

République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université -Ain-Temouchent Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique



Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Domaine : SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Commandes Electriques
Thème

Etude et simulation d'un onduleur Multi niveaux

Présenté Par :

- 1) Bouzidi Fatiha
- 2) Bouzada Hanaa

Devant le jury composé de :

Dr. YOUNES KHADIDJA
Dr. ALLAM MOHAMED
Dr. ATTOU AMINE

UAT.B.B (Ain T'émouchent) Président
UAT.B.B (Ain T'émouchent) Examineur
M C A UAT.B.B (Ain T'émouchent) Encadrant

Année universitaire 2023/2024

Remerciements

On Remercie Dieu Le Tout Puissant De Nous Avoir Donné La Santé Et La Volonté d'entamer Et De Terminer Ce Mémoire.

*Tout d'abord Nous Souhaitons Avant Tout Remercier Notre Professeur **Mr. Attou Amine** De Nous Avoir Donné Le Privilège d'encadré Nos Travaux, L Nous A Fait Des Suggestions Et Des Critiques Pendant Cette Période.*

*Je Tiens Également A Remercier Le Personnel De La Société De Distribution d'électricité Au Sein De SKE, En Particulier **M. Abdel Baqi Houari**. Son Expertise, Sa Disponibilité Et Son Soutien Continu Ont Été Essentiels A Ma Réussite Durant Ma Formation. Ses Conseils Avisés Et Sa Confiance En Mes Capacités m'ont Permis De Relever Les Défis En Toute Confiance Et d'atteindre Mes Objectifs.*

Je Tiens Également A Exprimer Notre Gratitude A Notre Collègue Et Amie Boudiaf Soria, Qui Nous A Soutenu Et Encouragé Par Sa Motivation Sans Fin Tout Au Long De Cette Expérience. Votre Soutien Nous A Été Inestimable.

*J'adresse également mes remerciements et ma gratitude à **M. Kaddour et Frah Abed Elrrahmen djelol** que Dieu le protège, pour nous avoir accordé beaucoup de temps et facilité ce qui était difficile pour nous.*

Nous remercions les honorables membres de la discussion d'avoir accepté de discuter de ce travail.

En fin, merci à tous ceux qui ont rendu possible ce travail, et même s'ils ne se retrouvent pas dans cette petite liste, ils sont dans mes pensées.

Merci encore une fois

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents Saïd et Nabila,

Ma très chère sœur Soria et mes très chers frères Ismaïl et Ibrahim,

Mon meilleur amie et partenaire Fatiha,

Toute ma famille Bouzada Et Meddah,

Et tous mes amis,

B. Hanaa

Dédicace

Je tiens dédiée ce modeste travail avant tout

*A mon père **LHABIB** et ma mère **KHAIRA** pour leur amour inestimable, leurs sacrifices, leur confiance, leur soutien et toutes les valeurs qu'ils ont su m'inculquer.*

*A mes frères **Abd El Rehimane** et **Badr El Dîne***

*A ma sœur **Rokaya***

A mon futur mari, qui m'a beaucoup encouragé et que je chéris bien

*A ma très chère copine et binôme **HANNA** qui a su absorber mon stress et me remettre les pieds sur terre.*

*A tout ma famille **Bouzidi** Et **Ben Cheikh***

*A mes cher amis **Chems**, **Soria** et **Fatima***

B. Fatiha

Résumé :

Ce travail est consacré à l'étude des convertisseurs multi niveaux de type (NPC) qui alimentent une machine asynchrone et à la simulation des ondes de ces convertisseurs ainsi qu'à la modification de la largeur d'impulsion.

L'objectif de ce travail est de comparer l'onduleur à deux niveaux, trois niveaux et cinq niveaux et de montrer comment les ondes multi niveaux peuvent entraîner une réduction des harmoniques résiduelles de tension.

Dans les applications haute puissance, la structure multi niveau est plus adaptée car les tensions et courants qu'elle génère ont un taux beaucoup plus faible de distorsion harmonique.

La modélisation et la simulation ont été réalisées à l'aide du logiciel Matlab 2014

Mots clés : NPC, MLI, Onduleur, THD

Abstract:

This work is dedicated to the study of multi-level transformers of type (NPC) which operate to drive an asynchronous machine and to simulate the waveforms of these transformers and adjust the pulse width.

The aim of this work is to compare the two-level, three-level, and five-level inverters and to demonstrate how multi-level waveforms can lead to a reduction in residual voltage harmonics.

In high-power applications, the multi-level structure is more suitable as the voltages and currents it produces have a much lower rate of harmonic distortion.

Modeling and simulation were performed using MATLAB 2014 software

Keywords: NPC, PWM, Inverter, THD.

ملخص:

تم تخصيص هذا العمل لدراسة المحولات متعددة المستويات من نوع (نقطة محايدة مقبضة) التي تعمل على تشغيل آلة غير متزامنة وعرض محاكاة الموجات لهذه المحولات وتعديل عرض النبضة الجيبية الهدف من هذا العمل هو المقارنة بين العاكس ذو المستويين ثلاثي المستويات و الخمس مستويات و لاضهار كيف يمكن أن تؤدي المموجات متعددة المستويات إلى انخفاض في توافقيات الجهد المتبقية. في تطبيقات الطاقة العالية يكون الهيكل متعدد المستويات أكثر ملائمة لان الفولتية والتيارات الناتجة لديها معدل اقل بكثير من التشويه التوافقي تم نمذجة و دراسة المحاكاة باستخدام برنامج ماطلاب. كلمات المفتاحية : العاكس

Table de matière

Remerciements

Dédicace

Résumé

Liste de Figures

Les symboles

INTRODUCTION GENERAL

CHAPITRE I Généralité sur les onduleurs

I.1 Introduction :	3
I.2 Définition d'un onduleur :	4
I.3 Principe générale de fonctionnement :	4
I.4 Classification des onduleurs :	6
I.4.1 Les onduleurs autonomes :	6
I.4.2 Onduleurs non autonome (raccordés aux réseaux):	7
I.5 Onduleurs monophasé	8
I.5.2 Montage en pont :	8
I.6 Onduleur triphasé en pont :	9
I.7 Le convertisseur matriciel :	9
I.8 Les Avantages et inconvénients des convertisseurs matriciels :	10
I.8.1 Avantages :	10
I.8.2 Inconvénients :	10
I.9 Les onduleurs multi niveaux :	11
I.10 Avantages des onduleurs multi-niveaux	12
I.10.1 Avantages technologiques	12
I.10.2 Avantages fonctionnelles pour le convertisseur	13
I.10.3 Avantages fonctionnelles pour les machines tournantes	13
I.10.4 Principe général de fonctionnement de l'onduleur multi niveaux :	13
I.12 Les applications des onduleurs	13

I.13 Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone :	14
I.14 Conclusion :	14

CHAPITRE II *Modalisation d'un onduleur Multi-niveaux*

II.1 Introduction	15
II.2 Concepts multi niveaux :	15
II.3 Définition et structure générale d'un onduleur de tension :	16
II.4 Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux.....	17
II.5 Avantages de la topologie NPC :	17
II.6 Onduleur à trois niveaux de type NPC.....	18
II.6.1 Structure et principe de fonctionnement de l'onduleur NPC à trois niveaux :	18
II.6.2 Model de l'onduleur à trois niveaux.....	18
II.6.3 Avantage :	19
II.6.4 Inconvénients :	20
II.7 Onduleur à cinq niveaux de type NPC.....	21
II.7.1 Structure	21
II.7.2 Principe de fonctionnement :	21
II.7.3 Les Avantages et les inconvénients :	23
II.8 Conclusion :	23

CHAPITRE III *Technique de commande des onduleurs a MLI triangle sinusoïdale*

III.1 Introduction :	25
III.2 Techniques de commande des onduleurs :	26
III.2.1 Modulation à haute fréquence.....	26
III.2.2 Modulation de largeur d'impulsion :	26
III.2.3 Modulation de largeur d'impulsion sinus-triangle :	27
III.3 Caractéristiques de la modulation de largeur d'impulsion MLI	28
III.3.1 L'indice de modulation (m) :	28
III.3.2 Le coefficient de réglage :	28
III.4 Avantages et inconvénients de la Technique de MLI-ST :	31
III.4.1 Avantages :	31
III.4.2 Inconvénients :	31
III.5 Analyse harmonique de la tension de sortie de l'onduleur :	31
III.5.1 Origine des harmoniques :	31
III.5.2 Mode de représentation ; le spectre en fréquence :	32

III.5.3 Les harmoniques mesurés en pratique :	32
III.5.4Caractérisation des perturbations harmoniques :	32
III.6 Conclusion :	33

Chapitre IV Simulations et interprétions des Résultats

IV.1 Introduction	34
IV.2 Commande MLI ST :	34
IV.2. 2 Onduleur à Trois niveaux :	38
IV.2.3 Onduleur a Cinq niveaux :	42
IV.3. Comparaison entre les différents niveaux :	45
IV.4 Conclusion :	45
CONCLUSION GENERAL	46
<i>Références Bibliographique</i>	47

Liste de Figures :

Figure 1.1 : Le différent type de convertisseurs statiques	3
Figure1. 2 : Schéma bloc de la conversion continue -alternative.....	4
Figure1. 3 : Symbole et signal d'un onduleur	5
Figure1. 4 : Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le première demi-cycle	5
Figure1. 5 : Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le deuxième demi-cycle.....	5
Figure1. 6 : Signal a la sortie de l'onduleur	6
Figure 1.7 : Schéma d'un système photovoltaïque non raccordé au réseau.....	7
Figure 1.8 : Système photovoltaïque connecté au réseau.....	8
Figure 1.9 : Schéma de l'onduleur en demi-pont.....	8
Figure 1.10 : Structure de l'onduleur en pont monophasé.....	9
Figure 1.11 : Onduleur triphasé.....	9
Figure 1.12 : Ondes de tension correspondantes a (a) une entrée continue, (b) Onduleur d'eaux niveaux (c) Onduleur trois niveaux (d) Onduleur multi niveaux	11
Figure 1.13: Onduleur a niveaux multiples a d'eaux(a) , trois(b) et a N niveaux(c).....	13
Figure 2.1: Schéma d'un bras d'onduleur a 2 niveaux ,3 niveaux et N niveaux	16
Figure 2.2: Onduleur de tension triphasée a deux niveaux	16
Figure 2.3: Différentes topologies des convertisseurs multi-niveaux	17
Figure 2.4: Schéma d'un Onduleur NPC a 3 niveaux.....	18
Figure 2.5: Schéma d'un onduleur NPC a 5 niveaux	21
Figure 3.1: Classification des stratégies de modulation selon la fréquence.....	25
Figure 3.2: Comparaison entre le signal de référence et le signal triangulaire	27
Figure 3.3: Principe de la modulation sinus-triangle	30
Figure 3.4: Spectre d'harmonique d'un signal électrique donné.....	32
Figure 4.1: Les signaux de commande MLI-ST d'un onduleur a 2 niveaux d'un bras.....	35
Figure 4.2: Schéma bloc de l'onduleur NPC a 2 niveaux avec la commande MLI-ST.....	35
Figure 4.3: Principe de la MLI à une seule porteuse un onduleur a deux niveaux	35
Figure 4.4: Tension V_a , V_b , V_c de la sortie de l'onduleur de deux niveaux commande MLI-ST	36
Figure 4.5: Zoom sur la tension de la sortie de l'onduleur de deux niveaux commande MLI	36
Figure 4.6: Spectre d'harmonique de la tension simple V_a	37
Figure 4.7: Les signaux de commande MLI-ST d'un onduleur a 3 niveaux d'un bras.....	38
Figure 4.8: Schéma bloc de l'onduleur NPC a 3 niveaux avec la commande MLI-ST.....	39
Figure 4.9: Principe de la MLI a une seule porteuse un onduleur a trois niveaux	40
Figure 4.10: Tension de la sortie V_a , V_b , V_c , de l'onduleur de trois niveaux commande MLI	40
Figure 4.11: Zoom sur la tension V_a de la sortie de l'onduleur de trois niveaux commande MLI.....	40
Figure 4.12: Spectre d'harmonique de la tension simple V_a	41
Figure 4.13: Les signaux de commande MLI-ST d'un onduleur a 5 niveaux d'un bras.....	42
Figure 36: Schéma bloc de l'onduleur NPC a 5 niveaux avec la commande MLI-ST.....	42
Figure 4.14: Tension V_a , V_b , V_c , de la sortie de l'onduleur de Cinq niveaux commande MLI	43

Figure 4.15: Zoom sur la tension V_a de la sortie de l'onduleur de cinq niveaux commande MLI.....	44
Figure 4.17: Spectre d'harmonique de la tension simple V_a	44

Les symboles

NPC	Netural Point Clamped
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
THD	Le Taux global de Distorsion Harmonique
CC	Courant Continu
CA	Courant Alternatif
Vdc	Source de tension continue
N	Nombre de niveaux de tension de sortie
E	Tension principale de l'onduleur NPC
K	Le nombre de commutateurs principaux
HZ	Hertz
Va, Vb, Vc	Les tensions simples a la sortie de l'onduleur entre les phases de la charge
IGBT	Insulted Gate Bipolaire transistor
SPWM	Modulation de largeur d'impulsion simple

INTRODUCTION GENERAL

Introduction générale :

L'industrie développe progressivement l'utilisation de moteurs asynchrones de haute puissance et de convertisseurs pour l'alimentation électrique constante. Généralement, ces moteurs sont alimentés par des transformateurs triphasés à deux niveaux, utilisés pour les basses et moyennes tensions et puissances. Cependant, l'analyse des courants et tensions de phase des machines électriques alimentées par ces transformateurs a révélé plusieurs limites, notamment l'apparition d'harmoniques coûteuses. Ces harmoniques provoquent des pertes dans la charge et le transformateur, entraînant un vieillissement prématuré de ces équipements.

Pour augmenter la puissance et la tension, plusieurs convertisseurs sont souvent combinés en série ou en parallèle, ce qui complexifie le contrôle et augmente le coût du système. Afin de surmonter ces inconvénients liés aux harmoniques d'ordre inférieur et d'augmenter la puissance, les structures de commutation multi niveaux proposent des solutions en plaçant des semi-conducteurs de puissance en série.

Un onduleur est un convertisseur statique qui assure la conversion du courant continu en courant alternatif. Ces dernières années, les onduleurs statiques ont été de plus en plus utilisés dans diverses applications, notamment celles nécessitant une alimentation haute tension, offrant une réglabilité facile et de bonnes performances spectrales. Pour répondre à ces besoins, des technologies multi niveaux et de nouvelles topologies de commutation ont été développées, permettant de générer plusieurs niveaux de tension en sortie de l'onduleur. Le nombre de semi-conducteurs requis pour ces topologies augmente avec le nombre de niveaux nécessaires.

Il existe trois principales topologies pour les convertisseurs multi niveaux à châssis unique avec une distribution de potentiel commune :

1. Convertisseurs à point neutre épinglé (NPC).
2. Convertisseurs de cellules imbriquées multi niveaux.
3. Convertisseurs en cascade multi niveaux.

L'objectif principal de mon projet est d'étudier et de comparer différentes structures d'onduleurs multi niveaux, en particulier les NPC. Dans ce travail, nous nous intéressons à l'étude des convertisseurs multi niveaux et des différentes techniques de commande,

en essayant de comparer certaines stratégies visant à minimiser le taux de distorsion harmonique total (THD) et à obtenir un signal sinusoïdal.

Dans les applications à haute puissance, une structure à plusieurs niveaux est plus adaptée qu'une structure à deux niveaux, car les tensions et courants résultants présentent un taux de distorsion harmonique beaucoup plus faible.

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

L'objectif de notre étude théorique et sa simulation pour trouver une bonne stratégie de commande et pour choisir le niveau désiré qui donne le meilleur résultat pour notre stratégie nous avons limitée notre travail au les niveaux sur deux, trois, et cinq niveaux.

Le premier chapitre sera consacré à Généralité des onduleurs leurs avantages et Inconvénients et Intérêt des onduleurs multi- niveaux.

Le deuxième chapitre est consacré l'étude de principe de fonctionnement et la modélisation du l'onduleur multi niveaux NPC (Neutral Point Clamped) deux, trois et cinq niveaux

Le troisième chapitre, on va étudie la commande des onduleurs multi niveaux.

Le quatrième chapitre, Simulation et interprétation des résultats.

Enfinement, on termine notre travail par une conclusion général

CHAPITRE I

Généralité sur les onduleurs

I.1 Introduction :

Pour les applications nécessitant la génération d'une onde de tension sinusoïdale ayant des caractéristiques spécifiques d'amplitude et de fréquence, ainsi que la variation de vitesse de machines alternatives en traction électrique ou dans des applications industrielles ou l'amplitude et fréquence doivent être variables: Un onduleur est donc une source de tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace à partir d'une tension continue donnée; L'onduleur fait partie des ensembles des convertisseurs statiques. C'est la mise au point des semi-conducteurs de puissance (diodes, thyristors et transistors) qui a permis le développement et l'apparition des groupes de convertisseurs. La figure 1.1 illustre les différents types de convertisseurs statiques.

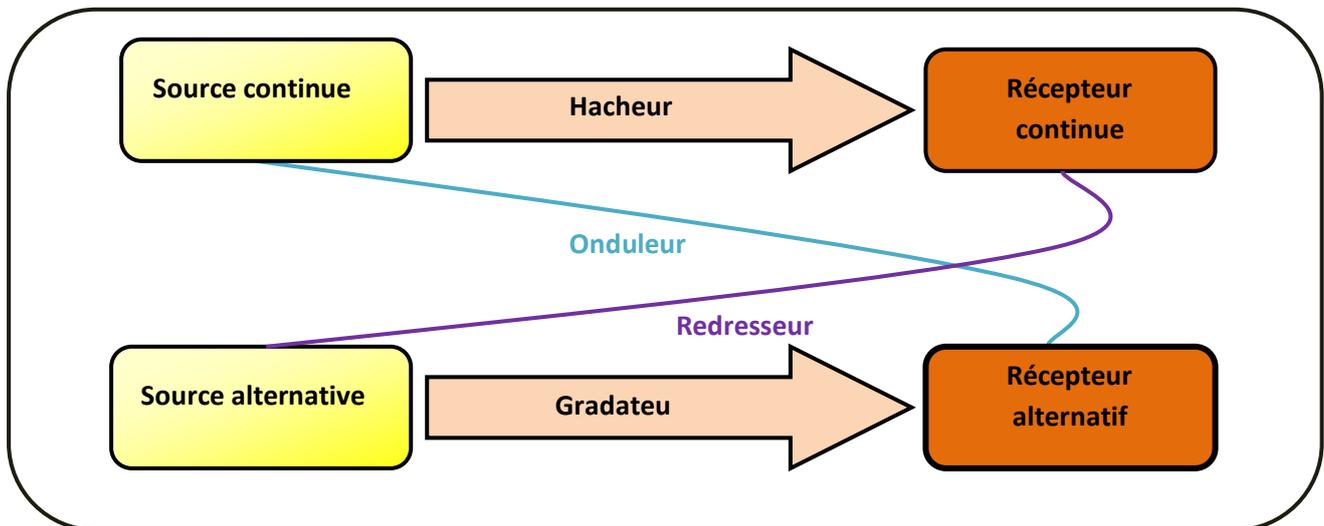


Figure 1.1 : Le différent type de convertisseurs statiques

En premier lieu nous définissons tout d'abord l'onduleur et présentons le principe de fonctionnement, ainsi que les classifications des onduleurs. En seconde lieu nous présentons l'onduleur monophasé et triphasé, convertisseur matriciel et convertisseur multi-niveau

I.2 Définition d'un onduleur :

Un onduleur est un convertisseur statique qui assure la conversion continu - alternatif, par exemple, si on dispose à l'entrée d'une tension continue et, grâce à des semi- conducteurs, on peut obtenir entre les bornes du récepteur une tension tantôt positive, tantôt négative.

