



Université Mohamed Khider - Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies

Électrotechnique

Machines électriques

Réf. :

Présenté et soutenu par :

Seyf eddine ZAIDI

Mounir HAMCHA

Le Mardi 03 juin 2025

Étude et simulation d'un Onduleur multi-niveaux à MLI

Jury :

Pr. Ramzi SAADI	Pr	Université de Biskra	Président
Dr. Messaoud MOHAMMEDI	MCA	Université de Biskra	Rapporteur
Pr. Khaled YAHIA	Pr	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2024-2025



Université Mohamed Khider - Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies

Électrotechnique

Machines électriques

Réf. :

Étude et simulation d'un Onduleur multi-niveaux à MLI

Le Mardi 03 juin 2025

Présenté par :

Seyf eddine ZAIDI

Mounir HAMCHA

Avis favorable de l'encadreur

Dr. Messaoud MOHAMMEDI

Signature Avis favorable du Président du Jury

Pr. Ramzi SAADI

Cachet et signature

Dédicace

Je dédie ce travail à mes chers parents, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices, leur soutien moral constant et leurs prières sans fin. Sans eux, ce travail n'aurait jamais vu le jour.

À mes frères et sœurs, pour leurs encouragements permanents et leur présence réconfortante tout au long de ce parcours. Leur soutien a été essentiel à la réussite de ce projet.

J'exprime également ma profonde gratitude à mon encadrant, Dr. Messaoud MOHAMMEDI, pour ses précieux conseils, sa disponibilité et son accompagnement constant, qui ont grandement contribué à la réalisation de ce travail.

Je tiens à remercier sincèrement mes amis proches, pour leur amitié sincère, leur écoute et leur soutien indéfectible : mon cher cousin **Zaidi Mohammed, Abbas, Fares, Hicham, Nasro, Hani**, ainsi que **Tulip**, dont la présence m'a été d'un grand réconfort.

Je remercie aussi l'ensemble de mes amis et collègues de la promotion Électrotechnique 2025, pour les moments partagés, leur aide précieuse et l'esprit de solidarité qui nous a permis de surmonter ensemble les défis de ce parcours.

Enfin, à toutes les personnes qui ont cru en moi, de près ou de loin, merci pour votre confiance et votre appui sans lesquels ce projet n'aurait pas pu se concrétiser.

À Gaza,

Terre meurtrie mais jamais soumise, À ses enfants, martyrs de la vérité, témoins du courage et de la résistance. À ceux qui, malgré les bombes et les ruines, élèvent la dignité humaine au rang de miracle quotidien. À un peuple qui inspire la liberté, la résilience, et l'espoir. Que ce modeste travail académique porte en lui, à défaut de justice, un témoignage de solidarité profonde. Gaza dans nos cœurs, Gaza pour toujours

Seif eddin

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À mes chers parents, pour leur amour, leurs sacrifices et leur soutien inconditionnel.

À mes sœurs et mes frères, pour leur présence et leurs encouragements constants.

À toute ma famille, pour leur bienveillance.

À mes amis fidèles : **ZAIDI Mohammed** et **HAMCHA Okba**.

À tous mes camarades du groupe Électrotechnique, promotion 2025.

À tous les étudiants de la Faculté des Sciences et de Technologie, et à l'ensemble du corps académique qui m'a accompagné tout au long de ce parcours.

Mounir

Remerciements

Au nom de Dieu, le Clément, le Miséricordieux Louange à Dieu, Maître des mondes, par qui les œuvres s’accomplissent et les objectifs se réalisent.

C’est avec une profonde reconnaissance que je rends grâce au Tout-Puissant, pour m’avoir accordé la santé, la patience, la lucidité et la force nécessaires à la réalisation de ce travail.

Je tiens à exprimer mes remerciements les plus sincères au **Docteur Messaoud MOHAMMEDI**, mon directeur de mémoire, pour son accompagnement exemplaire, ses conseils éclairés, sa disponibilité constante et la rigueur scientifique dont il a fait preuve tout au long de ce travail. Son expertise et son exigence académique ont été essentielles à la concrétisation de ce projet.

Je remercie également les membres du jury pour l’honneur qu’ils me font en acceptant d’évaluer ce mémoire. Je leur suis reconnaissant pour l’attention qu’ils porteront à mon travail, ainsi que pour leurs remarques pertinentes et constructives qui ne manqueront pas d’enrichir cette recherche.

Je n’oublie pas d’adresser mes remerciements à mes camarades et amis, pour leur soutien moral, leur présence bienveillante et les échanges intellectuellement stimulants qui ont nourri ma réflexion.

Enfin, j’exprime ma profonde gratitude à ma famille, et tout particulièrement à mes chers parents, pour leur amour inconditionnel, leurs encouragements constants, leurs sacrifices silencieux et leur foi en moi. Leur soutien a été un pilier fondamental tout au long de ce parcours.

À tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à l’aboutissement de ce mémoire :
Merci.

Que Dieu vous récompense.

Resumé

Ce mémoire porte sur l'étude et la simulation d'onduleurs multiniveaux de type NPC (Neutral Point Clamped) à trois et cinq niveaux, pilotés par des techniques de modulation en largeur d'impulsion (MLI). Ces convertisseurs représentent une solution efficace pour la conversion de l'énergie électrique dans les systèmes de moyenne et haute puissance, grâce à leur capacité à générer des signaux de sortie de haute qualité avec un faible taux de distorsion harmonique total (THD). Dans ce travail, plusieurs stratégies de modulation, telles que la modulation sinusoïdale en ondes triangulaires (SPWM) et la modulation vectorielle (SVPWM), ont été étudiées et appliquées aux structures à trois et cinq niveaux. Une étude comparative basée sur des simulations sous MATLAB/Simulink a permis d'évaluer les performances des différentes configurations en termes de forme d'onde, de distorsion harmonique et de rendement global. Les résultats obtenus confirment l'efficacité des techniques MLI dans l'amélioration des performances des onduleurs NPC, notamment pour la structure à cinq niveaux, qui permettent une sortie plus proche de l'onde sinusoïdale idéale.

Mots clés : Onduleur multi-niveaux NPC, Filtrage passif, MLI, THD

Abstract

This thesis focuses on the study and simulation of multilevel inverters of the NPC (Neutral Point Clamped) type with three and five levels, controlled using Pulse Width Modulation (PWM) techniques. These converters offer an efficient solution for electrical energy conversion in medium- and high-power systems, due to their ability to generate high-quality output signals with low Total Harmonic Distortion (THD). In this work, several modulation strategies, such as Sinusoidal PWM (SPWM) and Space Vector PWM (SVPWM), were studied and applied to three-level and five-level inverter structures. A comparative study based on simulations using MATLAB/Simulink was conducted to evaluate the performance of different configurations in terms of waveform quality, harmonic distortion, and overall efficiency. The results confirm the effectiveness of PWM techniques in improving the performance of NPC inverters, particularly for the five-level structure, which provides an output waveform closer to the ideal sine wave.

Keywords : Multilevel NPC inverter, Passive filtering, PWM, THD.

Table des matières

Introduction Générale	1
Chapitre 1 Généralité sur les convertisseurs multi-niveaux	3
1.1 Introduction	3
1.2 Principe des convertisseurs multi-niveaux	3
1.2.1 Principales topologies des onduleurs multi-niveaux	4
1.3 Classification des convertisseur multi-niveaux	5
1.3.1 Convertisseur d'un onduleur a diode de blocage (NPC)	5
1.3.2 Convertisseur d'un onduleur condensateur flotteur :	7
1.3.3 Convertisseurs d'un onduleur en cascade :	9
1.3.4 Autres topologies :	11
1.4 Comparaison entre les trois principaux convertisseurs multi-niveaux : . .	14
1.5 Applications des convertisseurs multiniveaux :	15
1.6 Conclusion :	16
Chapitre 2 Analyse Topologique et Fonctionnelle des Onduleurs NPC à Trois et Cinq Niveaux	17
2.1 Introduction	17
2.2 Convertisseur d'un onduleur a diode de blocage (NPC)	18
2.2.1 Structure de l'onduleur à trois niveaux :	18
2.2.2 Configurations et fonctionnement d'un bras de l'onduleur à trois niveaux :	20
2.3 Structure Onduleur à cinq niveaux de type NPC :	23
2.3.1 Principe de fonctionnement :	24
2.3.2 Différentes configurations d'un bras de l'onduleur NPC à cinq niveaux :	25
2.4 Comparaison d'onduleur NPC 3 niveaux et NPC 5 niveaux :	29

2.5	Conclusion :	30
Chapitre 3 Étude et Simulation d'un Onduleur Multiniveaux NPC par Modulation MLI		32
3.1	Introduction	32
3.2	Commande MLI des onduleurs de tension multi-niveaux :	33
3.2.1	Différentes méthodes de modulation :	34
3.2.2	Stratégie de commande en pleine onde :	34
3.3	Technique MLI engendrée :	34
3.4	Avantages de la technique MLI :	36
3.5	Résultats des simulations :	36
3.5.1	Onduleur a trois niveaux :	36
3.5.2	Onduleur a cinq niveaux :	41
3.6	Conclusion :	46
Chapitre 4 Amélioration de la qualité de la tension des onduleurs multi-niveaux par filtrage passif :		47
4.1	Introduction :	47
4.2	Définition du filtrage passif :	48
4.3	Insertion des filtres passifs dans un Onduleur NPC :	48
4.4	Avantages du filtrage passif pour les onduleurs NPC :	48
4.5	Inconvénients du filtrage passif :	49
4.6	Schéma de filtre passif d'un onduleur 3 niveaux et 5 niveaux :	49
4.7	Calcul des paramètres de filtre passive LC :	50
4.8	Résultats des simulations :	50
4.8.1	Onduleur trois niveaux :	50
4.8.2	Onduleur cinq niveaux :	52
4.9	Conclusion :	54
Bibliographie		57

Liste des Figures

1.1	Schéma d'un bras d'onduleur multi-niveaux multiples a deux (a), a trois (b) et a n niveaux (c)	4
1.2	Topologies des onduleurs multi-niveaux	5
1.3	Trois séquences de fonctionnement possible d'onduleur NPC à trois niveaux .	6
1.4	Topologies de circuits d'onduleur multiniveaux à diodes de blocage — a) Trois niveaux, b) Cinq niveaux	8
1.5	onduleur en cascade à 3 niveaux	9
1.6	onduleur en cascade à 5 niveaux	10
1.7	onduleur simplifie à cinq niveaux	13
2.1	Structure d'une conversion indirecte AC/AC	18
2.2	Schéma d'un onduleur NPC à 3 niveaux	19
2.3	: Interrupteur bidirectionnel équivalent de la paire Transistor – diode . . .	19
2.4	Un bras de l'onduleur à trois niveaux de type NPC	20
2.5	Première configuration du Première bra	21
2.6	Deuxième configuration du Première bra	22
2.7	Troisième configuration du Première bra	22
2.8	Forme d'onde de la tension de sortie d'un bras D'onduleur à trois niveaux de type NPC	23
2.9	Schéma d'un onduleur NPC à cinq niveaux.	24
2.10	Bras d'un onduleur NPC à cinq niveaux.	25
2.11	1ere configuration du 1ere bras.	25
2.12	2eme configuration du 1ere bras	26
2.13	3eme configuration du 1ere bras.	27
2.14	4eme configuration du 1ere bras.	27
2.15	5eme configuration du 1ere bras.	28

2.16	Forme d'onde de la tension de sortie d'un bras d'onduleur à cinq niveaux de type NPC	29
3.1	Différentes méthodes de modulation	34
3.2	Principe de la MLI triangulo-sinusoïdale pour onduleur monophasé.	35
3.3	Forme des signaux de commande, la tension de sortie et son spectre PWM à deux niveaux pour un onduleur monophasé en pont.	36
3.4	Références triphasées et porteuses.	37
3.5	Commande des interrupteurs du 1er bras	37
3.6	Tension simple V_{an}	38
3.7	Analyse FFT de la tension simple V_a	38
3.8	: Tension composée U_{ab}	39
3.9	: Analyse FFT de la tension composée U_{ab}	39
3.10	Courant de ligne I_a	40
3.11	Courants des lignes triphasées.	40
3.12	: Analyse FFT du courant de ligne I_a	41
3.13	Reference triphasée et porteuses	41
3.14	Commande des interrupteurs de 1er bras.	42
3.15	Tension simple V_a	43
3.16	: Analyse FFT de la tension simple V_{an}	43
3.17	Tension composée U_{ab}	44
3.18	: Analyse FFT de la tension composée U_{ab} en sortie d'un onduleur NPC à trois niveaux.	44
3.19	Courant de ligne I_a	45
3.20	Courants des lignes triphasés.	45
3.21	: Analyse FFT du courant de ligne I_a	46
4.1	Schéma de filtre passiver d'un onduleur 3 niveaux et 5 niveaux	49
4.2	Tension simple V_a	51
4.3	Analyse FFT de la tension simple V_{an}	51
4.4	Tension composée U_{ab}	52
4.5	Analyse FFT de la tension composée U_{ab} en sortie d'un onduleur NPC à cinq niveaux	52

4.6	: Tension simple V_{an}	53
4.7	: Analyse FFT de la tension simple V_{an} .	53
4.8	: Tension composée U_{ab}	54
4.9	: Analyse FFT de la tension composée U_{ab} .	54

Liste des tableaux

1.1	État des interrupteurs et tension de sortie V_{ao}	6
1.2	Comparaison des topologies d'onduleurs	14
2.1	État des interrupteurs et tension de sortie V_{ao}	22
2.2	État des interrupteurs et tension de sortie V_{ao}	28
2.3	Comparaison entre l'onduleur NPC à 3 niveaux et à 5 niveaux	30

Introduction Générale

L'évolution rapide des systèmes d'électronique de puissance et la demande croissante en énergie de qualité ont stimulé le développement de structures de conversion de plus en plus performantes. Parmi ces structures, les onduleurs multiniveaux se sont imposés comme une solution efficace pour la conversion d'énergie en moyenne et haute tension, notamment dans les domaines des énergies renouvelables, des entraînements de machines électriques, et du transport électrique.

L'objectif principal des onduleurs multiniveaux est de synthétiser une tension de sortie proche d'une sinusoïde idéale, tout en réduisant la distorsion harmonique et en limitant les contraintes de commutation sur les interrupteurs de puissance. Parmi les topologies les plus utilisées, l'onduleur de type NPC (Neutral Point Clamped) se distingue par sa capacité à fonctionner à plusieurs niveaux de tension, permettant une amélioration significative de la qualité de la tension et du courant.

Par ailleurs, la modulation en largeur d'impulsion (MLI) joue un rôle fondamental dans le pilotage des onduleurs multiniveaux. Elle permet de générer les signaux de commande des interrupteurs tout en contrôlant précisément les caractéristiques de la tension de sortie. La combinaison des structures NPC avec des techniques de MLI avancées permet ainsi d'obtenir des performances élevées, notamment en termes de réduction du THD (Total Harmonic Distortion) et de rendement énergétique.

Le présent travail s'articule autour de quatre chapitres complémentaires :

Le premier chapitre étudie un état de l'art sur les convertisseurs multiniveaux, en mettant l'accent sur leurs principes, classifications et applications.

Le deuxième chapitre propose une étude topologique et fonctionnelle détaillée des onduleurs NPC à trois et cinq niveaux.

Le troisième chapitre est consacré à la simulation de ces structures NPC sous modulation MLI, avec une analyse approfondie des résultats obtenus en termes de formes d'onde

et de THD.

Enfin, le quatrième chapitre traite des techniques d'amélioration de la qualité de la tension de sortie via l'utilisation de filtres passifs, et présente une évaluation comparative des performances avant et après filtrage.

Ce mémoire vise ainsi à mettre en évidence l'efficacité des onduleurs NPC multiniveaux associés à une modulation MLI adaptée, tout en proposant des solutions concrètes pour l'optimisation de la qualité de l'énergie délivrée.

Chapitre 1

Généralité sur les convertisseurs multi-niveaux

1.1 Introduction

Les convertisseurs multi-niveaux jouent un rôle essentiel dans le domaine de l'électronique de puissance, notamment pour les applications nécessitant une conversion efficace de l'énergie électrique. Contrairement aux convertisseurs classiques à deux niveaux, les structures multi-niveaux permettent d'améliorer la qualité des signaux, de réduire les contraintes sur les composants de puissance et d'optimiser le rendement énergétique. Ce chapitre explore les principes fondamentaux des convertisseurs multi-niveaux, en détaillant leurs principales topologies, leur classification et leurs avantages et inconvénients. Une comparaison entre les différentes structures est également réalisée afin d'identifier les solutions les plus adaptées aux applications industrielles et énergétiques.

1.2 Principe des convertisseurs multi-niveaux

Ce paragraphe présente les fondements théoriques des convertisseurs multi-niveaux, illustrés schématiquement par la Figure (1.1). Ce paragraphe vise à introduire le principe général du comportement multi-niveaux. La figure (1.1) illustre le fonctionnement des convertisseurs multi-niveaux. La figure (1.1.a) représente un convertisseur à deux niveaux, où les commutateurs semi-conducteurs sont modélisés par un interrupteur idéal. Dans ce cas, la tension de sortie ne peut prendre que deux valeurs : 0 ou V_{dc1} . La figure (1.1.b)

montre un convertisseur à trois niveaux, où la tension de sortie peut avoir trois valeurs : 0, V_{dc1} ou $V_{dc2} + V_{dc1}$. Enfin, la figure (1.1.c) présente le cas général d'un convertisseur à N niveaux [Ben09].

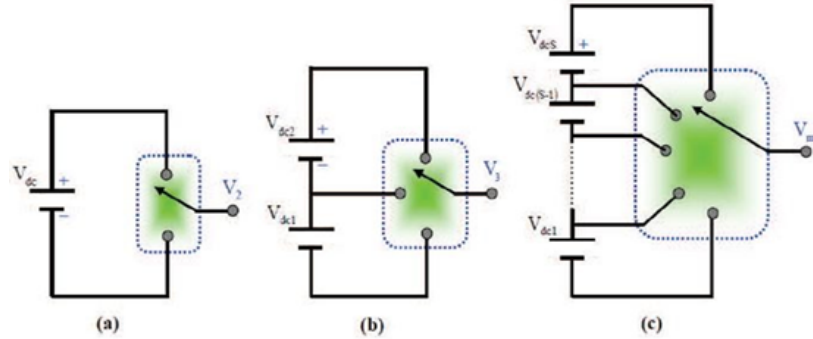


Figure 1.1 – Schéma d'un bras d'onduleur multi-niveaux multiples a deux (a), a trois (b) et a n niveaux (c)

1.2.1 Principales topologies des onduleurs multi-niveaux

Cette section présente les trois principales architectures des convertisseurs multini-veaux :

- La topologie à diodes de clamp (NPC - Neutral Point Clamped) :
 - Utilise des diodes de bouclage pour limiter la tension sur les interrupteurs.
 - Structure largement répandue en raison de sa simplicité et de sa robustesse.
- La topologie à condensateurs flottants (FC - Flying Capacitor) :
 - Également appelée topologie à cellules imbriquées.
 - Remplace les diodes par des condensateurs flottants pour équilibrer les niveaux de tension.
- La topologie en cascade (CHB - Cascaded H-Bridge) :
 - Basée sur l'association en série de ponts en H.
 - Permet une modularité et une extension facile du nombre de niveaux [DM16].

