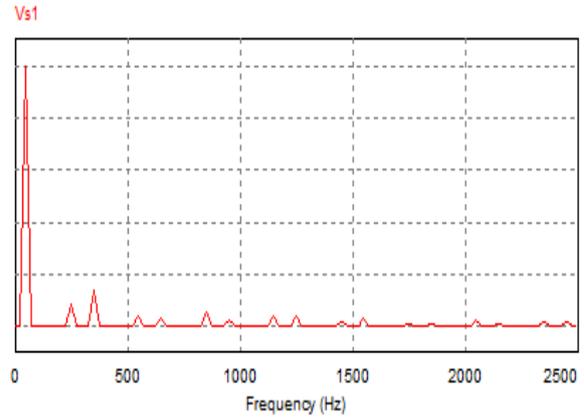


Figure III.16 : Spectre de la Tension de sortie 5-niv-Fc-180.

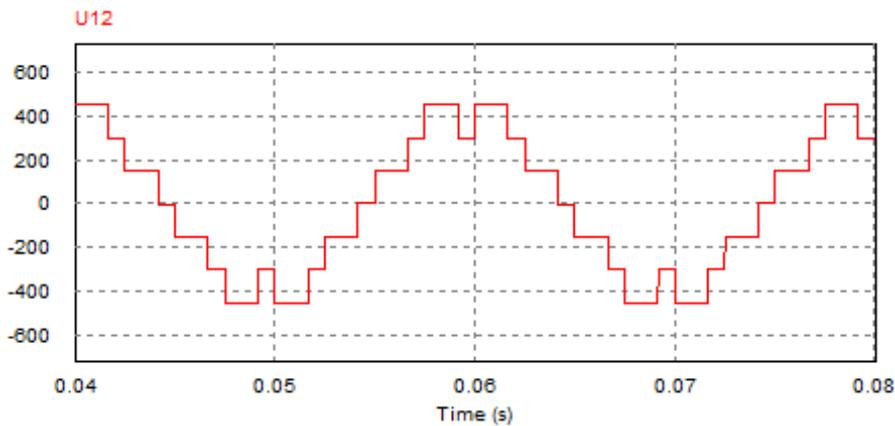


Figure III.17 : Tension composé 5-niv-Fc-180.

• CHB

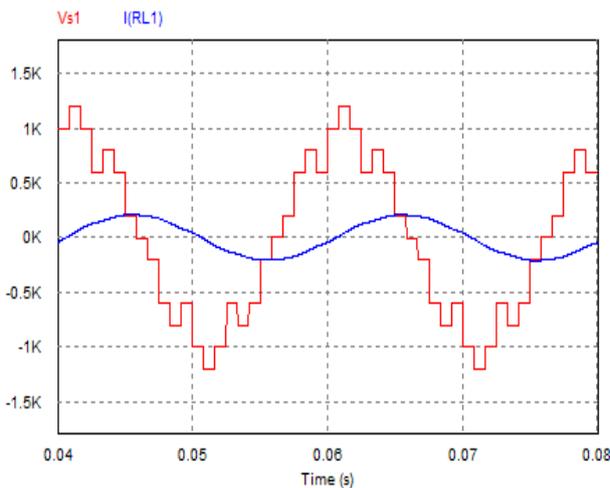


Figure III.18 : Tension de sortie et Courant de charge 5-niv-chb-180.

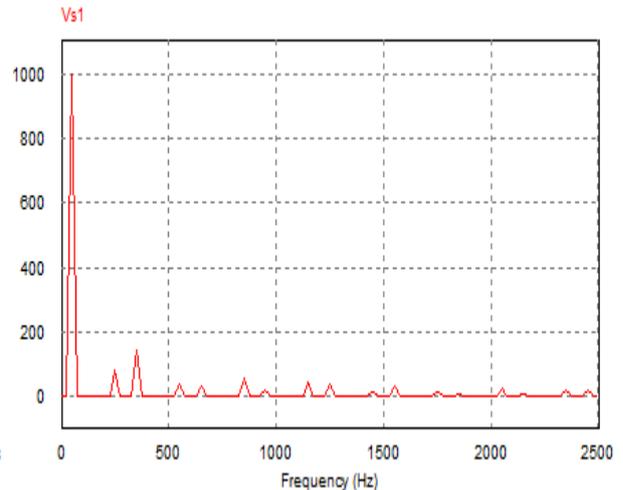


Figure III.19 : Spectre de la Tension de sortie 5-niv-chb-180.

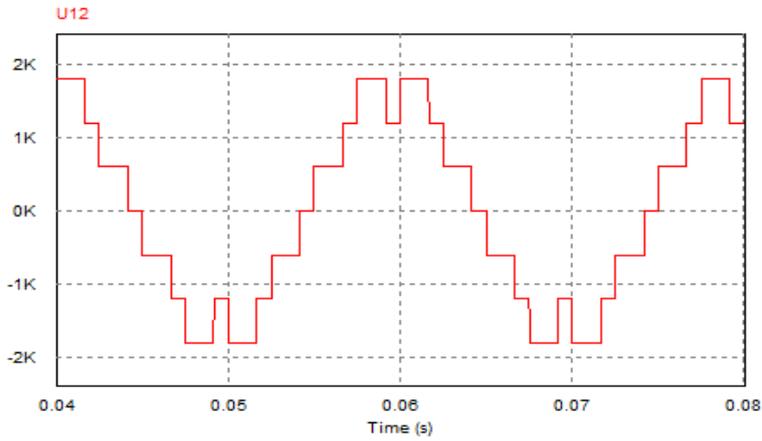


Figure III.20 : Tension composé 5-niv-chb-180.

III.2.2.4 Sept niveaux

- NPC

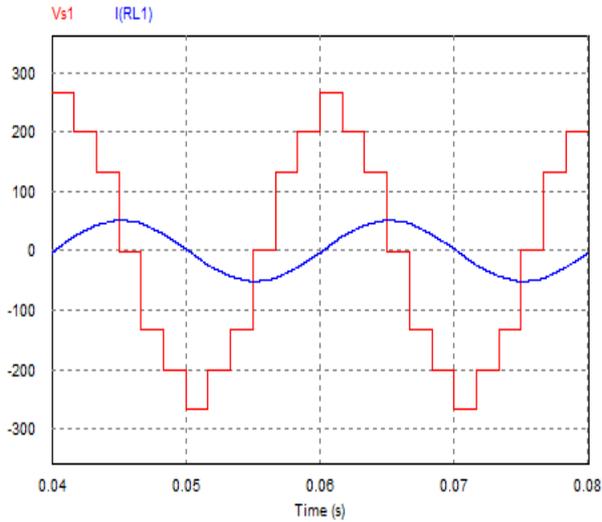


Figure III.21 : Tension de sortie et Courant de charge 7-niv-npc-180.

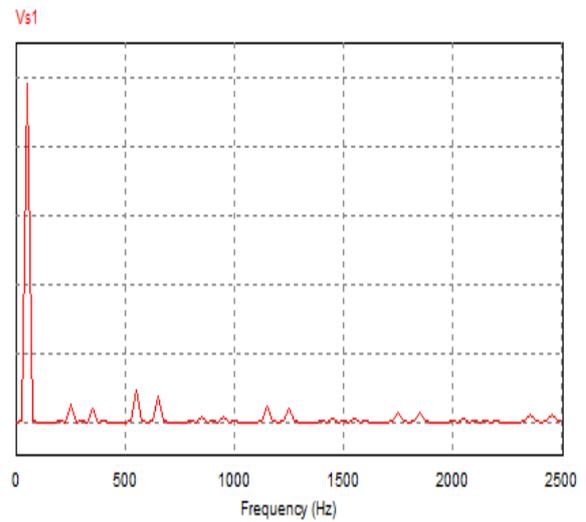


Figure III.22 : Spectre de la Tension de sortie 7-niv-npc-180.

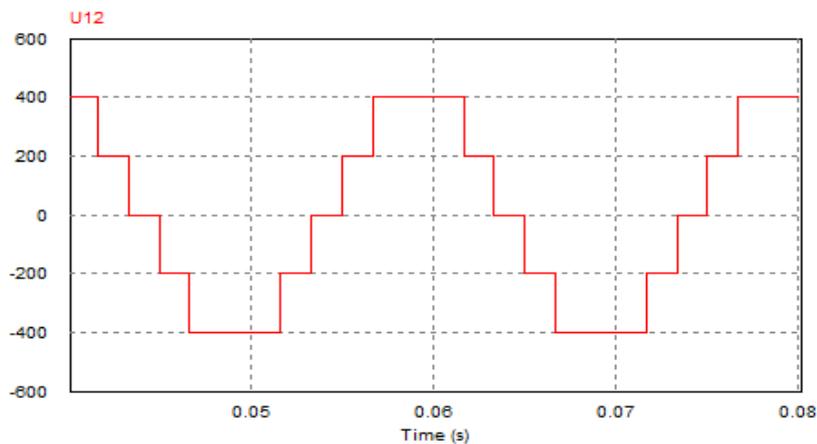


Figure III.23 : Tension composé 7-niv-npc-180.

• **FC**

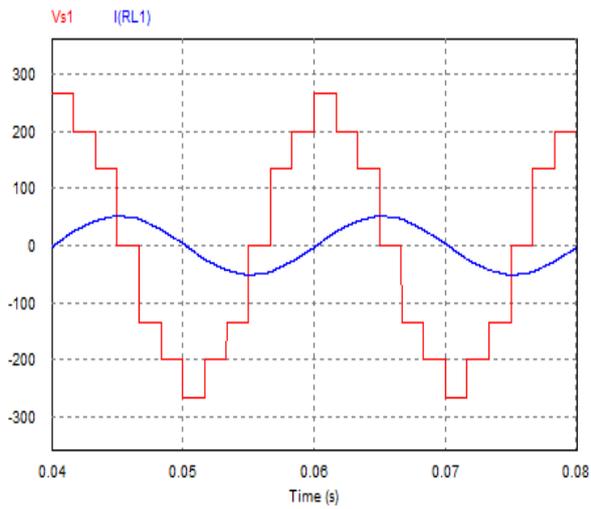


Figure III.24 : Tension de sortie et Courant de charge 7-niv-Fc-180.