Par une séquence adéquate de commande des semi-conducteurs. Il est donc possible de produire à la sortie du convertisseur une tension alternative de valeur moyenne nulle. Cette tension peut comporter un ou plusieurs créneaux par alternance, soit qu'il s'agit d'une commande à un créneau par alternance ou d'une commande par modulation de largeur d'impulsions (Pulse Width Modulation). [1]

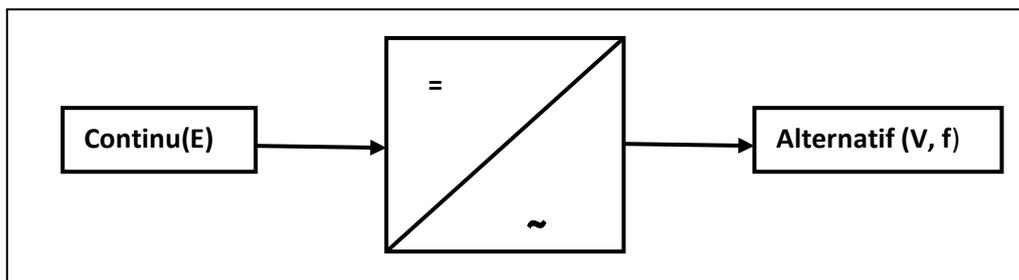


Figure1. 2 : Schéma bloc de la conversion continue -alternative

I.3 Principe générale de fonctionnement :

Le principe de fonctionnement d'un onduleur est basé sur l'électronique de commutation, on génère une onde de tension alternative à partir d'une tension continue

Comme la montre la figure 1.3. On peut dire qu'il existe deux moyens pour réaliser cette conversion :

✓ L'utilisation directe d'une paire d'interrupteurs de base, qui consiste à régler la fréquence et la durée des interconnexions de la source avec la sortie. Il est donc plutôt

Temporel et débouche sur les techniques de modulation de largeur d'impulsion.

✓ Contrôler l'amplitude soit de façon continue en créant d'une source réglable (ce qui suppose l'existence d'un autre étage de conversion), soit de façon discrète en disposant d'un nombre suffisant de sources [2]-[3]

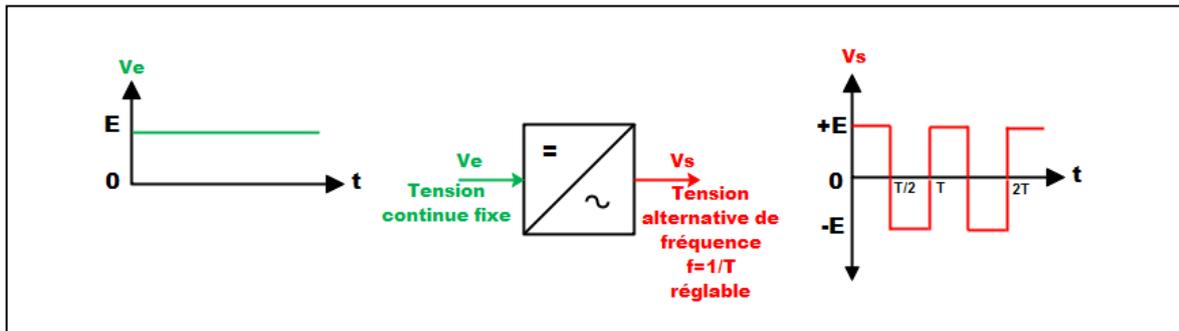


Figure1. 3 : Symbole et signal d'un onduleur

Quand $K_{11} = K_{22}$; sont fermés, et $K_{12} = K_{21}$ sont ouverts pour $t_1 < t < t_2$ on obtient une alternance positive $V(t) = E$, comme le montre la figure 1.4.

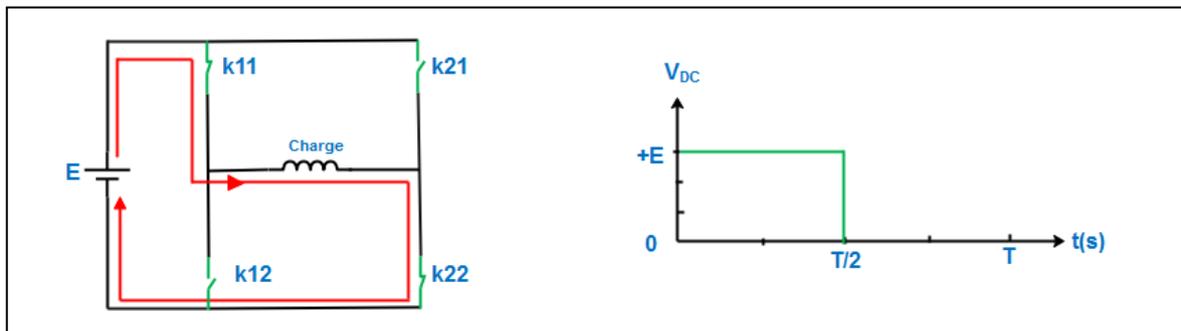


Figure1. 4 : Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le première demi-cycle

Quand $K_{11} = K_{22}$; sont ouverts, et $K_{12} = K_{21}$ sont fermés pour $t_2 < t < t_3$ on obtient une alternance négative $V(t) = -E$, comme le montre la figure 1.5.

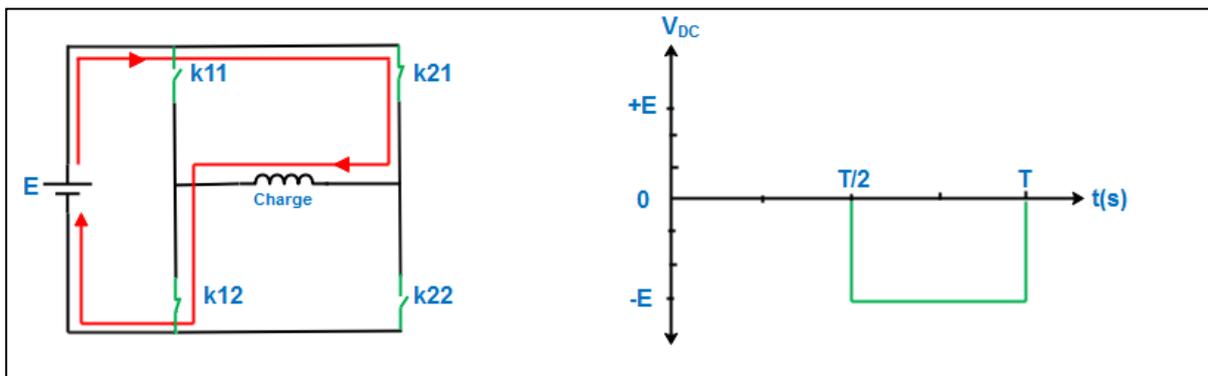


Figure1. 5 : Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le deuxième demi-cycle

Pour obtenir le signal résultant sur la période complète qui est présenté sur la figure1.6

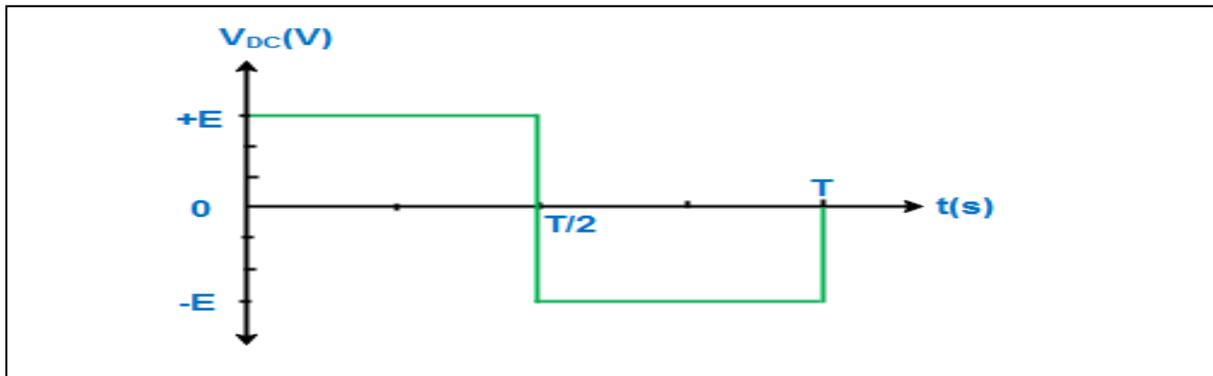


Figure1. 6 : Signal a la sortie de l'onduleur

I.4 Classification des onduleurs :

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.4.1 Les onduleurs autonomes :

Onduleur autonome (non raccordé au réseau électrique): On appelle onduleur autonome, un système qui délivre une tension avec une fréquence soit fixe, soit ajustable par l'utilisateur en épuisant de l'énergie d'un circuit auxiliaire pour la commutation des thyristors ou l'autre semi-conducteurs.

Les onduleurs autonomes sont constitués d'interrupteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture et dont les instants de commutations sont imposés par des circuits externes. Dans ce cas, on peut commander la fréquence de la tension de sortie de l'onduleur.[4]

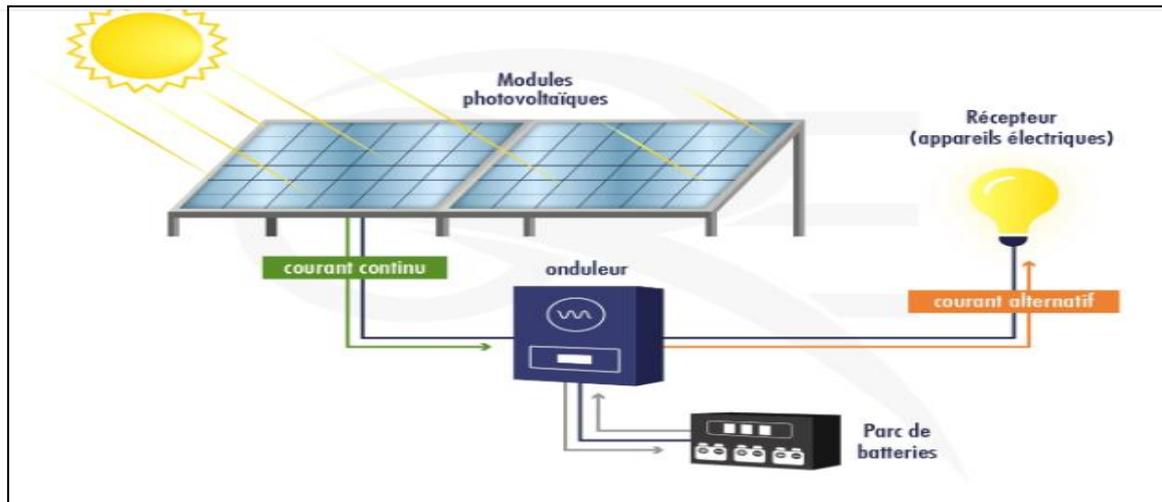


Figure 1.7 : Schéma d'un système photovoltaïque non raccordé au réseau

I.4.2 Onduleurs non autonome (raccordés aux réseaux):

Un onduleur réseau a pour principe de transformer une tension continue en une tension alternative, mais dans ce cas avec une fréquence et une valeur équivalente à celle du réseau. En effet, l'onde sera obligatoirement sinusoïdale et que cette tension alternative qui va charger le réseau, devra se mettre en phase avec ce dernier et répondre à un ensemble de prescriptions et d'impératifs de sécurité plus contraignants. Les onduleurs couplés au réseau utilisent deux techniques de génération du signal alternatif :

Soit la sinusoïde est produite par l'onduleur qui utilise le passage par zéro du réseau pour se synchroniser.

Soit le réseau est utilisé comme source du signal et de synchronisation.

Certains onduleurs utilisent un transformateur pour isoler les panneaux solaires du réseau.

D'autres, possède un système de test en continu du courant délivré par les panneaux. En cas de fuite, l'onduleur s'arrête pour éviter tout court-circuit entre les panneaux et le réseau. Chaque onduleur utilise pour son fonctionnement interne, une certaine quantité d'énergie fournie, soit par les panneaux photovoltaïques, soit par le réseau ce qui contribue à influencer les pertes de rendement annuelles. Pour la sécurité du système, les compagnies d'électricité exigent en général une surveillance de la tension et de la fréquence produites et une coupure très rapide en cas d'absence de réseau. Il faut noter que la limitation de puissance à 3,5 kW par phase implique une limitation du courant produit. Enfin, les onduleurs réseau sont de type MPPT (Maximum

Power Point Cracking) et leur microprocesseur peut faire varier le point de puissance maximale du générateur en direction de la tension ouverte et ainsi limiter la puissance à l'entrée.[4]

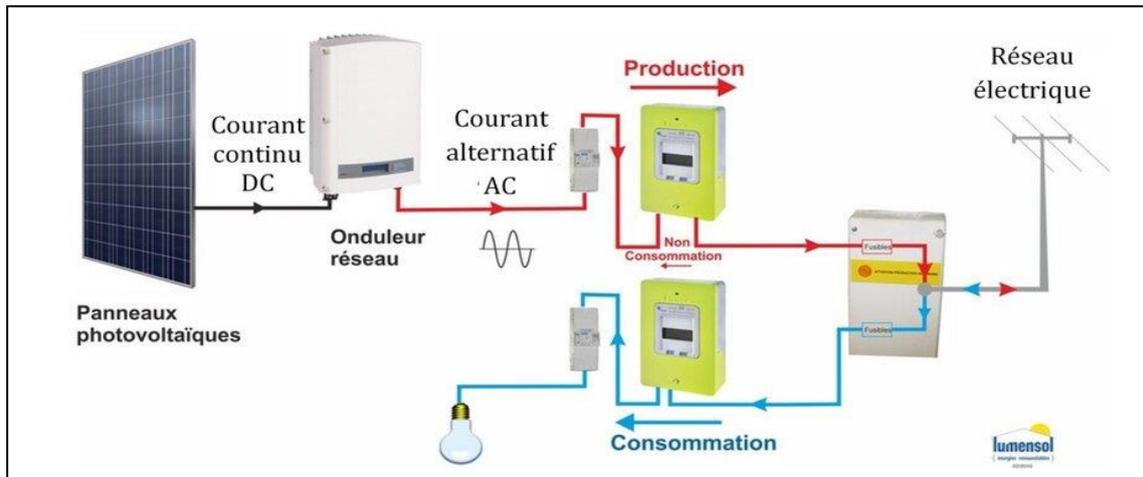
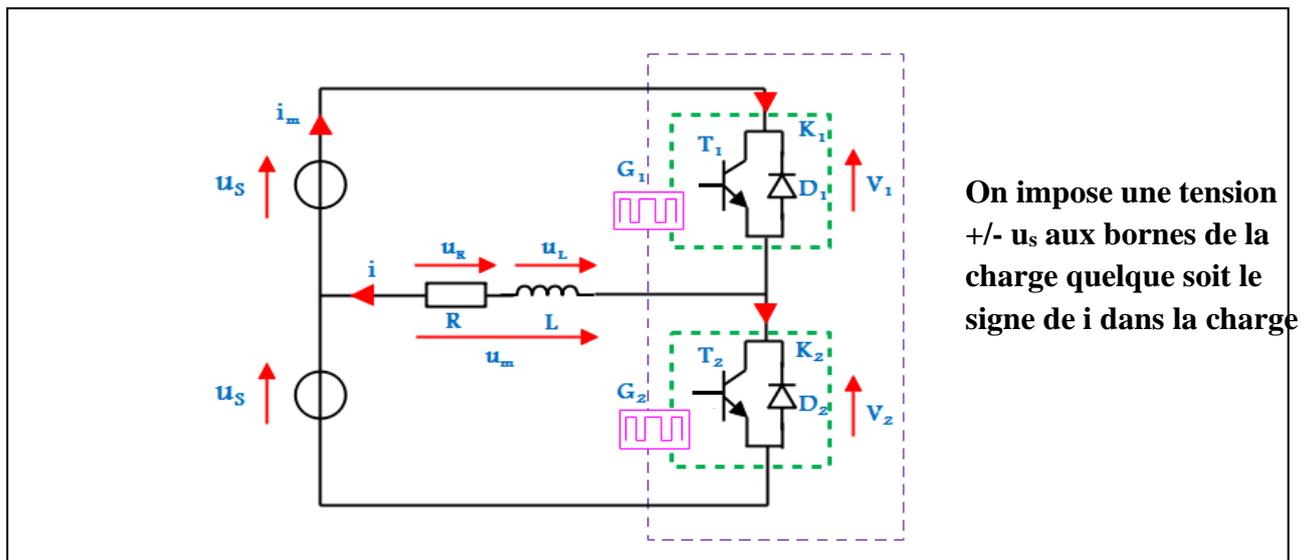


Figure 1.8 : Système photovoltaïque connecté au réseau

I.5 Onduleurs monophasé

I.5.1 en demi pont : le principe de l'onduleur monophasé en demi-pont peut être expliqué à partir de la figure [5]



On impose une tension $\pm u_s$ aux bornes de la charge quelque soit le signe de i dans la charge

Figure 1.9 : Schéma de l'onduleur en demi-pont

I.5.2 Montage en pont : L'onduleur en pont monophasé utilise la même structure que l'hacheur 4 quadrants. Seules la séquence des signaux de commande et sa fréquence de lecture les différencie [5]

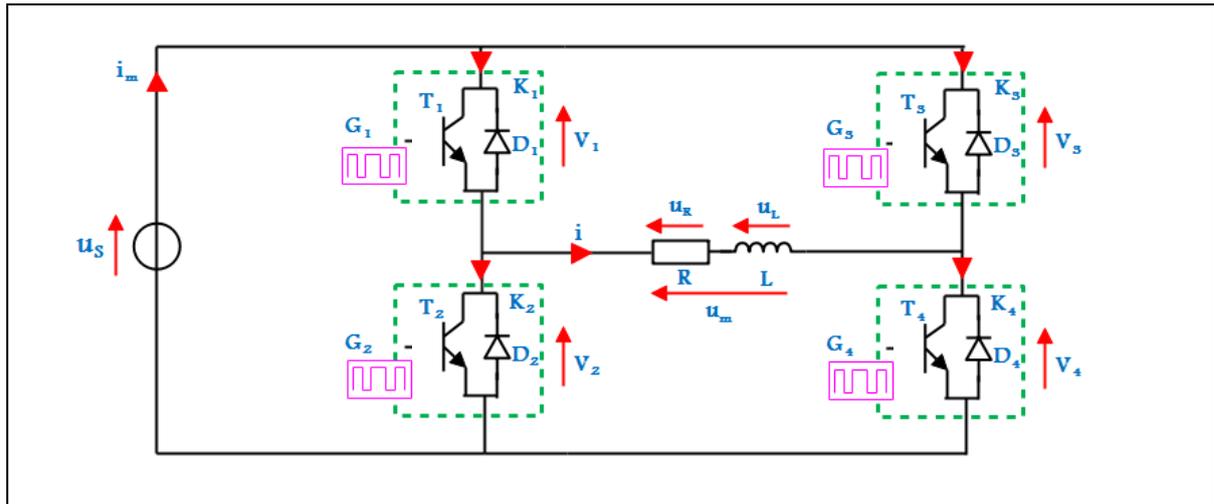


Figure 1.10 : Structure de l'onduleur en pont monophasé

I.6 Onduleur triphasé en pont :

L'onduleur triphasé en pont est constitué de trois cellules de commutation comme le montre la figure (1.11). 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.[6]

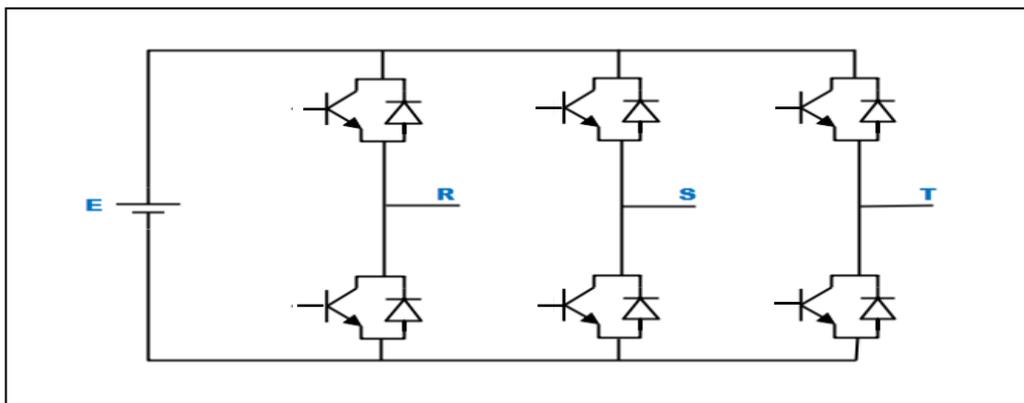


Figure 1.11 : Onduleur triphasé

I.7 Le convertisseur matriciel :

Le convertisseur matriciel (MC) est un convertisseur AC-AC direct. Il a été proposé en 1976 par Gaygyi Pelly. Appelé aussi convertisseur à commutation forcée, il utilise une matrice

(xm) d'interrupteurs bidirectionnels en puissance pour connecter directement les n phases d'entrée avec les m phases de sortie. Ses interrupteurs sont bidirectionnels donc ils peuvent conduire le courant dans les deux sens et bloquer les tensions dans les deux polarités ce qui lui permet de générer des tensions de sortie avec une fréquence variable (théoriquement illimitée) depuis n phases de tension alternative [7]

I.8 Les Avantages et inconvénients des convertisseurs matriciels :

Les avantages et les inconvénients des convertisseurs matriciels sont

I.8.1 Avantages :

Une large gamme de variation de la fréquence.