La figure (1.2) représente les topologies des onduleurs multi-niveaux les plus récentes :

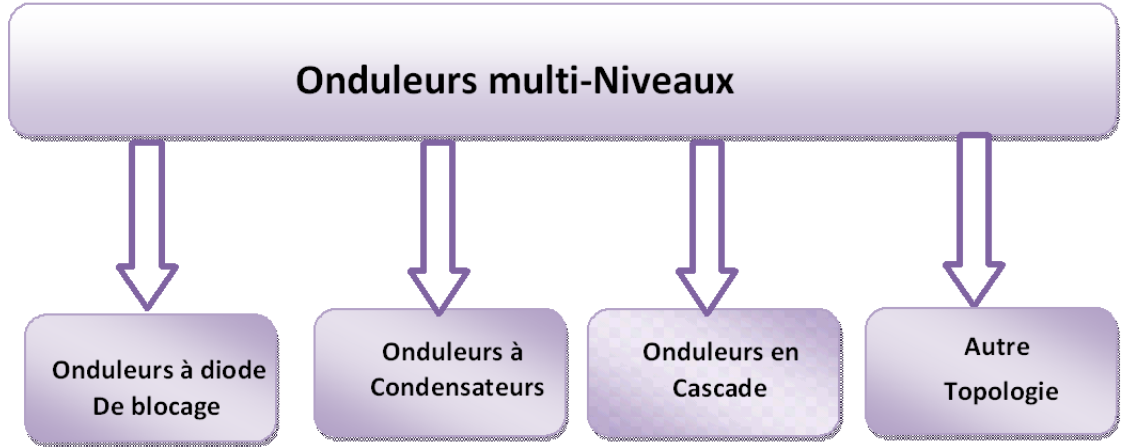


Figure 1.2 – Topologies des onduleurs multi-niveaux

1.3 Classification des convertisseur multi-niveaux

1.3.1 Convertisseur d'un onduleur a diode de blocage (NPC)

La topologie du convertisseur NPC (Neutral Point Clamped) a été introduite pour la première fois par Nabae et Akagi en 1981 [Ben09]. Son objectif principal était d'ajouter un niveau de tension intermédiaire à la sortie de l'onduleur, permettant ainsi une réduction significative des harmoniques. La figure(1.3) illustre la structure d'un convertisseur NPC (Neutral Point Clamped) trois niveaux, ainsi que les séquences de commutation associées à son fonctionnement [Abd16].

— **Séquence 1** : génération du niveau maximum

Dans ce cas, les interrupteurs k_{11} , k_{12} sont passants et k_{13} , k_{14} sont bloqués comme le montre la figure(1.3a) , et la tension de sortie V_{ao} à la valeur $+E/2$. La tension appliquée aux interrupteurs k_{11} , k_{14} vaut : $+E/2$.

— **Séquence 2** : génération du niveau intermédiaire

Les interrupteurs k_{12} , k_{13} sont passants et k_{11} , k_{14} sont bloqués, dans ce cas le point a est relié directement au point (o) à travers l'une des diodes de maintien, comme le montre la figure (1.3b). Et la tension de sortie V_{ao} est donc nulle, ($V_{ao}=0$). La tension appliquée aux interrupteurs k_{11} , k_{13} vaut : $(+E/2)$.

— **Séquence 3** : génération du niveau minimum

Dans ce cas, les interrupteurs k_{11} , k_{12} sont bloqués et k_{13} , k_{14} sont passants comme la montre figure (1.3c), Et la tension de sortie (V_{ao}) de $(-E/2)$. La tension

appliquée aux interrupteurs k_{11} , k_{12} vaut la valeur $(E/2)$.

Les trois états de commutation possibles sont résumés au tableau (1.1) l'état 1 représente l'interrupteur fermé et l'état 0 représente l'interrupteur ouvert [Cho18].

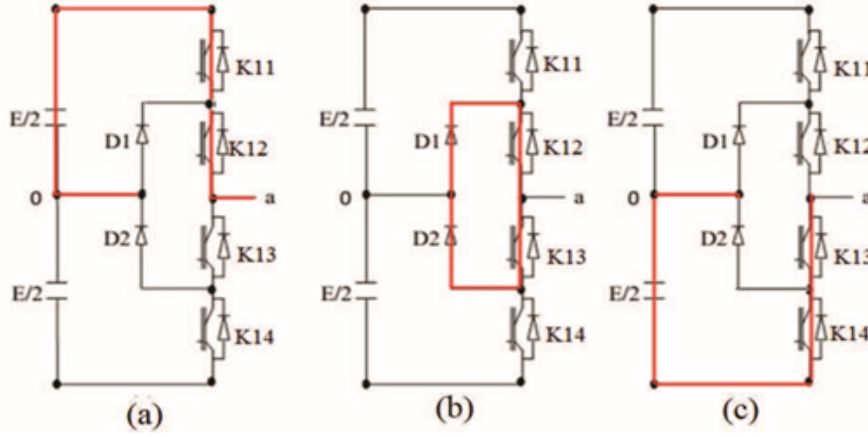


Figure 1.3 – Trois séquences de fonctionnement possible d'onduleur NPC à trois niveaux

K_{11}	K_{12}	K_{13}	K_{14}	Tension V_{ao}
1	1	0	0	$+E/2$
0	1	1	0	0
0	0	1	1	$-E/2$

Tableau 1.1 – État des interrupteurs et tension de sortie V_{ao}

Avantages de la topologie NPC :

La topologie NPC présente plusieurs avantages par rapport à la topologie de l'onduleur à deux niveaux :

- Les composants de puissance à semi-conducteur ne doivent bloquer qu'une tension inverse correspondant à la moitié de la tension de la source continue, ce qui réduit les exigences en termes de tenue en tension.
- Toutes les phases du convertisseur sont reliées à un même bus continu, ce qui simplifie la conception et la gestion de l'alimentation en courant continu.
- La méthode de contrôle utilisée est relativement simple, ce qui facilite la régulation et la mise en œuvre du système.
- La forme d'onde de sortie offre une meilleure qualité spectrale comparée à celle d'un onduleur triphasé classique, ce qui permet l'utilisation de filtres passifs de

taille réduite

- Réduction des Harmoniques : Grâce aux multiples niveaux, la distorsion harmonique (THD) est significativement réduite, améliorant la qualité de l'énergie injectée dans le réseau.

Inconvénients de la topologie NPC :

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

- Pour des topologies comportant plus de trois niveaux, les diodes de bouclage peuvent être soumises à une contrainte de tension atteignant, ce qui peut exiger la connexion en série de plusieurs diodes. Cette nécessité complique la conception, tout en posant des problèmes de fiabilité et en augmentant le coût de réalisation.
- Cette topologie requiert l'utilisation de diodes de bouclage à haute vitesse de commutation, capables de supporter le courant correspondant à la pleine charge.
- En raison du cycle de conduction des différents interrupteurs, il est nécessaire d'utiliser des appareils de commutation avec des calibres différents, ce qui complique le dimensionnement des composants [CKB11].

1.3.2 Convertisseur d'un onduleur condensateur flotteur :

Le concept du premier onduleur à condensateurs flottants (Flying Capacitors Inverter) a été proposé par Meynard en 1992. La Figure(1.4a) présente une topologie monophasée à trois niveaux de cet onduleur. Cette structure reprend le principe de base du convertisseur NPC, mais avec une modification essentielle : les diodes de clamping traditionnellement utilisées sont remplacées par des condensateurs flottants. Cette substitution permet non seulement de diviser les niveaux de tension de sortie, mais aussi de contribuer au lissage de la forme d'onde. L'utilisation de condensateurs comme éléments de clamping introduit cependant des défis supplémentaires en termes de gestion dynamique de la charge des condensateurs et de stabilité de la tension aux bornes [BEL18].

Pour un convertisseur à capacité flottantes de N niveaux, chaque bras doit contenir $(2N - 2)$ interrupteurs et $(N - 2)$ capacités [BER19].

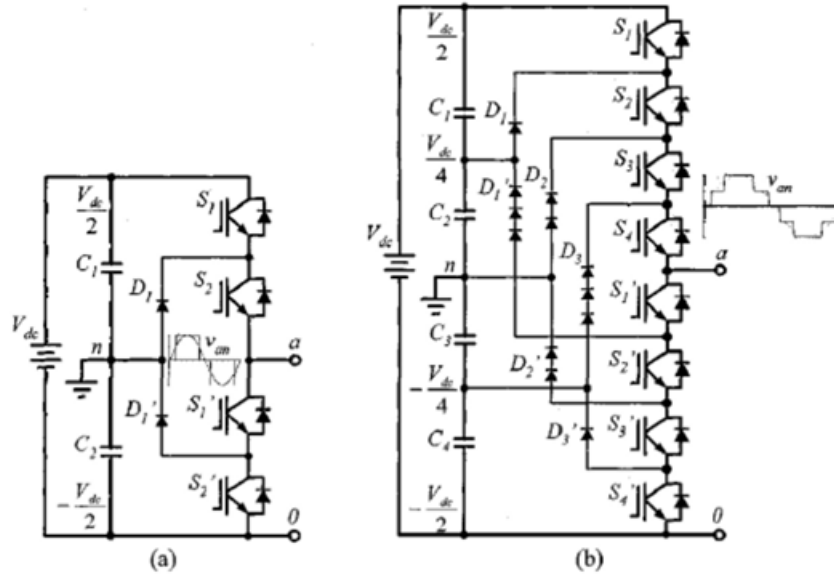


Figure 1.4 – Topologies de circuits d'onduleur multiniveaux à diodes de blocage — a) Trois niveaux, b) Cinq niveaux

Avantages de la topologie à condensateur flotteur :

Cette topologie présente les avantages suivants :

- La tension de blocage appliquée aux interrupteurs est uniformément répartie, ce qui facilite la sélection et la conception des composants semi-conducteurs.
- La structure est modulable et peut être généralisée à d'autres types de convertisseurs (DC-DC, DC-AC, AC-AC), permettant ainsi une flexibilité d'application aussi bien en transfert unidirectionnel qu'en transfert bidirectionnel de puissance.
- L'absence de mise en série des condensateurs entre les différents niveaux élimine le risque de déséquilibre de leur tension, simplifiant ainsi le contrôle et la stabilité du système.
- Elle élimine le problème des diodes de blocage dans la topologie NPC.
- La tension de blocage des interrupteurs est partout la même.
- L'absence de mise en série des condensateurs entre les différents niveaux élimine le risque de déséquilibre de leur tension, simplifiant ainsi le contrôle et la stabilité du système[Bou21].
- Puisqu'elle est modulaire l'existence pour un nombre de niveaux élevé est facile.
- Les condensateurs n'étant jamais mis en série entre niveaux différents, le problème du déséquilibre de leur tension n'existe plus [BER19].

Inconvénients de la topologie d'onduleur à condensateur flotteur :

Actuellement, cette topologie présente certains inconvénients techniques :

- Le contrôleur de la charge du condensateur ajoute la complexité au contrôle du circuit .
 - Peut exiger plus de condensateurs que la topologie de l'onduleur NPC.
 - La présence d'un potentiel de résonance parasite entre les condensateurs découplés.
- [BER19].

1.3.3 Convertisseurs d'un onduleur en cascade :

La topologie de l'onduleur en pont H en cascade a été introduite par Peng et al. (1996) dans le but de développer des onduleurs multi-niveaux plus simples et modulaires, adaptés aux applications de conversion de puissance à haute qualité. Cette solution visait à surmonter certaines des limitations des topologies d'onduleurs précédentes, notamment en matière de complexité et de coût.[Che14]. Le principe de fonctionnement de l'onduleur en pont H en cascade repose sur l'assemblage en série de plusieurs onduleurs monophasés à trois niveaux. Chaque onduleur est alimenté par une source de tension continue distincte. Ce système génère une tension de sortie à plusieurs niveaux en combinant les tensions des différentes sources d'alimentation. Pour un total de n onduleurs, la sortie peut comporter $(2n + 1)$ niveaux, permettant ainsi de réduire l'ondulation de la tension et d'améliorer la qualité du signal en comparaison avec les systèmes à moins de niveaux [PZW96].

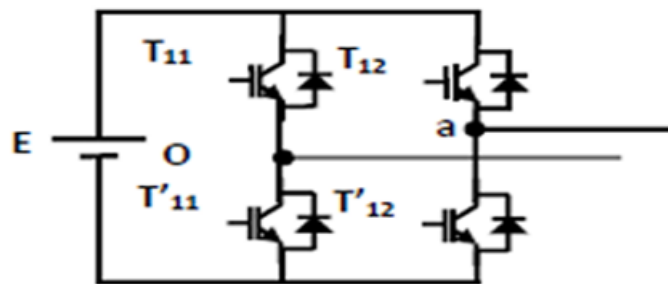


Figure 1.5 – onduleur en cascade à 3 niveaux

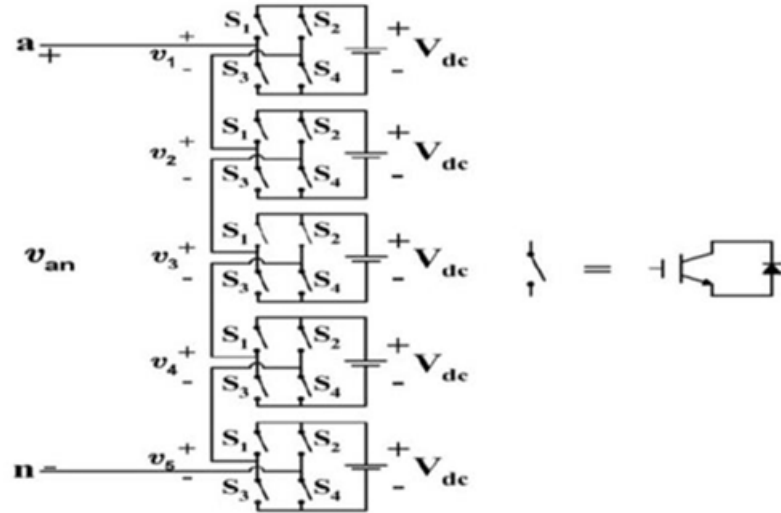


Figure 1.6 – onduleur en cascade à 5 niveaux

Avantage de la topologie d'onduleur en cascade :

La topologie en pont H en cascade présente plusieurs atouts majeurs qui expliquent son adoption dans de nombreuses applications de conversion de puissance :

- Modularité : La structure modulaire de cette topologie permet une extension facile du nombre de cellules par phase, sans introduire de complexité supplémentaire dans le contrôle ou l'assemblage. Chaque cellule fonctionne indépendamment avec une architecture identique, ce qui simplifie la conception globale du système [10].
- Simplicité de commande : Grâce à l'utilisation de sources de tension continue isolées pour chaque cellule, l'équilibrage des tensions est assuré de manière naturelle. Cette isolation entre les sources élimine le besoin de capacités d'équilibrage ou de diodes de clamping, ce qui allège la topologie [HL98].
- Uniformité de la tension de blocage : Tous les interrupteurs de la structure supportent la même tension de blocage, ce qui simplifie le choix des composants et améliore la fiabilité du système.
- Compatibilité avec des alimentations basses tensions : Il devient possible d'alimenter une charge moyenne ou haute tension à partir de plusieurs sources basses tensions, ce qui améliore la sécurité et réduit les exigences sur chaque source individuelle [Gue09].
- Le nombre de niveaux possibles de tension de sortie est plus que le double du

nombre de sources à courant continu ($N = 2s + 1$) [Cho18].

Inconvénients de la topologie de l'onduleur en cascade :

- Pour Nombre élevé d'interrupteurs électroniques : Pour un système triphasé, cette structure nécessite un nombre significativement plus important de dispositifs de commutation (IGBTs ou MOSFETs) comparé à un onduleur conventionnel à deux ou trois niveaux, ce qui augmente la complexité de la commande et le coût global [RLP02].
- Équilibrage des sources continues (DC) : Chaque pont en H requiert une source DC indépendante. Il est crucial de maintenir un équilibrage de tension entre ces sources pour garantir une qualité de tension en sortie et éviter des déséquilibres de modulation [LP96].
- Complexité du câblage : L'utilisation de multiples sources DC implique un besoin accru de connexions et de câbles, ce qui complique le câblage, augmente le volume et le poids du système [PRGM10].
- Augmentation du volume et de la maintenance : L'intégration de plusieurs modules en cascade augmente la taille physique de l'onduleur, ainsi que le besoin en maintenance en raison du nombre élevé de composants [FRL⁺08].
- Rendement sensible à l'équilibrage des charges : Une mauvaise répartition de la charge entre les différents niveaux peut réduire le rendement global du système [BSW⁺05].
- Systèmes de contrôle plus complexes : La génération des signaux de commande (PWM) est plus complexe en raison du nombre accru de niveaux et d'interrupteurs, nécessitant des algorithmes sophistiqués et des capacités de calcul supérieures [TPH99].

1.3.4 Autres topologies :

En plus des trois topologies de base précédemment abordées, plusieurs autres structures ont été proposées. La plupart d'entre elles reposent sur des circuits hybrides, combinant deux topologies fondamentales ou apportant des modifications mineures à ces dernières. Parmi ces topologies, on distingue :

- Le convertisseur hybride asymétrique :

- Il associe différentes structures avec des niveaux de tension asymétriques afin d'améliorer le rendement et de réduire le nombre de composants.
- Une configuration courante consiste en des ponts H en cascade alimentés par des sources de tensions distinctes, permettant ainsi une réduction de la distorsion harmonique.
- Le convertisseur à ponts en cascade avec sources CC/CC isolées :
 - Variante du Cascade H-Bridge (CHB) où chaque module est alimenté par une source CC isolée ou un convertisseur CC/CC avec isolement galvanique.
 - Cette architecture offre une meilleure régulation de la tension et une flexibilité accrue.
- Le convertisseur basé sur des topologies multi-niveaux en cascade :
 - Extension du CHB, combinant plusieurs cellules élémentaires en série afin d'augmenter le nombre de niveaux de tension.
 - Permet d'obtenir une tension de sortie de meilleure qualité et de réduire les contraintes appliquées aux semi-conducteurs.
- Le convertisseur avec commutation douce :
 - Il intègre des techniques de commutation douce telles que le Zéro Voltage Switch ING (ZVS) ou le Zéro Curent Switch ING (ZCS) pour limiter les pertes de commutation et améliorer l'efficacité énergétique.
 - Couramment utilisé dans les applications de puissance élevée.
- Les convertisseurs interconnectés par transformateur :
 - L'utilisation d'un transformateur permet d'isoler les différentes cellules et de faciliter l'adaptation des niveaux de tension.
 - Peut être combiné avec d'autres topologies pour renforcer la modularité et la fiabilité.
- Le convertisseur Diode/Capacitor-Clamped :
 - Variante du Neutral Point Clamped (NPC) intégrant des condensateurs pour équilibrer les tensions intermédiaires, réduisant ainsi le nombre de diodes nécessaires.
- Le convertisseur New Diode-Clamped :
 - Une évolution du NPC, optimisant la gestion des tensions intermédiaires et réduisant les pertes dans les composants.

- Le convertisseur multi-niveaux généralisé :
 - Un concept flexible regroupant différentes structures où les niveaux de tension sont générés via diverses combinaisons de condensateurs, diodes et sources CC.
 - Permet une adaptation plus large aux exigences spécifiques des applications.
 - Ces topologies avancées visent principalement à réduire les pertes, améliorer la qualité de la tension de sortie et minimiser le nombre de composants, ce qui les rend particulièrement adaptées aux domaines industriels, au transport et à la production d'énergie renouvelable.[CHO]

En plus des topologies mentionnées ci-dessus, de nombreuses autres ont été proposées et publiées dans la littérature, dépassant ainsi la portée de ce rapport. Certaines des nouvelles topologies introduites sont illustrées comme suit : La figure (1.7) montre un onduleur à cinq niveaux (Abd Rahim, Mohamad Elias et Hew ; Ceglia et al., 2006). Dans cette topologie, un demi-pont (HB) avec deux condensateurs de courant continu est utilisé, où le point milieu des condensateurs est connecté à la charge via un interrupteur auxiliaire et quatre diodes de serrage. Ce circuit auxiliaire permet de créer deux

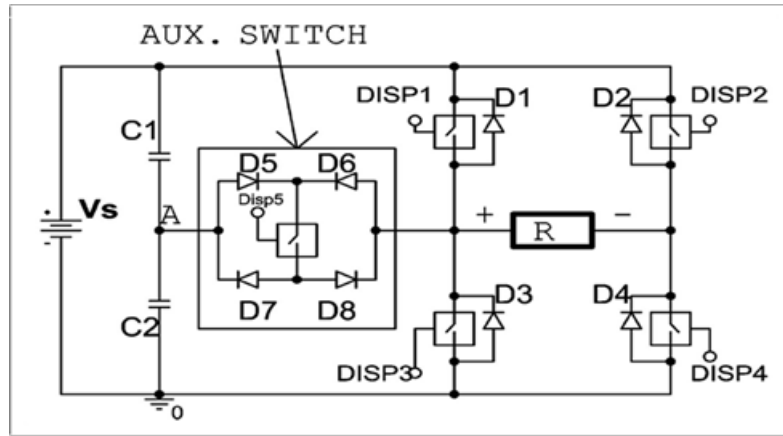


Figure 1.7 – onduleur simplifié à cinq niveaux

niveaux supplémentaires en plus des trois niveaux de sortie du demi-pont, ce qui donne une onde de sortie à cinq niveaux ($V_s, sV_s/2, 0$). La topologie ci-dessus génère une tension V_s plus élevée, égale à sa source de courant continu. De plus, la fréquence de commutation du modèle implémenté était élevée, ce qui le rend inadapté aux applications de forte puissance [Vah16].