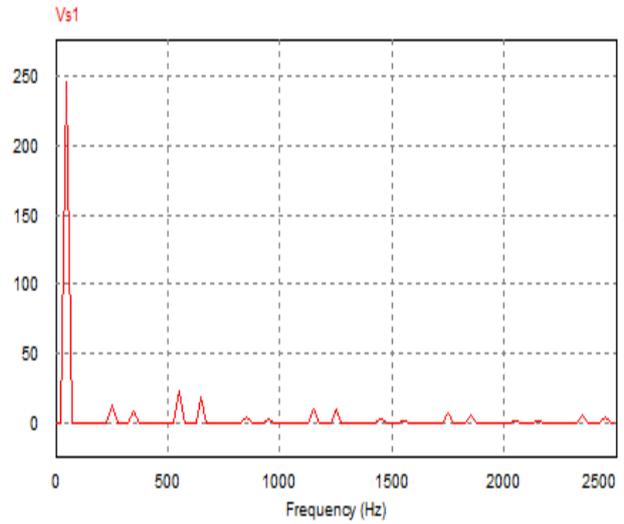


Figure III.25 : Spectre de la Tension de sortie 7-niv-Fc-180.

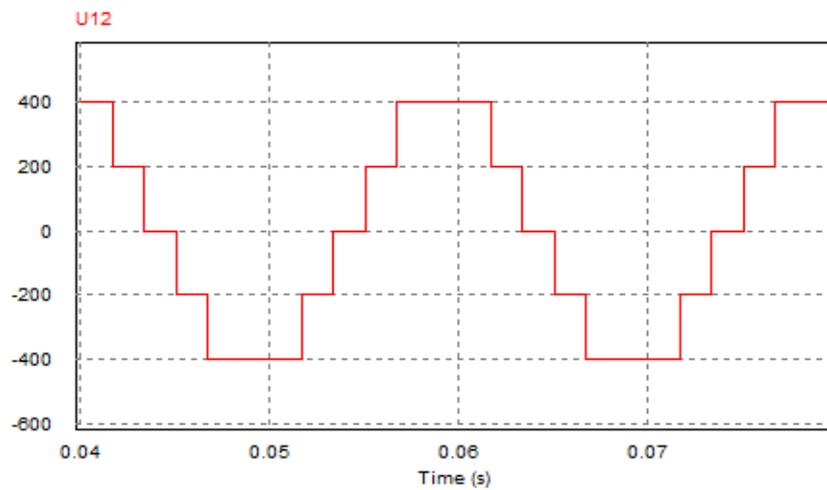


Figure III.26 : Tension composé 7-niv-Fc-180.

• **CHB**

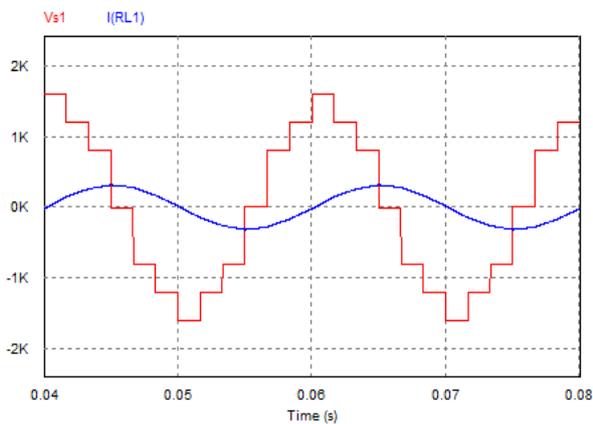


Figure III.27 : Tension de sortie et Courant de charge 7-niv-chb-180.

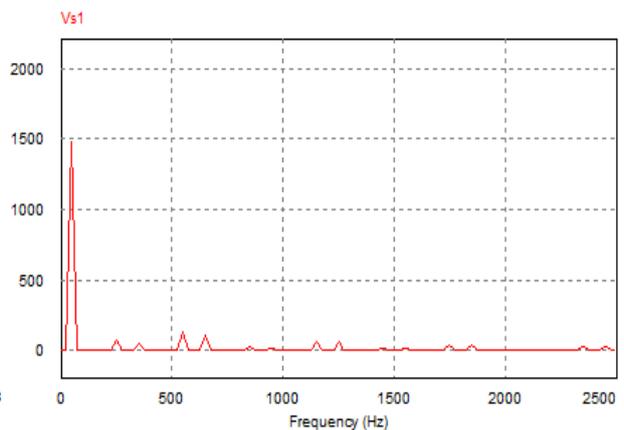


Figure III.28 : Spectre de la Tension de sortie 7-niv-chb-180.

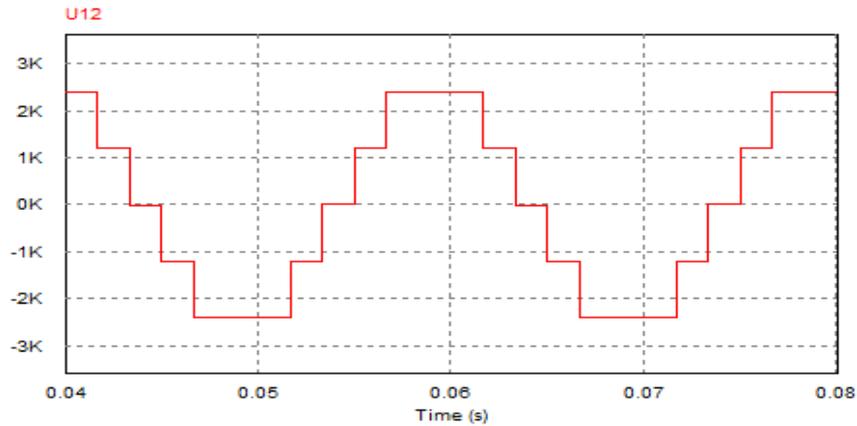


Figure III.29 : Tension composé 7-niv-chb-180.

III.3 Commande MLI Sinusoïdale

III.3.1 Description

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 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.

III.3.2 Résultat de simulation des onduleurs à deux niveaux et multi-niveaux pour les trois topologies de base

III.3.2.1 Deux niveaux

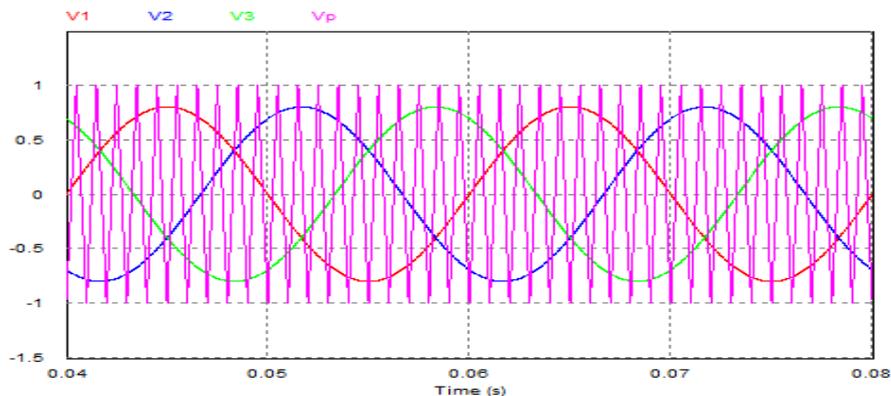


Figure III.30 : Porteuse, Modulantes 2-niv-MLI.

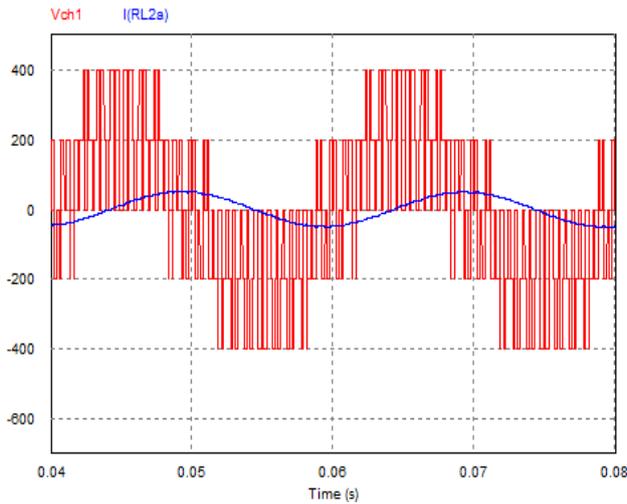


Figure III.31 : Tension de sortie et Courant de charge 2-niv-MLI.

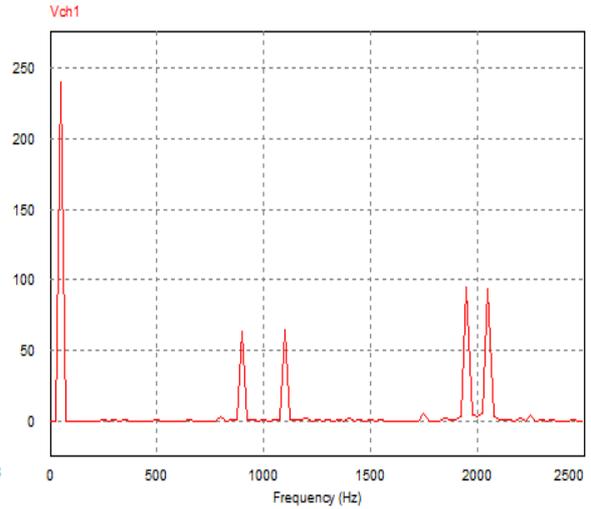


Figure III.32 : Spectre de la Tension de sortie 2-niv-MLI.