Un spectre de fréquence faible pour les grandeurs d'entrée aussi bien que pour les grandeurs de sortie.

Possibilité de travailler dans les deux sens donc dans les quatre quadrants du plan tension/courant, ce qui permet d'avoir le fonctionnement moteur, aussi bien le fonctionnement générateur.

Caractéristiques de puissance d'entrée pure avec un facteur de puissance unitaire

Convertisseur tout silicium de petite taille et économique.

Il ne nécessite pas d'élément réactif encombrant,

Lourd et susceptible de défaillance [8]

I.8.2 Inconvénients :

L'inconvénient principal est qu'il génère de larges courants d'harmoniques à l'entrée ainsi que des tensions d'harmoniques à la sortie qui ne peuvent être éliminées facilement par des filtres. Ce problème a été résolu par Mr Venturi ni en 1980 qui a proposé un nouvel algorithme à commande MILI. Cet algorithme permet d'avoir des courants à l'entrée et des tensions de sortie sinusoïdale. En 1989 Venturi ni a publié une démonstration mathématique concernant l'amélioration du rapport de tension après avoir modifié l'algorithme original de Venturi ni.

Les risques de fautes de commutation

Le nombre élevé de semi-conducteurs à commander.

L'inconvénient majeur est le manque d'interrupteurs bidirectionnels, ce qui explique l'utilisation, en général, de deux transistors (IGBT) et deux diodes pour la réalisation de chaque interrupteur bidirectionnel.

Alors que le montage à émetteur commun est le plus utilisé car celui à collecteur

Commun est difficile à réaliser physiquement à cause des tensions différentes [8]

I.9 Les onduleurs multi niveaux :

Si un onduleur produit une tension de sortie de plus de trois niveaux, il est appelé multi-niveaux. Il comprend plusieurs d'interrupteurs semi-conducteurs, des sources de tension et des condensateurs dont la sortie génère des tensions avec des formes d'onde échelonnées. Il permet de surmonter les limitations de tension des dispositifs semi-conducteurs à structure conventionnelle à deux niveaux et d'améliorer la qualité de forme de signal de sortie par la diminution de sa distorsion harmonique totale THD. En effet, ils sont capables à partir de ses structures de synthétiser un signal de sortie en escalier proche de la sinusoïdale comme montre la figure 1.12.d avec des composants de filtre réduits et d'une bonne qualité de puissance de sortie du point de vue harmoniques. Ils sont donc les meilleures alternatives pour limiter les problèmes des onduleurs à deux niveaux. La valeur limitée de la tension de blocage de commutation est repoussée au fil d'amélioration basée au développement des onduleurs multi-niveaux, mais est toujours inférieure à 10 kV et elle ne pourra être franchie qu'avec l'avènement des nouvelles technologies. [9]

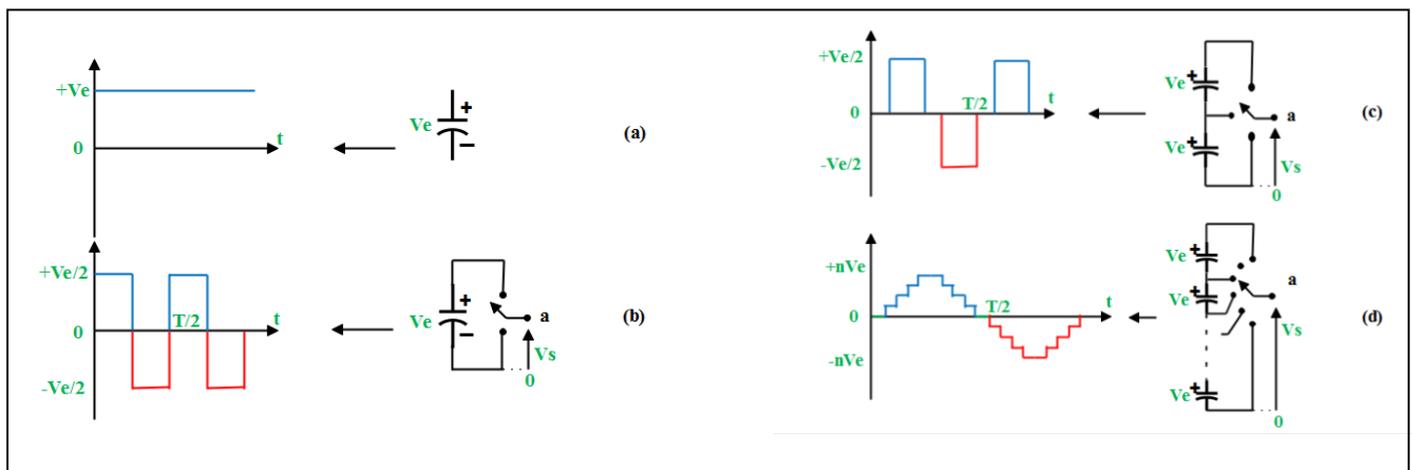


Figure 1.12 : Ondes de tension correspondantes a (a) une entrée continue, (b) Onduleur d'eaux niveaux (c) Onduleur trois niveaux (d) Onduleur multi niveaux

Une implémentation de convertisseur multi-niveaux consiste à utiliser une topologie plus complexe. Plus de signaux sont nécessaires pour les contrôler, mais les signaux résultants présentent des meilleures performances [9].

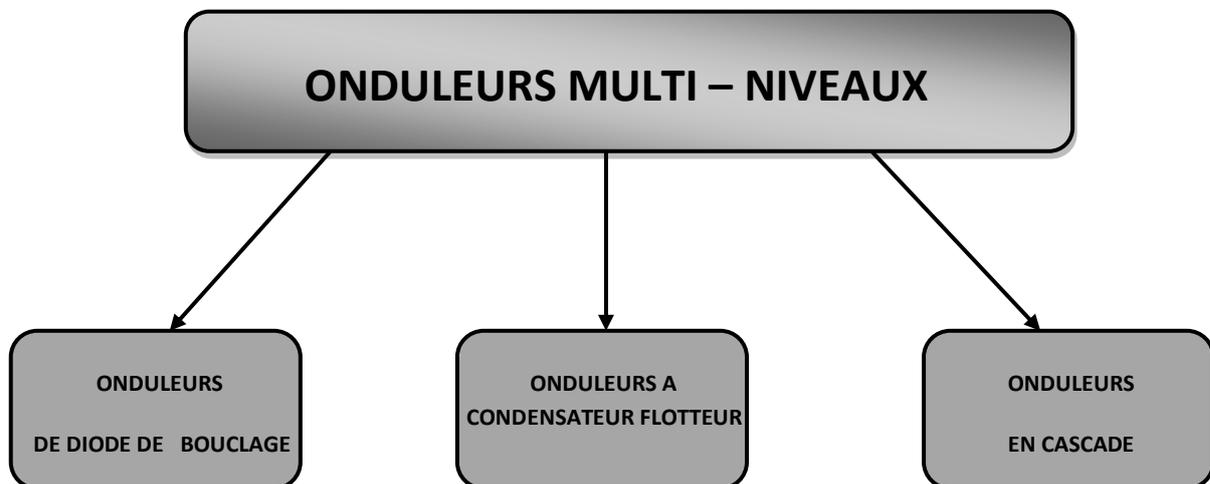


Figure 1.13 : les types des onduleurs multi-niveaux

I.10 Avantages des onduleurs multi-niveaux

Les onduleurs multi-niveaux offrent des avantages remarquables par rapport aux onduleurs à deux niveaux. Ces avantages dépendent, d'une part d'un point de vue technologique et d'autre part d'un point de vue fonctionnel. Les avantages d'un onduleur à cinq niveaux incluent une meilleure qualité des formes d'onde, des performances spectrales supérieures, une réduction des pertes dans les composants, et la possibilité de générer des tensions proches de la sinusoïde [1]

I.10.1 Avantages technologiques

La répartition de la tension dans les onduleurs, multi-niveaux est obtenue de manière naturelle en régime établi, ce qui permet de commuter chaque interrupteur indépendamment des autres. Ceci rend le convertisseur plus efficace et plus performant pendant les commutations. La tension commutée est d'amplitude réduite et la commutation devient plus simple à gérer.

I.10.2 Avantages fonctionnelles pour le convertisseur

Ces convertisseurs ont la possibilité d'accéder à des applications de haute puissance, et possèdent aussi des meilleurs compromis entre les performances statiques (tension de saturation) et performances dynamiques (pertes par commutation, temps de commutation).

I.10.3 Avantages fonctionnelles pour les machines tournantes

Le nombre de tensions générées par un onduleur multi-niveaux plus élevé que celui d'onduleur à deux niveaux, permet d'améliorer la qualité de sa forme d'onde, qui se traduit par la suite à une réduction de sa distorsion harmonique. Ceci peut entraîner des avantages considérables comme la diminution des pertes fer, l'augmentation du temps de vie des isolants, la diminution du rayonnement électromagnétique issu des bobinages de la machine

I.10.4 Principe général de fonctionnement de l'onduleur multi niveaux :

Le principe du comportement multi-niveaux est illustré dans la figure 1.14, elle aide à comprendre comment fonctionnent ces convertisseurs. Un convertisseur à deux niveaux est représenté à la figure 1.14(a), dans laquelle les commutateurs semi-conducteurs ont été remplacés par un interrupteur idéal.

La tension de sortie de l'onduleur ne prend que les valeurs : 0 ou V_{dc1} . Sur la figure 1.14(b), la tension de sortie de trois niveaux peut prendre les valeurs : 0, V_{dc1} , ou $-V_{dc1}$. Dans la figure 1.12(c), le cas général de (n) niveaux est présenté.[10]

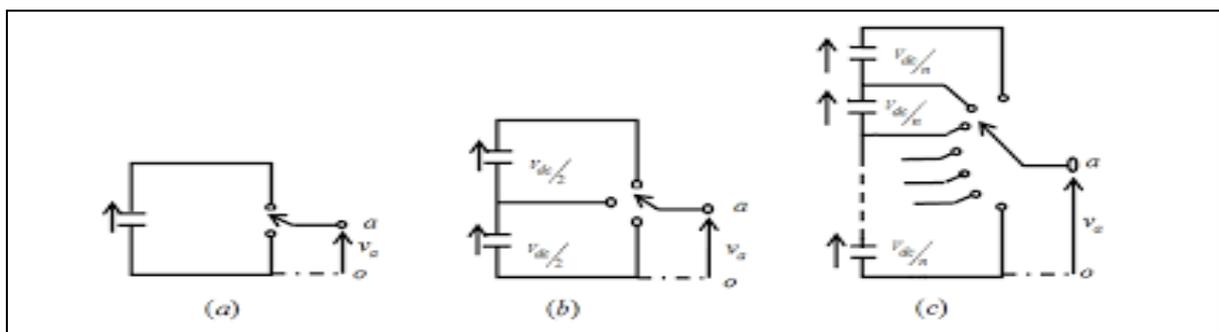


Figure 1.14: Onduleur a niveaux multiples a d'eaux(a) , trois(b) et a N niveaux(c)

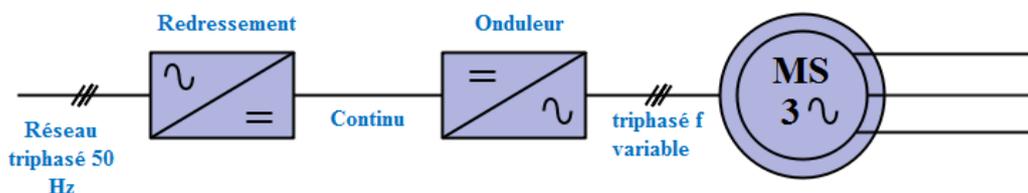
I.12 Les applications des onduleurs

Parmi les nombreux domaines d'emploi des onduleurs, on trouve principalement les onduleurs à fréquence fixe à commutation forcée : alimentés le plus souvent par une batterie d'accumulateurs. Ils jouent d'ordinaire le rôle d'alimentation de sécurité, ils constituent à ce titre,

Les onduleurs à fréquence variable à commutation forcée : alimentés à partir du réseau industriel par l'intermédiaire d'un montage redresseur, ils délivrent une tension de fréquence et de valeurs efficaces nécessaires pour faire tourner à vitesse variable un moteur à courant alternatif. L'onduleur de secours pour le matériel informatique permet d'assurer la continuité de l'alimentation en cas de coupures sur le réseau, il permet aussi de filtrer les éventuels défauts de la tension du réseau (passants ou surtensions) [1].

I.13 Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone :

La vitesse d'un moteur synchrone est fixée par la pulsation des courants statiques. Pour changer de vitesse il faut donc changer la fréquence des tensions d'alimentation. Il faut donc redresser la tension du réseau puis l'onduler à la fréquence désirée. [1]



I.14 Conclusion :

Les onduleurs jouent un rôle essentiel dans le domaine de l'électronique de puissance, en permettant la conversion de courant continu en courant alternatif et vice versa. Leur utilisation a connu une évolution significative grâce au développement technologique,

Les onduleurs sont classés selon différents critères, tels que la nature de l'alimentation et la nature de la charge

Ils sont largement utilisés dans divers domaines, y compris la commande de moteurs électriques et les systèmes d'alimentation sans interruption (ASI).

En conclusion, les onduleurs représentent une technologie fondamentale pour la conversion efficace de l'énergie électrique, et leur importance continue de croître avec les avancées technologiques.

CHAPITRE II

Modalisation d'un onduleur

Multi-niveaux

II.1 Introduction

Un convertisseur à niveaux multiples ou convertisseur multi-niveaux peut commuter chaque entrée ou sortie au moins entre trois niveaux de tension ou de courant. Dans les dernières années, on a vécu l'apparition et le perfectionnement de nouveaux composants de puissance commandables à l'ouverture et à la fermeture, qui ont permis la conception de nouveaux convertisseurs fiables, rapides et puissants. Parmi ces convertisseurs on distingue les convertisseurs multi-niveaux à structure NPC (Neutral Point Clamping Diode).

Dans toutes les topologies de convertisseurs multi-niveaux existant, plus le nombre de niveaux est élevé, plus compliquée devient la structure du convertisseur, son coût et la complexité de sa commande s'en trouvent augmentés, et sa fiabilité s'en trouve réduite.

Dans ce chapitre on présentera une dérivée de la structure d'onduleurs NPC à trois et à cinq niveaux qu'on va associer au compensateur de puissance réactive STATCOM, commandé par la stratégie de modulation de largeur d'impulsion à plusieurs porteuses.

II.2 Concepts multi niveaux :

Un onduleur de tension triphasé à N niveaux est un convertisseur statique capable de fournir, en équilibre, une tension entre chaque phase et le point négatif du bus continu avec N niveaux différents : 0, $E/(N-1)$, $2E/(N-1)$, ..., E. [15]

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

$$V_{VM} = \left(\frac{C_i}{N-1} \right) * E$$

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

L'onduleur de la Figure (II.1.a) délivre à sa sortie deux niveaux de tensions :

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

Les trois positions (P_1 , P_2 , P_3) de l'interrupteur de la Figure II.1.b, permettent d'avoir respectivement trois niveaux de tension (E , $-E$ et 0). D'où l'appellation onduleur à N niveaux de la Figure II.1.c.