1.4 Comparaison entre les trois principaux convertisseurs multi-niveaux :

À partir du tableau (1.2), on peut comparer les différentes topologies d'onduleurs en termes de nombre de commutateurs principaux et de diodes principales nécessaires pour atteindre un certain nombre de niveaux de tension. Dans les configurations à condensateurs imbriqués (Flying Capacitor) et à onduleur en cascade (CHB – Cascaded H-Bridge), l'utilisation de diodes supplémentaires n'est pas requise. De plus, les condensateurs d'équilibrage de tension ne sont pas indispensables dans les structures à diodes clampées (Diode Clamped) ni dans les onduleurs en cascade. Cela indique que la topologie en cascade requiert moins de composants passifs et actifs, ce qui simplifie le système. Un autre avantage notable de l'onduleur en cascade réside dans sa flexibilité architecturale. En effet, grâce à la structure identique et modulaire de chaque cellule (pont en H), la disposition du circuit de modulation est facilitée. Contrairement aux autres topologies, aucune diode clampée ou condensateur d'équilibrage supplémentaire n'est nécessaire. De plus, le nombre de niveaux de tension en sortie peut être aisément ajusté en ajoutant ou en retirant des cellules, ce qui rend cette configuration particulièrement adaptée aux applications évolutives [Cho18].

Topologie	n	s	K	D	D _c	C
Onduleur à trois niveaux						
NPC	3	2	4	4	2	0
Cellules imbriquées	3	2	4	4	0	1
Cascade	3	1	4	4	0	0
Onduleur à cinq niveaux						
NPC	5	4	8	8	12	0
Cellules imbriquées	5	4	8	8	0	6
Cascade	5	2	8	8	0	0
Onduleur à n niveaux						
NPC	n	(n-1)	2(n-1)	2(n-1)	(n-1)(n-2)	0
Cellules imbriquées	n	(n-1)	2(n-1)	2(n-1)	0	(n-1)(n-2)/2
Cascade	n	(n-1)/2	2(n-1)	2(n-1)	0	0

Tableau 1.2 – Comparaison des topologies d'onduleurs

Du point de vue nombre de composants, l'onduleur en cascade paraît être la solution multi-niveau la plus avantageuse, surtout lorsque le nombre de niveaux devient important. Avec :

- **n** : le nombre de niveaux de tension obtenus.
- **S** : le nombre de sources à courant continu.
- **K** : le nombre de commutateurs principaux.
- **D** : le nombre de diodes principales.
- **D_c** : le nombre des diodes clampées.
- **C** : le nombre de condensateurs d'équilibrage.

1.5 Applications des convertisseurs multiniveaux :

Les convertisseurs multiniveaux sont devenus incontournables dans de nombreuses applications industrielles et énergétiques grâce à leur capacité à générer des tensions de haute qualité avec une faible distorsion harmonique, tout en assurant un meilleur rendement énergétique. Leurs principales applications comprennent :

- **Variateurs de vitesse pour moteurs à moyenne et haute tension :**

Les convertisseurs multiniveaux permettent un pilotage précis du couple et de la vitesse des moteurs asynchrones et synchrones, utilisés dans les procédés industriels lourds. Cela favorise une réduction des pertes, une amélioration du facteur de puissance et une meilleure efficacité énergétique globale [RLP02].

- **Transmission d'énergie en courant continu haute tension (HVDC) :**

Grâce à leur capacité à supporter des tensions élevées avec une commutation à faible fréquence, ces convertisseurs sont adaptés au transport de l'électricité sur de longues distances, avec une réduction significative des pertes en ligne et une amélioration de la stabilité du réseau [LM03].

- **Compensateurs statiques d'énergie réactive (STATCOM) :**

Les convertisseurs multiniveaux sont utilisés dans les STATCOM pour réguler dynamiquement la tension du réseau en injectant ou absorbant de la puissance réactive, ce qui améliore la stabilité et la qualité de l'alimentation électrique [BSW⁺05].

- **Filtres actifs de puissance (APF) :**

Grâce à leur capacité de génération de signaux de tension à faible distorsion, les convertisseurs multiniveaux sont idéaux pour éliminer les harmoniques et corriger les déséquilibres de courant dans les systèmes électriques complexes [WNSC05].

- **Systèmes de traction ferroviaire :**

Dans les applications ferroviaires, notamment les propulseurs de trains électriques, les convertisseurs multiniveaux permettent une conversion efficace et fiable de l'énergie, tout en assurant un fonctionnement silencieux et durable [KMG⁺10].

— **Réseaux électriques intelligents (Smart Grids) :**

Les convertisseurs multiniveaux facilitent l'intégration des énergies renouvelables (solaire, éolien) et participent à une gestion dynamique et décentralisée de l'énergie, en améliorant la résilience et la flexibilité du réseau électrique [YI10].

1.6 Conclusion :

L'étude des convertisseurs multi-niveaux met en évidence leur intérêt majeur pour les systèmes de conversion de puissance, notamment dans les domaines de l'entraînement électrique, des réseaux intelligents et des énergies renouvelables. Grâce à leurs différentes topologies, ils permettent une flexibilité accrue et une meilleure qualité des tensions de sortie. Toutefois, chaque structure présente des défis spécifiques en termes de complexité de commande, de coût et de fiabilité. L'analyse comparative a permis de démontrer que l'onduleur en cascade offre une solution avantageuse en raison de son évolutivité et de son efficacité en haute tension. Ces travaux ouvrent ainsi la voie à des recherches futures sur l'optimisation des stratégies de commande et l'intégration de nouvelles technologies de semi-conducteurs pour améliorer encore les performances des convertisseurs multi-niveaux.

Chapitre 2

Analyse Topologique et Fonctionnelle des Onduleurs NPC à Trois et Cinq Niveaux

2.1 Introduction

Au cours des dernières décennies, les convertisseurs multiniveaux ont suscité un intérêt croissant dans le domaine de l'électronique de puissance, notamment dans les applications à moyenne et haute tension. Ces structures permettent d'améliorer significativement la qualité de la tension de sortie tout en réduisant le taux de distorsion harmonique (THD), les pertes de commutation et les contraintes imposées aux composants. Parmi ces topologies, le convertisseur à diodes de blocage ou Neutral Point Clamped (NPC) s'impose comme une solution performante et robuste, répondant aux exigences des systèmes industriels modernes. Ce chapitre présente une étude approfondie des structures NPC à trois et cinq niveaux. Il s'articule autour de la description détaillée de leur architecture, du fonctionnement des interrupteurs, des différentes configurations de commutation possibles, et se conclut par une comparaison technique basée sur plusieurs critères de performance, tels que la qualité de la tension, la complexité de commande et la fiabilité globale.

2.2 Convertisseur d'un onduleur a diode de blocage (NPC)

2.2.1 Structure de l'onduleur à trois niveaux :

La figure (2.1) illustre une architecture typique de conversion indirecte AC-AC, comprenant un redresseur triphasé à diodes, suivi d'un filtre de tension constitué d'une inductance et de deux condensateurs connectés en point milieu. Ce filtre génère les deux tensions continues requises pour alimenter un onduleur de tension triphasé à trois niveaux. Celui-ci fournit ensuite l'énergie à une charge triphasée équilibrée de nature inductive, connectée en étoile avec un neutre isolé.

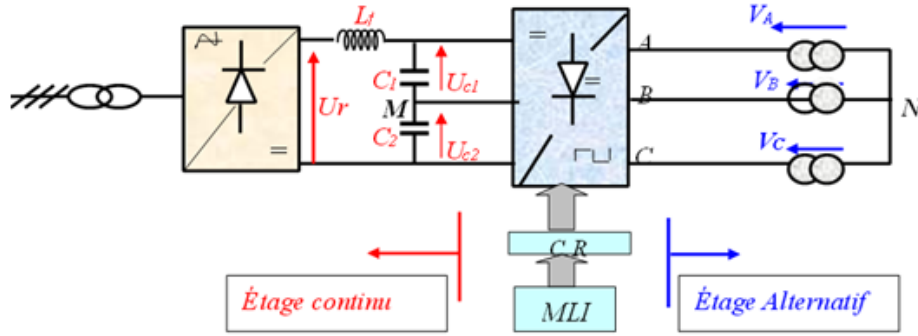


Figure 2.1 – Structure d'une conversion indirecte AC/AC

La figure (2.2) représente la structure topologique d'un onduleur triphasé à trois niveaux, constitué de trois bras monophasés. La tension continue principale est divisée à l'aide d'un pont capacitif formé par deux condensateurs de filtrage identiques et, créant ainsi deux sources secondaires délivrant chacune une tension d . Cette disposition génère un point neutre au milieu des condensateurs. L'égalité des capacités garantit l'équilibrage des tensions et évite tout déséquilibre de charge[Fad06].

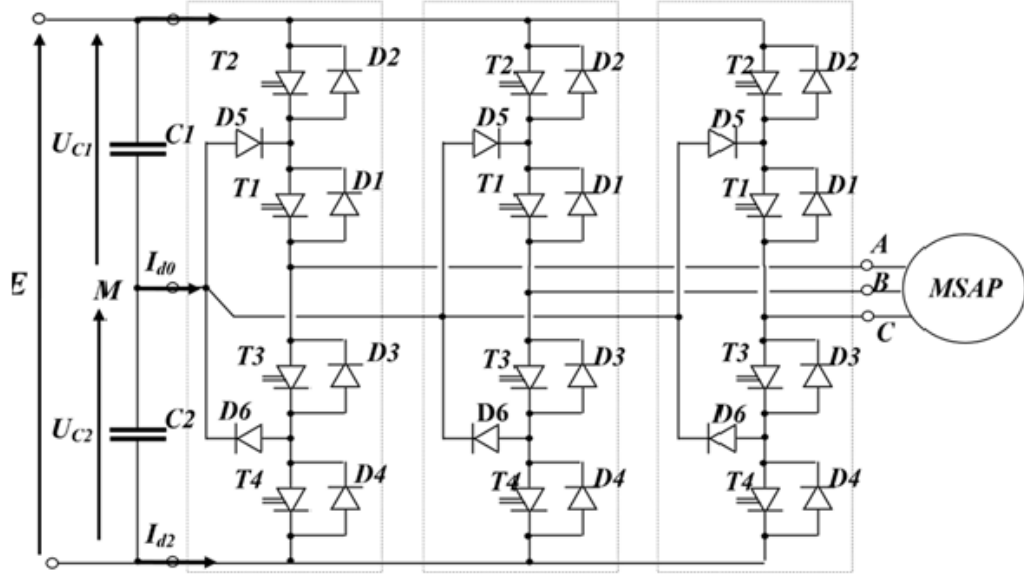


Figure 2.2 – Schéma d'un onduleur NPC à 3 niveaux

Afin de réduire la complexité de l'onduleur à trois niveaux, chaque paire transistor-diode est représentée par un interrupteur bidirectionnel unique TDKS (2.3a). De plus, grâce à la symétrie de la structure, seule la configuration d'un bras monophasé est illustrée (2.3b).



Figure 2.3 – : Interrupteur bidirectionnel équivalent de la paire Transistor – diode

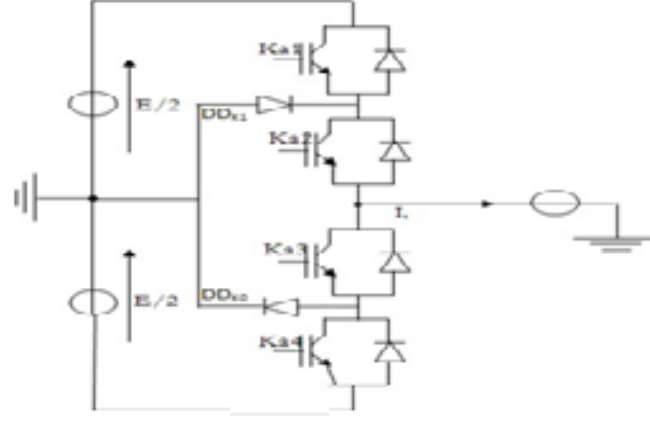


Figure 2.4 – Un bras de l'onduleur à trois niveaux de type NPC

L'onduleur NPC à trois niveaux est représenté par un bras sur la figure(2.4) Le bus continu d'entrée est composé de deux sources continues en série (E_1 et E_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. La tension totale du bus continu vaut E ; dans les conditions normales de fonctionnement, celle-ci est uniformément répartie sur les deux sources qui possèdent alors une tension ($E/2$) à leurs bornes. Chacun des trois bras (a, b et c) de l'onduleur est composé de quatre interrupteurs commandés (k_1 , k_2 , k_3 et k_4 , pour le bras a) et deux diodes de maintien connectées au point milieu du bus continu. Les interrupteurs commandés sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant : il s'agit d'associations classiques d'un transistor et d'une diode en antiparallèle [Ras14].

2.2.2 Configurations et fonctionnement d'un bras de l'onduleur à trois niveaux :

Il faut déterminer les valeurs que peut prendre la tension simple V_{ao} entre la borne (a) de la charge et le point neutre 0. Cette tension est entièrement définie par l'état(0ou1) des quatre interrupteurs k_{a1} , k_{a2} , k_{a3} et k_{a4} du bras.

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

peut se limiter au fonctionnement d'un seul bras, (où on distingue trois configurations possibles). On donne ci dessous le tableau récapitulatif tableau (2.1) représente la tension de sortie V_{ao} d'un onduleur NPC à trois niveaux en fonction de l'état des interrupteurs, la tension à la borne des interrupteurs de puissance n'excède jamais la moitié du bus d'entrée. A la différence de l'onduleur à deux niveaux, chaque demi-bas de l'onduleur à trois niveaux utilisés non pas un interrupteur bidirectionnel mais deux, ce qui permet d'effectuer une commande décalée.

— **Première configuration :**

k_{a1} , k_{a2} sont passants et k_{a3} et k_{a4} sont bloqués. figure (2.5), la valeur de tension simple V_{ao} est donnée par l'équation suivante : $V_{ao} = +E/2$ La tension inverse aux bornes des interrupteurs bloqués est : $V_{k_{a3}} = V_{k_{a4}} = +E/2$

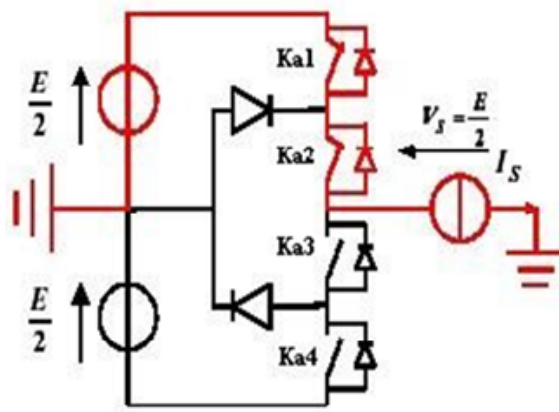


Figure 2.5 – Première configuration du Première bra

— **Deuxième configuration :**

k_{a2} , k_{a3} sont passants et k_{a1} et k_{a4} sont bloqués Figure(2.6), le point a est relié directement au point neutre 0. La tension simple V_{ao} est nulle : $V_{ao} = 0$ La tension inverse aux bornes des interrupteurs bloqués est : $V_{k_{a1}} = V_{k_{a4}} = +E/2$

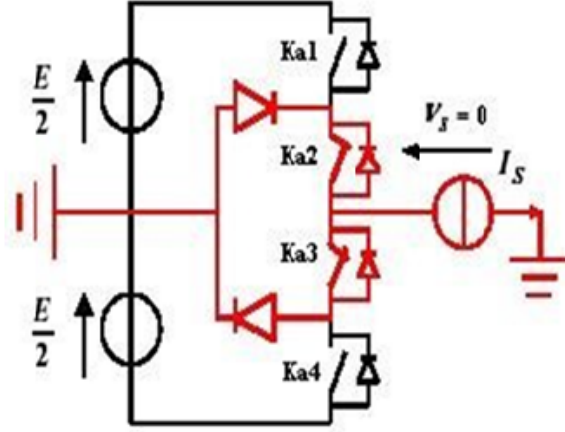


Figure 2.6 – Deuxième configuration du Première bra

— **Troisième configuration :**

K_{a3} , K_{a4} sont passants et K_{a1} et K_{a2} sont bloqués figure (2.7), la valeur de tension simple V_{ao} est donnée par l'équation suivante : $V_{ao} = -E/2$ La tension inverse aux bornes des interrupteurs bloqués est : $V_{ka1} = V_{ka2} = +E/2$

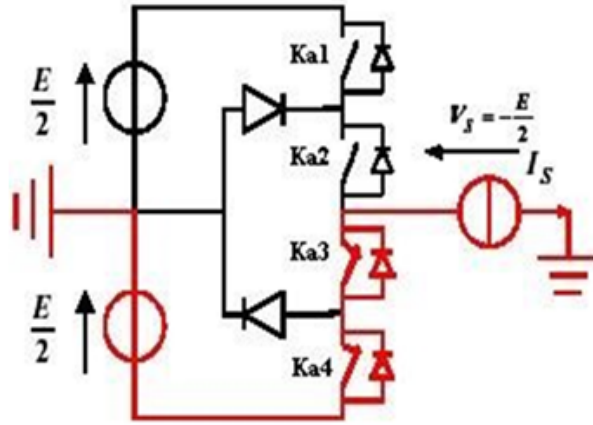


Figure 2.7 – Troisième configuration du Première bra

K_{a1}	K_{a2}	K_{a3}	K_{a4}	Tension V_{ao}
1	1	0	0	$+E/2$
0	1	1	0	0
0	0	1	1	$-E/2$

Tableau 2.1 – État des interrupteurs et tension de sortie V_{ao}

Pour visualiser l'enchainement des configurations décrites ci-dessus, la figure(2.8) représente les signaux de commande de chaque interrupteur, ainsi que la forme d'onde de

la tension de sortie V_{ao} [Hou10].