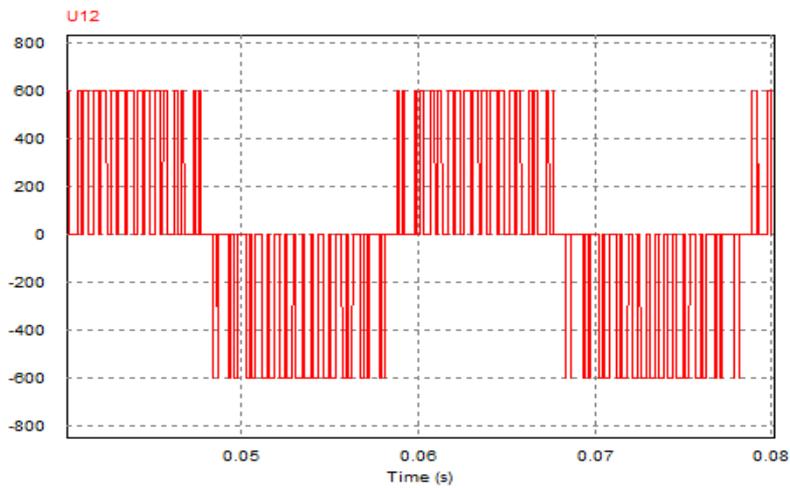


Figure III.33 : Tension composé 2-niv-MLI.

III.3.2.2 Trois niveaux

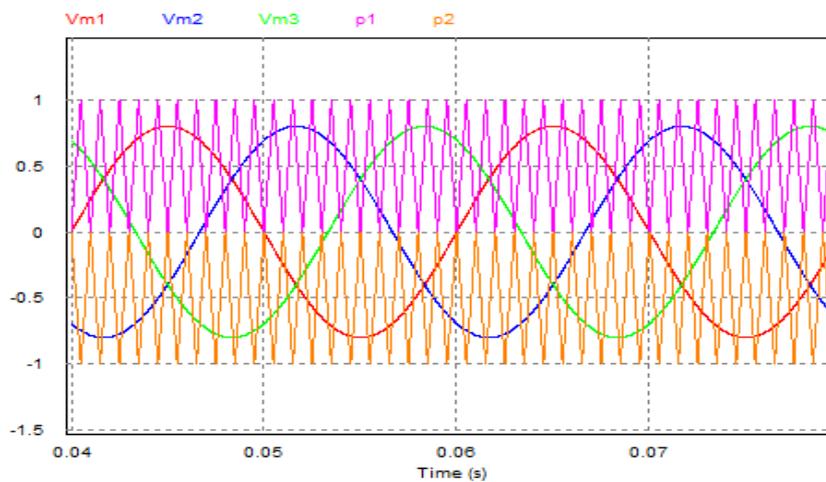


Figure III.34 : Porteuses, Modulantes 3-niv-MLI.

• NPC

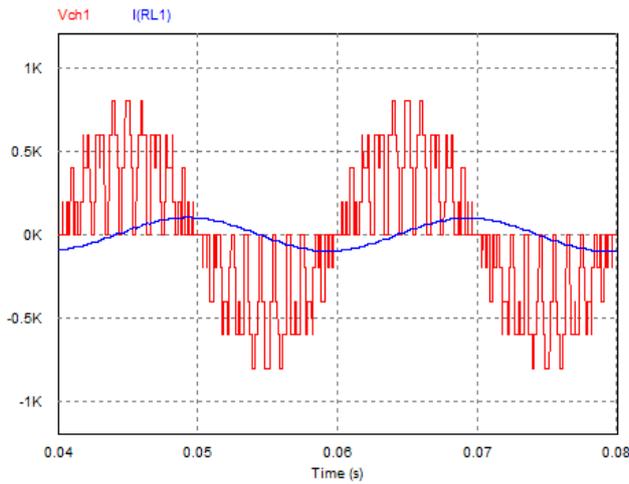


Figure III.35 : Tension de sortie et Courant de charge 3-niv-npc-MLI.

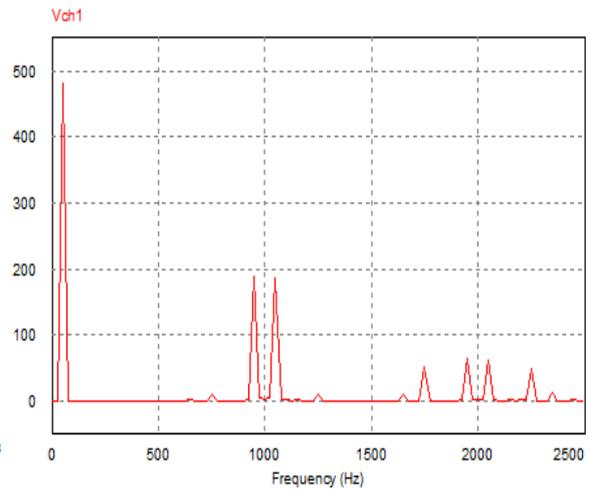


Figure III.36 : Spectre de la Tension de sortie 3-niv-npc-MLI

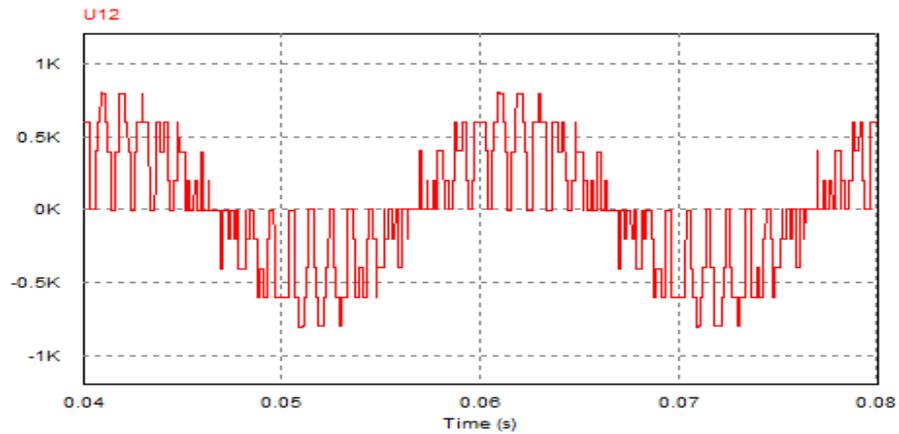


Figure III.37 : Tension composé 3-niv-npc-MLI.

• FC

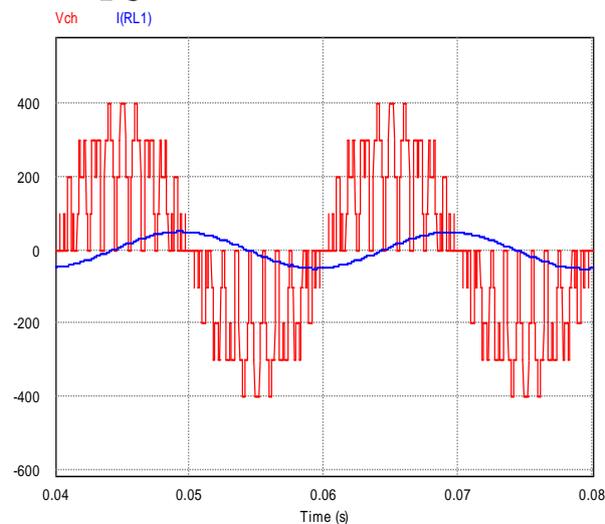


Figure III.38 : Tension de sortie et Courant de charge 3-niv-Fc-MLI

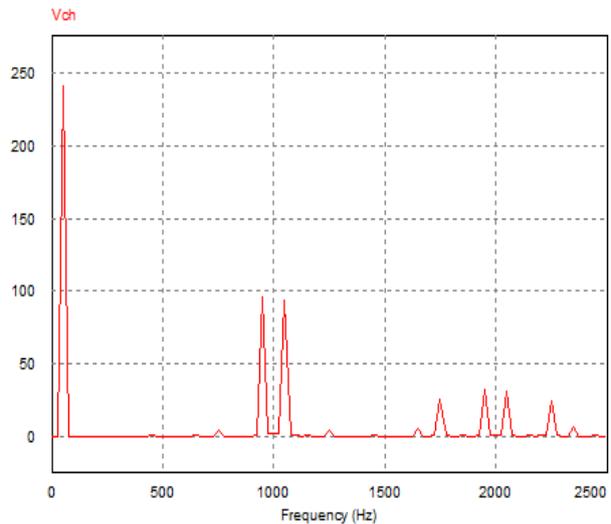


Figure III.39 : Spectre de la Tension de sortie 3-niv-Fc-MLI.

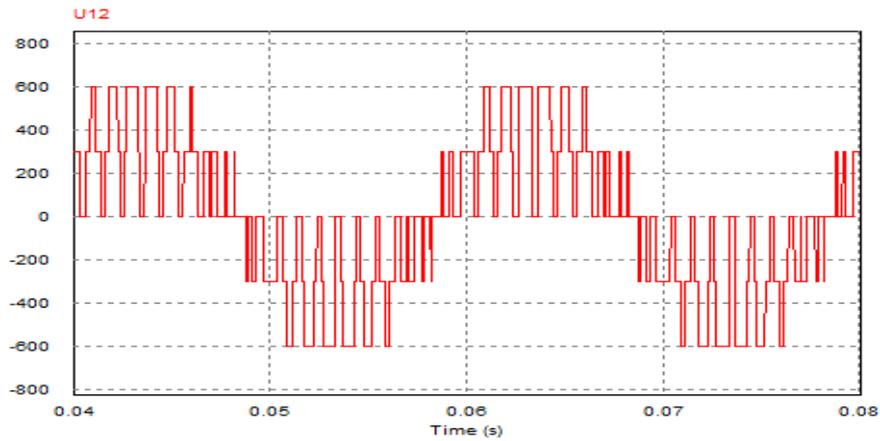


Figure III.40 : Tension composé 3-niv-Fc-MLI.

- **CHB**

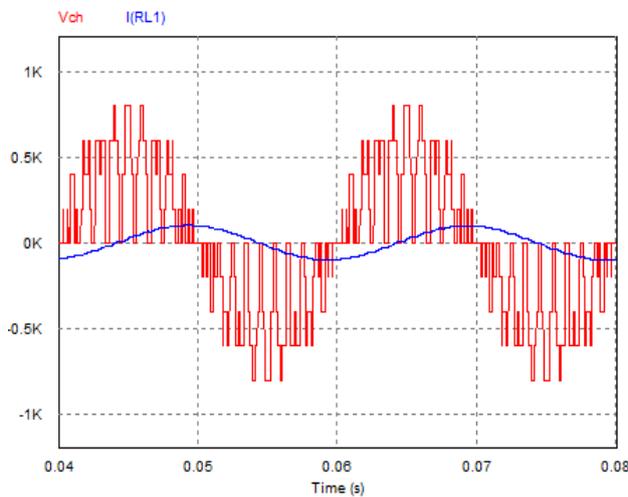


Figure III.41 : Tension de sortie et Courant de charge 3-niv-chb-MLI.