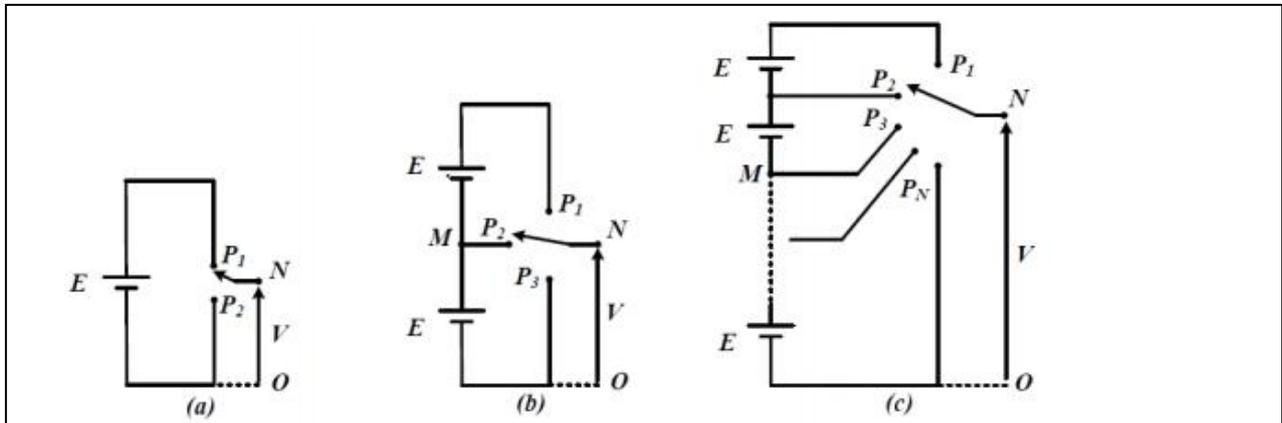


Figure 2.15: Schéma d'un bras d'onduleur à 2 niveaux, 3 niveaux et N niveaux

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

II.3 Définition et structure générale d'un onduleur de tension :

L'onduleur de tension est un convertisseur statique constitué de cellule de commutation à thyristor ou à transistor et qui transforme une tension continue en une tension alternative. Le principe de fonctionnement s'exprime dans le séquencement imposé aux interrupteurs statiques qui réalisent la modulation de largeur d'impulsion [16]

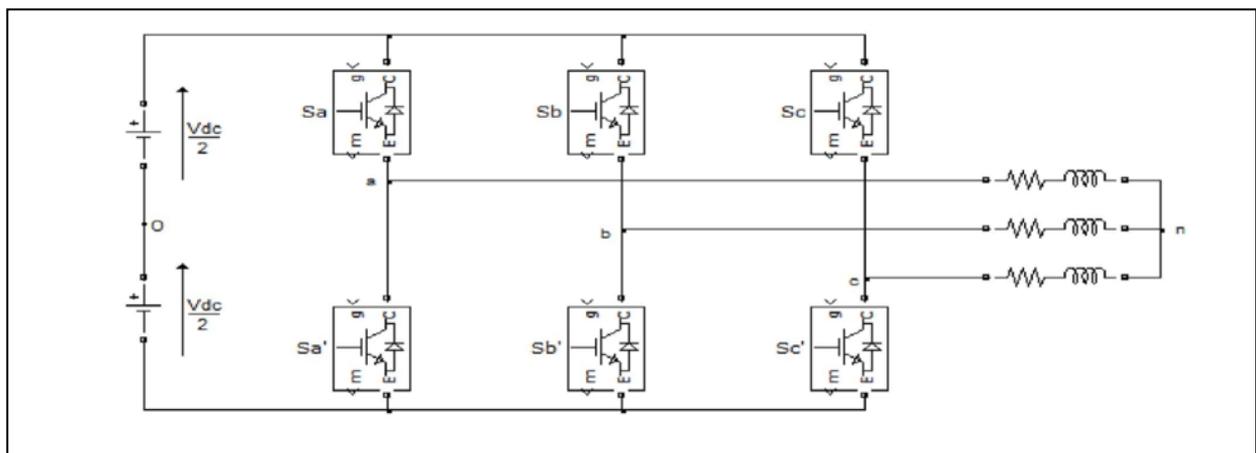


Figure 16: Onduleur de tension triphasé à deux niveaux

En cas de présence d'un point milieu la structure générale d'un onduleur de tension à deux niveaux est présentée par la Fig. 2.2. L'onduleur triphasés à deux niveaux est constitué par six interrupteurs, ces derniers ont la particularité d'être bidirectionnels en courant et entièrement commandables en ouverture et à la fermeture pour assurer la circulation du courant dans les deux sens, le thyristor ou le transistor doit être placé en anti parallèle avec une diode.

II.4 Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux

Les onduleurs de tension multi-niveaux peuvent être implantés de différentes manières, dans lesquelles la tension de sortie est produite à partir de plusieurs niveaux.

Les principales topologies sont représentées par la figure 2.3 [1]

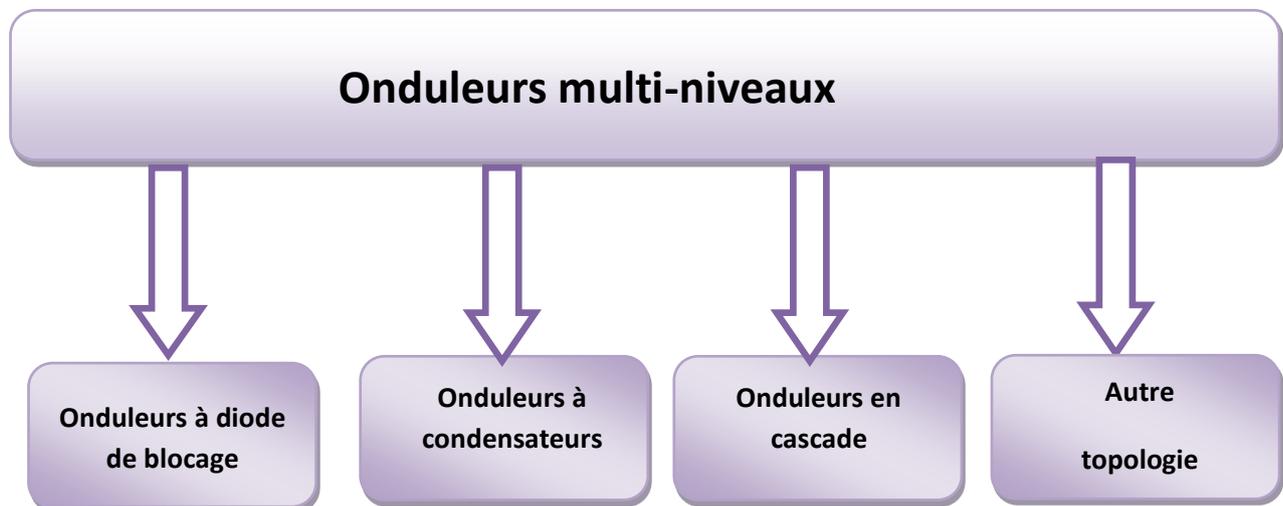


Figure 17: Différentes topologies des convertisseurs multi-niveaux

II.5 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 a semi-conducteur bloquent une tension inverse égale seulement à la moitié de la tension de la source continue.
- ✓ Toutes les phases partagent le même bus continu.
- ✓ la méthode de contrôle est relativement simple.
- ✓ la forme d'onde résultante donne une meilleure qualité spectrale par rapport à celle d'un onduleur triphasé classique, ce qui rend les filtres passifs peu volumineux.

II.6 Onduleur à trois niveaux de type NPC

II.6.1 Structure et principe de fonctionnement de l'onduleur NPC à trois niveaux :

L'onduleur NPC à trois niveaux est représenté à la Fig.2.4. 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. 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 (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. Les interrupteurs commandés sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant : il s'agit d'association d'un transistor et d'une diode en antiparallèle. [17]

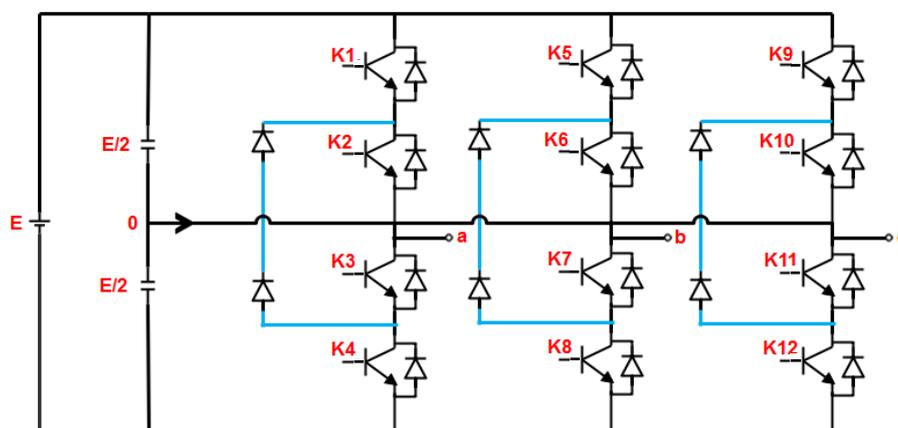


Figure 18: Schéma d'un Onduleur NPC a 3 niveaux

II.6.2 Model de l'onduleur à trois niveaux

La figure 1 montre la structure d'un onduleur de tension triphasé à trois niveaux à structure NPC. On commence par définir la fonction de connexion F_{ici} de l'interrupteur. Elle vaut 1 si l'interrupteur est fermé et 0 dans le cas contraire. [18]

En mode commandables, les fonctions de connexion de l'onduleur sont liées par la relation (1).

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

Avec $k=1, 2$ ou 3 , représente le numéro du bras.

Fig. 1. Onduleur à trois niveaux à structure NPC

On définit la fonction de connexion F_m du demi-bas comme suit :

$$\begin{cases} F_{K1} = F_{K1} * F_{K2} \\ F_{K0} = F_{K3} * F_{K4} \end{cases} \quad (2)$$

On désigne par $m=1$: le demi-bas du haut et $m = 0$: le demi-bas du bas. Les potentiels des nœuds A, B et C de l'onduleur triphasé à trois niveaux, par rapport au point M s'expriment comme suit

$$\begin{cases} V_{AM} = F_{11} * U_{C1} - F_{10} * U_{C2} \\ V_{BM} = F_{21} * U_{C1} - F_{20} * U_{C2} \\ V_{CM} = F_{31} * U_{C1} - F_{30} * U_{C2} \end{cases} \quad (3)$$

Les tensions simples de sortie s'écrivent

$$\begin{pmatrix} V_A \\ V_{BM} \\ V_{CM} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} * \left\{ \begin{pmatrix} F_{11} \\ F_{21} \\ F_{31} \end{pmatrix} U_{C1} - \begin{pmatrix} F_{10} \\ F_{30} \\ F_{30} \end{pmatrix} U_{C2} \right\} \quad (4)$$

Les onduleurs à trois niveaux de type NPC, également appelés onduleurs NPC, présentent plusieurs avantages et inconvénients.

II.6 .3 Avantage :

- Niveau de tension supplémentaire : Les onduleurs NPC offrent un niveau de tension supplémentaire par rapport aux onduleurs traditionnels à deux niveaux, ce qui permet

de fournir une tension plus proche de la forme sinusoïdale souhaitée, avec moins d'harmoniques indésirables

- Tension statique et dynamique améliorées : Grâce à la possibilité d'augmenter la tension des dispositifs en série, les onduleurs NPC offrent des performances statiques et dynamiques améliorées
- Meilleures performances spectrales : Les onduleurs NPC présentent des performances spectrales supérieures pour les formes d'ondes des grandeurs de sortie par rapport aux onduleurs à deux niveaux
- Réduction des problèmes de surtensions : La limitation naturelle des problèmes de surtensions est un avantage des onduleurs NPC

II.6.4 Inconvénients :

- Complexité accrue : Les onduleurs NPC sont plus complexes que les onduleurs à deux niveaux, ce qui peut entraîner une augmentation des coûts et de la complexité de la commande
- Utilisation de diodes : L'utilisation de diodes dans la structure NPC peut entraîner certains inconvénients, tels que des pertes de puissance et une réduction de l'efficacité
- Limitation des applications : Les onduleurs NPC sont principalement adaptés aux applications de puissance élevée et peuvent ne pas être aussi efficaces dans les applications de faible puissance

En résumé, les onduleurs NPC offrent des avantages significatifs en termes de performances spectrales, de tension statique et dynamique et de réduction des problèmes de surtensions, mais ils sont également plus complexes et peuvent présenter des inconvénients liés à l'utilisation de diodes et à la limitation des applications

❖ Les 3 états ou séquences de commutation possible sont résumé au tableau

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

Tableau : état possible de l'onduleur NPC a 3 niveaux

II.7 Onduleur à cinq niveaux de type NPC

II.7.1 Structure

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 tout au long du bus continu. [19]

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

La structure triphasée de l'onduleur NPC à cinq niveaux de tensions est présentée sur la figure 2.5.

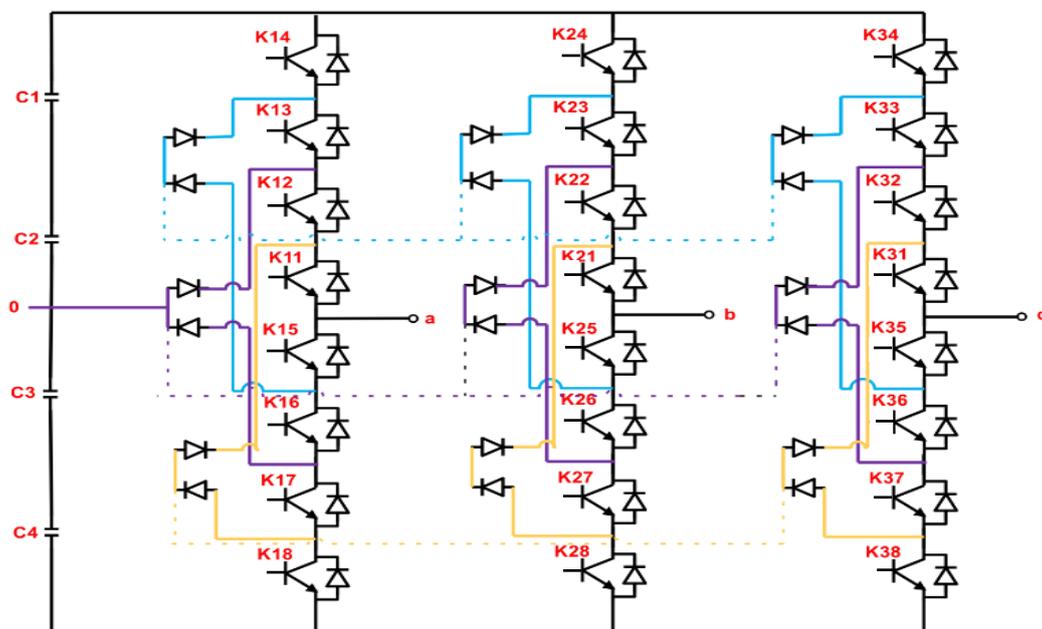


Figure 19: Schéma d'un onduleur NPC a 5 niveaux

II.7.2 Principe de fonctionnement :

Nous limiterons l'étude à un bras d'onduleur NPC de cinq niveaux, figure 2.7. 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.[19]

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

- Séquence 1:

K_1, K_2, K_3 et K_4 sont passants et $K_5, K_6, K_7,$ et K_8 sont bloqués

Alors, le point a est reliée directement à la borne positive du premier étage de tension $E/4$ et le point O est relié à la borne négative du deuxième étage de tension $E/4$ ce qui

implique que la tension de sortie vaut : $V_{ao}=+E/2$

▪ **Séquence 2:**

K_2, K_3, K_4 et K_5 sont passants et $K_6, K_7, K_8,$ et $K_1,$ sont bloqués, on a: la tension de sortie est:
 $V_{ao} = E/4+$

▪ **Séquence 3 :**

K_3, K_4, K_5 et K_6 sont passants et K_7, K_8, K_1 et $K_2,$ sont bloqués, on a La tension de sortie est :
 $V_{ao} = 0$

▪ **Séquence 4 :**

K_4, K_5, K_6 et $K_7,$ sont passants et K_8, K_1, K_2 et K_3 sont bloqués, on a : la tension de Sortie est :
 $v_{ao} = E/4$

▪ **Séquence 5 :**

K_5, K_6, K_7 et K_8 sont passants et K_1, K_2, K_3 et $K_4,$ sont bloqués, on a La tension de sortie est :
 $V_{ao}= E/ 2$

❖ Les Différentes séquences de fonctionnement et l'état des interrupteurs commandés sont regroupés dans le tableau

K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8	V_{ao}
1	1	1	1	0	0	0	0	$E/2$
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 : état possible de l'onduleur NPC a 5 niveaux

I.7.3 Les Avantages et les inconvénients :

Les onduleurs multi niveaux, tels que les onduleurs NPC (Neutral Point Clamped), offrent des avantages et des inconvénients spécifiques. Un onduleur NPC à cinq niveaux présente une meilleure qualité de tension de sortie par rapport aux onduleurs à deux et trois niveaux, grâce à une tension de sortie en forme d'escalier avec plus de paliers, ce qui permet une meilleure approximation de la sinusoïde

De plus, les interrupteurs commandés dans un onduleur NPC à cinq niveaux bloquent une tension deux fois plus faible que ceux d'un convertisseur à trois niveaux, ce qui réduit le stress sur les composants

Cependant, l'inconvénient majeur d'un onduleur NPC à cinq niveaux est la tension de blocage élevée, qui peut entraîner une augmentation des pertes et une réduction de la fiabilité

Le dimensionnement adéquat de l'onduleur est crucial pour minimiser ces effets négatifs. La stratégie de commande en pleine onde est une méthode courante pour commander ces onduleurs, permettant de générer une tension de sortie sinusoïdale avec des éraflures légères

II.8 Conclusion :

Nous avons étudié dans ce chapitre, l'onduleur multi-niveaux de type ANPC à trois et cinq niveaux de tension, commandé par la technique de modulation à plusieurs porteuses. Cette stratégie est d'une manière générale une extension de celles des onduleurs à deux niveaux.

Nous avons aussi présenté les résultats de simulation de ces onduleurs multi-niveaux à structure NPC. L'onduleur à deux niveaux conventionnel a la limitation de la tension continue disponible à son entrée. Par conséquent, la mise en série des dispositifs de commutation a été employée pour réaliser des systèmes de forte puissance. Il y a eu de grands intérêts dans l'onduleur à trois niveaux, qui peuvent surmonter les problèmes de la mise en série des interrupteurs à semi-conducteurs, d'autre part son interprétation physique en facilite l'analyse des stratégies de commande.

L'avantage qui découle de la structure de l'onduleur à cinq niveaux consiste à une meilleure maîtrise des contraintes en tension sur les composants, l'amplitude de la tension aux

bornes est limitée à la demi-tension de la source majorée de la surtension due à la commutation des interrupteurs. Cette topologie est en mesure de générer une tension simple à cinq niveaux.

CHAPITRE III
Technique de commande des
onduleurs a MLI triangle sinusoidale

III.1 Introduction :

Le choix du mode de commande de l'onduleur repose sur deux paramètres : les caractéristiques désirées de la tension de sortie (distorsion acceptable, spectres de basses fréquences souhaités, etc.) et la fréquence de commutation des semi-conducteurs utilisés dans l'application de puissance. Dans ce contexte, plusieurs stratégies de commande des onduleurs de tension peuvent être envisagées :

- À basses fréquences, ils sont commandés en pleine onde, avec un signal de commande à la fréquence de la tension souhaitée en sortie, nécessitant une source continue ajustable (à l'aide d'un redresseur à thyristor ou d'un hacheur, etc.).
- À hautes fréquences, ils sont commandés par modulation de largeur d'impulsion, permettant le réglage simultané de l'amplitude et de la fréquence tout en maintenant constante la source continue (pont à diode). Cela vise à produire une tension de sortie proche de la sinusoïde.

Diverses stratégies de commande ont été proposées par différents chercheurs, comme illustré dans la figure 3.1.