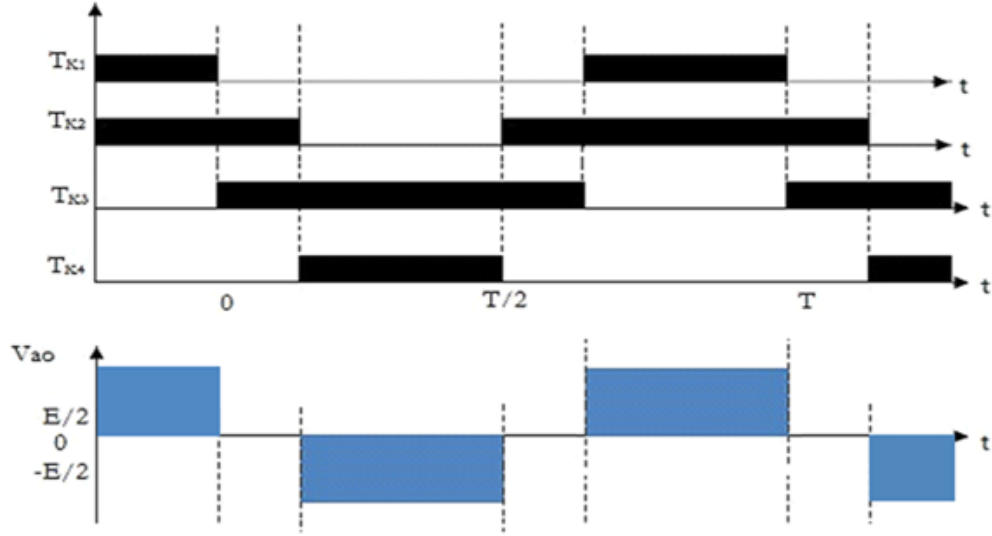


Figure 2.8 – Forme d’onde de la tension de sortie d’un bras D’onduleur à trois niveaux de type NPC

2.3 Structure Onduleur à cinq niveaux de type NPC :

L’onduleur triphasé à cinq niveaux à structure NPC (Neural Point clamping) étudié est constitué de trois (3) bras et quatre (4) sources de tension continue. Chaque bras comporte huit (8) interrupteurs, six (6) en série et les deux autres en parallèle, plus deux (2) diodes. Chaque interrupteur est composé d’un transistor et une diode montés en tête bêche. La figure (2.9) donne une représentation schématique de cet onduleur. Afin d’élaborer un modèle de fonctionnement de cet onduleur sans à priori sur la commande, et réduire le nombre de places du réseau de Petri correspondant, on représente chaque paire transistor (Tks)- diode I) ks) par un seul interrupteur bidirectionnel (TDks) [Ame98]. *struct*

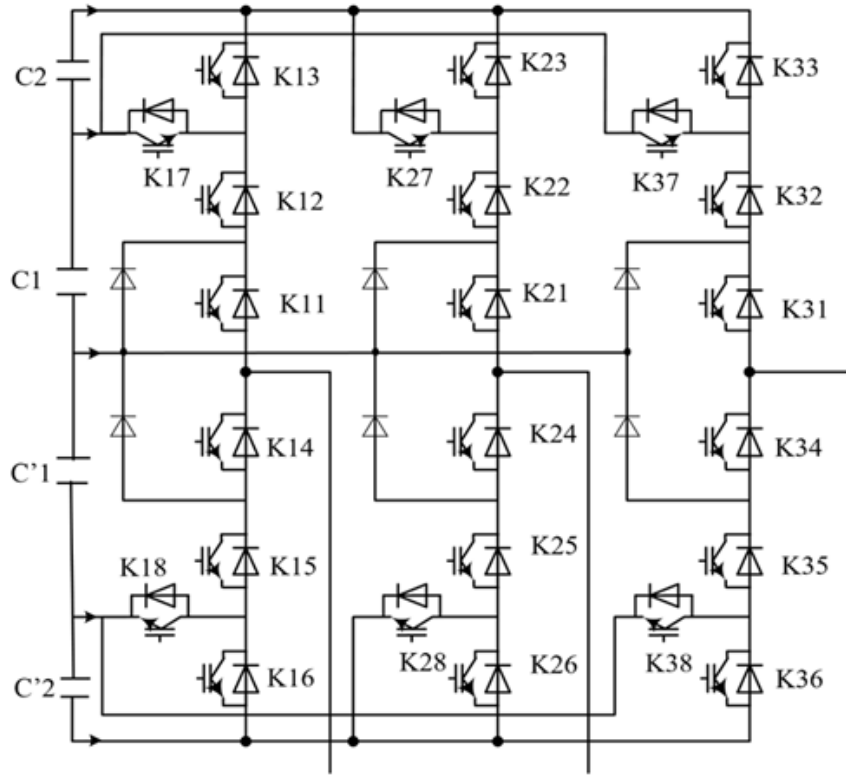


Figure 2.9 – Schéma d'un onduleur NPC à cinq niveaux.

2.3.1 Principe de fonctionnement :

Pour déterminer la séquence de fonctionnement de l'onduleur, il est nécessaire d'identifier au préalable les différents états que peut adopter la tension simple. Un seul bras de Commutation peut théoriquement présenter $2^5 = 32$ combinaisons, représentées par des quadruplets composés de 0 et de 1. Toutefois, seuls cinq états sont réellement exploitables. La figure (2.10) illustre de manière schématique un bras typique de cet onduleur [BE20].

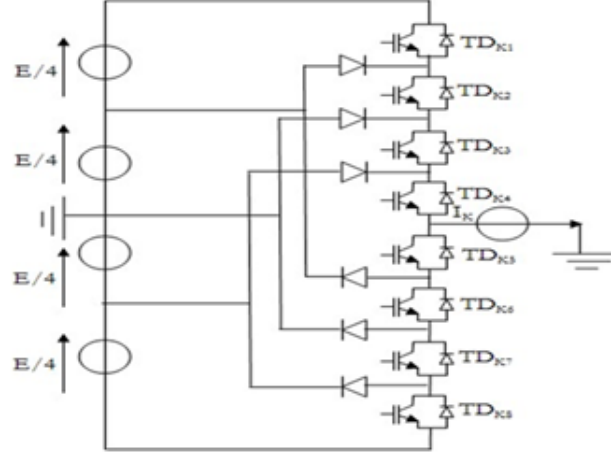


Figure 2.10 – Bras d'un onduleur NPC à cinq niveaux.

2.3.2 Différentes configurations d'un bras de l'onduleur NPC à cinq niveaux :

Pour ce type d'onduleur, seules cinq séquences sont fonctionnelles. Elles sont d'écrites comme suit :

— **Première configuration :**

K_{a1} , K_{a2} , K_{a3} et K_{a4} sont passants et K_{a5} , K_{a6} , K_{a7} et K_{a8} sont bloqués, figure (2.11)

- La tension de sortie est : $V_{ao} = +E/2$
- La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est : $V_{ka5} = V_{ka6} = V_{ka7} = V_{ka8} = +E/4$

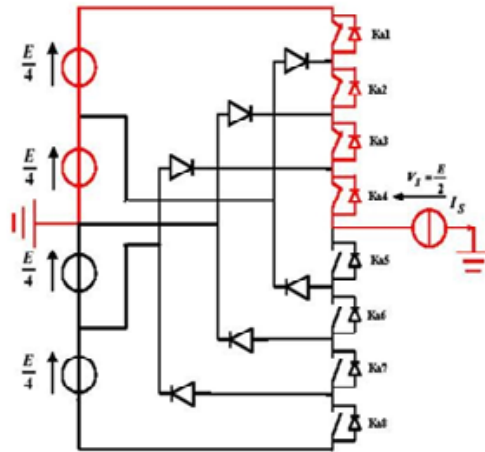


Figure 2.11 – 1ere configuration du 1ere bras.

— **Deuxième configuration :**

K_{a2}, K_{a3}, K_{a4} , et K_{a5} , sont passants et K_{a6}, K_{a7}, K_{a8} et K_{a1} sont bloqués figure (2.12), la valeur de tension simple V_{ao} est donnée par l'équation suivante : $V_{ao} = +E/4$ La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est : $V_{ka1}=V_{ka6} = V_{ka7} = V_{ka8} = +E/4$

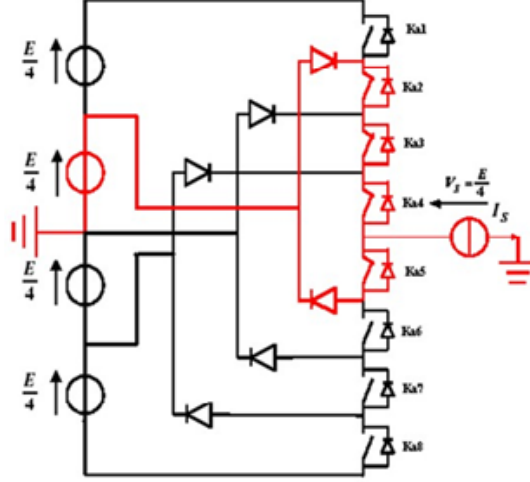


Figure 2.12 – 2eme configuration du 1ere bras

— Troisième configuration :

K_{a3}, K_{a4}, K_{a4} et K_{a6} sont passants et K_{a7}, K_{a8}, K_{a1} et K_{a2} sont bloqués figure (2.13), la valeur de tension simple V_{ao} est donnée par l'équation suivante : $V_{ao} = 0$ La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est : $V_{ka1} = V_{ka2} = V_{ka7} = V_{ka8} = +E/4$

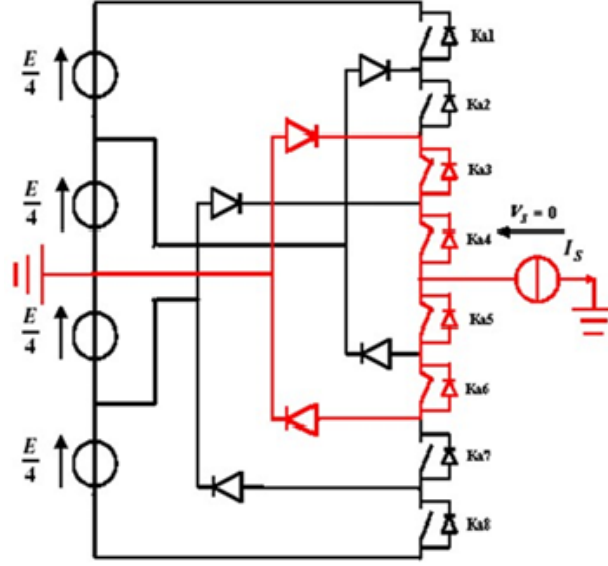


Figure 2.13 – 3eme configuration du 1ere bras.

— Quatrième configuration :

K_{a4} , K_{a5} , K_{a6} et K_{a7} sont passants et K_{a8} , K_{a1} , K_{a2} et K_{a3} sont bloqués figure(2.14), la valeur de tension simple V_{ao} est donnée par l'équation suivante : $V_{ao} = -E/4$ La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est : $V_{ka1} = V_{ka2} = V_{ka3} = V_{ka8} = +E/4$

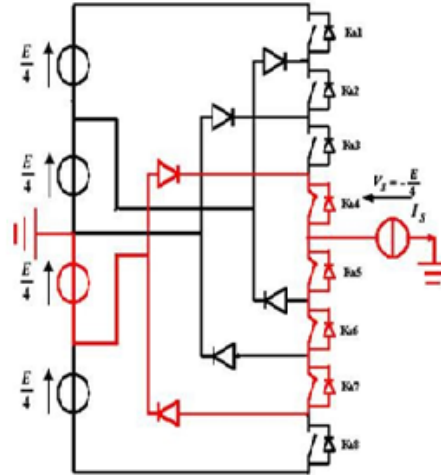


Figure 2.14 – 4eme configuration du 1ere bras.

— Cinquième configuration :

K_{a5} , K_{a6} , K_{a7} et K_{a8} sont passants et K_{a1} , K_{a2} , K_{a3} et K_{a4} sont bloqués figure(2.15), la

valeur de tension simple V_{ao} est donnée par l'équation suivante : $V_{ao} = -E/2$ La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est : $V_{ka1} = V_{ka2} = V_{ka3} = V_{ka4} = +E/4$ [Hou10].

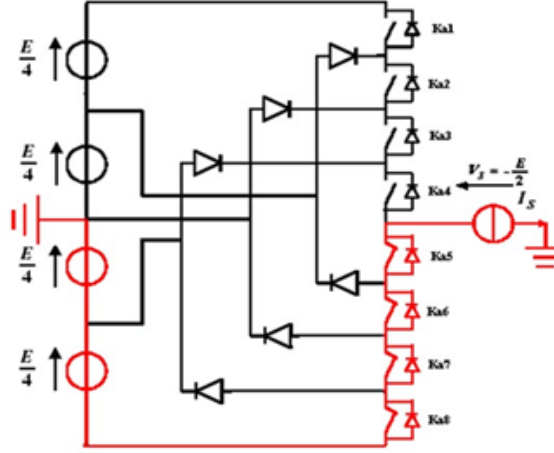


Figure 2.15 – 5eme configuration du 1ere bras.

Le tableau (2.2) : représente la table d'excitation des interrupteurs de l'onduleur à cinq niveaux :

K_{a1}	K_{a2}	K_{a3}	K_{a4}	K_{a5}	K_{a6}	K_{a7}	K_{a8}	Tension V_{ao}
1	1	1	1	0	0	0	0	$E/2$
0	1	1	1	1	0	0	0	$E/4$
0	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	0	$E/4$
0	0	0	0	1	1	1	1	$E/2$

Tableau 2.2 – État des interrupteurs et tension de sortie V_{ao}

La figure ci-dessous montre la forme d'onde de la tension de sortie V_{ao} et le signal de commande de chaque interrupteur :

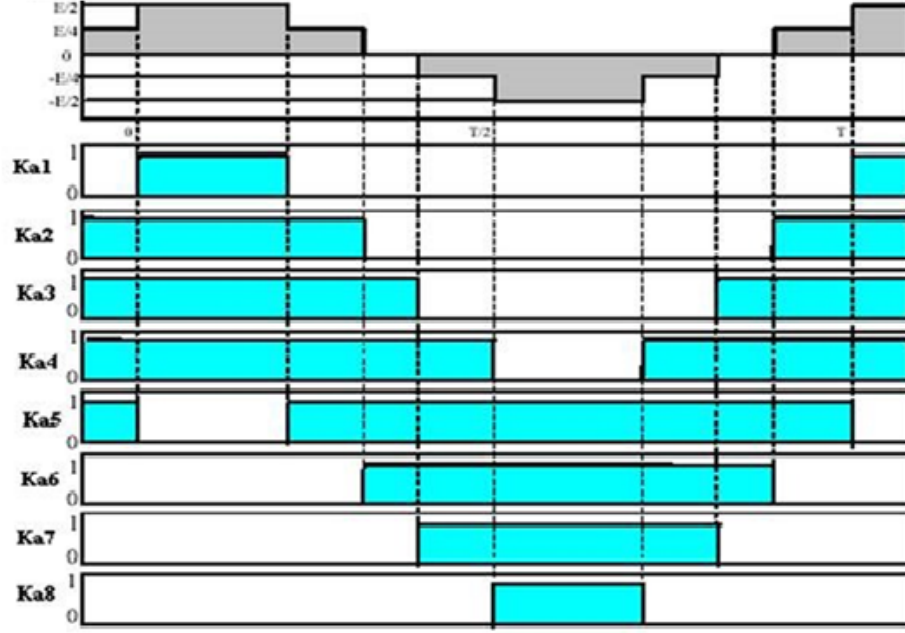


Figure 2.16 – Forme d’onde de la tension de sortie d’un bras d’onduleur à cinq niveaux de type NPC

2.4 Comparaison d’onduleur NPC 3 niveaux et NPC 5 niveaux :

Avant de présenter le tableau comparatif, il convient de définir les critères utilisés pour évaluer les performances des onduleurs NPC à 3 niveaux et à 5 niveaux. Le tableau (2.3) synthétise divers aspects clés, tels que le nombre de niveaux de tension en sortie, le nombre d’IGBTs et de diodes de clamping par phase, la qualité de la tension de sortie (mesurée par le THD), les pertes de commutation, la complexité du contrôle, ainsi que la fiabilité et le coût. Ces critères permettent de mieux comprendre les avantages et les limitations de chaque topologie, facilitant ainsi le choix en fonction des exigences spécifiques des applications envisagées [RLP02].[FRL⁺08].

Critères de comparaison	Onduleur NPC 3 niveaux	Onduleur NPC 5 niveaux
Niveaux de tension en sortie	3 ($-V_{dc}/2, 0, +V_{dc}/2$)	5 ($-V_{dc}, -V_{dc}/2, 0, +V_{dc}/2, +V_{dc}$)
Nombre d'IGBTs par phase	Environ 4	Environ 8
Nombre de diodes de clamp	Environ 2	Environ 6
Qualité de la tension de sortie (THD)	Bonne qualité	Meilleure qualité (THD réduit)
Pertes de commutation	Moindres	Plus élevées en raison du nombre accru de composants
Complexité du contrôle	Moyenne	Élevée
Fiabilité et coût	Simplicité relative, coût moindre	Complexité accrue pouvant entraîner un coût plus élevé
Applications idéales	Systèmes de moyenne tension, entraînements de moteurs	Applications nécessitant une haute précision et de meilleurs rendements (énergies renouvelables, réseaux intelligents)

Tableau 2.3 – Comparaison entre l'onduleur NPC à 3 niveaux et à 5 niveaux

2.5 Conclusion :

Ce chapitre a permis de mettre en évidence les principes de fonctionnement et les caractéristiques structurelles des convertisseurs multiniveaux de type NPC, en se concentrant sur les versions à trois et cinq niveaux. L'analyse a montré que le convertisseur NPC à trois niveaux se distingue par une architecture plus simple et une commande modérément complexe, adaptée aux applications à tension moyenne. En revanche, le convertisseur NPC à cinq niveaux offre une meilleure qualité de la tension de sortie, avec une réduction

significative du THD, au prix d'une augmentation du nombre de composants et de la complexité du système de commande. La comparaison effectuée démontre que le choix de la topologie dépend fortement des exigences de l'application cible : rendement, qualité de la tension, coût et fiabilité. Les convertisseurs NPC constituent ainsi une solution efficace pour les systèmes nécessitant une conversion d'énergie précise, fiable et à haut rendement, notamment dans les domaines des énergies renouvelables, des entraînements industriels avancés et des réseaux intelligents.

Chapitre 3

Étude et Simulation d'un Onduleur Multiniveaux NPC par Modulation MLI

3.1 Introduction

Ce chapitre présente une étude approfondie de la simulation d'un onduleur multiniveaux de type NPC (Neutral Point Clamped) à trois et cinq niveaux, utilisant la technique de modulation en largeur d'impulsion (MLI). Les onduleurs multiniveaux sont devenus une solution incontournable pour les applications de moyenne et haute tension, offrant des avantages significatifs en termes de qualité de tension, réduction des harmoniques et efficacité énergétique. La modulation MLI, adaptée aux architectures multiniveaux, permet de générer des signaux de sortie plus proches d'une sinusoïde idéale, tout en minimisant les pertes de commutation et en améliorant les performances globales du système. Dans ce contexte, ce chapitre explore les différentes stratégies de modulation MLI appliquées aux onduleurs NPC, en mettant l'accent sur leurs impacts sur la forme d'onde de la tension et du courant, ainsi que sur le taux de distorsion harmonique (THD). Les simulations réalisées comparent les performances des configurations à trois et cinq niveaux, en analysant notamment, les signaux de référence et porteuses utilisés pour la génération des impulsions de commande et les formes d'onde des tensions simples et composées, ainsi que des courants de ligne.

3.2 Commande MLI des onduleurs de tension multi-niveaux :

Les stratégies classiques de modulation en largeur d'impulsion (MLI ou PWM) utilisées dans les onduleurs à deux niveaux peuvent être adaptées et étendues pour fonctionner avec des onduleurs multi-niveaux. Ces techniques de modulation PWM dans les architectures multi-niveaux sont généralement classées selon la fréquence de commutation, comme l'illustre la figure (3.1). Parmi les plus étudiées dans la littérature, on trouve : la modulation à base de porteuses multiples, la modulation par élimination sélective des harmoniques, et la modulation vectorielle PWM. Ces approches représentent des généralisations des techniques PWM traditionnelles appliquées à des structures à plusieurs niveaux. Les différences majeures entre ces méthodes résident dans le spectre harmonique des signaux générés, la forme d'onde des tensions et courants de sortie, ainsi que dans les pertes engendrées. En effet, il est bien établi que les pertes augmentent avec la fréquence de commutation des interrupteurs, et deviennent plus significatives à mesure que la puissance du système croît. Les techniques de modulation ont pour objectif de produire un signal quantifié qui représente le plus fidèlement possible un signal de référence continu. Ce signal de référence correspond à la commande idéale à appliquer au système afin d'obtenir l'effet désiré. Le signal modulé, généré en sortie du modulateur, constitue une approximation du signal idéal que l'onduleur peut effectivement reproduire en fonction des niveaux de tension disponibles. Dans ce contexte, les méthodes de modulation les plus appropriées restent les modulations en largeur d'impulsion (MLI ou PWM), qui offrent un bon compromis entre qualité de signal, complexité de mise en œuvre et rendement énergétique [Mar05].

La tension alternative en sortie d'un onduleur présente une forme en créneaux rectangulaires, ce qui nécessite l'utilisation de filtres afin de l'approcher d'une onde sinusoïdale. Lorsque cette tension est à la fréquence industrielle, le processus de filtrage devient complexe, onéreux, et peu performant. Pour pallier cette limitation, une technique d'échantillonnage de l'alternance en multiples créneaux s'avère indispensable. La modulation en largeur d'impulsion (MLI) a ainsi été développée pour répondre à cette exigence. Toutefois, le développement et la généralisation de cette méthode n'ont été possibles qu'avec l'évolution des technologies des semi-conducteurs[BH16].

La modulation en largeur d'impulsion (MLI) consiste à générer chaque alternance de la tension de sortie sous forme d'une série de créneaux de largeur appropriée, en utilisant une fréquence de commutation nettement supérieure à celle des grandeurs de sortie de l'onduleur. Cette technique permet de contrôler la valeur de la composante fondamentale de la tension de sortie et d'ajuster sa forme, de manière à obtenir une onde qui se rapproche d'une sinusoïde.

3.2.1 Différentes méthodes de modulation :

Parmi les techniques de modulation, on distingue .

3.2.2 Stratégie de commande en pleine onde :

- La modulation M L I :
- MLI sinusoïdale .
- MLI vectorielle [GUE].