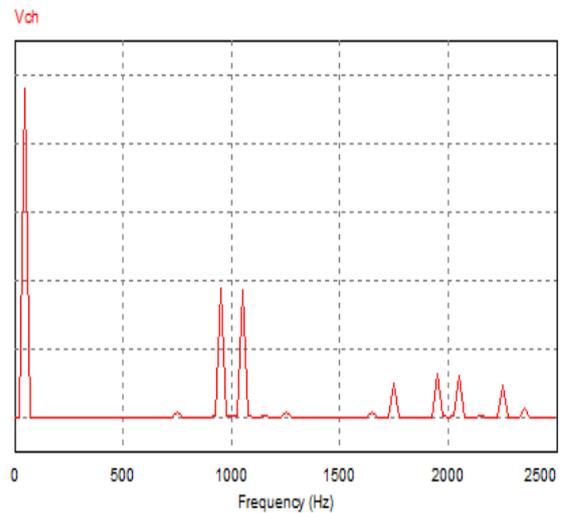


Figure III.42 : Spectre de la Tension de sortie 3-niv-chb-MLI.

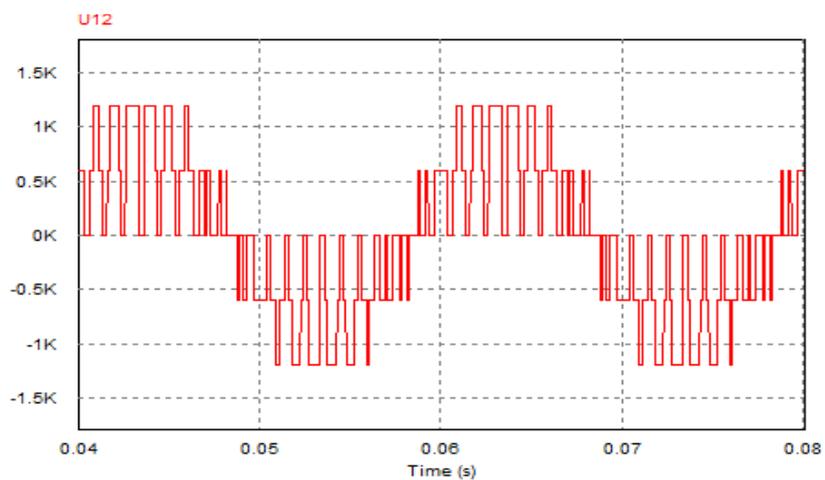


Figure III.43 : Tension composé 3-niv-chb-MLI.

III.3.2.3 Cinq niveaux

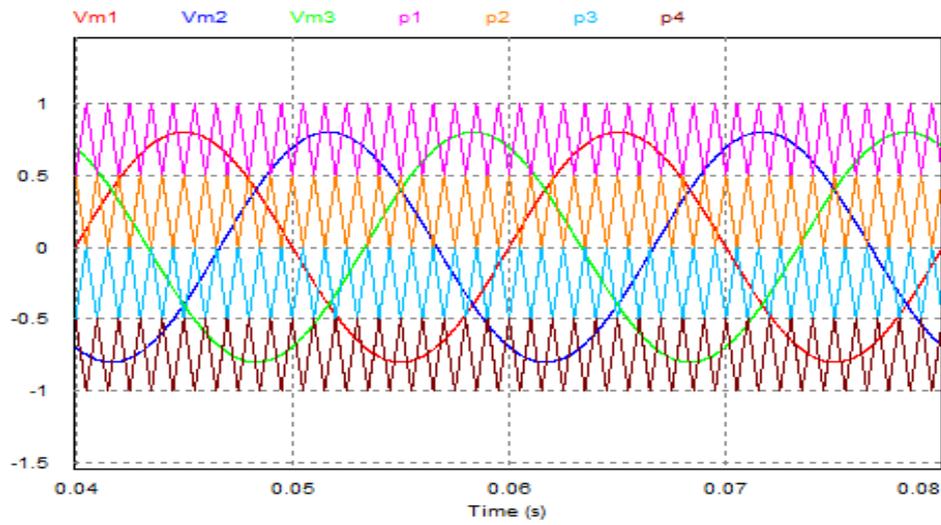


Figure III.44 : Porteuses, Modulantes 5-niv-MLI.

- NPC

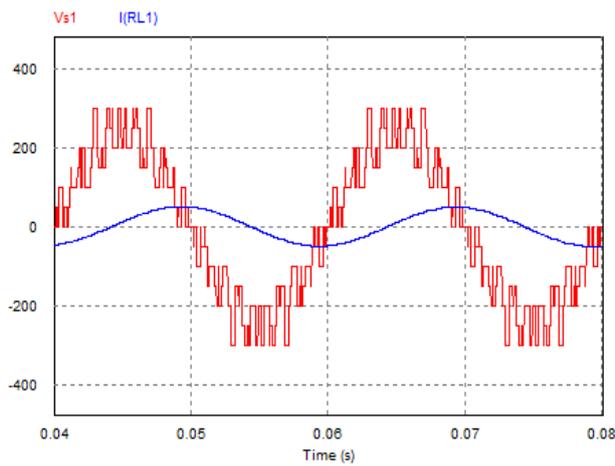


Figure III.45 : Tension de sortie et Courant de charge 5-niv-npc-MLI.

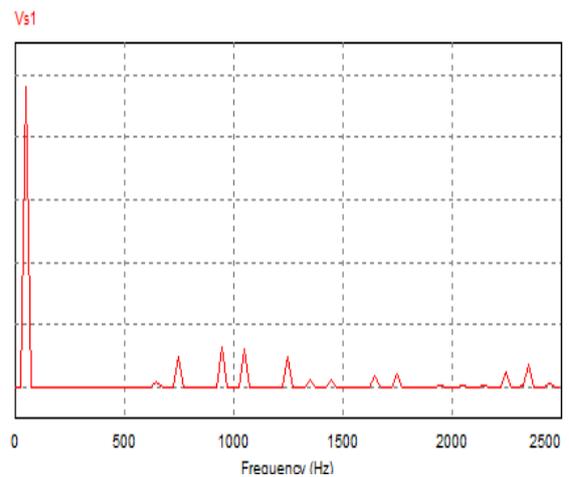


Figure III.46 : Spectre de la Tension de sortie 5-niv-npc-MLI.

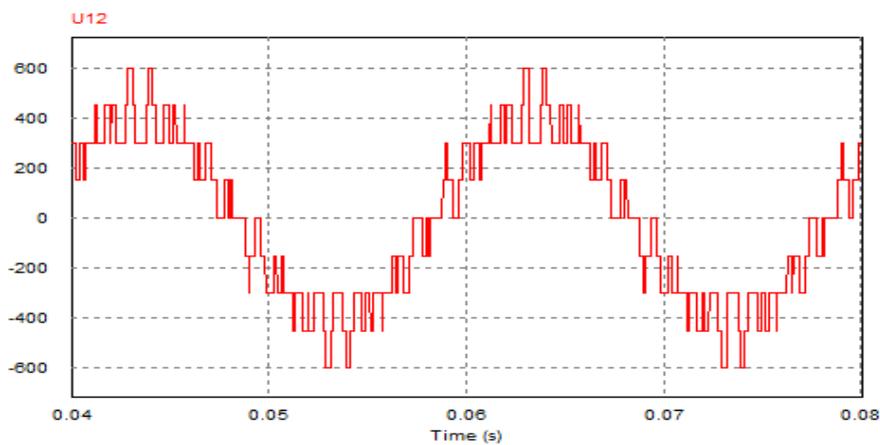


Figure III.47 : Tension composé 5-niv-npc-MLI.

• **FC**

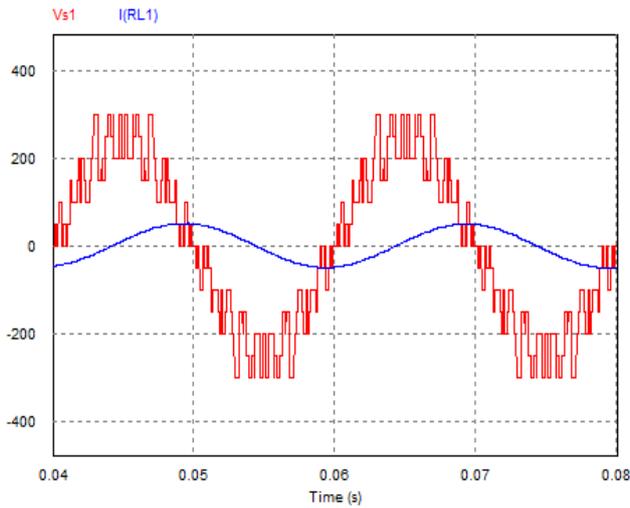


Figure III.48 : Tension de sortie et Courant de charge 5-niv-Fc-MLI.

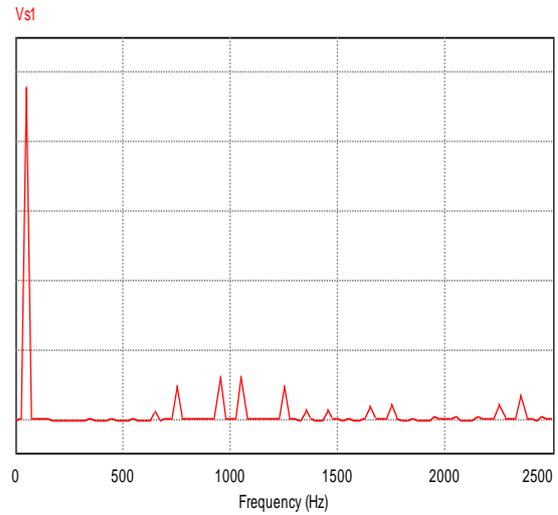


Figure III.49 : Spectre de la Tension de sortie 5-niv-Fc-MLI.