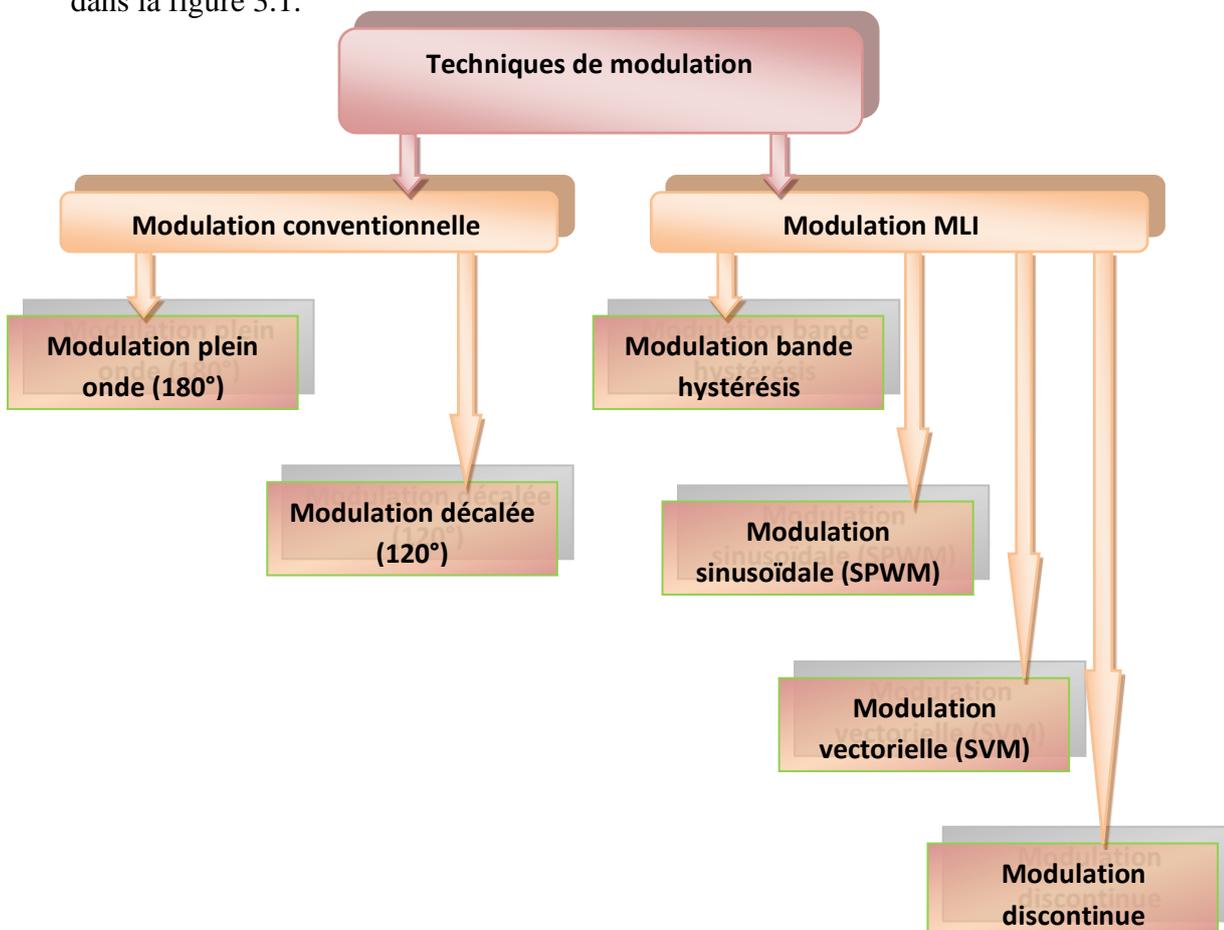


Figure 20: Classification des stratégies de modulation selon la fréquence

III.2 Techniques de commande des onduleurs :

III.2.1 Modulation à haute fréquence :

L'application de techniques de commande à des fréquences de découpage plus élevées permet de déplacer les harmoniques de commutation vers des fréquences plus élevées et plus facilement filtrables, améliorant ainsi la qualité du spectre de tension. Ces techniques (Commande par hystérésis, Commande par modulation de largeur d'impulsion, Commande par injection d'harmoniques et Commande par modulation de largeur d'impulsion vectorielle) [1].

Permettent non seulement le contrôle du fondamental de la tension côté alternatif, mais également de l'ensemble de son spectre de basse fréquence.

Dans la suite de ce chapitre, nous examinerons la méthode de commande suivante :

- Commande par modulation de largeur d'impulsion

III.2.2 Modulation de largeur d'impulsion :

La Modulation en Largeur d'Impulsions (MLI) est une méthode de contrôle des convertisseurs statiques qui agissent comme une liaison entre une charge (comme une machine électrique) et son alimentation (comme un onduleur triphasé). Elle est utilisée pour la conversion d'énergie et est connue en anglais sous le nom de Pulse Width Modulation (PWM). La commande MLI est cruciale pour la régulation de la vitesse, ce qui affecte les performances globales du système, y compris les performances de l'entraînement, les pertes dans l'onduleur ou la machine, ainsi que le niveau de bruit acoustique. Cette technique permet de générer les tensions ou courants désirés aux bornes de la charge à partir d'une source à fréquence et tension fixes (généralement une tension continue), en utilisant un convertisseur direct qui établit la connexion électrique entre la source et la charge. Le réglage est réalisé en ajustant les durées d'ouverture et de fermeture des interrupteurs (semi-conducteurs) ainsi que les séquences de fonctionnement. [1]

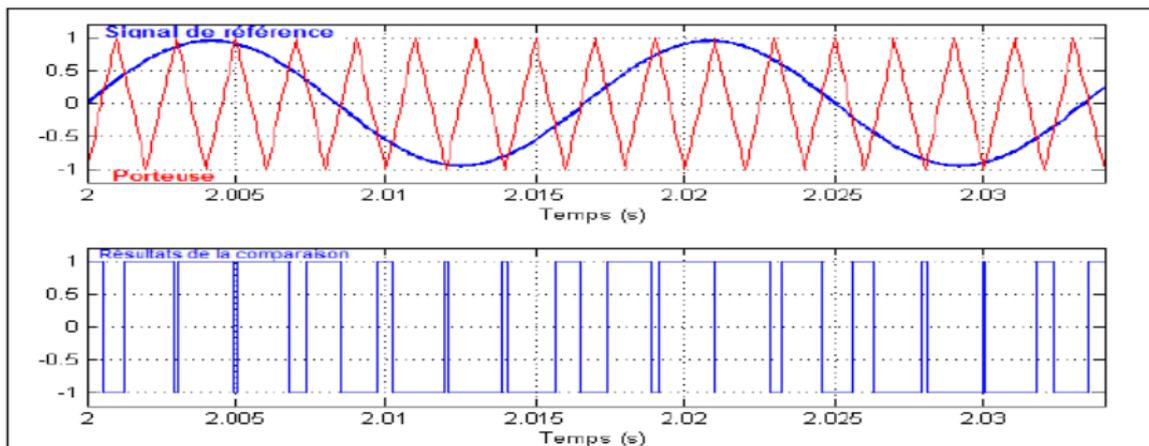


Figure 21: Comparaison entre le signal de référence et le signal triangulaire [1]

Dans cette Figure :

1. La porteuse, définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques du convertisseur. C'est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence
2. La comparaison de ses 2 signaux donne un signal carré dont la somme donne le signal final modulé.

III.2.3 Modulation de largeur d'impulsion sinus-triangle :

La modulation de largeur d'impulsion est réalisée en comparant une onde basse fréquence (tension de référence) avec une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire (Figure 1.3). Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante, avec la fréquence de commutation des interrupteurs fixée par la porteuse. [20]

Dans un système triphasé, trois références sinusoïdales déphasées de $2\pi/3$ à la même fréquence f sont utilisées. Puisque la tension en sortie de l'onduleur n'est pas purement sinusoïdale, mais comporte des harmoniques, responsables des parasites et engendrant des pertes supplémentaires, cette modulation de largeur d'impulsion vise à remédier à ces problèmes. Elle présente les avantages suivants :

- Variation de la fréquence de la tension de sortie.
- Élimination de certaines harmoniques de tension.

III.3 Caractéristiques de la modulation de largeur d'impulsion MLI

Les paramètres essentiels de la MLI sont :

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

Avec : A_r , est l'amplitude de la référence et A_p , l'amplitude de la porteuse.

- La modulation montre que plus $\langle\langle m \rangle\rangle$ est grande et plus la neutralisation des harmoniques est efficace.
- La modulation est dite synchrones si $\langle\langle m \rangle\rangle$ est entier, elle est dite asynchrones dans le cas contraire.

Pour le choix de $\langle\langle m \rangle\rangle$, on doit tenir compte des pertes supplémentaires pendant les commutations d'un état à l'autre, ces pertes croissent lorsque la fréquence de modulation augmente.[21]

III.3.1 L'indice de modulation (m) :

C'est le rapport entre la fréquence de modulation et la fréquence de référence. Lorsque la modulation synchrone est suffisamment importante ($m > 15$), les raies se regroupent en séquences aux rangs suivants : 1, ($m-2$, m , $m+2$), ($2m-5$, $2m-3$, $2m-1$, $2m+1$, $2m+3$, $2m+5$...). Une augmentation de m entraîne le déplacement des premiers harmoniques non nuls vers des fréquences plus élevées, ce qui facilite leur filtrage. Cependant, m est limité par les temps de commutation des interrupteurs du convertisseur et donc par la largeur minimale des impulsions.[1]

III.3.2 Le coefficient de réglage :

Le coefficient de modulation est défini comme le rapport entre l'amplitude de tension de référence et la valeur crête de la modulation de fond. Cette relation reste valable pour un fonctionnement en modulation de largeur d'impulsion (MLI), et par extension pour un

fonctionnement en pleine onde. La valeur maximale du coefficient de modulation, notée r_{\max} , peut varier dans une fourchette d'environ 25%, en fonction de la technique de MLI utilisée. L'indice de modulation r_{\max} d'une MLI revêt une grande importance car il indique la capacité d'une méthode à exploiter au maximum la tension du bas continu. En ajustant sur r , il est théoriquement possible d'augmenter l'amplitude du fondamental de 0 jusqu'à son maximum.

La modulation de largeur d'impulsion (MLI) permet de s'approcher du signal désiré, mais elle présente des imperfections. Les harmoniques générées par l'onde MLI entraînent des pertes dans le réseau (pertes fer dans le transformateur, pertes joule dans la ligne et le convertisseur) et dans la charge (pertes joule, fer et par courants de Foucault). Ces pertes engendrent des oscillations de couple et des bruits acoustiques dans les machines tournantes, et introduisent des non-linéarités pouvant déstabiliser le système. Il est donc nécessaire de minimiser ces harmoniques.[1]

La méthode MLI sinusoïdale et les différentes grandeurs appliquées à l'onduleur sont illustrées dans la figure (2.14), notamment les signaux de référence issus de la commande (V_{aref} , V_{bref} , V_{eref}), le signal de la porteuse V_p , ainsi que les tensions simples V_{an} et composée en sortie de l'onduleur.

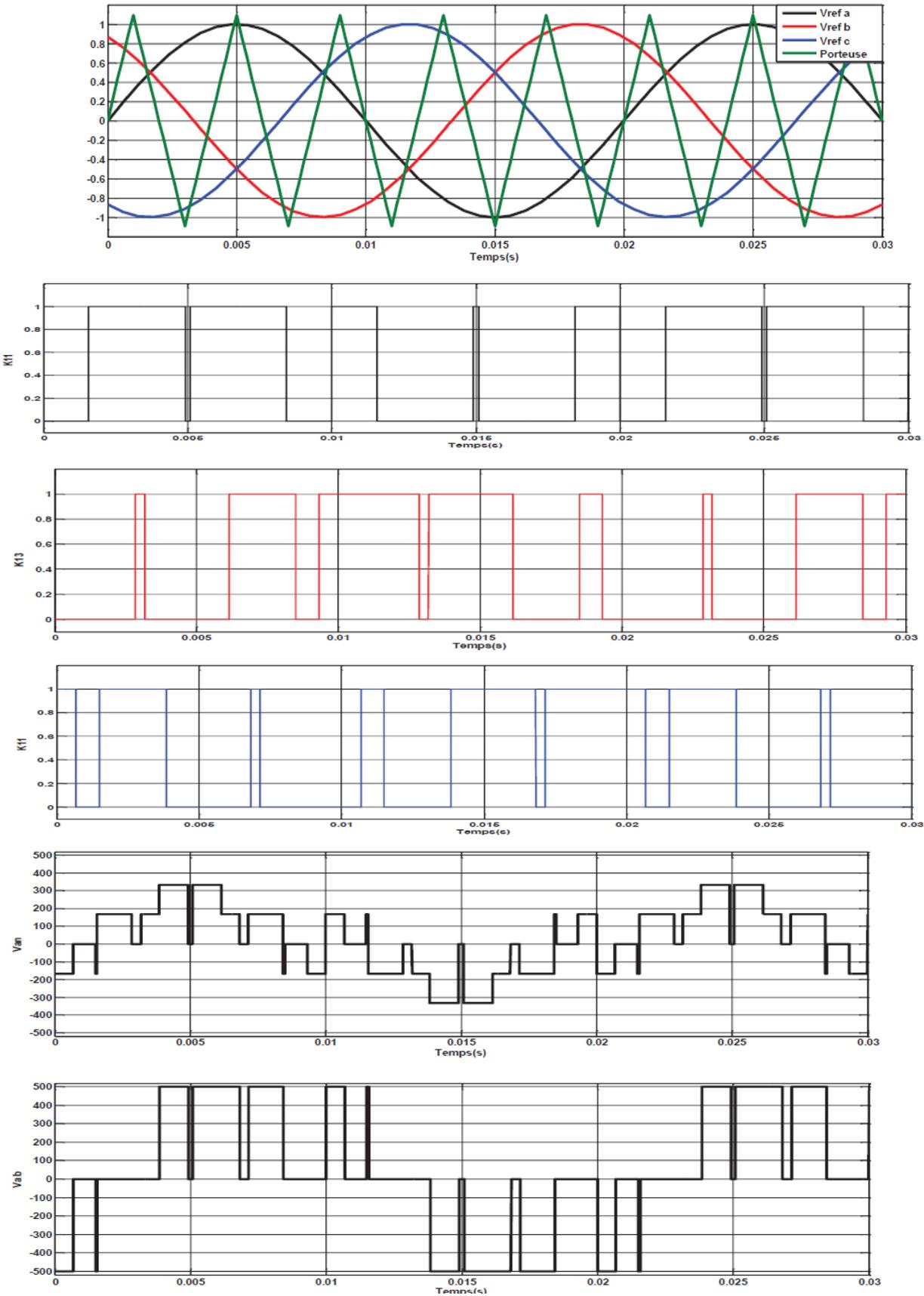


Figure 22:Principe de la modulation sinus-triangle [1]

III.4 Avantages et inconvénients de la Technique de MLI-ST :

III.4.1 Avantages :

1. Réduction des harmoniques :

- La MLI ST permet de réduire efficacement les harmoniques de tension dans la sortie de l'onduleur, améliorant ainsi la qualité de l'alimentation électrique.

2. Meilleur rendement :

- En optimisant la sélection des vecteurs de commutation, la MLI ST contribue à améliorer le rendement global du système d'onduleur.

3. Flexibilité de commande :

- La MLI ST offre une flexibilité accrue dans la génération des signaux de commande, ce qui permet d'adapter le comportement de l'onduleur à différentes conditions de charge et de fonctionnement.

III.4.2 Inconvénients :

1. Complexité de mise en œuvre :

- La mise en œuvre pratique de la MLI ST peut être plus complexe que certaines autres techniques de modulation en raison de la nécessité de sélectionner et de calculer les vecteurs de commutation de manière précise.

2. Besoin de calculs avancés :

Pour obtenir les avantages de la MLI ST, des calculs avancés sont souvent nécessaires pour déterminer les angles de commutation et sélectionner les vecteurs appropriés, ce qui peut nécessiter une expertise approfondie en électrotechnique.

III.5 Analyse harmonique de la tension de sortie de l'onduleur :

III.5.1 Origine des harmoniques :

Les harmoniques proviennent de charges non linéaires qui absorbent un courant non sinusoïdal. Les équipements à thyristors sont actuellement la principale origine de ces harmoniques. Ces dispositifs, dont les propriétés électriques changent avec la tension, agissent

comme des générateurs de courants harmoniques présents dans les appareils tels que l'éclairage fluorescent, les variateurs de vitesse, les redresseurs, les téléviseurs, les ordinateurs, etc. [22]

III.5.2 Mode de représentation ; le spectre en fréquence :

Le spectre est un histogramme fournissant l'amplitude de chaque harmonique en fonction de son rang et son importance [22]

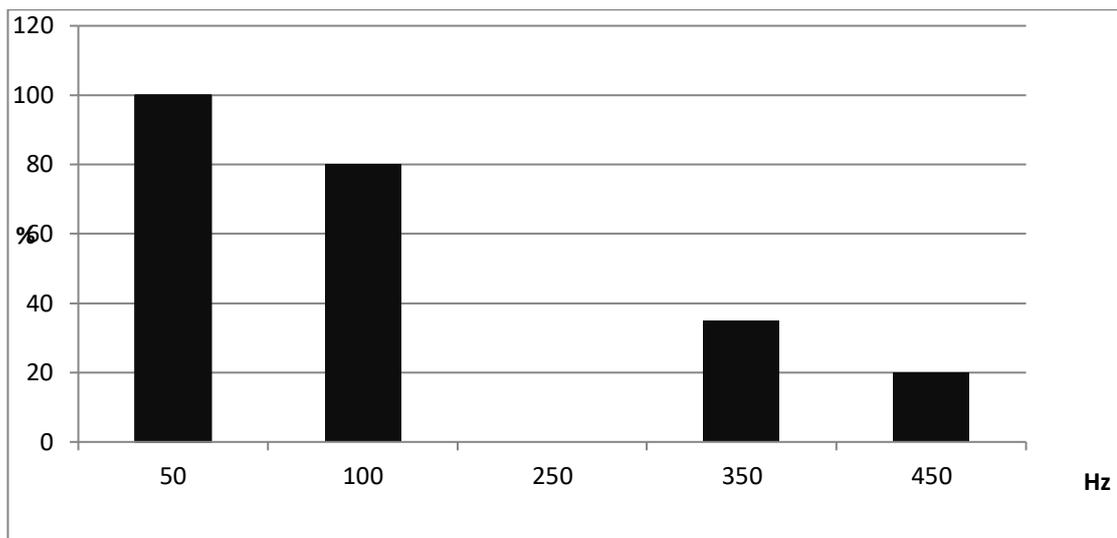


Figure 23: Spectre d'harmonique d'un signal électrique donné

III.5.3 Les harmoniques mesurés en pratique :

Dans les réseaux triphasés, les harmoniques les plus courants sont ceux de rangs impairs. Au-delà du rang 50, les courants harmoniques deviennent négligeables et leur mesure perd en signification.

Pour une précision de mesure optimale, il est recommandé de considérer les harmoniques jusqu'au rang 50, avec une attention particulière portée aux harmoniques de rangs 3, 5, 7, 9, 11 et 13.

Il est impératif de compenser les harmoniques jusqu'au rang 13, mais une compensation efficace devrait également inclure les harmoniques jusqu'au rang 25. [22]

III.5.4 Caractérisation des perturbations harmoniques :

Différentes grandeurs sont définies pour caractériser la distorsion en régime déformé. Le taux global de distorsion harmonique (THD) et le facteur de puissance sont les plus

Employés pour quantifier respectivement les perturbations harmoniques et la consommation de puissance réactive.

- Le taux de distorsion harmoniques.

Notre étude se limite au cas où la source de courant est sinusoïdale et où la tension absorbée par la charge est entachée de composantes harmoniques. Dans ces conditions, le taux global de distorsion harmonique est bien adapté pour quantifier le degré de pollution harmonique sur les réseaux électriques. Le THD s'exprime par rapport à la fréquence fondamentale et caractérise l'influence des harmoniques sur l'onde de tension déformée. Il est donné par l'expression suivante :

$$THD (\%) = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n V_i^2}}{V_i}$$

III.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons examiné en détail la commande MLI sinusoïdale, une méthode cruciale pour générer des tensions de sortie de haute qualité dans les systèmes d'onduleurs. Nous avons passé en revue ses caractéristiques, souligné ses avantages tels que sa capacité à produire des formes d'onde sinusoïdales pures et son efficacité énergétique, tout en reconnaissant ses inconvénients potentiels tels que la complexité du contrôle pour maintenir une qualité de sortie constante. De plus, nous avons exploré les analyses harmoniques pour évaluer la distorsion harmonique présente dans la tension de sortie, offrant ainsi une perspective sur la qualité du signal électrique généré par la commande MLI-ST.

Chapitre IV :

**Simulations et interprétations
des Résultats**

IV.1 Introduction

Les onduleurs de tension triphasés à trois niveaux avec structure NPC (Neutral Point Clamped) sont essentiels dans les applications de haute puissance et haute tension. Ce chapitre est consacré à la simulation de cet onduleur NPC à deux, trois et cinq niveaux sous MATLAB. Associée à une charge, la simulation utilise la commande MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion).