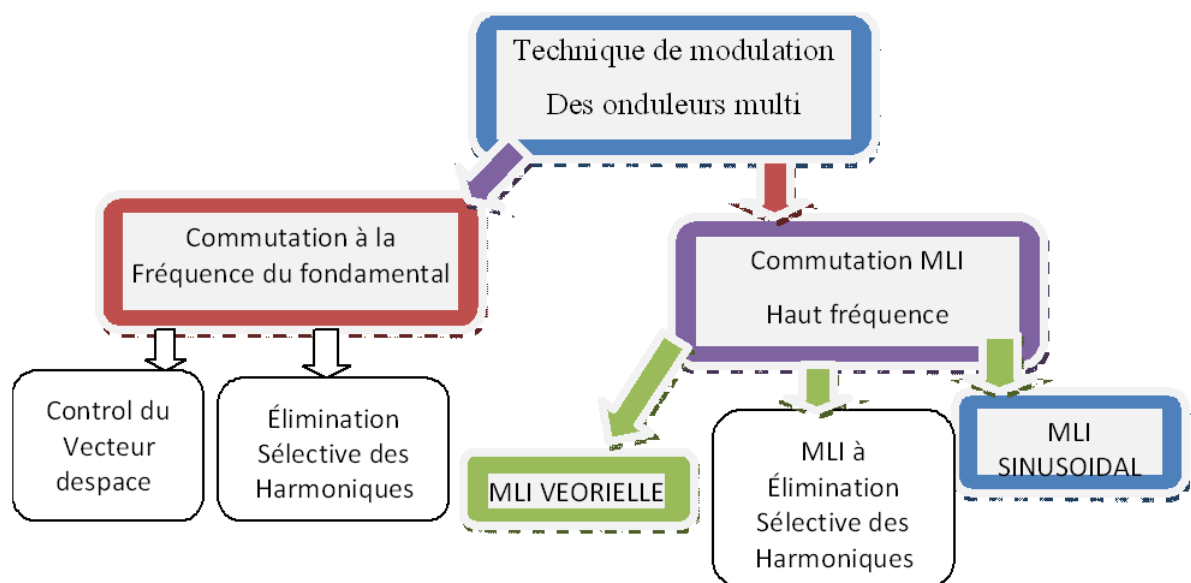


Figure 3.1 – Différentes méthodes de modulation

3.3 Technique MLI engendrée :

Les méthodes de modulation à largeur d'impulsion (MLI) basées sur la comparaison d'ondes permettent de fixer les instants de commutation à partir de l'intersection entre une

onde porteuse et un signal de référence. Sur le plan analytique, ces méthodes conduisent à des équations transcendantes complexes, difficilement solubles en temps réel. Toutefois, leur mise en œuvre sous forme analogique reste bien adaptée. En revanche, leur traitement numérique implique une charge élevée en calcul et en mémoire.

La stratégie de modulation triangulo-sinusoidale repose sur la comparaison d'un signal de référence sinusoïdal, de fréquence F_r , représentant la tension désirée en sortie (appelée signal modulant), avec une onde porteuse triangulaire ou en dent de scie de fréquence F_p . Les croisements entre ces deux signaux déterminent les instants de commutation, produisant ainsi des impulsions de largeur variable. L'ensemble de ces impulsions permet de reproduire la composante fondamentale sinusoïdale correspondant au signal de référence.

L'étude de la MLI triangulo-sinusoidale se base sur deux paramètres qui caractérisent la commande :

- L'indice de modulation m qui est l'image du rapport des fréquences de la porteuse F_p sur celle de la référence F_r . Si m est entier la modulation est synchrone. Elle est asynchrone dans le cas contraire.
- Le taux de la modulation r qui est l'image du rapport des amplitudes des tensions de la référence sur celle de la porteuse.

La porteuse la plus adaptée aux convertisseurs à deux niveaux est la triangulaire bipolaire.

La figure (3.2) représente le principe de génération des impulsions de commande d'un onduleur de tension à deux niveaux [NAA11].

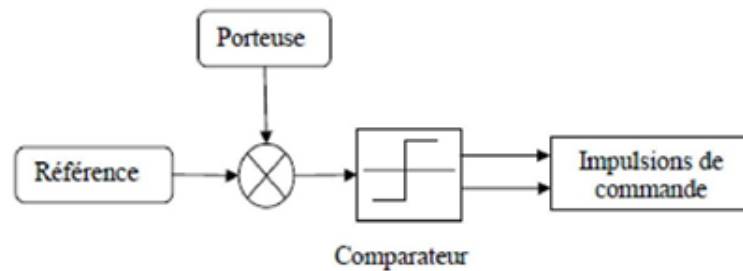


Figure 3.2 – Principe de la MLI triangulo-sinusoidale pour onduleur monophasé.

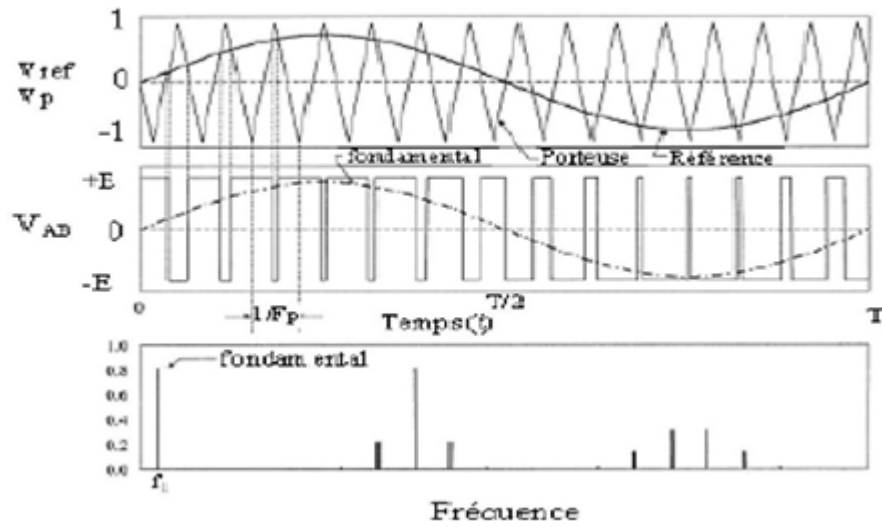


Figure 3.3 – Forme des signaux de commande, la tension de sortie et son spectre PWM à deux niveaux pour un onduleur monophasé en pont.

3.4 Avantages de la technique MLI :

- Variation de la fréquence de la tension de sortie.
- Élimination de certaines harmoniques en tension.
- Elle repousse les harmoniques à des fréquences élevées [AA03].

3.5 Résultats des simulations :

Après avoir élaboré le modèle théorique et réalisé sa mise en œuvre dans l'environnement de simulation, une série de tests a été effectuée afin d'analyser le comportement du système dans différentes conditions. Ce qui suit présente un résumé des principaux résultats obtenus.

3.5.1 Onduleur a trois niveaux :

Les figures (3.4) et (3.5) représentent successivement les références triphasées avec les porteuses et les commandes des interrupteurs du premier bras de l'onduleur.

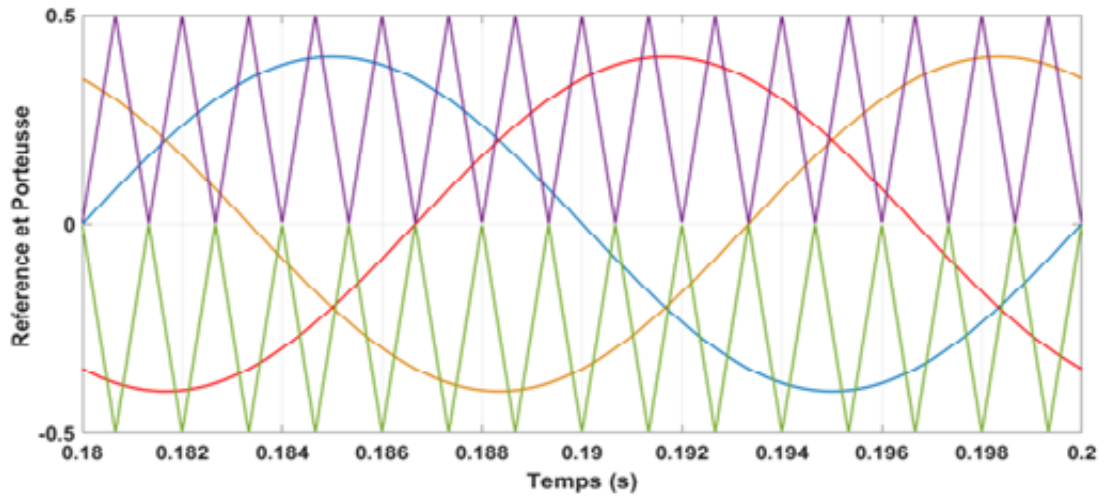


Figure 3.4 – Références triphasées et porteuses.

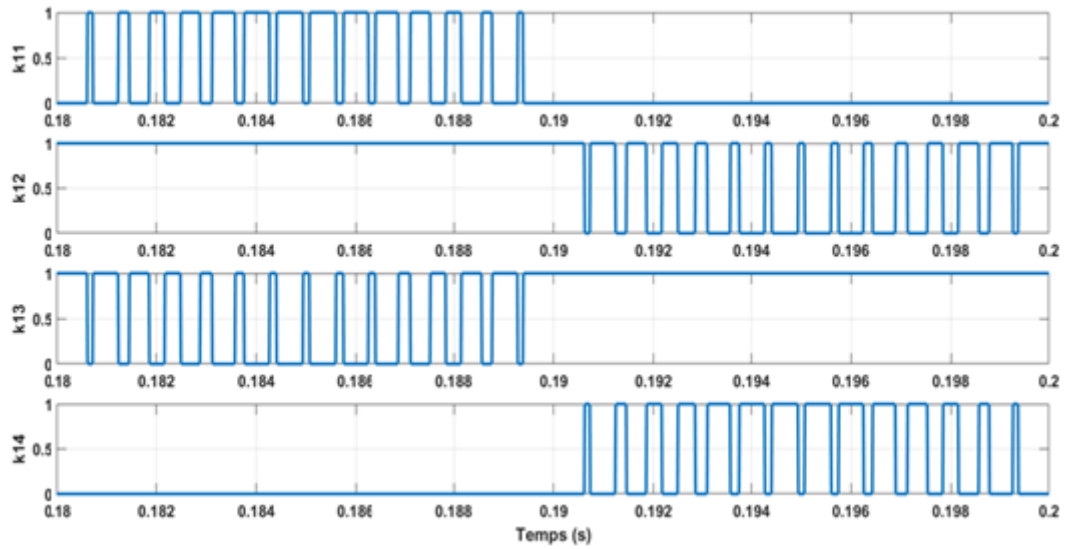


Figure 3.5 – Commande des interrupteurs du 1er bras .

La figure (3.6) représente la tension simple V_{an} , c'est-à-dire la tension entre une phase de l'onduleur et le neutre. On observe que la tension oscille clairement entre des niveaux distincts : $+266.66$ (V), $+200$ (V), $+133.33$ (V), 0 (V), -133.33 (V), -200 (V) et -266.66 (V) ce qui correspond parfaitement au fonctionnement d'un onduleur à trois niveaux de type NPC (Neutral Point Clamped).

La figure (3.7) illustre l'analyse spectrale de la tension simple V_{an} sans filtrage. On y observe une fondamentale à 50Hz , d'amplitude 160V accompagnée d'un taux de distorsion harmonique total 66.98% . Ce THD important est typique des signaux issus de

la modulation MLI non filtrée, où les commutations rapides introduisent de nombreuses harmoniques. Un pic notable apparaît à l'ordre harmonique 29, indiquant une forte présence de hautes fréquences. La faible présence d'harmoniques paires valide la symétrie du signal. Ce spectre montre clairement que, sans filtrage, la tension est inadaptée à une alimentation directe de charges sensibles.

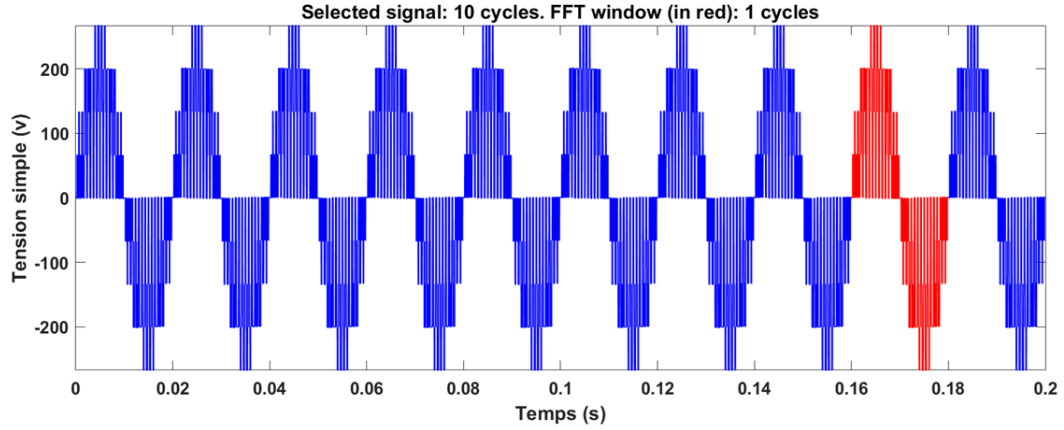


Figure 3.6 – Tension simple V_{an} .

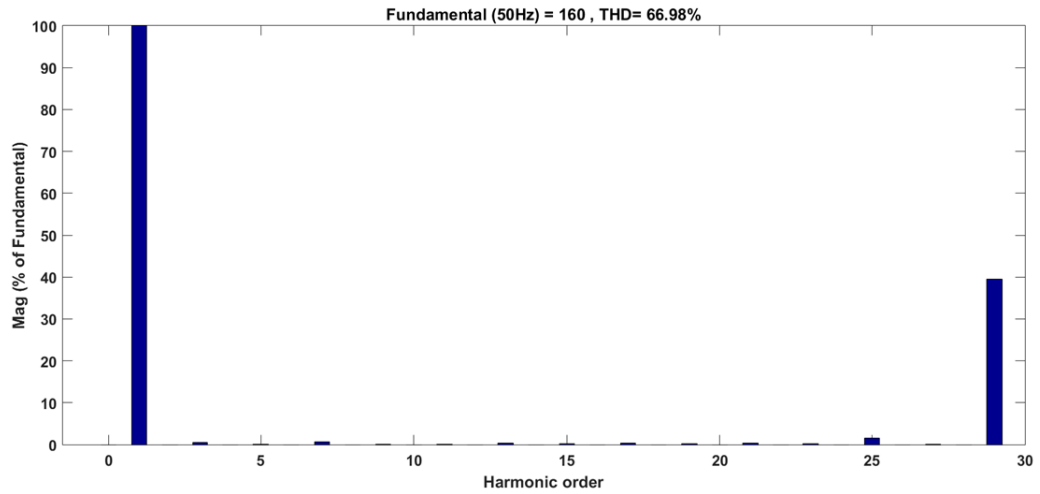


Figure 3.7 – Analyse FFT de la tension simple V_a .

La figure (3.8) montre la tension composée U_{ab} , soit la différence de potentiel entre deux phases de l'onduleur. Contrairement à la tension simple, la tension composée présente cinq niveaux distincts : -400 (V), -200 (V), 0 (V), $+200$ (V) et $+400$ (V). Grâce à la combinaison des tensions des trois phases déphasées de 120° , la tension composée est naturellement plus proche d'une sinusoïde, avec des transitions plus douces. Cela contribue à réduire le taux de distorsion harmonique total (THD) et améliore la qualité globale du

signal sans complexifier l'architecture de l'onduleur. Cette tension est donc mieux adaptée à l'alimentation de charges triphasées comme les moteurs électriques.

La forme symétrique de la courbe indique un bon équilibrage du point neutre, indispensable pour garantir une qualité de tension correcte et limiter les distorsions. Cette onde de forme carrée à trois niveaux constitue la base du fonctionnement du convertisseur.

La figure (3.9) révèle une analyse spectrale préoccupante, avec un THD total de 67.06% avec une fondamentale à 50Hz, d'amplitude 277.2V. Cette distorsion harmonique excessive, bien que typique pour un onduleur sans filtrage, dépasse largement les normes industrielles (généralement < 5%). Les harmoniques impaires dominantes suivent le modèle théorique attendu pour les topologies MLI, avec une absence notable d'harmoniques paires confirmant l'équilibre du système.

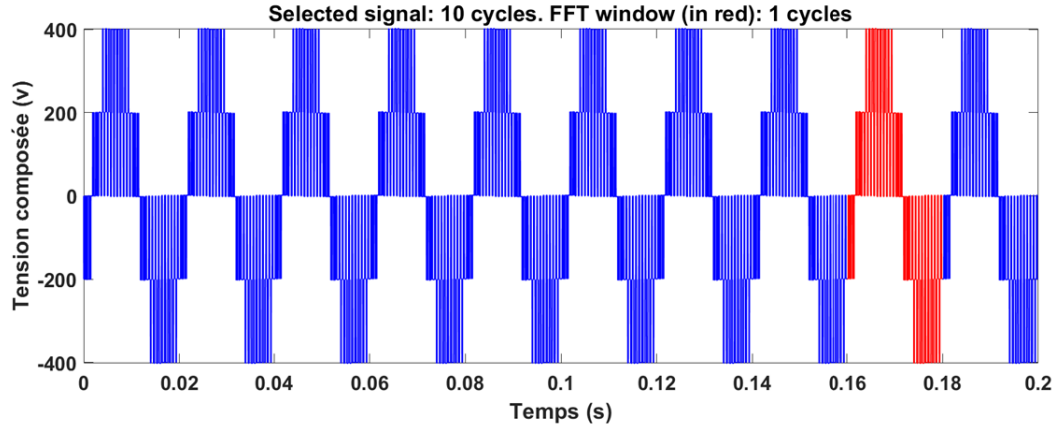


Figure 3.8 – : Tension composée U_{ab} .

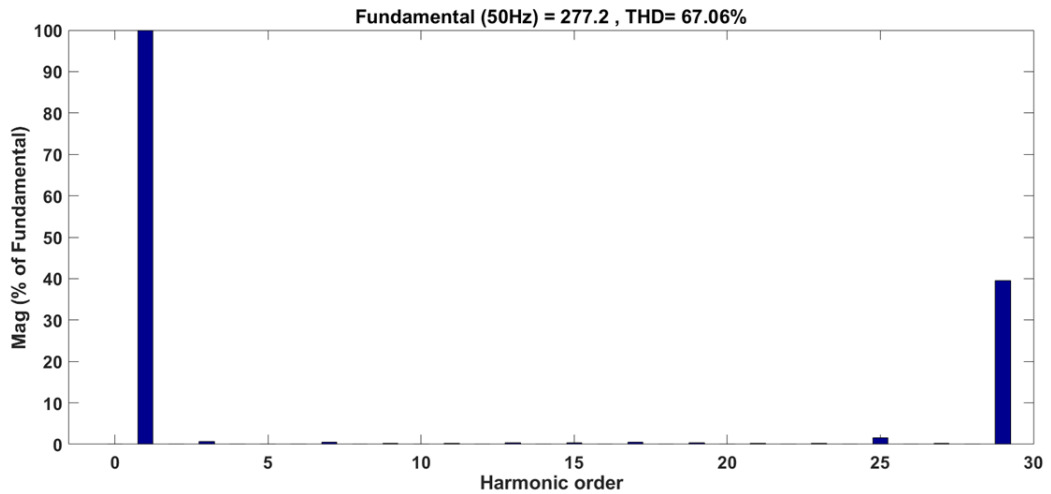


Figure 3.9 – : Analyse FFT de la tension composée U_{ab} .

La figure (3.10) présente la forme du courant de ligne en sortie de l'onduleur. Le

signal observé est quasi-sinusoïdal, avec une légère ondulation principalement due à la commutation rapide des interrupteurs de l'onduleur, ce qui introduit des composantes harmoniques. L'amplitude du courant atteint environ ± 10 A, et la fréquence fondamentale est stable sur toute la durée de simulation.

La figure (3.11) représente les courants de ligne triphasés en sortie d'un onduleur à trois niveaux.

La figure (3.12) illustre le spectre harmonique du courant de ligne, avec un THD de 2.47%, ce qui indique une distorsion relativement faible et acceptable pour la plupart des applications industrielles.