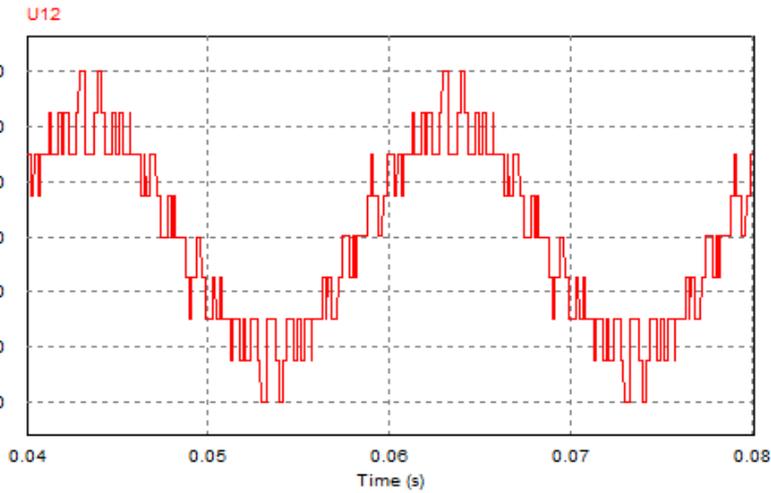


Figure III.50 : Tension composé 5-niv-Fc-MLI.

• **CHB**

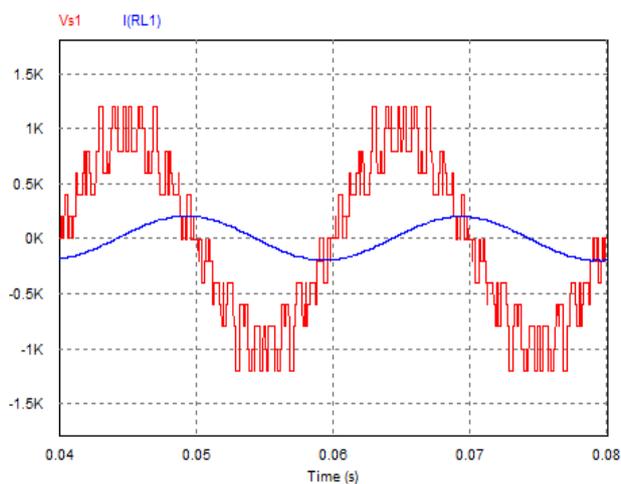


Figure III.51 : Tension de sortie et Courant de charge 5-niv-chb-MLI.

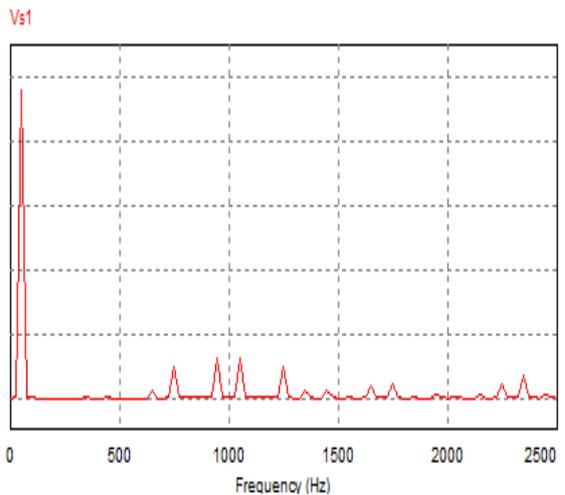


Figure III.52 : Spectre de la Tension de sortie 5-niv-chb-MLI.

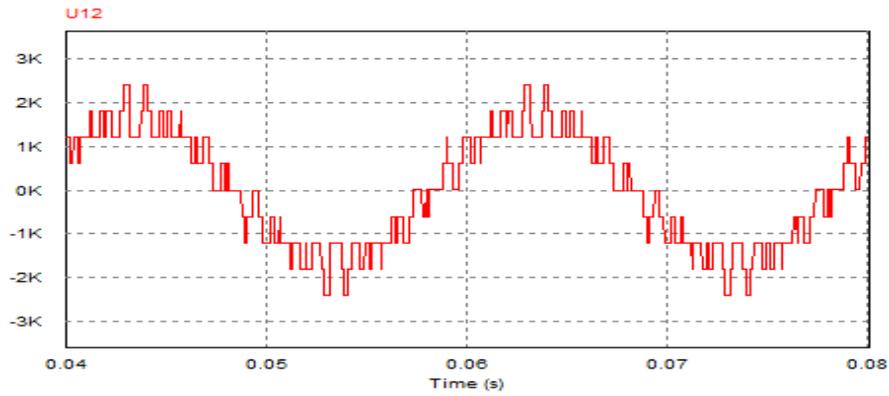


Figure III.53 : Tension composé 5-niv-chb-MLI.

III.3.2.4 Sept niveaux

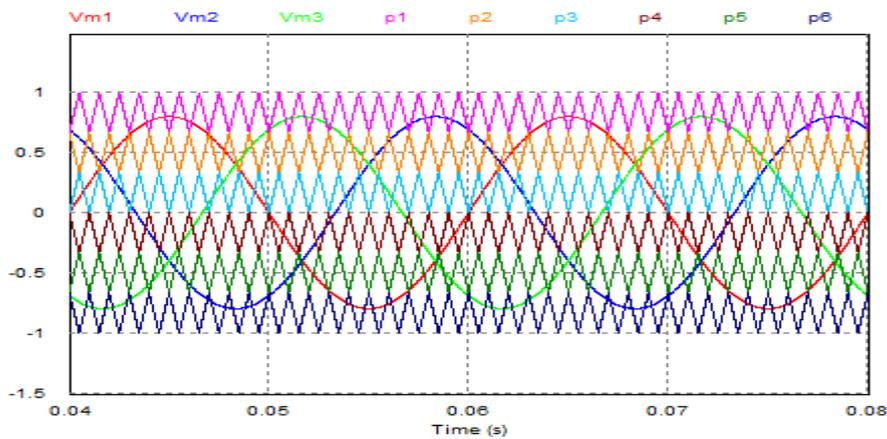


Figure III.54 : Porteuses, Modulantes 7-niv-MLI.

- **NPC**

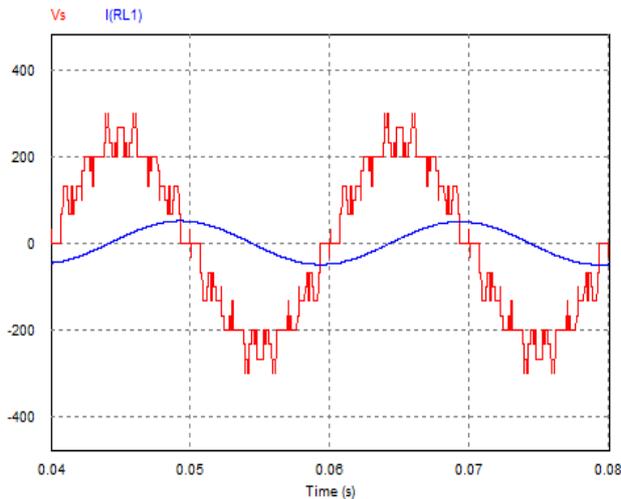


Figure III.55 : Tension de sortie et Courant de charge 7-niv-npc-MLI.

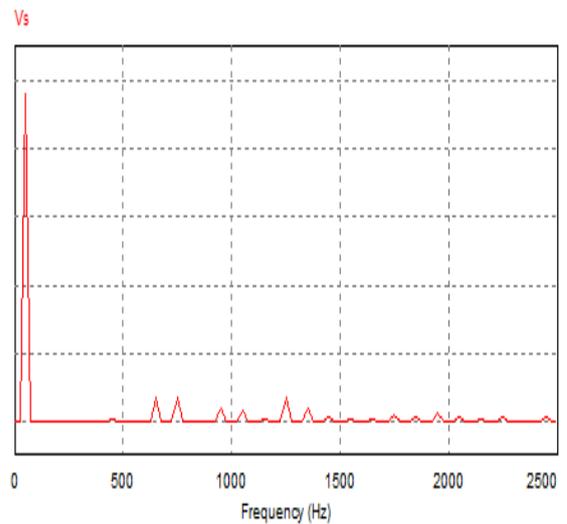


Figure III.56 : Spectre de la Tension de sortie 7-niv-npc-MLI.

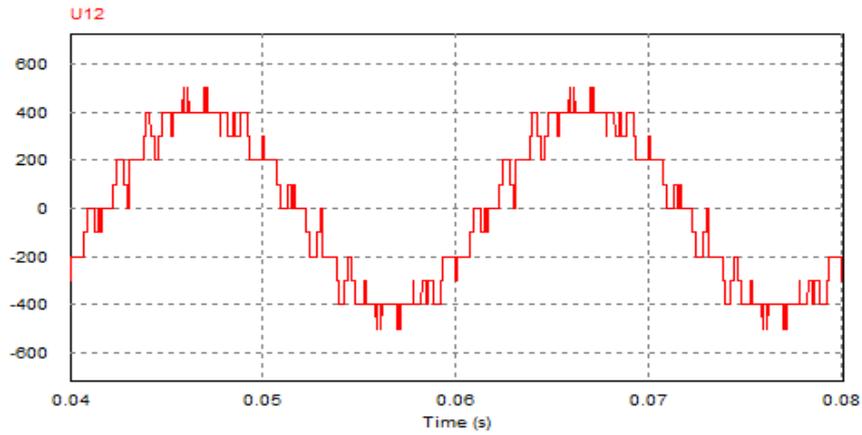


Figure III.57 : Tension composé 7-niv-npc-MLI.