Pour démontrer les avantages de l'onduleur à trois niveaux, une simulation détaillée est réalisée avec MATLAB/SIMULINK. MATLAB est un langage de développement informatique principalement destiné au calcul scientifique, à la modélisation et à la simulation. Il est utilisé pour développer des solutions nécessitant une grande puissance de calcul. Le noyau de calcul de MATLAB est associé à l'environnement SIMULINK, permettant une modélisation basée sur des schémas-blocs.

Simulink est un environnement de diagramme pour la simulation multi-domaine et la conception basée sur un modèle. Il prend en charge la conception au niveau du système, la simulation, la génération automatique de code, ainsi que les tests et vérifications continus des systèmes embarqués. Simulink fournit un éditeur graphique, des bibliothèques de blocs personnalisables et des solveurs pour la modélisation et la simulation de systèmes dynamiques. Il est intégré à MATLAB, permettant d'incorporer des algorithmes MATLAB dans des modèles et d'exporter les résultats de simulation vers MATLAB pour une analyse approfondie.

Dans ce chapitre, nous utilisons MATLAB pour simuler l'onduleur de tension NPC à deux, trois et cinq niveaux, commandé par la technique de MLI-ST.

IV.2 Commande MLI ST :

IV.2.1 Onduleur a deux niveaux :

La figure présente schéma bloc d'un onduleur triphasé a deux niveaux de tension. Il se compose de trois bras de commutation a transistors associé a charge, cet onduleur est commander en MLI-ST.

La tension de la source continue qui alimente notre onduleur est fixé de valeur 400V

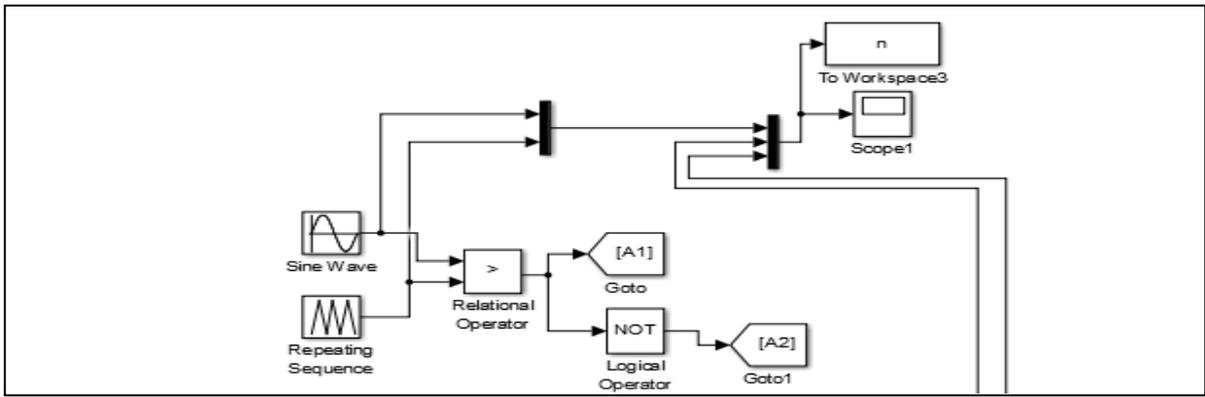


Figure 24: Les signaux de commande MLI-ST d'un onduleur a 2 niveaux d'un bras

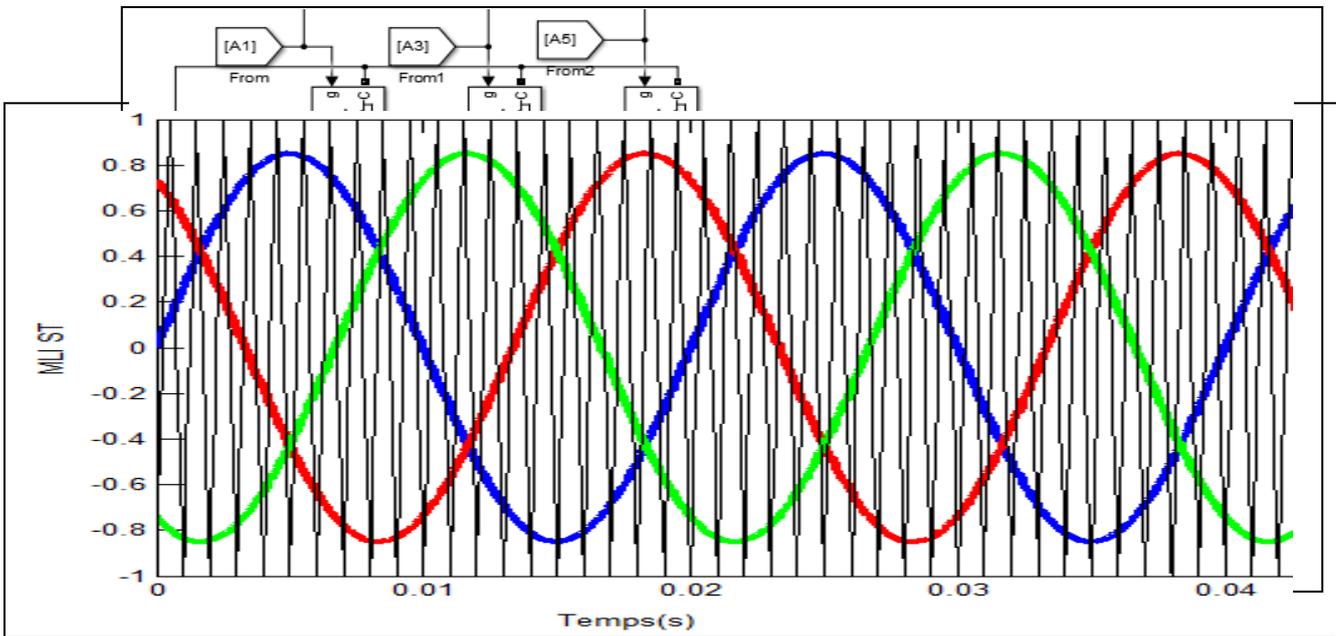


Figure 25: Schéma bloc de l'onduleur NPC a 2 niveaux avec la commande MLI-ST

Figure 26: Principe de la MLI à une seule porteuse un onduleur a deux niveaux

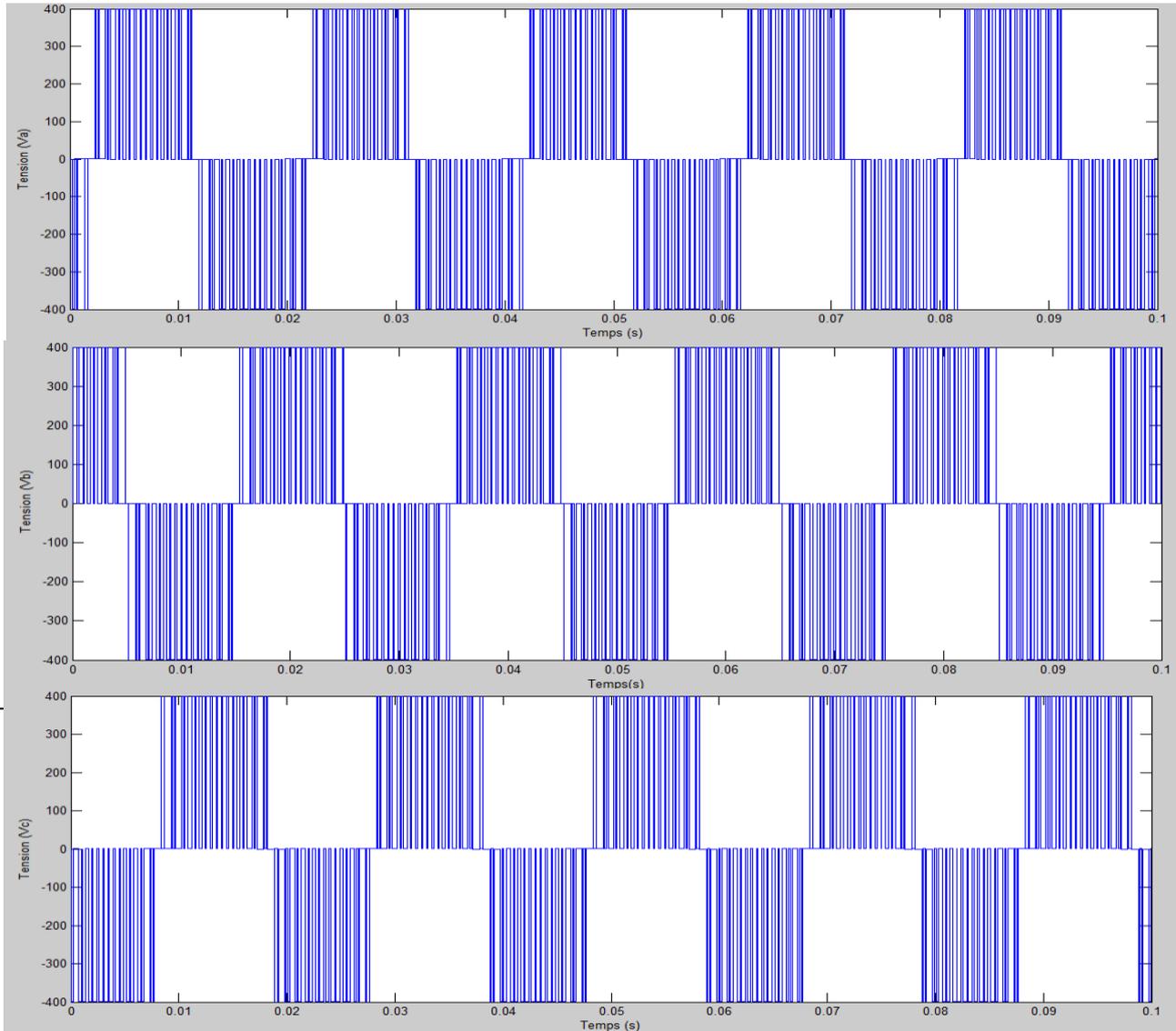


Figure 27: Tension Va, Vb, Vc de la sortie de l'onduleur de deux niveaux commande MLI-ST

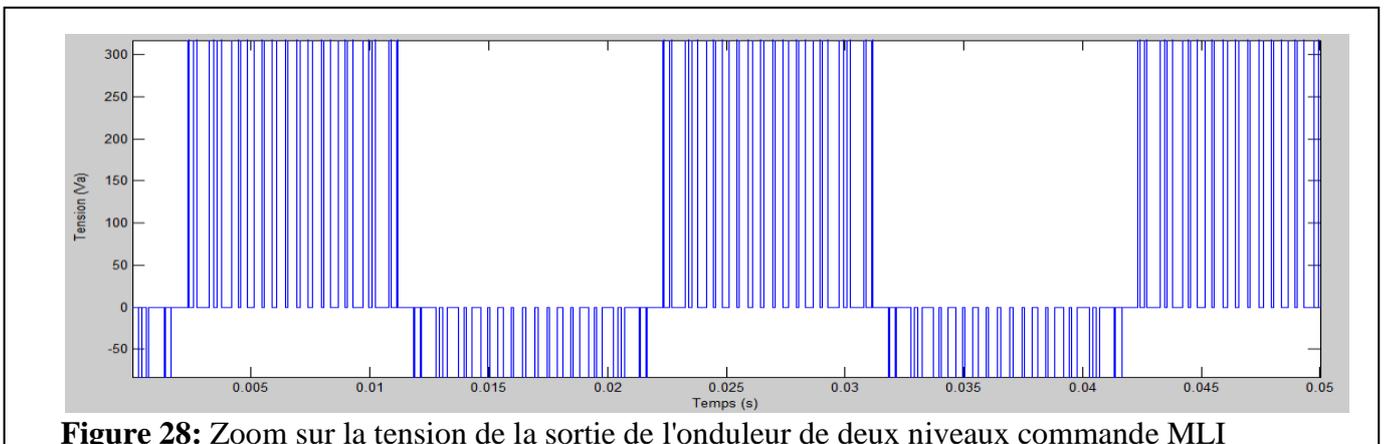


Figure 28: Zoom sur la tension de la sortie de l'onduleur de deux niveaux commande MLI

La tension de la sortie de l'onduleur de deux niveaux, on remarque que le signal est périodique et prend un signal carré. La valeur maximale est égale la valeur de la source d'alimentation **400V**.

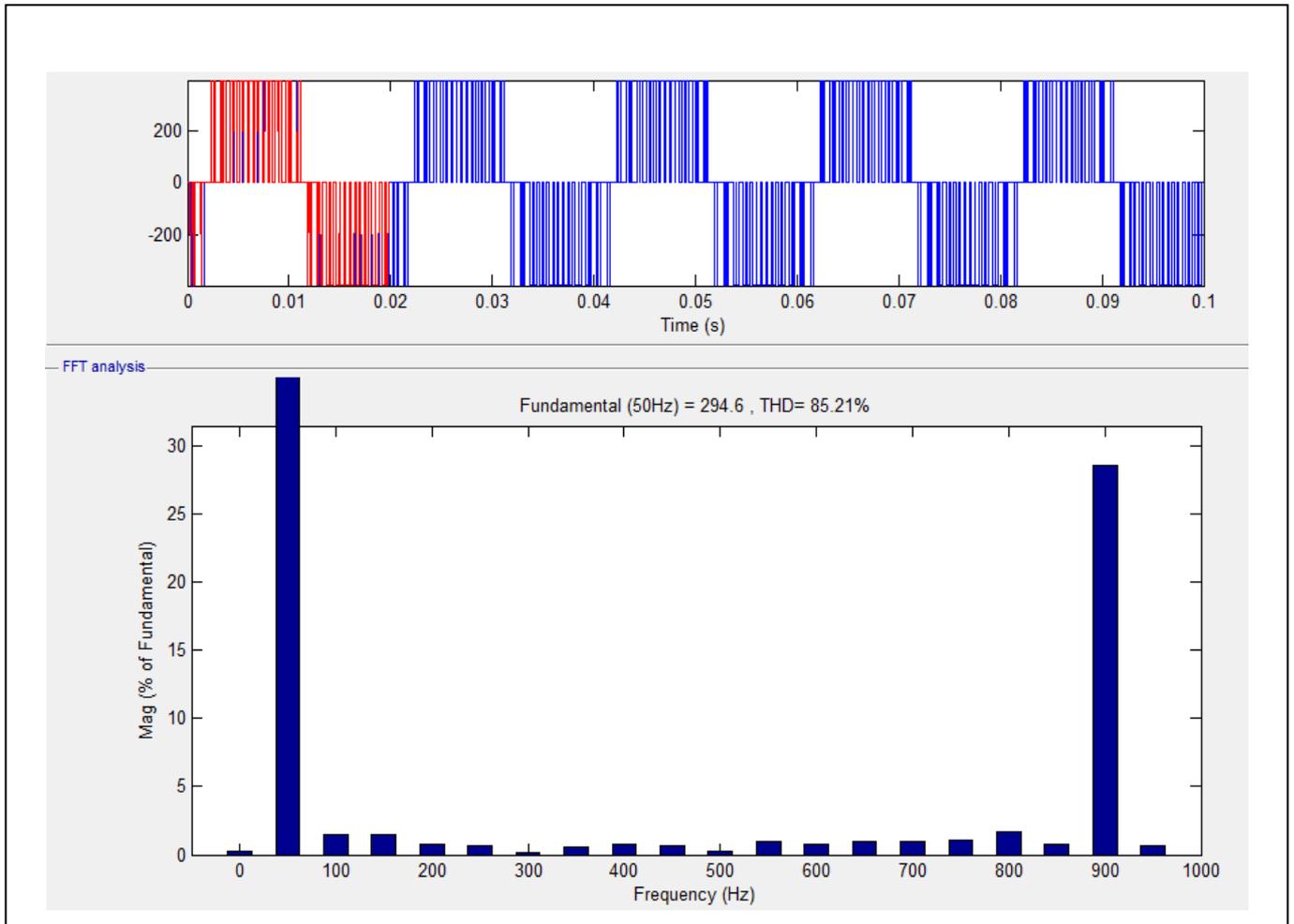


Figure 29: Spectre d'harmonique de la tension simple V_a

La figure 4.5 représente l'analyse spectral d'harmonique de la commande MLI-sinusoidale et nous avons obtenus le **THD** = 85,21%.

IV.2. 2 Onduleur à Trois niveaux :