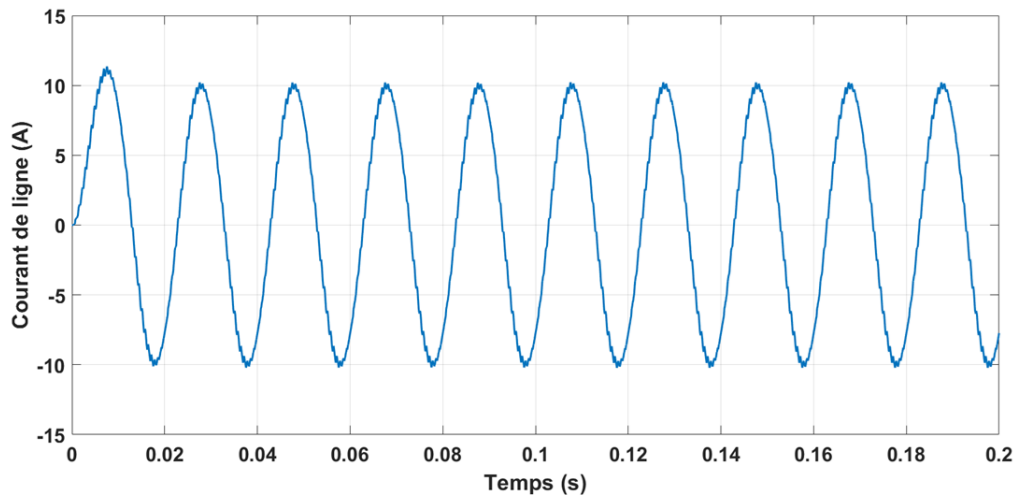


Figure 3.10 – Courant de ligne I_a .

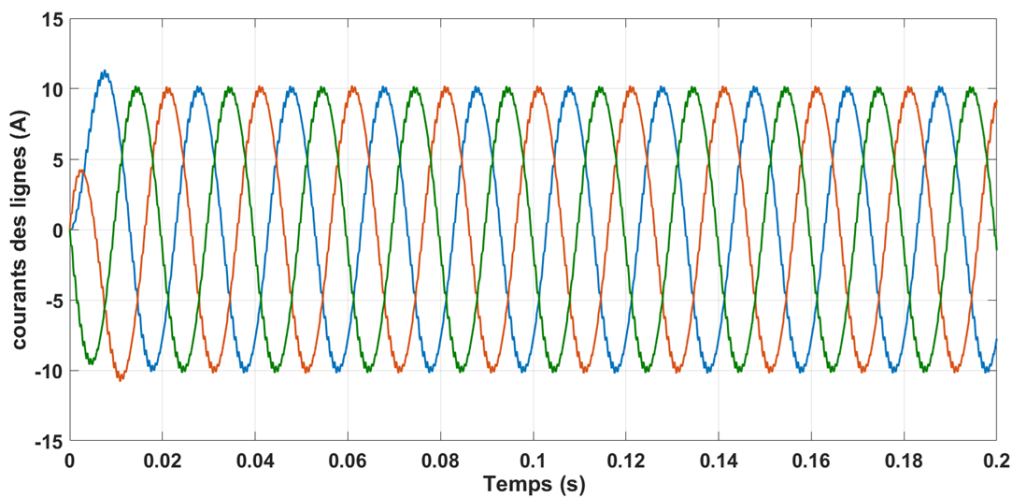


Figure 3.11 – Courants des lignes triphasées.

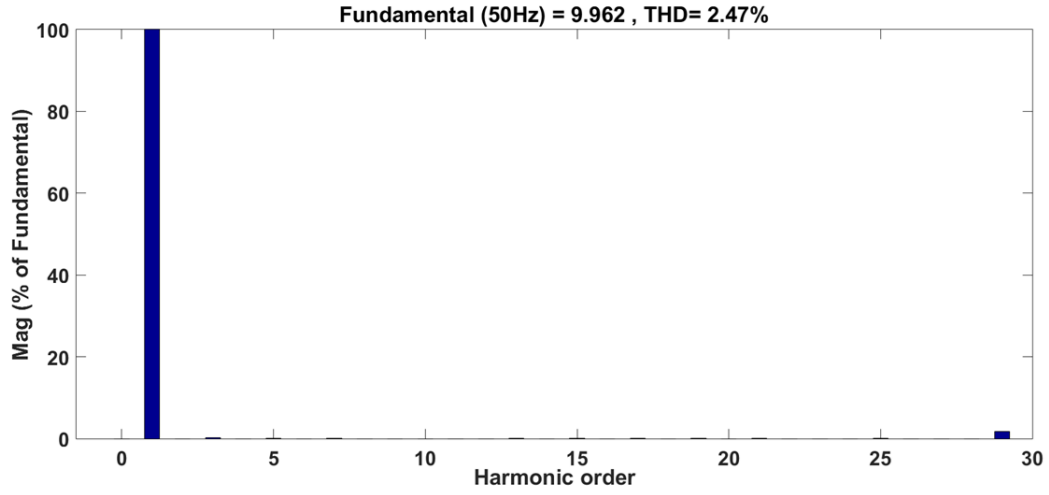


Figure 3.12 – : Analyse FFT du courant de ligne I_a .

3.5.2 Onduleur a cinq niveaux :

Les figures (3.13) et (3.14) représentent successivement les références triphasées avec les porteuses et les commandes des huit interrupteurs du premier bras de l'onduleur.

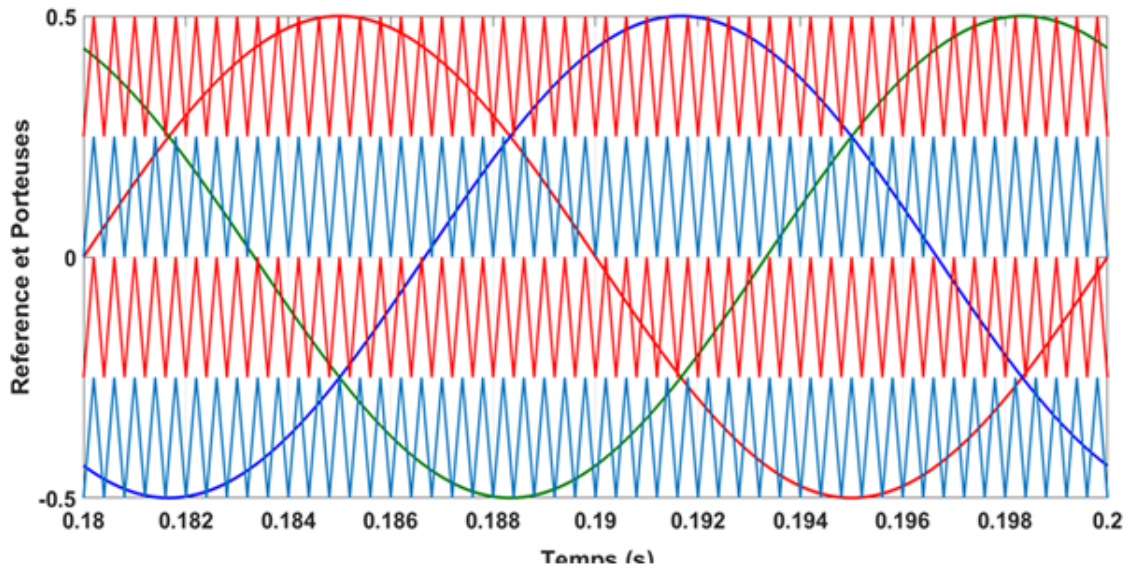


Figure 3.13 – Reference triphasée et porteuses .

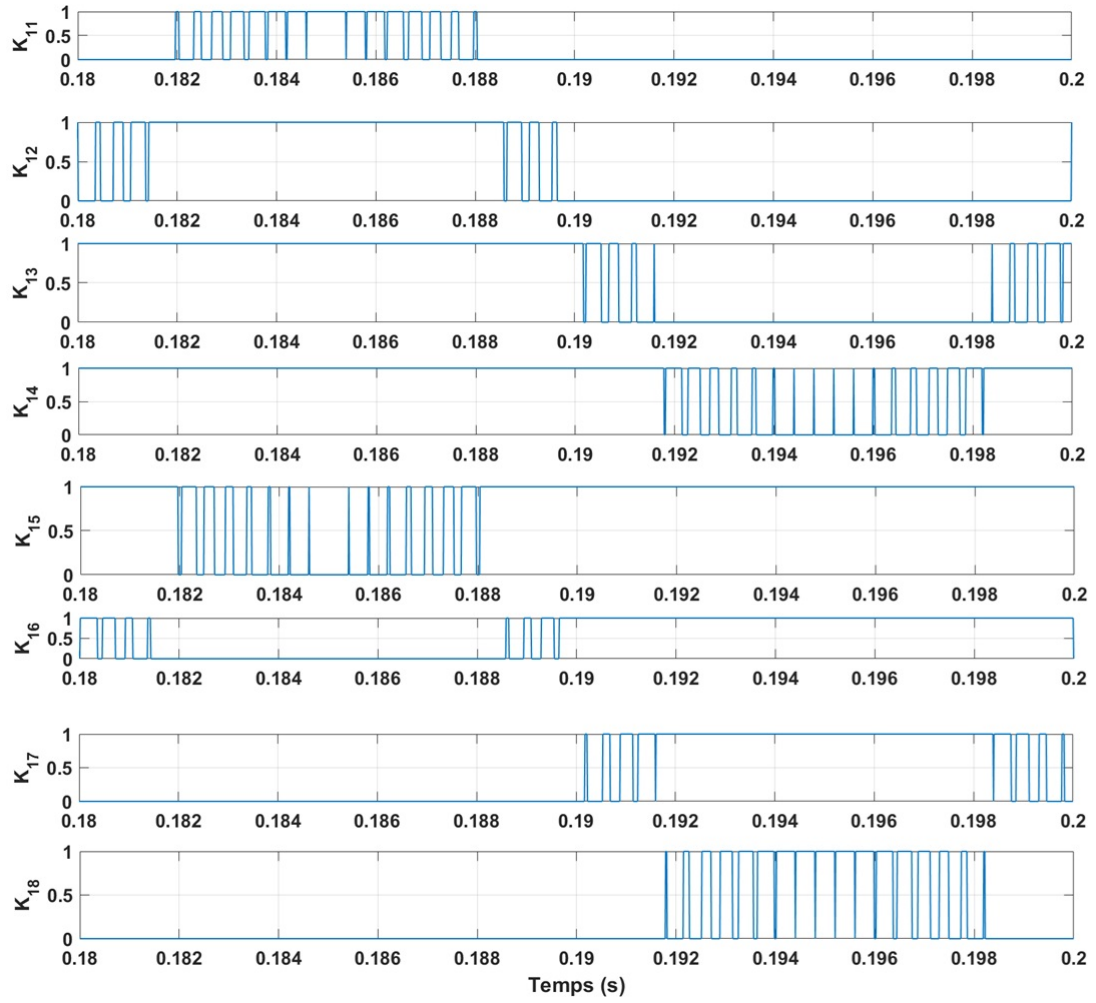
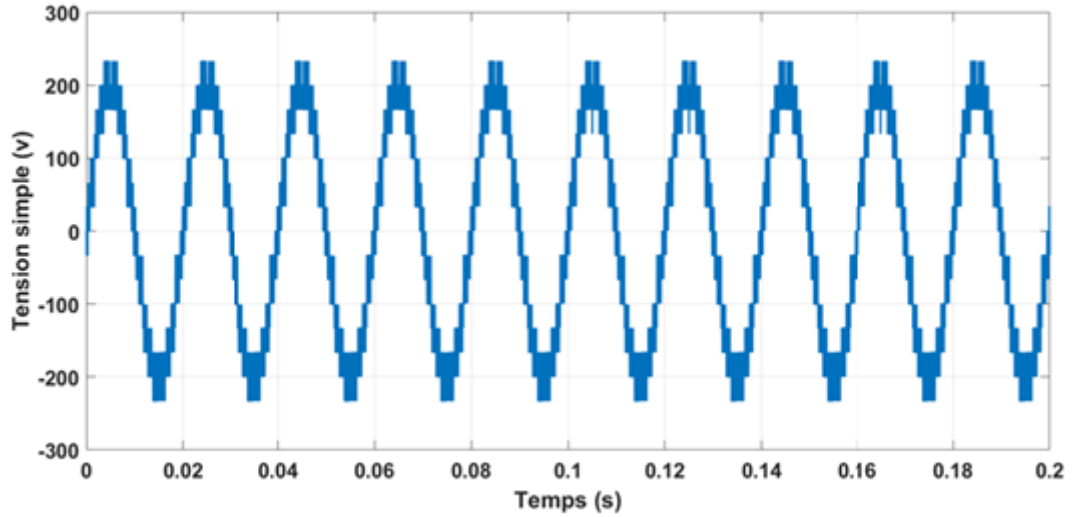
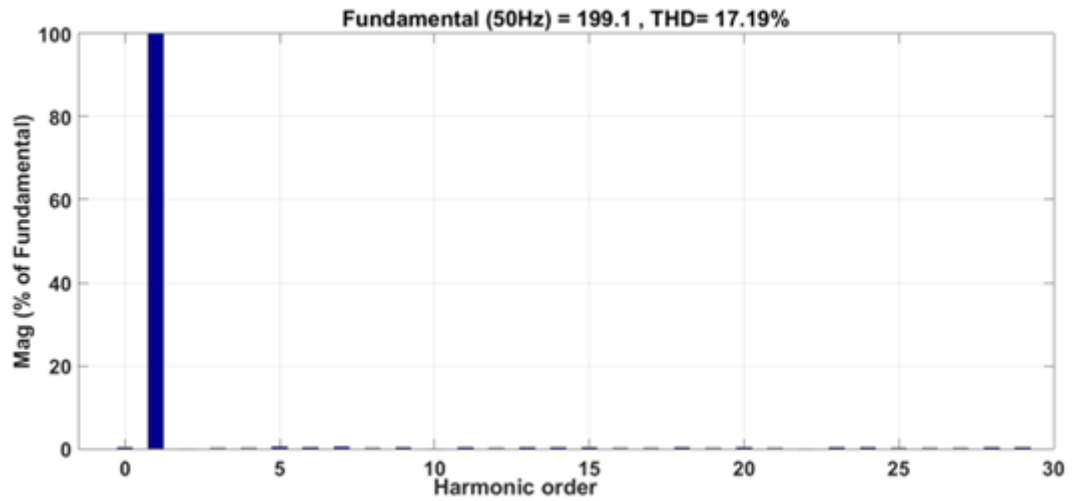


Figure 3.14 – Commande des interrupteurs de 1er bras.

La figure (3.15) présente la tension simple V_{an} , on observe que la tension oscille clairement entre $+220$ (V), 0 (V) et -220 (V) ce qui correspond parfaitement au fonctionnement d'un onduleur à cinq niveaux. Cette forme d'onde démontre l'excellente maîtrise de la modulation MLI mise en œuvre dans cet onduleur NPC à cinq niveaux.

La figure (3.16) met en évidence une distorsion harmonique notable avec un THD de 17.19 %, ce qui indique une qualité de tension dégradée.

Figure 3.15 – Tension simple V_a .Figure 3.16 – : Analyse FFT de la tension simple V_{an} .

La tension composée U_{ab} , représentée dans la figure (3.17), indique une forme d'onde typique des onduleurs multi-niveaux. La technologie NPC permet ici d'obtenir une onde quasi-sinusoidale grâce à la multiplication des niveaux de tension, réduisant ainsi considérablement le taux de distortion harmonique.

La figure (3.18) représente l'analyse spectrale du signal de la tension composée U_{ab} , obtenue via la transformée de Fourier rapide (FFT). On y observe que la composante fondamentale, à 50 Hz , atteint une amplitude de 344.9 (V), ce qui confirme qu'elle domine largement le spectre. Toutefois, le taux de distorsion harmonique totale (THD) mesuré est de 17.21 %, ce qui est relativement élevé. Bien que les harmoniques supérieures soient

peu marquées visuellement, leur contribution globale reste significative.

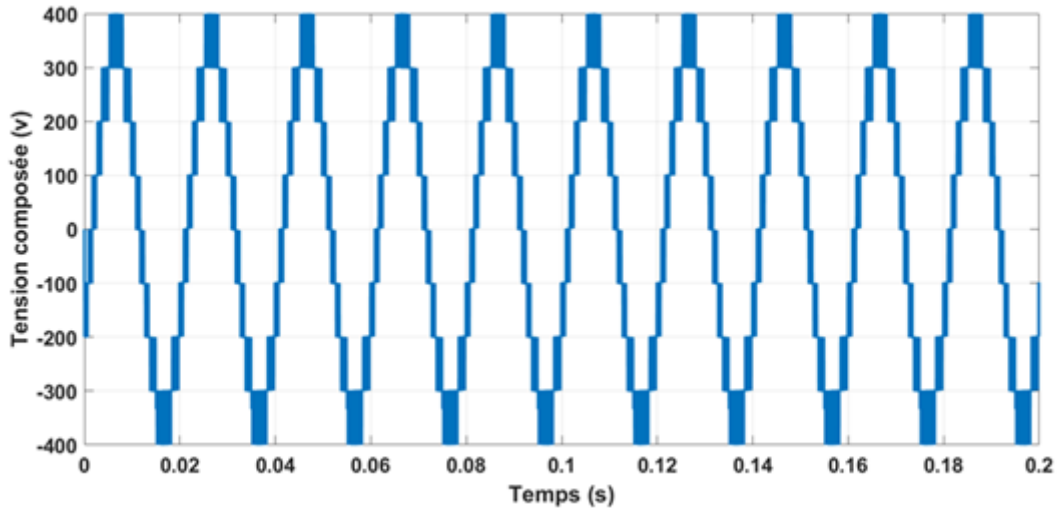


Figure 3.17 – Tension composée U_{ab} .

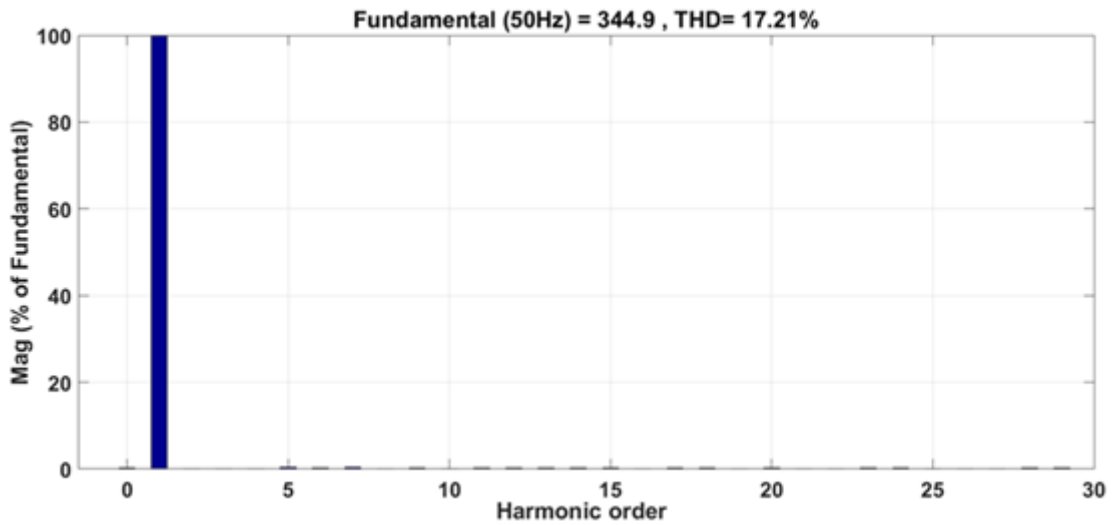


Figure 3.18 – : Analyse FFT de la tension composée U_{ab} en sortie d'un onduleur NPC à trois niveaux.

La figure (3.19) présente l'évolution temporelle du courant de ligne I_a . On observe une forme d'onde sinusoïdale stable et régulière.

La figure (3.20), présente l'analyse harmonique, du courant de la ligne. La composante fondamentale à 50Hz et le taux de distorsion harmonique totale (THD) atteint un niveau exceptionnellement bas de 0.20%.