• **FC**

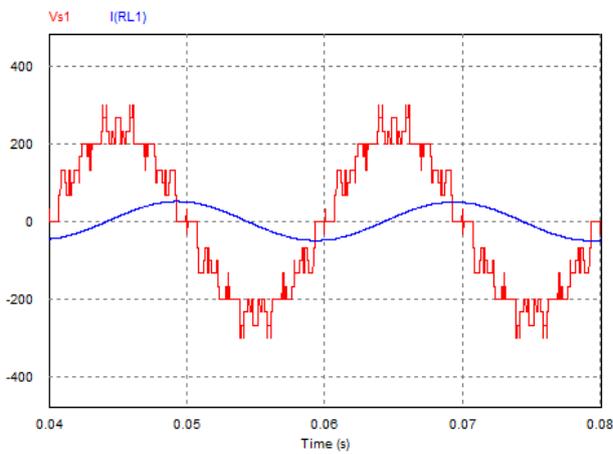


Figure III.58 : Tension de sortie et Courant de charge 7-niv-Fc-MLI.

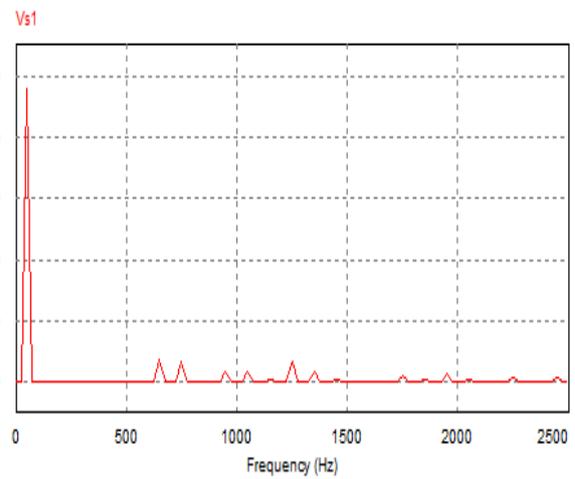


Figure III.59 : Spectre de la Tension de sortie 7-niv-Fc-MLI.

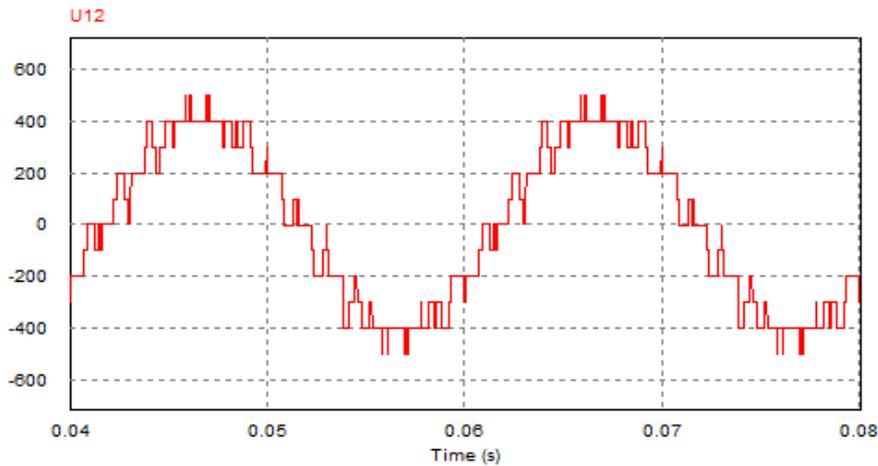


Figure III.60 : Tension composée 7-niv-Fc-MLI.

Chapitre III : Simulation et comparaison des résultats

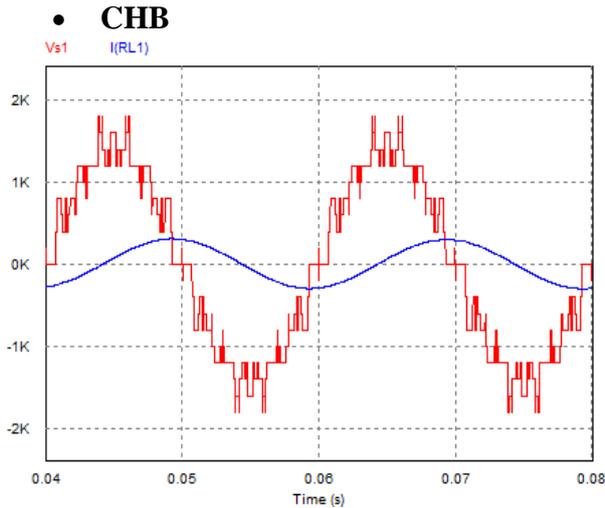


Figure III.61 : Tension de sortie et Courant de charge 7-niv-chb-MLI.

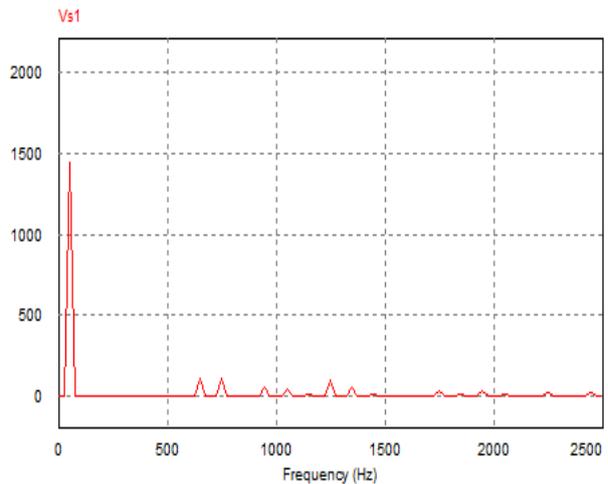


Figure III.62 : Spectre de la Tension de sortie 7-niv-chb-MLI.

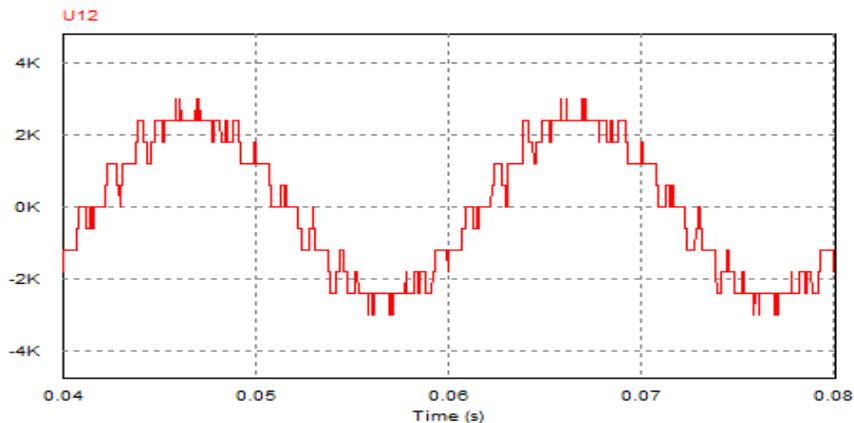


Figure III.63 : Tension composé 7-niv-chb-MLI.

Les tableaux suivants nous donnent les résultats numériques (sous forme de pourcentage %) des harmoniques (THD) en tensions et courants. Ainsi que leurs valeurs maximales respectives obtenus par la simulation des onduleurs de tension à deux, trois, cinq et sept niveaux avec les deux techniques de commandes utilisées précédemment (la commande pleine onde et la MLI sinusoidale).

Nombre de niveaux	Type d'onduleur	La commande 180°	La commande MLI
Onduleur 02 niveaux	Triphasé	V1max = 381.91 V THD (v) = 31.11% I1max = 79.26 A THD (i) = 4.97 %	V1max = 239.72 V THD (v) = 91.56% I1max = 49.80 A THD (i) = 2.93 %

Tableau III.1: Performance d'un onduleur triphasé à deux niveaux.

Chapitre III : Simulation et comparaison des résultats

Onduleur 03 niveaux	NPC	V1max =270.1 V THD (v) =31.1 % I1max =56.3 A THD (i) =4.81 %	V1max =481.99 V THD (v) =66.94 % I1max = 99.54 A THD (i) =3.16 %
	FC	V1max =270.06 V THD (v) =31.1 % I1max = 56.3 A THD (i) =4.82 %	V1max =241.43 V THD (v) =66.92 % I1max =78.45 A THD (i) = 3.87 %
	CHB	V1max =540.12 V THD (v) =31.1 % I1max = 112.63 A THD (i) = 4.82 %	V1max =482.29 V THD (v) =66.93 % I1max = 99.59 A THD (i) =3.23 %

Tableau III.2: Performances des trois topologies de base triphasée à trois niveaux.

Onduleur 05 niveaux	NPC	V1max =249.44 V THD (v) =20.97 % I1max =51.89 A THD (i) =2.82 %	V1max =240.35 V THD (v) =30.05 % I1max =49.83 A THD (i) =1.81 %
	FC	V1max =249.47 V THD (v) =20.95 % I1max =51.91 A THD (i) = 2.79 %	V1max =240.22 V THD (v) =30.12 % I1max =49.8 A THD (i) =1.91 %
	CHB	V1max =997.7 V THD (v) =20.95 % I1max =207.59 A THD (i) =2.808 %	V1max =960.98 V THD (v) =30.12 % I1max =199.24 A THD (i) = 1.91 %

Tableau III.3: Performances des trois topologies de base triphasée à cinq niveaux.

Onduleur 07 niveaux	NPC	V1max =245.94 V THD (v) = 16.86 % I1max =51.1 A THD (i) =1.65 %	V1max =240.05 V THD (v) =17.69 % I1max =49.84 A THD (i) =1.57 %
	FC	V1max = 245.91 V THD (v) =16.87 % I1max = 51.11 A THD (i) =1.64 %	V1max =239.93 V THD (v) =17.51 % I1max= 49.83 A THD (i) =1.58 %
	CHB	V1max =1475.46 V THD (v) =16.87 % I1max =306.66 A THD (i) =1.64 %	V1max =1439.61 V THD (v) =17.51 % I1max =298.99 A THD (i) =1.58 %

Tableau III.4: Performances des trois topologies de base triphasée à sept niveaux.

III.4 Discussion des résultats obtenues par simulation sous Psim pour les deux techniques de commandes utilisées

- Un onduleur à deux niveaux en lui-même présente des performances en termes des harmoniques aux niveaux du courant on voit bien d'après les résultats obtenus que la commande MLI nous donne un taux de distorsion harmonique (THD) faible par rapport

à celui obtenue par la commande 180° . Ce qui explique que la forme du courant se rapproche de la sinusoïde dans le cas de la commande MLI.