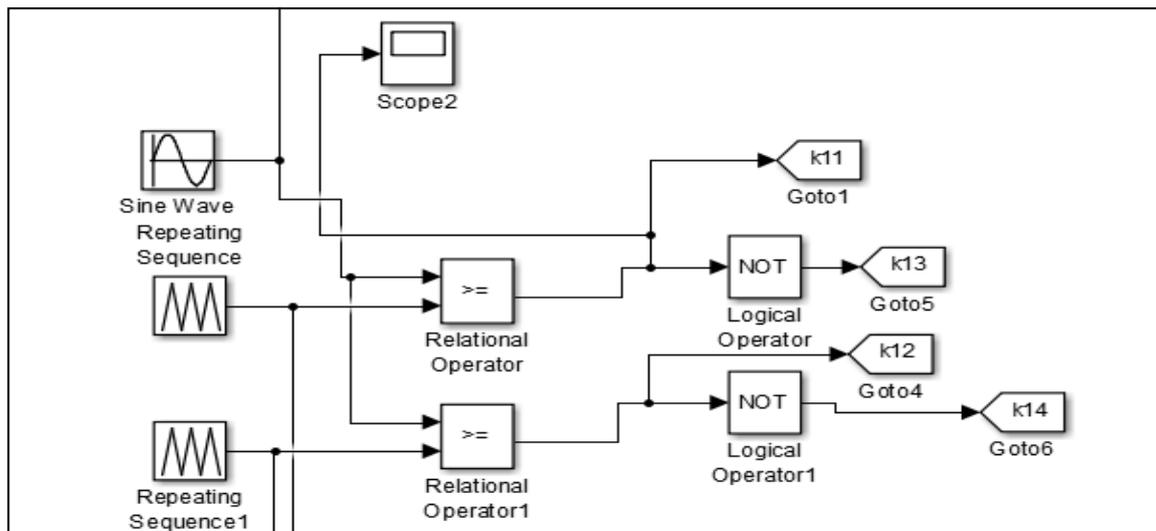


Figure 30: Les signaux de commande MLI-ST d'un onduleur a 3 niveaux d'un bras

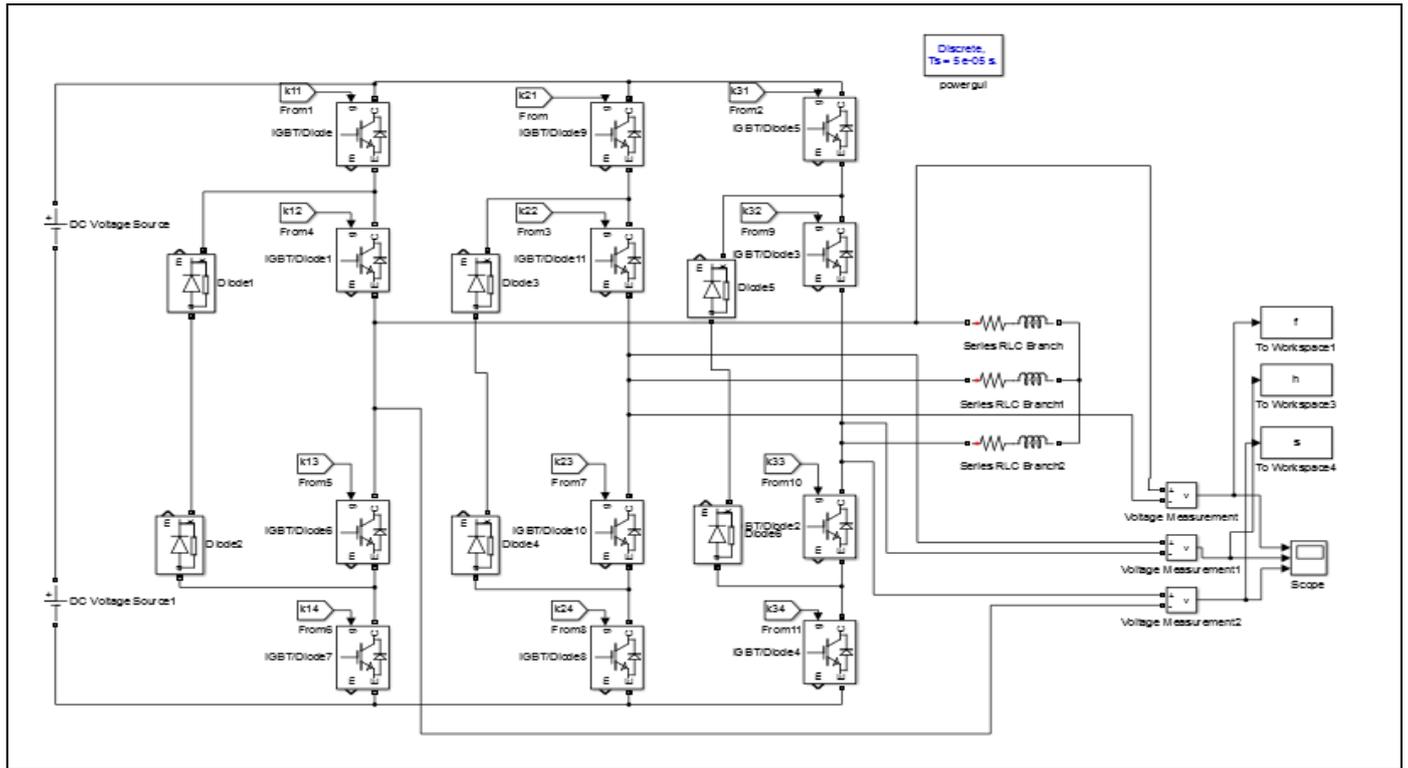


Figure 31: Schéma bloc de l'onduleur NPC a 3 niveaux avec la commande MLI-ST

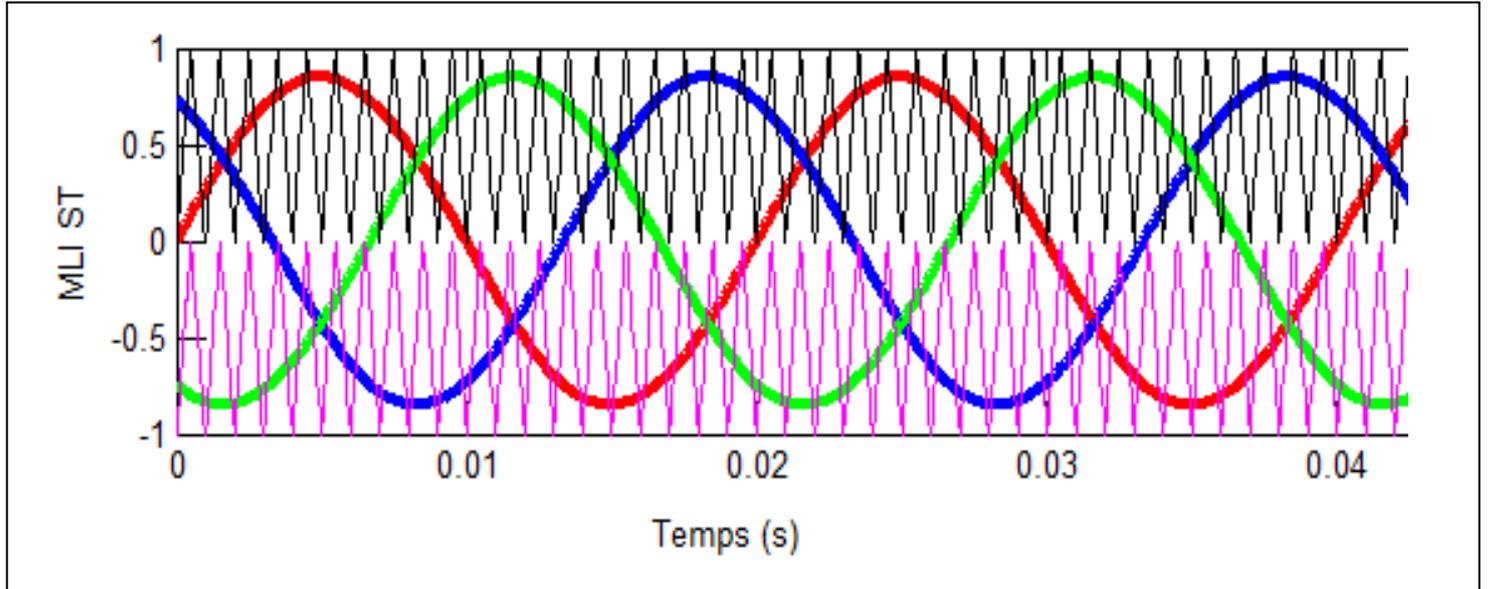
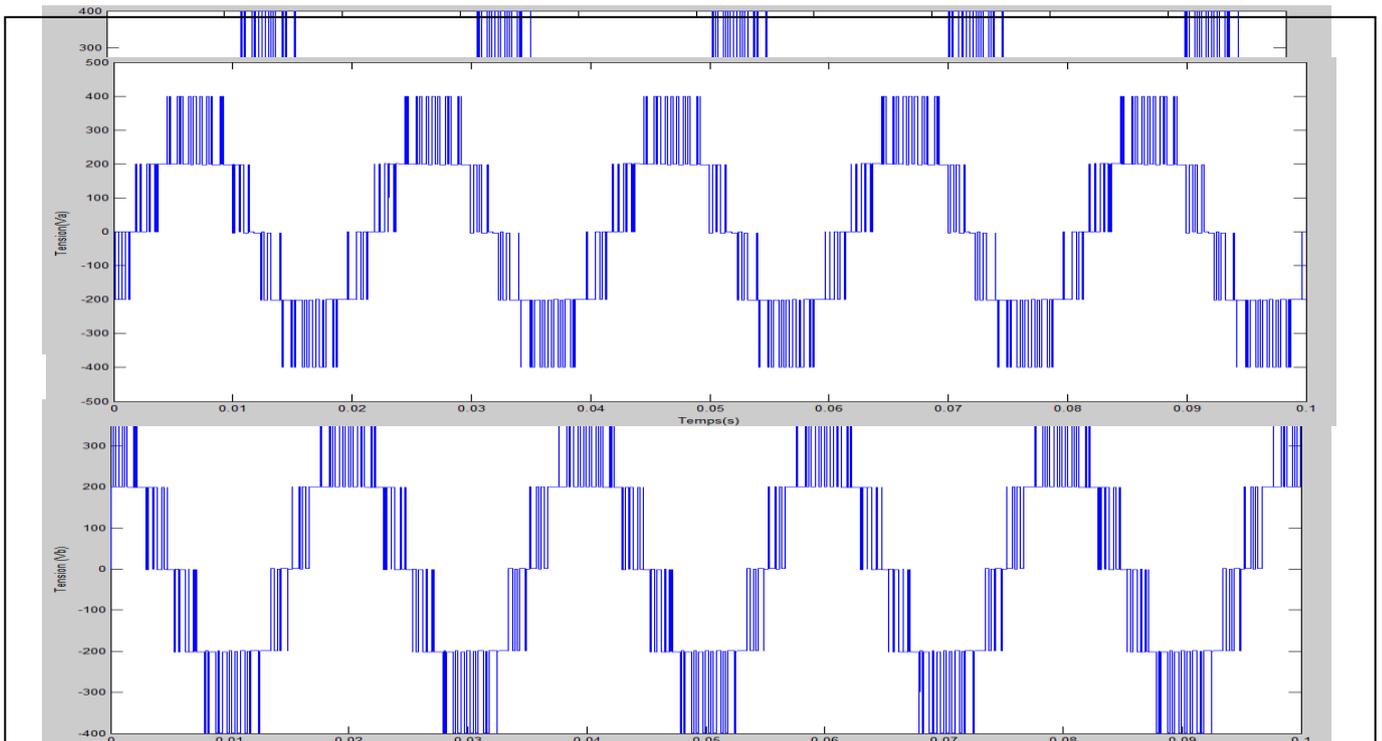
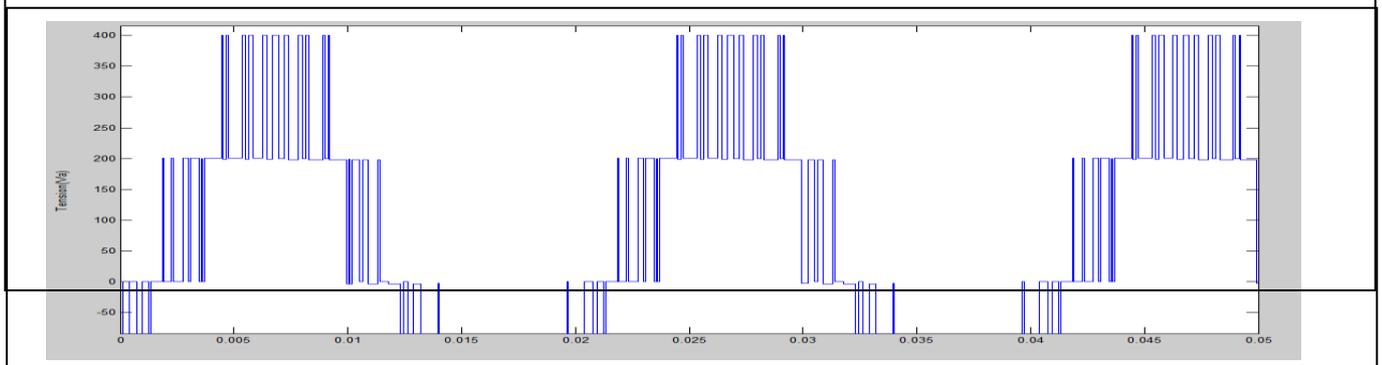


Figure 32: Principe de la MLI a une seule porteuse un onduleur a trois niveaux**Figure 33:** Tension de la sortie Va, Vb, Vc, de l'onduleur de trois niveaux commande MLI**Figure 34:** Zoom sur la tension Va de la sortie de l'onduleur de trois niveaux commande MLI

La tension de la sortie de l'onduleur de trois niveaux, on remarque que le signal est périodique et il prend une forme d'escalier. La valeur maximale est égale la valeur de la source d'alimentation **400V**.

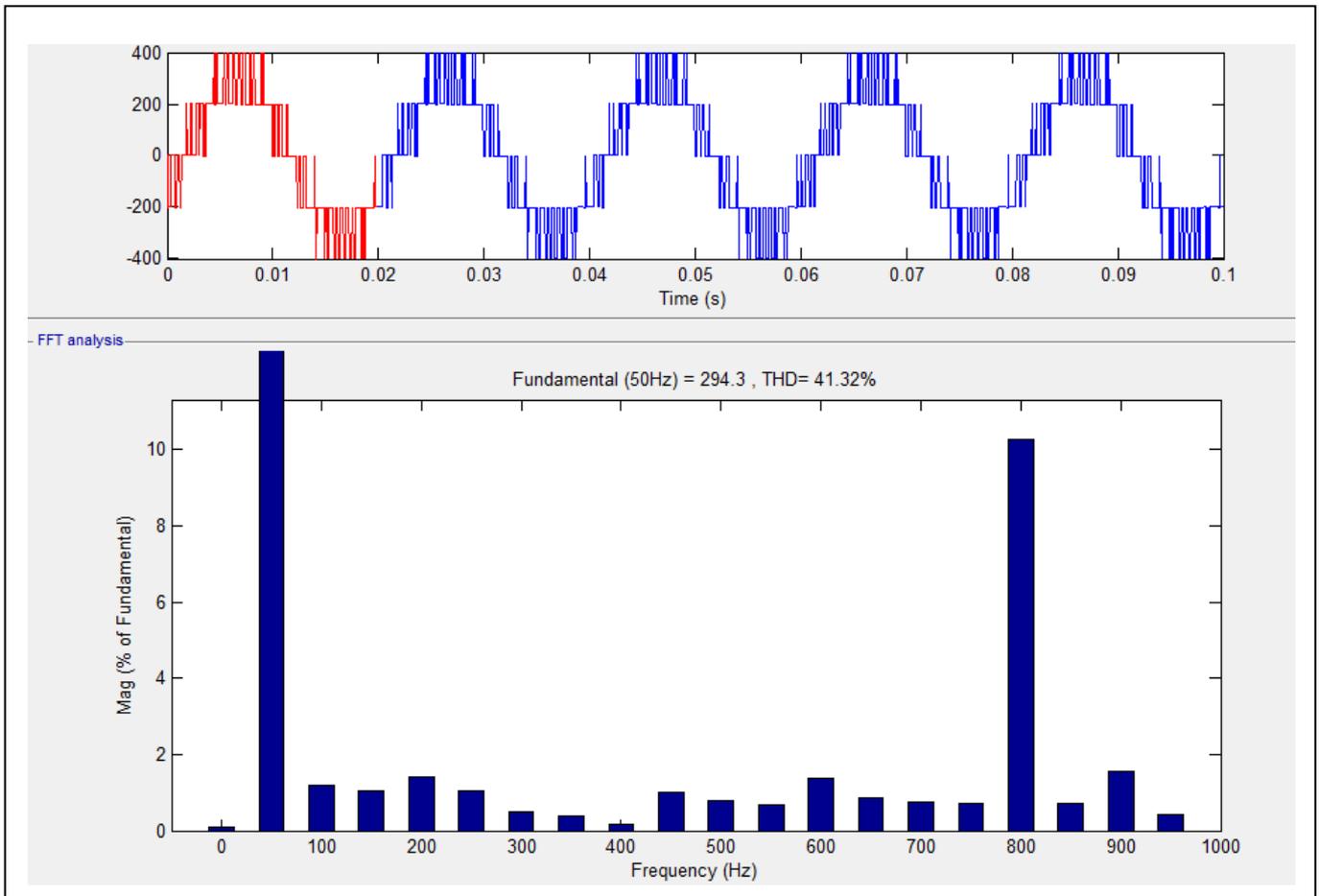


Figure 35: Spectre d'harmonique de la tension simple V_a

La (figure 4.12) représente l'analyse spectral d'harmonique de la commande MLI-sinusoidale et nous avons obtenus le **THD=41.32%**. On remarque qu'il ya une diminution de **THD** par rapport a celui de la pleine onde a deux niveaux

IV.2.3 Onduleur a Cinq niveaux :