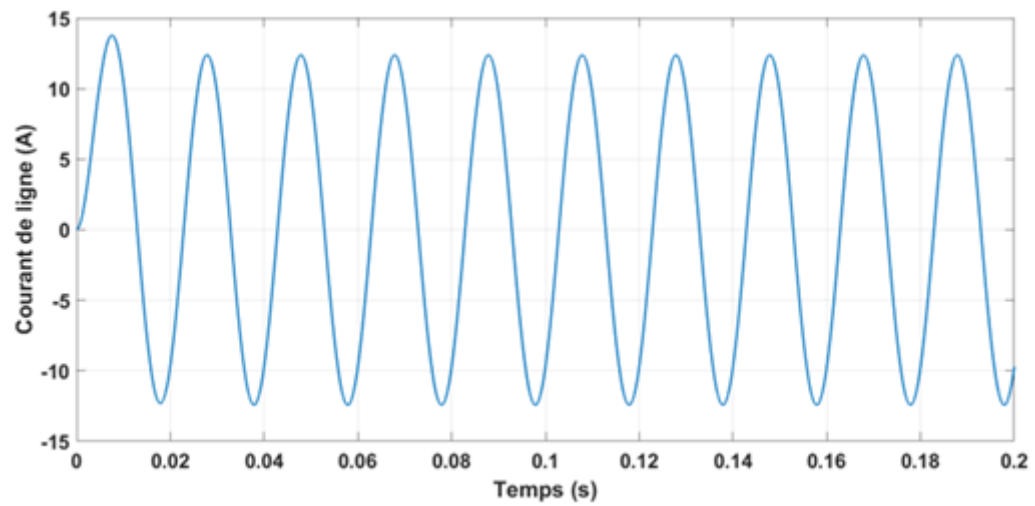


Figure 3.19 – Courant de ligne I_a .

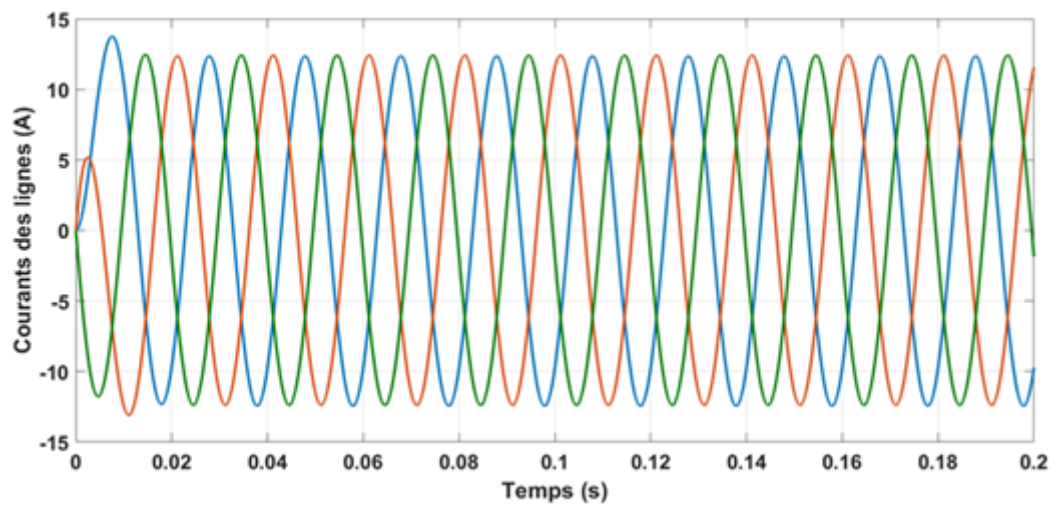


Figure 3.20 – Courants des lignes triphasés.

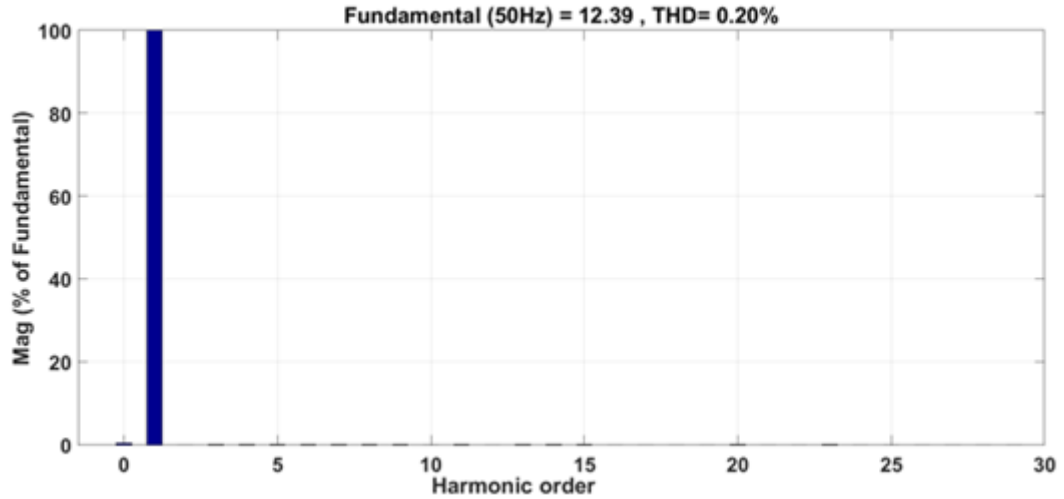


Figure 3.21 – : Analyse FFT du courant de ligne I_a .

3.6 Conclusion :

Cette étude a permis d'évaluer les performances des onduleurs multiniveaux de type NPC à travers une analyse comparative des configurations à trois et cinq niveaux utilisant la modulation MLI. Les résultats démontrent clairement l'amélioration progressive des caractéristiques de sortie avec l'augmentation du nombre de niveaux. La topologie à cinq niveaux s'est révélée particulièrement avantageuse, offrant une qualité de signal supérieure avec une réduction notable des distortions harmoniques par rapport à la version à trois niveaux. L'analyse des formes d'onde a confirmé l'obtention de tensions et courants plus proches de l'idéal sinusoïdal, tout en maintenant une bonne stabilité du système.

Chapitre 4

Amélioration de la qualité de la tension des onduleurs multi-niveaux par filtrage passif :

4.1 Introduction :

Les onduleurs multiniveaux, notamment ceux à structure NPC (Neutral Point Clamped), sont largement utilisés dans les applications industrielles et énergétiques en raison de leur capacité à produire une tension de sortie de qualité supérieure, tout en réduisant les contraintes sur les composants de puissance. Toutefois, l'utilisation de techniques de modulation en largeur d'impulsion (MLI) engendre des harmoniques et des perturbations haute fréquence susceptibles d'affecter la qualité de l'énergie fournie, ainsi que la durée de vie des équipements connectés. Pour pallier ces inconvénients, le recours à des filtres passifs constitue une solution efficace et économiquement avantageuse. Ce chapitre se propose d'analyser en détail le rôle, les types, les avantages et les limites du filtrage passif appliqué aux onduleurs NPC, en s'appuyant sur des résultats de simulation portant sur des structures à trois et cinq niveaux. L'objectif est de démontrer l'impact du filtrage sur la réduction du THD et l'amélioration de la qualité spectrale des tensions de sortie.

4.2 Définition du filtrage passif :

Le filtrage passif est une technique utilisée pour atténuer les harmoniques et les perturbations hautes fréquences générées par les onduleurs, en particulier dans les convertisseurs multi-niveaux comme le NPC (Neutral Point Clamped). Ces filtres sont constitués de composants passifs (inductances L , condensateurs C et résistances R) disposés en différentes configurations (filtre LC, LCL, RLC) pour améliorer la qualité du signal de sortie. Contrairement aux filtres actifs, qui nécessitent une alimentation externe et des algorithmes de commande complexes, les filtres passifs sont simples, robustes et économiques, mais leur performance dépend fortement du dimensionnement correct des composants [RLP02] .[AWA17].

4.3 Insertion des filtres passifs dans un Onduleur NPC :

Dans un onduleur NPC multi-niveaux, le filtrage passif est généralement placé :

- En sortie de l'onduleur (entre l'onduleur et charge/réseau) pour atténuer les harmoniques de tension/courant.
- Sur le bus DC pour réduire les oscillations de la tension du lien continu.

Les configurations courantes incluent :

- Filtre LC : Réduit les harmoniques haute fréquence (commutation PWM). continu.
- Filtre LCL : Plus efficace pour les couplages réseau, car il offre une meilleure atténuation des hautes fréquences.
- Filtre RLC amorti : Limite les résonances indésirables [BTLT06].

4.4 Avantages du filtrage passif pour les onduleurs NPC :

- Simplicité et fiabilité : ne nécessite ni alimentation externe ni contrôle complexe.
- Coût réduit par rapport aux solutions de filtrage actif.
- Robustesse adaptée aux environnements industriels.
- Bonne atténuation des harmoniques si le filtre est correctement dimensionné.

- Compatibilité avec les topologies multiniveaux, permettant la réduction des dv/dt et des surtensions [FRL⁺08].

4.5 Inconvénients du filtrage passif :

- Forte dépendance au dimensionnement : une mauvaise sélection des éléments L, C ou R peut entraîner des résonances ou une atténuation insuffisante.
- Augmentation du volume et du poids, surtout pour les inductances de forte puissance.
- Pertes par dissipation, notamment dans les résistances d'amortissement.
- Performance limitée en cas de variation de charge, contrairement aux filtres actifs adaptatifs [HL03].

4.6 Schéma de filtre passif d'un onduleur 3 niveaux et 5 niveaux :

Le schéma ci-dessous représente la manière dont un filtre passif est alimenté à partir de la sortie d'un onduleur multiniveaux.

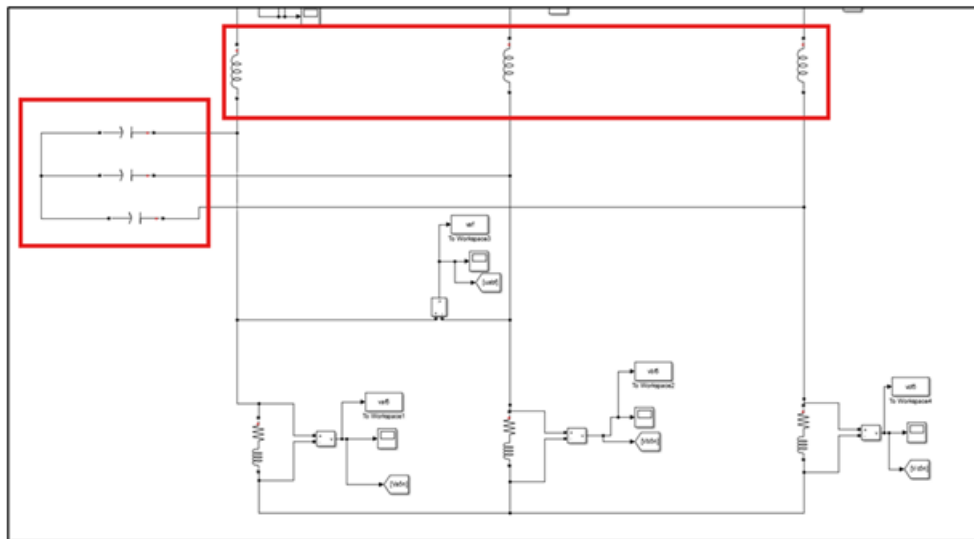


Figure 4.1 – Schéma de filtre passif d'un onduleur 3 niveaux et 5 niveaux

4.7 Calcul des paramètres de filtre passive LC :

Pour réduire les harmoniques dans les tensions de sortie (simple et composée) des onduleurs à trois et cinq niveaux, on utilise un filtre passif LC . Ce filtre est conçu selon la loi de résonance série, avec une fréquence de coupure choisie pour laisser passer la fréquence fondamentale

$$f_C = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4.1)$$

Le choix des composants L et C dépend du THD visé, de la fréquence de commutation et de la charge. Typiquement, f_C doit être éloignée de la fréquence de la fondamentale. Ce filtre permet d'améliorer significativement la qualité de l'onde en réduisant le THD .

$$\begin{aligned} f_C &= 160 \text{ Hz} \\ C &= (200 \times 10^{-6}) \mu F \\ 160 &= \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L \times 200 \times 10^{-6})}} \\ L &= \frac{1}{4\pi^2 \times 160^2 \times 200 \times 10^{-6}} = 5 \text{ mH} \end{aligned}$$

4.8 Résultats des simulations :

Après avoir élaboré le modèle théorique et réalisé sa mise en œuvre dans l'environnement de simulation, une série de tests a été effectuée afin d'analyser le comportement du système dans différentes conditions. Ce qui suit présente un résumé des principaux résultats obtenus.

4.8.1 Onduleur trois niveaux :

Les figures (4.2) et (4.4) représentent les tensions de sortie simple et composée de l'onduleur NPC à trois niveaux après application d'un filtrage passif.

Les figures (4.3) et (4.5) représente de L'analyse spectrale révèle des résultats exceptionnels, avec un taux de distorsion harmonique total (THD) de seulement 1.66% et 1.92% successivement.

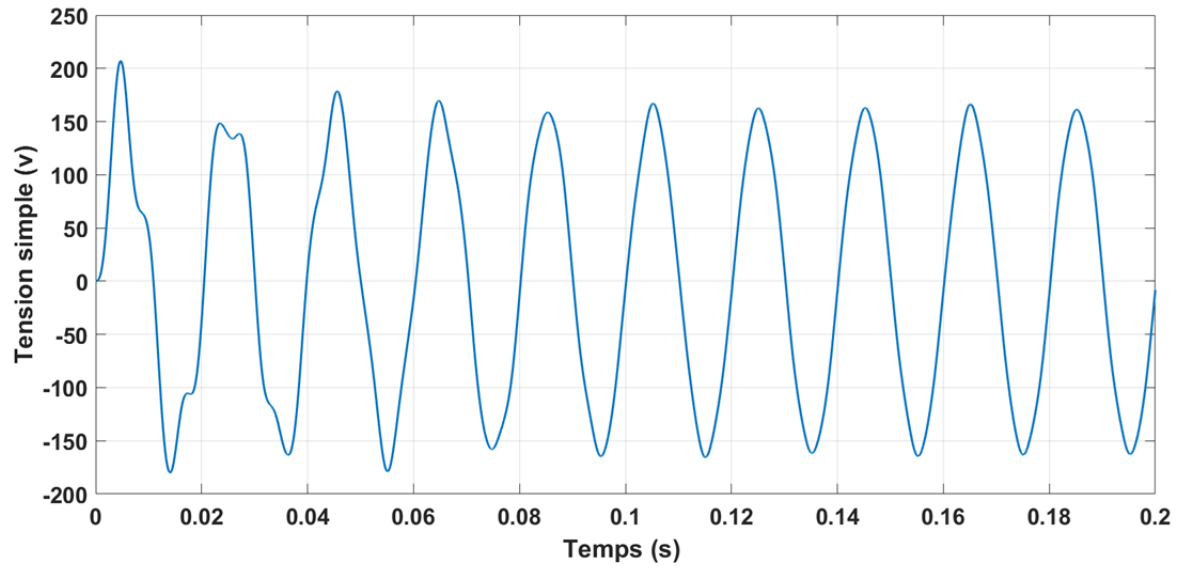


Figure 4.2 – Tension simple V_a .

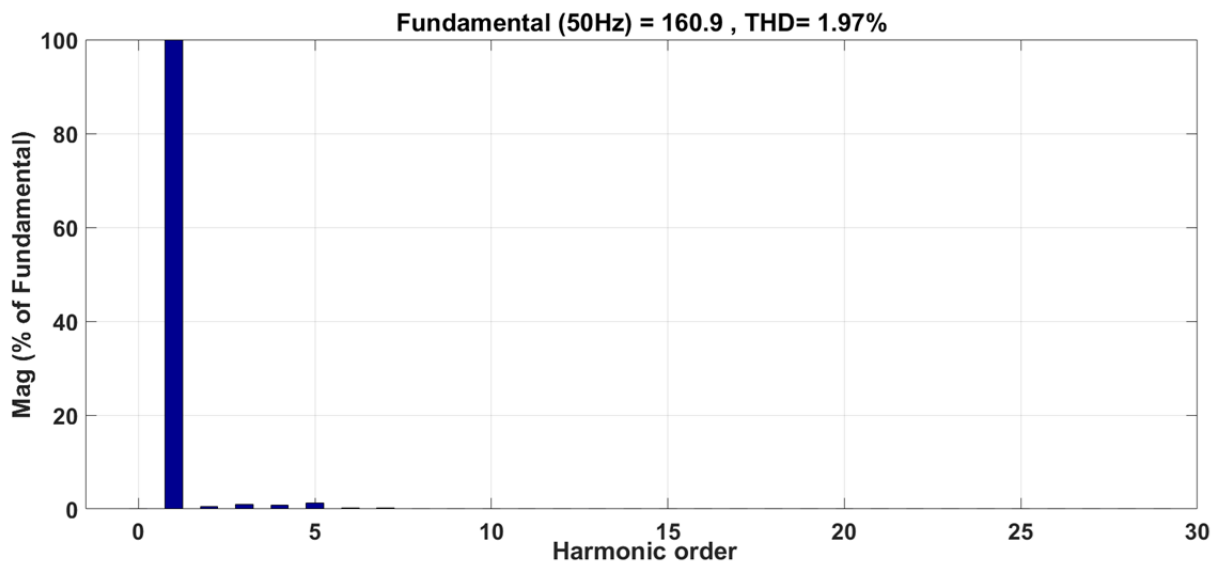


Figure 4.3 – Analyse FFT de la tension simple V_{an} .

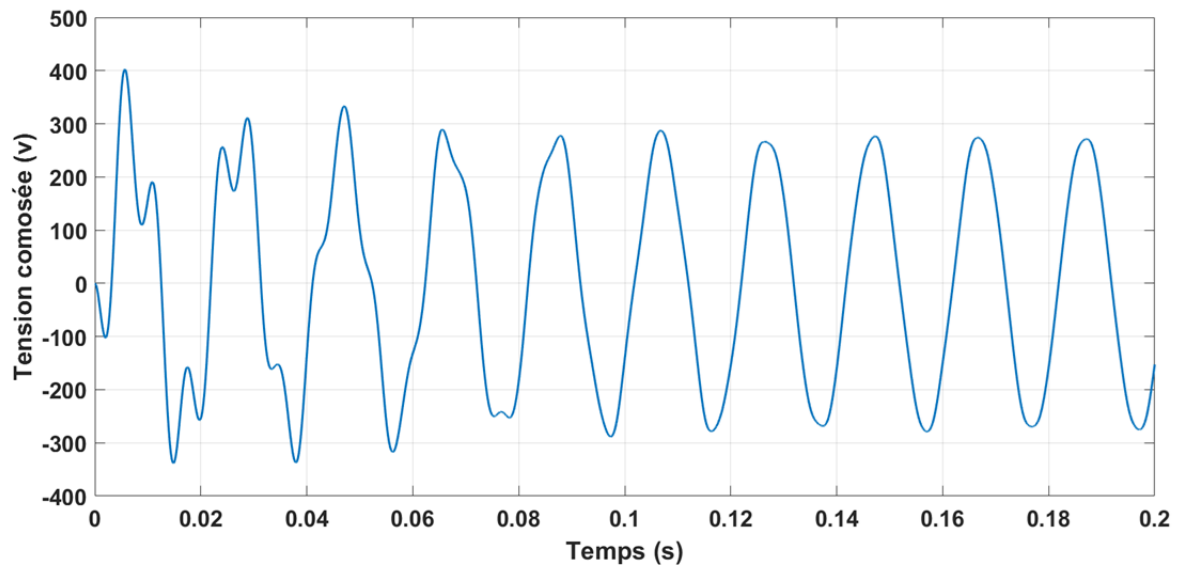


Figure 4.4 – Tension composée U_{ab} .