- On remarque aussi d'après les résultats obtenus si on augmente le nombre de niveaux le taux de distorsion harmonique diminue. Ce qui explique que la forme d'onde du courant et de la tension se rapproche de plus en plus de la sinusoïde dans le cas d'un onduleur multi-niveaux si on la compare avec celle de deux niveaux.
- La commande MLI donne des résultats plus performants que La technique de commande pleine onde (180°) illustrée en dessus on voit bien qu'elle nous donne un très faible taux de distorsion harmonique THD en courant. Donc la commande MLI se montre la plus efficace pour la neutralisation des harmoniques si on la compare à la commande pleine onde.
- Une structure d'un onduleur triphasée nous donne des meilleures performances par rapport à la structure monophasée (un seul bras de l'onduleur).
- La tension maximale à la sortie d'un onduleur en pont H à structure cascadié est beaucoup plus élevée si on la compare avec celle obtenue pour la structure à diode flottante (ou même à condensateur flottant). Cette dernière est alimentée par une seule source de bus continue. Donc dans ce cas la tension à la sortie de l'onduleur est inférieure ou égale à la tension de bus continue (Tension d'entrée) par contre la structure cascadiée en pont H exige des sources de tension isolés (l'alimentation par plusieurs sources d'entrées). Donc la tension de sortie est la somme de tensions obtenues pour chaque pont monophasé.

III.5 Comparaisons des pertes de puissance dans les semi-conducteurs

III.5.1 Les pertes de puissance dans les semi-conducteurs

Le dimensionnement des convertisseurs statiques repose sur divers compromis, mais les pertes dans les semi-conducteurs constituent un point d'entrée particulièrement important car elles impactent tous les critères de performance (masse, fiabilité, coût, etc...).

Au cours des dernières décennies, l'importance de cette information a conduit les fabricants d'IGBT à communiquer des informations de plus en plus complètes dans leurs notices, mais dans le cas des composants plus rapides (MOSFETs Si basse tension, composants grands gap) ces informations sont souvent bien plus parcellaires. Cela peut être dû au fait que les pertes dépendent de l'environnement [53] (drivers, câblage, diode de l'autre composant de la cellule de commutation, etc..) ou au fait que les mesures sont plus difficiles à réaliser.

Toujours est-il que le concepteur a besoin de ces informations et qu'il faut donc arriver à faire ces mesures.

III.5.2 Résultat de simulation des pertes de puissances obtenues sous Psim

		P source (kW)	P charge (kW)	Les pertes totales dans les semi-conducteurs (W)
2-NIV		14.305	13.541	754.08
3-NIV	NPC	1.8198	1.7105	109.4
	FC	1.780	1.6032	177.2
	CHB	6.897	6.4330	465.24

Tableau III.5: Pertes de puissance dans les onduleurs à deux et trois niveaux.

		Les pertes dans les semi-conducteurs (W)			
		Diode		IGBT	
		con	sw	con	sw
2-NIV		9.660801e+1	3.614937e-6	9.174547e+1	1.669878e-1
		Ptot (W)		Ptot (W)	
		96.608015614938		91.91246386	
		Ptot 1 (W)			
		188.52047947494			
		Ptot (W)=4*Ptot1			
		754.08			

Tableau III.6 : Les pertes dans les semi-conducteurs pour un onduleur à deux niveaux.

III.5.3 Discussion des résultats de simulation obtenus sous Psim

- On voit bien d'après le tableau que les pertes par commutation dans un onduleur en pont H à deux niveaux sont plus grandes que celle en pont H à trois niveaux ce qui explique que le temps de conduction des interrupteurs est réduit dans le cas d'un onduleur en pont H à trois niveaux si on le compare à celui de deux niveaux. Donc les interrupteurs sont moins sollicités dans le cas d'un onduleur en pont H à trois niveaux.
- On remarque aussi que la somme des pertes dans les semi-conducteurs et dans la charge est égale à la puissance aux niveaux de la source.
- D'après le tableau on remarque aussi que la puissance aux niveaux de la charge pour un onduleur à deux niveaux (pont H) est 2 fois plus grande que celle aux niveaux de la charge pour un onduleur à trois niveaux à structure cascadié (pont H). C'est dû à la forme d'onde de la tension de sortie imposé par l'onduleur à trois niveaux et son passage par zéro si on la compare avec la forme d'onde pour un onduleur à deux niveaux.

- Les pertes de puissances dans le semi-conducteur sont maximales dans le cas d'un onduleur trois niveaux à structure cascadié comparé aux autres topologies multiniveaux (NPC, FC). C'est dû à la pleine tension E qui supporte l'interrupteur à l'état bloqué dans le cas d'un onduleur à trois niveaux à structure cascadié donc il délivre un courant important si on le compare avec la structure NPC ou FC que leur interrupteur a l'état bloqué supporte une tension $\frac{E}{2}$ (deux fois plus petite que celle de la structure cascadiée à trois niveaux). Donc il délivre dans ce cas un courant faible sachant que les pertes de puissance sont proportionnelles au courant.
- Pour une charge purement résistive et d'après les résultats obtenus par simulation les pertes par commutation sont négligeables devant les pertes par conduction.
- D'après toujours les résultats obtenus par simulation si on augmente la fréquence de commutation les pertes par commutation vont augmenter.
- On déduit que les pertes par commutation sont proportionnelles à la fréquence de commutation.
- Pour les pertes par conduction dépendent de la chute de tension et de courant qui la traverse.

III.6 Conclusion

Deux techniques de commande appliquées sur un onduleur de tension à deux, trois, cinq, jusqu'à sept niveaux pour les trois topologies de base de la conversion multi-niveaux sont simulées et leurs performances comparées en termes 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 deux techniques sont :

- La commande pleine onde
- La commande MLI Sinusoïdale

On peut conclure de ce chapitre d'après les résultats obtenus par simulation

- La commande MLI Sinusoïdale offre la tension de charge la moins polluée avec des harmoniques basses fréquences 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.
- Si on augmente le nombre de niveaux on aura un taux de distorsion harmonique (THD) en courant et en tension très intéressant (faible), ce qui fait une bonne qualité spectrale en tension et un courant qui se rapproche de plus en plus de la sinusoïde.

Les pertes de puissance dans les semi-conducteurs est l'un des points les plus importants dans le domaine de l'électronique de puissance. De ce fait on peut conclure d'après les résultats obtenus par simulation :

Chapitre III : Simulation et comparaison des résultats

- Les pertes par commutation dans un onduleur à deux niveaux sont plus grandes que celle en pont H à trois niveaux ce qui explique que le temps de conduction des interrupteurs est réduit dans le cas d'un onduleur en pont H à trois niveaux, donc les interrupteurs sont moins sollicités dans ce cas.
- Les pertes par commutation sont proportionnelles à la fréquence de commutation.
- Les pertes par conduction dépendent de la chute de tension et de courant qui la traverse.

Conclusion générale

Conclusion générale

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

Nous avons commencé par la présentation de la généralité sur les onduleurs, principe de fonctionnement et une description des principales topologies des convertisseurs multiniveaux avec leurs avantages et inconvénients. Ainsi que leurs domaines d'applications industrielles.

L'utilisation de l'onduleur classique à deux niveaux dans le domaine des applications de forte puissance ne convient pas, car elle exige plusieurs limites, Pour contourner ces limites, on a proposé dans la littérature, les onduleurs multiniveaux qui permettent de générer une tension de sortie plus proche à la sinusoïdale.

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 commande ont été élaborées pour les onduleurs à deux et à trois jusqu'à sept niveaux dont la plus courante est la stratégie de commande par palier et la modulation de la largeur d'impulsion triangle sinusoïdale.

Nous avons étendu les notions connues pour la stratégie citée aux onduleurs à deux niveaux et à trois niveaux jusqu'à sept niveaux.

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

Après simulation, on trouve que :

- Si on augmente le nombre de niveaux on aura un taux de distorsion harmonique qui diminue. Donc la tension de sortie qui se rapproche de plus en plus de la sinusoïde.
- La commande MLI nous donne des meilleures performances spectrales si on la compare à la commande pleine onde. Donc elle est plus efficace pour la neutralisation des harmoniques.
- Si on augmente le nombre de niveaux, le temps de conduction des interrupteurs est réduit. Ce qui explique la diminution des pertes de puissances dans les semi-conducteurs.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] **B. K. Bose**, « Power Electronics and AC Drives », Edition Practice Hall, 1986.
- [2] **L. M. Tolbert**, « Multilevel Converters for Large Electric Drives », IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 35, pp. 36-44, January/February 1999.
- [3] **B. Haroun et H. Safouane**, « Etude et analyse de la commande des onduleurs Multi-niveaux par MLI sinusoïdale », MEMOIRE Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master, UNIVERSITE LARBI TEBSSI-TEBESSA-Faculté des Sciences et de la Technologie Département de Génie des Mines, 2016.
- [4] **S. Mehaba et S. Haderbache**, « Etude par simulation d'un onduleur cinq niveaux » MEMOIRE Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master, UNIVERSITÉ ABDERRAHMANE MIRA-BEJAIA –Faculté des sciences et de la technologie Département de Génie Électrique, 2018.
- [5] **J. P. Caron, J. P. Hautier**, « Convertisseurs Statiques – Méthodologie Causale de Modélisation et de Commande », Editions Technip, Paris 1999.
- [6] **M. Alali**, « Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension - Automatisation des systèmes de puissance électriques », Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur – Strasbourg I, Discipline : Génie électrique, Septembre 2002.
- [7] **B. Ouahid**, « Contribution à l'analyse des onduleurs multi-niveaux », Mémoire de Magister, Université de Batna, 2005.
- [8] **G. Segulier, F. Labrique**, « Les convertisseurs de l'électronique de puissance » Edition Lavoisier. Tec & Doc, 1998, Tome1 et Tome 4.
- [9] **M. Pinard**, « convertisseurs et électronique de puissance et puissance de commande, description », mise en oeuvre Dunode, Paris, ISBN 978-10-049674-7, p116.
- [10] **Bannister, R. H. Baker et L. H. Bannister**, "Electric Power Converter", U.S. Patent Number 3,867,643, Feb. 1975.
- [11] **A. Nabae, I. Takahashi, H. Akagi**, "A new-point-clamped PWM Inverter", IEEE trans. on Ind elect, Vol.1A-17, NO 5, pp. 518-523, 1981.
- [12] **R. H. Baker**, "H-Bridge Converter Circuit", U.S. Patent 4 270 163, May 1981.
- [13] **J. Rodriguez, J. S. Lai, et F. Z. Peng**, "Multilevel Inverters : A Survey of Topologies, Controls, and Applications", IEEE trans. on Ind. elec, Vol. 49, No. 4, pp. 724-738, August 2002.
- [14] **P. W. Hammond**, "Medium voltage PWM drive and methode", U.S. Patent 5 625 545, Apr. 1997.
- [15] **F. Z. Peng, J. S. Lai**, "Multilevel cascade voltage-source inverter with separate DC sources", U.S. Patent 5 642 275, June 24, 1997.
- [16] **T. A. Meynard, H. Foch**, "Multilevel conversion: High-Voltage choppers and Voltage source Inverters", IEEE conference, pp. 398-403, 1992
- [17] **A. Leredde**, "Etude, Commande et Mise en Oeuvre de Nouvelles Structures Multi-niveaux", Thèse de doctorat, INP Toulouse, 2011.
- [18] **K. J. McKenzie**, "Eliminating Harmonics in a Cascaded H-Bridges Multilevel Inverter Using Resultant Theory, Symmetric Polynomials, and Power Sums", A Thesis Presented for the Master of Science Degree The University of Tennessee, Knoxville, 2004.

Bibliographie

- [19] **L. M. Tolbert, Z. Peng, T. G. Habetler**, "Multilevel Inverters for Electric Vehicle Applications", WPET '98, Dearborn, Michigan, October 22-23, 1998.
- [20] **S. Khomfoi, L. M. Tolbert**, "Multilevel Power Converters", Chapter 31, The University of Tennessee, 2005.
- [21] **A. BERBOUCHA**, "Commandes avancées des aérogénérateurs pour une meilleure qualité de l'énergie électrique" thèse de doctorant, université de Bejaia, 2018.
- [22] **H. Ben Zemammouch** « Application de la MLI Vectorielle aux Onduleurs Multi niveaux à base de GTO et d'IGBT », Mémoire Présenté en vue d'obtention du diplôme de Magister, Université Badji Mokhtar Annaba.2010.
- [23] **M. Abdallah** « Commande des Onduleurs Multiniveaux », Mémoire Présenté en vue d'obtention du diplôme de MASTER, UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAFM'SILA.2016.
- [24] **F. Mnif** « Etude et Réalisation des lois de commande par mode de Glissement et par approche Géométrique : Application à un Onduleur De Tension Monophasés », Thèse présente à l'université du Québec à Trois-Rivières Comme Exigence Pour l'obtention du Déplume de maitrise sciences appliquées en électronique industrielle, Université du Québec.1991.
- [25] **A. Ammiche** « Commande des onduleurs multiniveaux de tension à diode flottante » mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme de master en génie électrique. Université de m'sila 2012/2013.
- [26] **Bannister, R. H. Baker et L. H. Bannister**, "Electric Power Converter", U.S. Patent Number 3,867,643, Feb. 1975.
- [27] **A. Leredde**, "Etude, Commande et Mise en Oeuvre de Nouvelles Structures Multiniveaux", Thèse de doctorat, INP Toulouse, 2011
- [28] **K. J. McKenzie**, "Eliminating Harmonics in a Cascaded H-Bridges Multilevel Inverter Using Resultant Theory, Symmetric Polynomials, and Power Sums", A Thesis Presented for the Master of Science Degree The University of Tennessee, Knoxville, 2004.
- [29] **J. SONG MANGUELLE**, Convertisseurs multiniveaux asymétriques alimentés par transformateurs multi-secondaires basse-fréquence: réactions au réseau d'alimentation, Thèse n° 3033 (2004), École Polytechnique Fédérale de LAUSANNE, Suisse.
- [30] **S. Kouro, M. Malinowski, K. Gopakumar, J. Pou, L. G. Franquelo, Bin Wu, J. Rodriguez, M. A. Pérez**, "Recent Advances and Industrial Applications of Multilevel Converters", IEEE Trans. on Ind. Elec, Vol. 57,N°.8, pp. 2553-2580, 2010.
- [31] **J. Rodriguez, J. S. Lai, et F. Z. Peng**, "Multilevel Inverters : A Survey of Topologies, Controls, and Applications", IEEE trans. on Ind. elec, Vol. 49, No. 4, pp. 724-738, August 2002.
- [32] **J. S. Mariethoz**, "Étude formelle pour la synthèse de Convertisseur Multiniveaux asymétrique : Topologies, modulation et commande", Thèse de doctorat N° d'ordre : 3188, EPFL de Lausanne, 2005.
- [33] **R. Teodorescu, F. Blaabjerg, John. K. Pedersen, E. Cengelci, Prasad N. Enjeti**, "Multilevel Inverter by Cascading Industrial VSI", IEEE Trans. on. Ind. Elec, Vol. 49, No. 4, pp. 832-838, Aug 2002.

Bibliographie

- [34] **A. Tahri, et A. Draou**, "A Comparative Modelling Study of PWM Control Techniques for Multilevel Cascaded Inverter", Leonardo Journal of Sciences ISSN 1583-0233, pp. 42-58, 2005.
- [35] **S. Kouro, M. Malinowski, K. Gopakumar, J. Pou, L. G. Franquelo, Bin Wu, J. Rodriguez, M. A. Pérez**, "*Recent Advances and Industrial Applications of Multilevel Converters*", IEEE Trans. on Ind. Elec, Vol. 57, No.8, pp. 2553-2580, 2010.
- [36] **L. M. Tolbert, Z. Peng, T. G. Habetler**, "*Multilevel Inverters for Electric Vehicle Applications*", WPET '98, Dearborn, Michigan, October 22-23, 1998.
- [37] **Zhong Du, B. Ozpineci, L. M. Tolbert, et J.N. Chiasson**, "*DC-AC Cascaded H-Bridge Multilevel Boost Inverter with No Inductors for Electric/Hybrid Electric Vehicle Applications*", IEEE Trans. on Ind. Elec, Vol. 45, No. 3, pp. 963-970, 2009.
- [38] **Djaafer LALILI**. MLI Vectorielle et Commande Non Linéaire du Bus Continu des Onduleurs Multiniveaux. Application à la Conduite de la Machine Asynchrone
- [39] **Lourci N** : « Contribution à l'étude et la commande d'un onduleur à cinq niveaux à diodes flottantes. Application à la conduite d'une machine asynchrone triphasée ». Thèse de magister, ENP, Alger 2000.
- [40] **F. BOUCHAFAA**, « Etude et Commande de différentes Cascades à Onduleur à Neuf Niveaux à Structure NPC. Application à la conduite d'une MSAP », Thèse doctorat, 2006.
- [41] **S.Fernandez**, "Comparaison des performances électriques d'un onduleur triphasé deux niveaux à commandes directes et indirectes connecté au réseau," Thèse de doctorat, Université Lille 1, Nord de France, 2013.
- [42] **Ch.Krishna kantha, P.Deepthi Sree**, "Analysis, Simulation & Comparison of Various Multilevel Inverters Using Different PWM Strategies," IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering, Vol. 9, no. 2, PP 54-65, 2014.
- [43] **Jean-Sébastien MARIÉTHOZ**, Étude formelle pour la synthèse de convertisseurs multiniveaux asymétriques : topologies, modulation et commande, Thèse n° 3188(2005), École Polytechnique Fédérale de LAUSANNE, Suisse.
- [44] **K.BOULAAM , E.M.,M.S.BOUCHERIT , G.MANESSE**, "Linear feedback 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, Bruxelles ,Belgique.
- [45] **H. Zemammouch** « Application de la MLI Vectorielle aux Onduleurs Multi niveaux à base de GTO et d'IGBT », Mémoire Présenté en vue d'obtention du diplôme de Magister, Université Badji Mokhtar Annaba.2010.
- [46] **P. M. Bhagwat, and V. R. Stefanovic**, "General Structure of a Multilevel PWM Inverter," IEEE Trans. On IA, Vol. IA-19, No. 6, Nov. /Dec., 1983, pp. 1057-69

Bibliographie

[47] **Rahim, N.A; Selvaraj, J.,** "Multilevel inverter with dual reference modulation technique for grid-connected PV system" Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES apos;09. IEEE, Volume, Issue, 26-30 July 2009 Page(s):1 – 8.

[48] **Das, A. Sivakumar, K. Mondal, G. Gopakumar, K.,** " A Multilevel inverter with hexagonal and 12-sided polygonal space vector structure for induction motor drive" Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE, Nov 2008, pp : 1077-1082.

[49] **Wu Hongyang; He Xiangning;** <<Power Electronics and Motion Control Conference, 200. Proceedings ». IPEMC 2000. The Third International Volume 3, 15-18 Aug. 2000 Page(s): 1099 1103 vo\,3 Digital Object Identifier 10.1109/IPEMC.2000.882983.

[50] **A.Radan, A.H.Shahirinia** «Novel Carrier-Based PWM Methods for Multi-level Inverters» EPE Journal, ISSN 0939-8368 V01.18-N°2- April-May-June 2008 pages 16-21.

[51] **Joseph SONG MANGUELLE,** Convertisseurs multiniveaux asymétriques alimentés par transformateurs multi-secondaires basse-fréquence: réactions au réseau d'alimentation, Thèse n° 3033 (2004), École Polytechnique Fédérale de LAUSANNE, Suisse.

[52] **Ahmet M.Hava Russel j kerkman, Thomas A.lipo** Carrier-based PWM-VSI over modulation strategies: Analysis, and design IEEE transactions on power electronics vol .13, N°, 4 July 1998.

[53] **T. Meade, D. O'Sullivan, R. Foley, C. Achimescu, M.G. Egan, P. McCloskey,** « Parasitic inductance effect on switching losses for a high frequency Dc-Dc converter », Twenty-ThirdAnnual IEEE APEC, pp.3- 9, Fev. 2008.