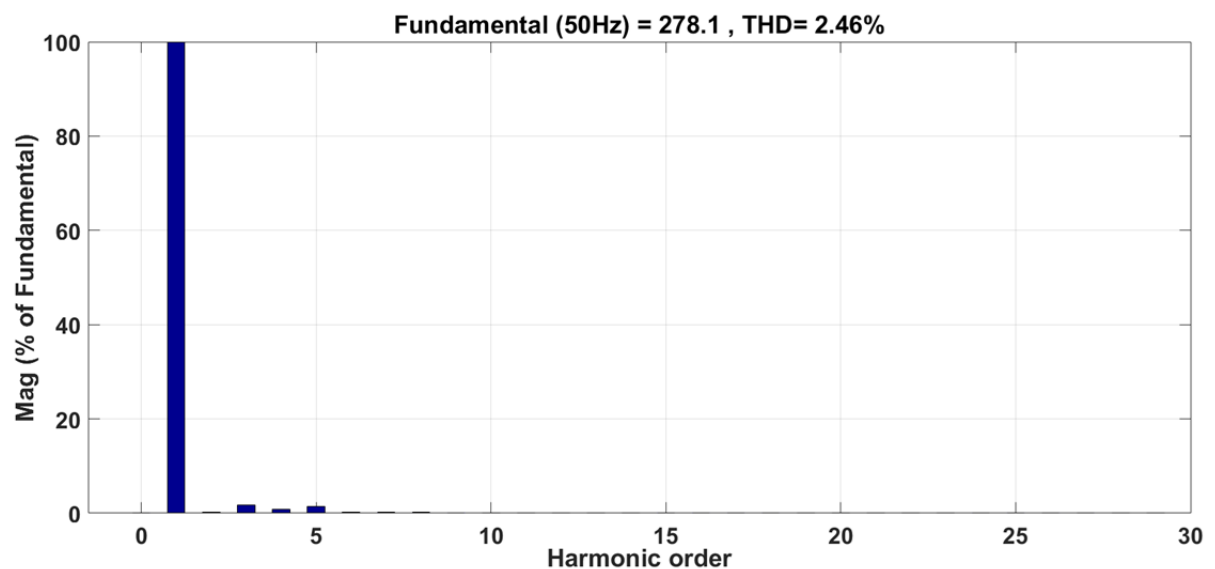


Figure 4.5 – Analyse FFT de la tension composée U_{ab} en sortie d'un onduleur NPC à cinq niveaux .

4.8.2 Onduleur cinq niveaux :

Les figures (4.6) et (4.8) représentent les tensions de sortie simple et composée de l'onduleur NPC à trois niveaux après application d'un filtrage passif.

Les figures (4.7) et (4.9) représente de L'analyse spectrale révèle des résultats exceptionnels, avec un taux de distorsion harmonique total (THD) de seulement 1.59% et 2.43% successivement.

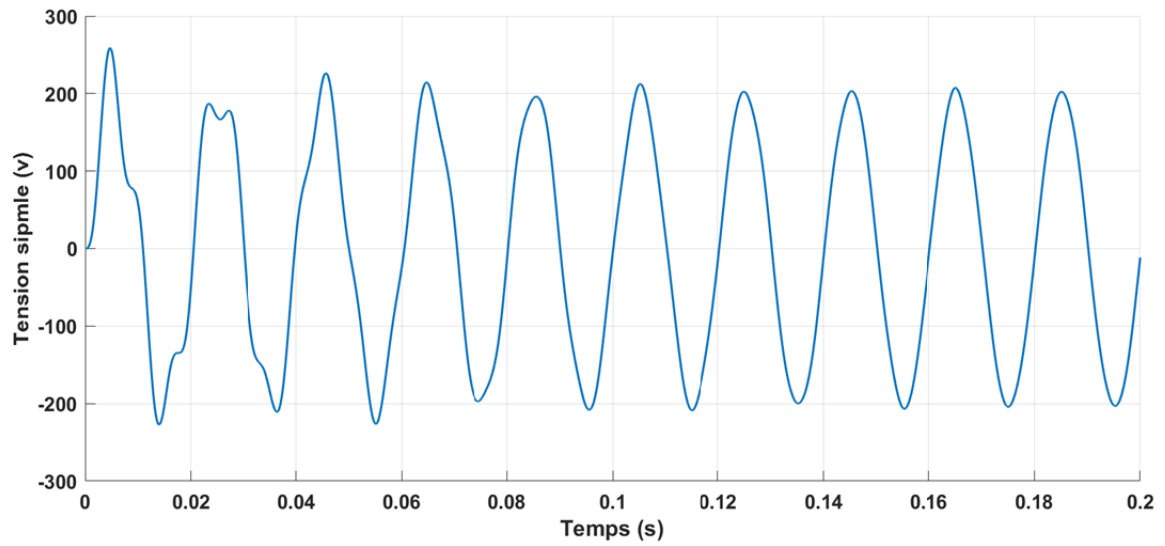


Figure 4.6 – : Tension simple V_{an}

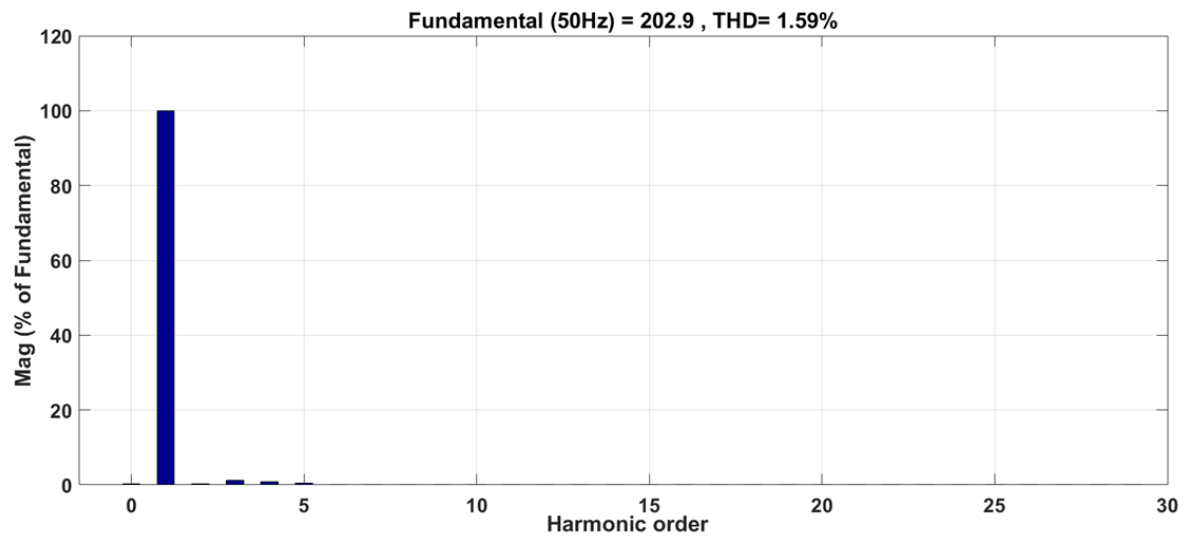


Figure 4.7 – : Analyse FFT de la tension simple V_{an} .

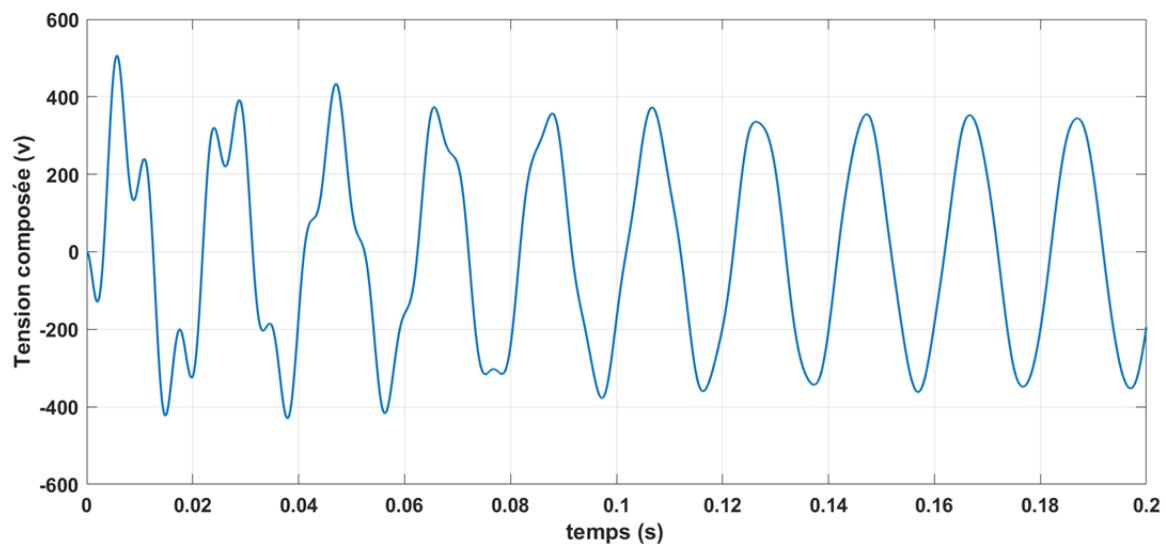


Figure 4.8 – : Tension composée U_{ab}

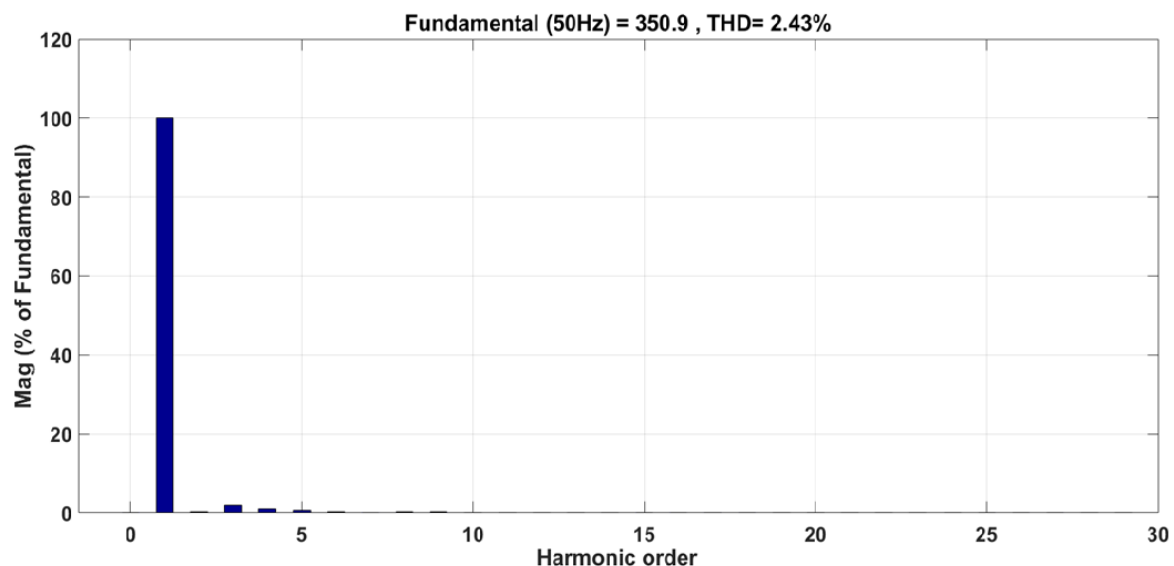


Figure 4.9 – : Analyse FFT de la tension composée U_{ab} .

4.9 Conclusion :

L'étude menée dans ce chapitre met en évidence l'efficacité du filtrage passif dans l'amélioration de la qualité de la tension produite par les onduleurs NPC à trois et cinq niveaux. À travers des simulations détaillées, il a été démontré que l'insertion de filtres LC en sortie de l'onduleur permet de réduire significativement les harmoniques de commutation, conduisant à des taux de distorsion harmonique (THD) très faibles, inférieurs à 3% dans les meilleurs cas. La topologie multiniveau combinée à un filtrage passif bien dimen-

sionné garantit une onde de tension quasi-sinusoidale, conforme aux exigences des normes industrielles. Malgré certaines limitations comme la sensibilité au dimensionnement et l'augmentation du volume, les filtres passifs demeurent une solution robuste, simple et adaptée aux applications nécessitant un compromis optimal entre performance et coût.

Conclusion Générale

À travers ce mémoire, nous avons étudié en profondeur les onduleurs multiniveaux de type NPC et leur pilotage par modulation en largeur d'impulsion (MLI), dans le but de produire une tension de sortie de meilleure qualité, adaptée aux exigences des systèmes modernes d'électronique de puissance.

L'analyse théorique des différentes structures multiniveaux, notamment celles à trois et cinq niveaux, a permis de mieux comprendre leur fonctionnement, leurs avantages, ainsi que les contraintes technologiques qu'elles imposent. L'étude topologique a montré que plus le nombre de niveaux augmente, plus la tension de sortie devient proche d'une sinusoïde idéale, ce qui se traduit par une réduction significative du THD.

Les résultats de simulation obtenus à travers l'application de différentes techniques MLI ont confirmé ces hypothèses. Il en ressort que la modulation sinusoïdale à rapport de fréquence élevé, appliquée aux onduleurs NPC, offre une tension de sortie lissée, avec un contenu harmonique réduit, en particulier dans le cas du convertisseur à cinq niveaux.

Cependant, malgré les performances prometteuses observées, la présence résiduelle de certaines harmoniques justifie l'introduction de techniques de filtrage passif. Ces filtres, simples à mettre en œuvre, ont permis une amélioration notable de la qualité du signal en sortie, réduisant davantage le THD tout en assurant la conformité avec les normes de qualité de l'énergie électrique.

Ainsi, cette étude met en évidence l'importance des techniques de modulation et de filtrage dans le perfectionnement des onduleurs multiniveaux. Elle ouvre également la voie à des perspectives intéressantes, telles que l'intégration de stratégies de commande intelligentes (MLI optimisées, commande prédictive) ou l'étude de filtrage actif, pour améliorer encore les performances globales des systèmes convertisseurs.

Bibliographie

- [AA03] Nabil Adjir and Hamza Amrous. Réalisation de la commande triangulo-sinusoïdale à une porteuse triangulaire unipolaire. Projet de fin d'Études, École Nationale Polytechnique, Alger, 2003.
- [Abd16] Hamed Ben Abdelghani. *Étude, conception et réalisation d'un convertisseur statique hybride multiniveaux tolérant aux défauts*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT ; École nationale d . . . , 2016.
- [Ame98] Rafik Ameer. Modélisation et commande d'un onduleur à cinq niveaux à structure npc : application à la machine asynchrone. Projet de fin d'Études, École Nationale Polytechnique, Alger, 1998.
- [AWA17] Hirofumi Akagi, Edson Hirokazu Watanabe, and Mauricio Aredes. *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*. John Wiley & Sons, 2017.
- [BE20] Aicha Boudiar and Randa Echiker. Étude et simulation de la commande des onduleurs multi-niveaux par mli sinusoïdale. Mémoire de projet de fin d'Études, Université Saad Dahlab de Blida, 2020.
- [BEL18] Riadh EL BELKACEM. *Contribution to the study and the design of inverters control «Contribution à l'étude et à la conception des commandes des onduleurs»*. PhD thesis, Université de Batna 2, 2018.
- [Ben09] Khelifa Benmansour. *Réalisation d'un banc d'essai pour la Commande et l'Observation des Convertisseurs Multicellulaires Série : Approche Hybride*. PhD thesis, Cergy-Pontoise, 2009.
- [BER19] Khouloua BERRAHAL. *Application d'un onduleur multi-niveaux à la compensation de la puissance réactive*. PhD thesis, Université de Batna 2, 2019.

- [BH16] Haroun BRIGHEN and Safouane HALAIMIA. Étude et analyse de la commande des onduleurs multi-niveaux par MLI sinusoïdale, 2016.
- [Bou21] Houssem Eddine Boutarboucha. Topologie d'onduleurs multiniveaux et stratégie de commande (application aux systèmes photovoltaïques). Mémoire de master, Université Badji Mokhtar - Annaba, 2021.
- [BSW⁺05] A. R. Bendre, M. Steurer, S. Woodruff, W. Zhang, and T. L. Baldwin. Modeling and design of a voltage balancing controller for a cascaded h-bridge converter-based statcom. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 52(3) :654–660, 2005.
- [BTLT06] Frede Blaabjerg, Remus Teodorescu, Marco Liserre, and Adrian V Timbus. Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 53(5) :1398–1409, 2006.
- [Che14] Mohamed Talel Chebbah. *Étude et simulation d'un convertisseur multiniveaux type PUC*. PhD thesis, École de technologie supérieure, 2014.
- [CHO] SAAD_EDDINE CHOUABIA. Etude_et_simulation_d'un_onduleur_multi_niveaux_
- [Cho18] Fethi Chouaf. *Commande d'un onduleur triphasé par MLI vectorielle*. Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar - Annaba, 2018.
- [CKB11] Ilhami Colak, Ersan Kabalci, and Ramazan Bayindir. Review of multilevel voltage source inverter topologies and control schemes. *Energy conversion and management*, 52(2) :1114–1128, 2011.
- [DM16] Kais Dyhia and Belkacem Mohammed. *Commande par élimination sélective d'harmoniques d'un onduleur multi niveaux asymétrique*. PhD thesis, Université Mouloud Mammeri, 2016.
- [Fad06] Ouahiba Fadli. *Modélisation et Commande Non Linéaire de l'association : Machine Synchrone à Aimants Permanents-onduleur de tension a trois niveaux*. PhD thesis, Université de Batna 2, 2006.
- [FRL⁺08] Leopoldo G Franquelo, Jose Rodriguez, Jose I Leon, Samir Kouro, Ramon Portillo, and Maria AM Prats. The age of multilevel converters arrives. *IEEE industrial electronics magazine*, 2(2) :28–39, 2008.
- [GUE] Abdelhakim GUEDIRI. Etude et commande de l'association onduleur multi-niveaux mli/moteur asynchrone.

- [Gue09] Virginie Guennegues. *Contribution l'étude des convertisseurs multiniveaux destinés aux applications moteurs rapides*. PhD thesis, Vandoeuvre-les-Nancy, INPL, 2009.
- [HL98] Thomas G. Habetler and Fred C. Lee. Cascaded h-bridge multilevel inverter with minimal total harmonic distortion. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 13(4) :629–635, 1998.
- [HL03] D Grahame Holmes and Thomas A Lipo. *Pulse width modulation for power converters : principles and practice*. John Wiley & Sons, 2003.
- [Hou10] Benzemamouche Houria. Application de la mli vectorielle aux onduleurs multi niveaux à base de gto et d'igbt'. *Mémoire de Magister, université Badji Mokhtar, Annaba*, 2010.
- [KMG⁺10] Samir Kouro, Mariusz Malinowski, K Gopakumar, Josep Pou, Leopoldo G Franquelo, Bin Wu, Jose Rodriguez, Marcelo A Pérez, and Jose I Leon. Recent advances and industrial applications of multilevel converters. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 57(8) :2553–2580, 2010.
- [LM03] Anton Lesnicar and Rainer Marquardt. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range. In *2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings*,, volume 3, pages 6–pp. IEEE, 2003.
- [LP96] Jih-Sheng Lai and Fang Zheng Peng. Multilevel converters-a new breed of power converters. *IEEE Transactions on industry applications*, 32(3) :509–517, 1996.
- [Mar05] Jean-Sébastien Mariéthoz. *Etude formelle pour la synthèse de convertisseurs multiniveaux asymétriques : topologies, modulation et commande*. PhD thesis, EPFL, 2005.
- [NAA11] Abdelatif NAAMI. *La stratégie MLI vectorielle optimisée : Recherche de toutes les solutions d'angles de commutation*. PhD thesis, Ecole Nationale Polytechnique, 2011.
- [PRGM10] VMA Pérez, Jose Rodriguez, K Gopakumar, and Mariusz Malinowski. A survey on cascaded multi-level-inverters". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(7) :2197–2206, 2010.

- [PZW96] Fang Z. Peng, Chon Zhan, and F. Wang. A new cascaded multilevel inverter. In *Proceedings of the IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC)*, pages 423–429. IEEE, 1996.
- [Ras14] Muhammad H. Rashid. *Power Electronics Devices, Circuits, and Applications*, volume 4. Pearson Education, USA, 2014.
- [RLP02] Jose Rodriguez, Jih-Sheng Lai, and Fang Zheng Peng. Multilevel inverters : a survey of topologies, controls, and applications. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 49(4) :724–738, 2002.
- [TPH99] Leon M Tolbert, Fang Zheng Peng, and Thomas G Habetler. Multilevel converters for large electric drives. *IEEE transactions on industry applications*, 35(1) :36–44, 1999.
- [Vah16] Hani Vahedi. *Modeling, development and control of multilevel converters for power system application*. PhD thesis, École de technologie supérieure, 2016.
- [WNSC05] Tsai-Fu Wu, Hung-Shou Nien, Chih-Lung Shen, and Tsung-Ming Chen. A single-phase inverter system for pv power injection and active power filtering with nonlinear inductor consideration. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 41(4) :1075–1083, 2005.
- [YI10] Amirnaser Yazdani and Reza Iravani. *Voltage-sourced converters in power systems : modeling, control, and applications*. John Wiley & Sons, 2010.