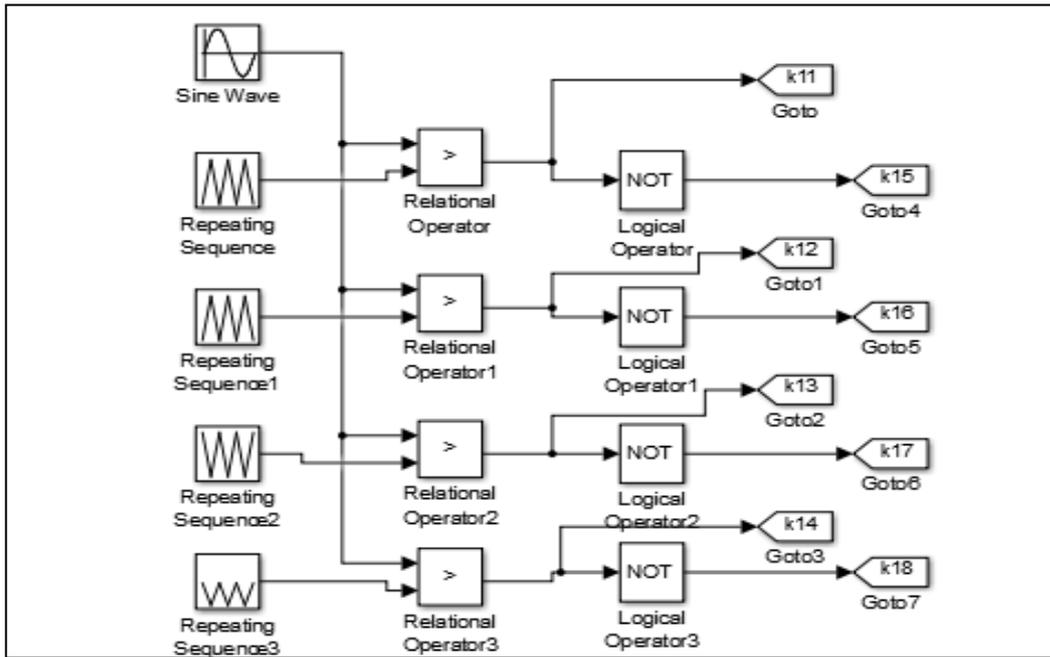


Figure 36: Les signaux de commande MLI-ST d'un onduleur a 5 niveaux d'un bras

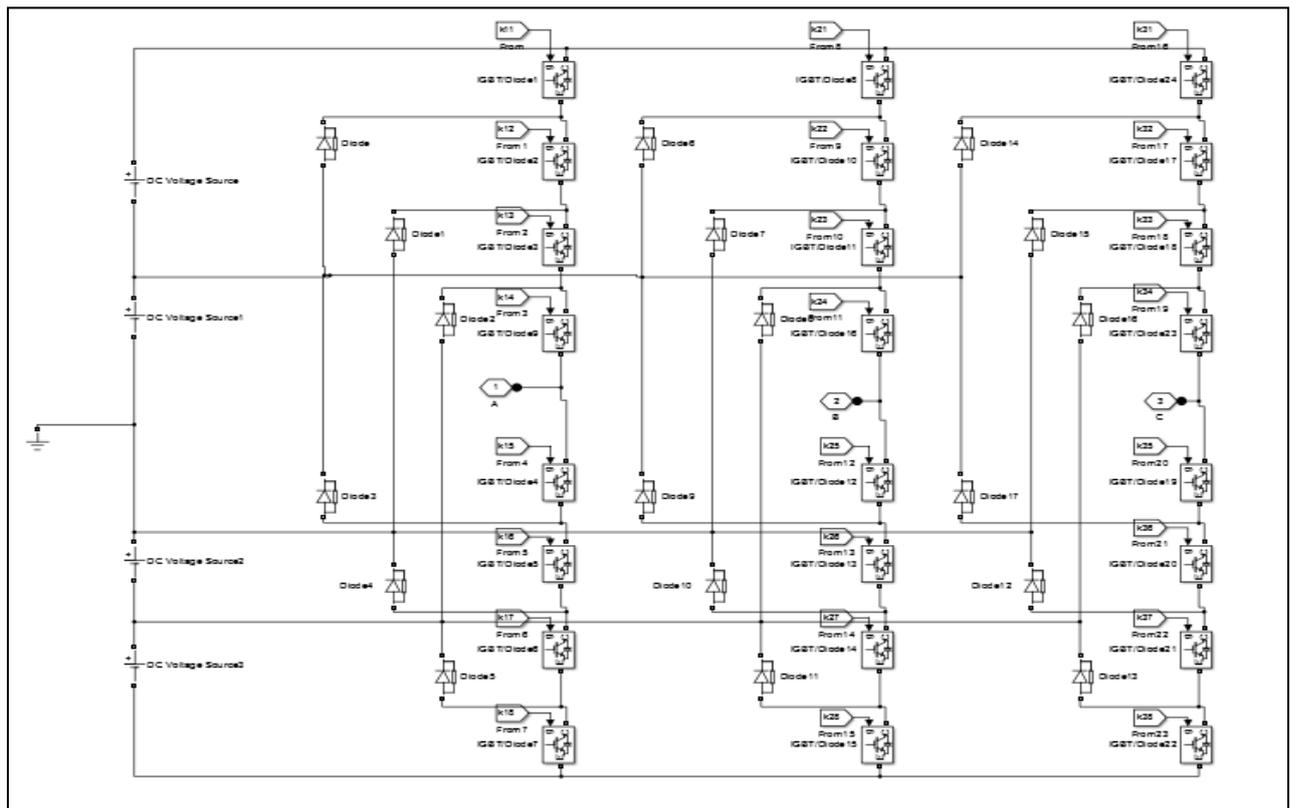


Figure 37: Schéma bloc de l'onduleur NPC a 5 niveaux avec la commande MLI-ST

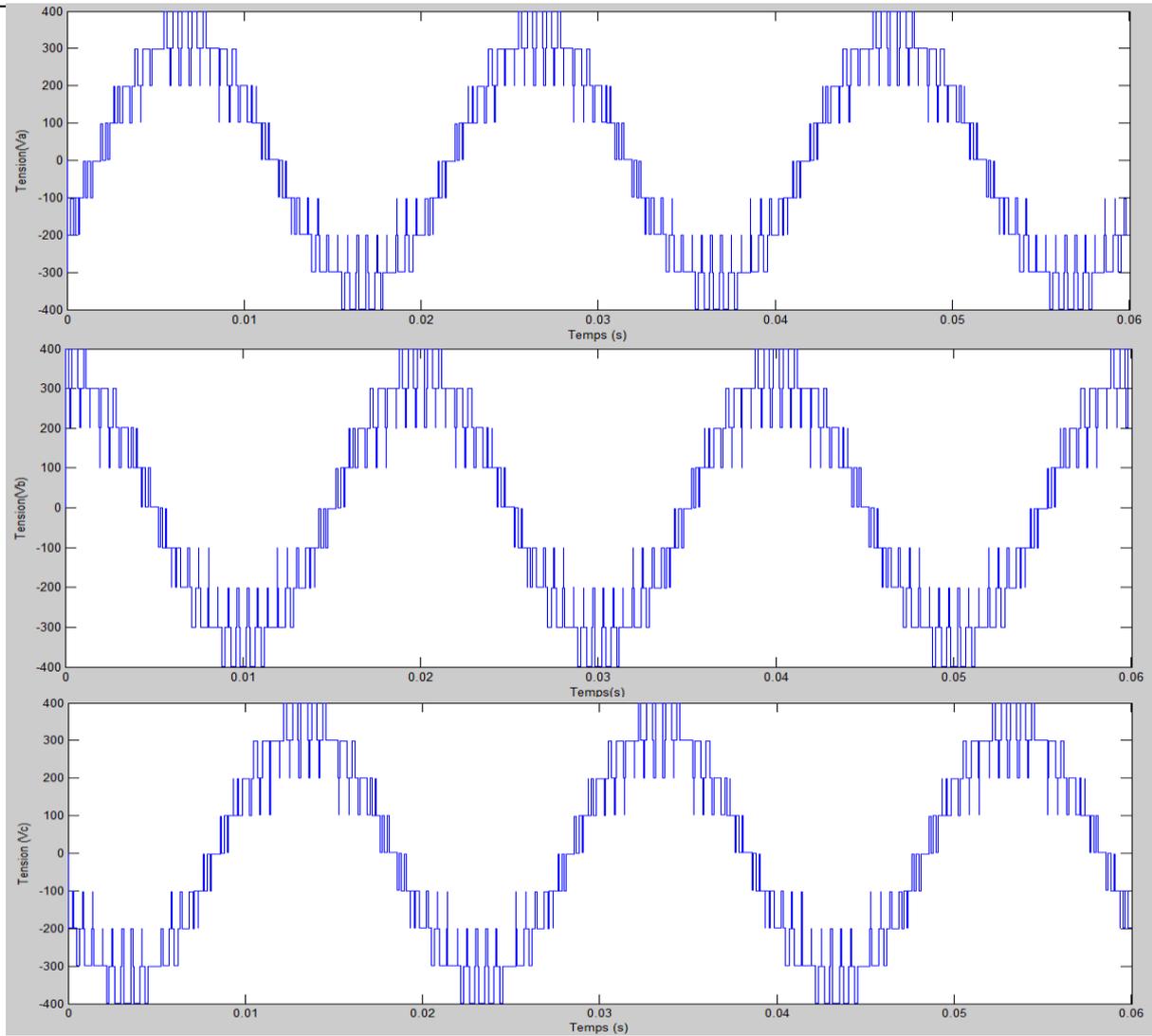


Figure 38: Tension Va, Vb, Vc, de la sortie de l'onduleur de Cinq niveaux commande MLI

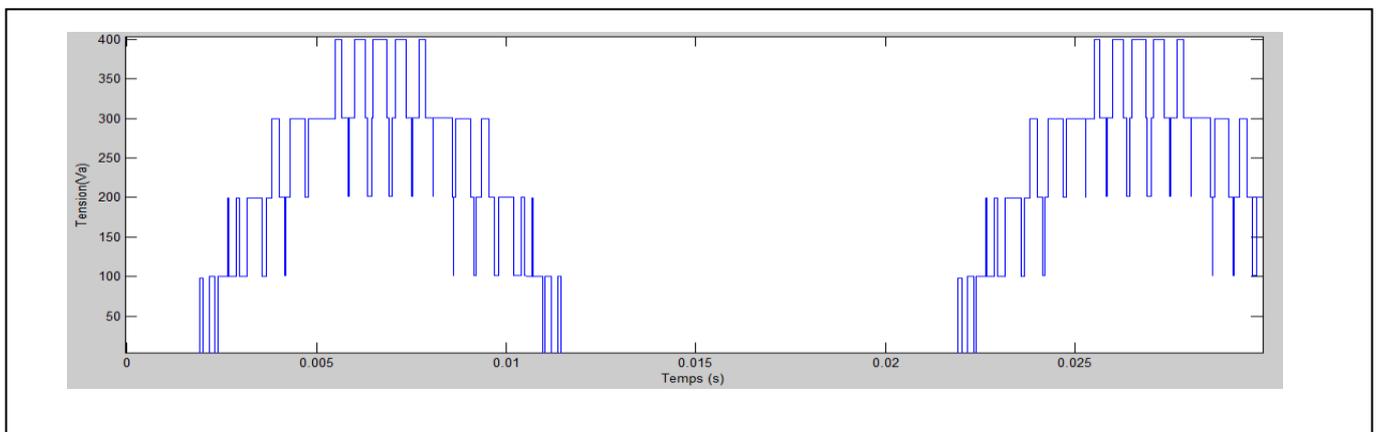


Figure 39: Zoom sur la tension Va de la sortie de l'onduleur de cinq niveaux commande MLI

La tension de sortie de l'onduleur à cinq niveaux, on remarque que le signal est périodique et prend la forme d'un escalier. La valeur maximale est égale à celle de la source d'alimentation de **400V**.

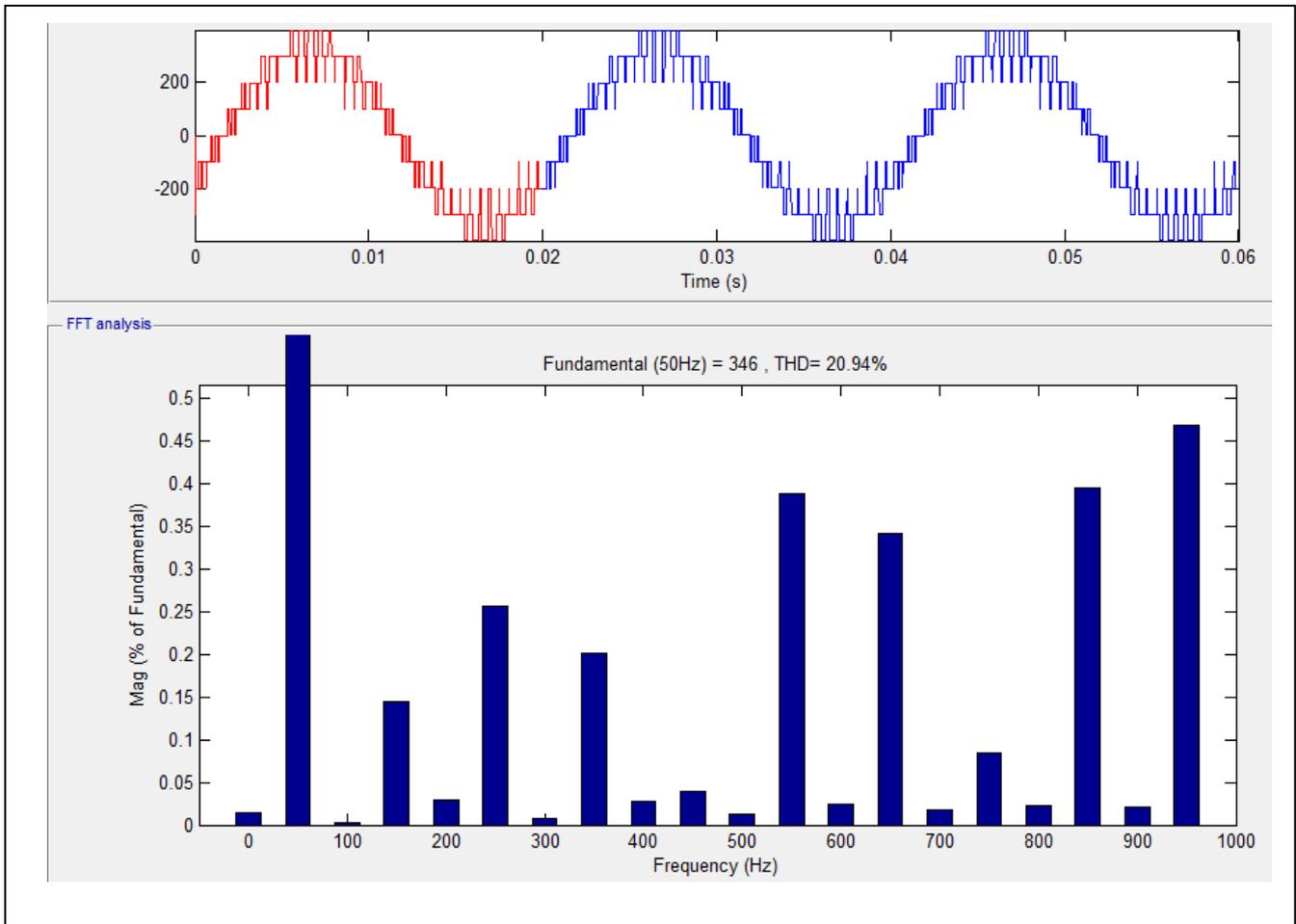


Figure 40: Spectre d'harmonique de la tension simple V_a

La (figure 4.18) représente l'analyse spectral d'harmonique de la commande MLI-ST et nous avons obtenus le **THD** = 20.94%. On remarque qu'il ya une diminution de **THD** par rapport a celui de la pleine onde a deux niveaux et trois niveaux.

IV.3. Comparaison entre les différents niveaux :

	Niveaux	THD
MLI ST	2 NIVEAUX	85,22%
	3 NIVEAUX	41,32
	5 NIVEAUX	20,94%

Tableau 4.1 : comparaison de THD entre les trois niveaux d'onduleur

Dans le (tableau 4.1) on remarque que lorsqu'on augmente le nombre de niveaux de l'onduleur, le **THD** se diminue.

IV.4 Conclusion :

Dans ce dernier chapitre, on s'est penché sur la simulation d'un convertisseur de tension à plusieurs niveaux, deux, trois et cinq, contrôlé par une commande MLI-ST.

On a observé que le taux de distorsion harmonique THD de la tension de sortie d'un onduleur NPC contrôlé par MLI diminue à mesure qu'on augmente le nombre de niveaux.

CONCLUSION GENERAL

Conclusion Général

L'utilisation d'onduleurs fixes dans l'industrie est devenue très répandue, notamment avec l'essor des variateurs de vitesse pour les équipements industriels. Les transformateurs de tension sont couramment employés pour réguler les moteurs asynchrones. Pour contourner les limites des onduleurs classiques à deux niveaux dans les applications à forte puissance, des solutions multi niveaux ont émergé, telles que la topologie à diodes de bouclage, offrant une sortie plus proche de la sinusoïde. Le contrôle de ces onduleurs est crucial pour générer une tension de sortie de meilleure qualité, d'où l'application de différentes stratégies de modulation de largeur d'impulsion, telles que le PWM-ST. En simulant ces contrôles sur des onduleurs à différents niveaux, comme deux, trois et cinq, on peut comparer leurs performances en termes de qualité de la forme d'onde de sortie, tout en maintenant l'amplitude de la composante fondamentale de la tension de charge. L'efficacité du contrôle sinusoïdal dans la réduction des pertes de commutation et des harmoniques est également mise en évidence. Les simulations montrent une diminution du THD de la tension de sortie à mesure que le nombre de niveaux de l'onduleur augmente.

Nous avons commencé par fournir des Définitions générales sur les convertisseurs, leur principe de fonctionnement, ainsi qu'une description des principales topologies de convertisseurs multi niveaux avec leurs avantages et inconvénients. Cette topologie implique principalement la technologie de commutation NPC avec des capacités distribuées.

L'utilisation d'un onduleur classique à deux niveaux dans le domaine des applications de forte puissance n'est pas adaptée, car elle nécessite plusieurs limites. Pour contourner ces limites, des onduleurs multi niveaux ont été proposés dans la littérature qui permettent de générer une tension de sortie plus proche de celle-ci. une sinusoïde. Les topologies utilisées dans les onduleurs multi niveaux sont celles à diodes de bouclage, en raison de leur structure plus simple.

Il est nécessaire de développer une stratégie de contrôle de ces onduleurs afin de générer une tension plus proche de la forme sinusoïdale. Pour cette raison, différentes stratégies de modulation de largeur d'impulsion ont été développées pour les convertisseurs à deux niveaux, à trois niveaux et à N niveaux.

Nous avons étendu les concepts bien connus de la stratégie susmentionnée aux transformateurs à deux, trois et cinq niveaux.

Conclusion Général

Pour cela, nous avons appliqué une technique de contrôle, à savoir le PWM-ST pour contrôler l'onduleur à diode de rétroaction. La technologie de contrôle appliquée à un onduleur de tension à deux, trois et cinq niveaux est simulée et ses Performances sont comparées en termes de qualité de la forme d'onde de la tension de sortie tout en garantissant la même amplitude de la composante fondamentale de cette tension de charge.

La forme de la tension de sortie dépend également de la méthode utilisée pour contrôler l'onduleur. Afin de réduire les pertes de commutation et les harmoniques, le contrôle utilisé dans ce travail est la modulation sinusoïdale.

Après simulation, on remarque que le THD de l'onde de tension en sortie d'un convertisseur de tension NPC diminue à mesure que le nombre de niveaux augmente

Références Bibliographique

Référence Bibliographique

- [1] F.CHOUAF (Commande d'un onduleur triphasé par MLI vectorielle) Thèse de Doctorat. Université Badji Mokhtar-Annaba, Algérie 2018.
- [2] L.BENYETTOU (Contribution au diagnostic des convertisseurs statiques DC-AC (Onduleurs de tension) : application au filtre actif parallèle) .Thèse de Doctorat. Université Tahri Mohamed-Bechar, Algérie 2016.
- [3]M PINARD. (convertisseur et électronique de puissance commode, description mise en œuvre application) . Technique et ingénierie, Dunod 2007.
- [4] O.DEGLA, T.SAYAH LEMBAREK.(Etude par simulation d'un onduleur) . Mémoire de Master. Université KASDI MERBAH-Ouargla, Algérie 2020.
- [5] PHILIPPE MARSEILLE. Science industrielles de l'ingénieur. ingénierie électrique (les onduleur)
- [6] B.LAKEHAL.(Modélisation et commande d'un onduleur triphasé à structure multi-niveaux).Mémoire de Master. Université A/MIRA-BEJAIA, Algérie 2015.
- [7] A.BENACHOUR.(Commande sans capture basée sur DTC d'une machine asynchrone alimentée par convertisseur matriciel).Thèse de Doctorat. Ecole Nationale Polytechnique-Alger, Algérie 2017.
- [8] H.DIAB, M.ZAANOUNE (Diagnostic de défaut dans un convertisseur matriciel (3*3)).Mémoire de Master. Université IBN-KHALDOUN-Tiaret, Algérie 2020.
- [9] H.ABOUB. (Contribution à l'étude des onduleurs neuf niveaux triphasés connectés aux convertisseurs DC-DC survolteurs multi sorties dans des systèmes).Thèse de Doctorat. Université BATNA 2, Algérie 2023.
- [10] A.TIAIBA. (Utilisation d'un onduleur multi-niveau pour la compensation de l'énergie électrique).Mémoire de Master. Université DE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA, Algérie 2016
- [11] H.ELFERD, M.ZEGAAR. (Fonctionnement en mode dégrade d'un onduleur multi niveaux application au filtre actif parallèle).Mémoire de Master. Université MOHAMED BOUDIAF-M'SILA, Algérie 2017.

Référence Bibliographique

- [12] B. REBAOUI. (Etude du déséquilibre de l'alimentation d'un onduleur multi-niveaux). Mémoire de Master. Université Sciences et de Technologie MOHAMED BOUDIAF –ORAN, Algérie 2014.
- [13] H. BRIGHEN, S. HALAMIA. (Etude et analyse de la commande des onduleurs multi-niveaux par MLI sinusoïdale). Mémoire de Master. Université LARBI TEBESSI-TEBESSA, Algérie 2016.
- [14] S. TAOUCHE. (Commande et réalisation d'un convertisseur multi-niveau (MLDC)). Mémoire de Master. Université SAAD DAHLAB-BLIDA 1, Algérie 2020.
- [15] S. MEHABA, H. SABRI. (Etude par simulation d'un onduleur cinq niveaux). Mémoire de Master. Université ABDERRAHMANE MIRA. BEJAIA, Algérie 2018.
- [16] BERRAHAL KHOKHA, (Application d'un onduleur multi niveaux a la compensation de la puissance réactive). Thèse doctorat. Université de Batna 2, Algérie 2018
- [17] BERRAHAL KHOKHA, (Application d'un onduleur multi niveaux a la compensation de la puissance réactive). Thèse doctorat. Université de Batna 2, Algérie 2018
- [18] K. ALIOUANE, K. BENAMRANE, T. BENSLIMANE (Etude et réalisation d'un onduleur a trois niveaux commandé par MLI vectorielle). Revue Energies Renouvelables vol 14N°2, Ghardaïa, Algérie 2011.
- [19] MAMADOU BALDE. (Etude d'un compensateur statique pour éolienne à vitesse fixe a base de génératrice asynchrone a cage). Mémoire. Université du QUEBEC. 2010.
- [20] K. BACHIR, B. ABDELKADER, B. MEBAREK. (Etat de l'art de la commande directe du couple de la machine asynchrone). Mémoire. Université du Salhi Ahmed. Algérie .2021.
- [21] E. BOUDISSA, N.E.H GABOUR (Génération et implémentation sur FPGA de signaux PWM pour la commande des onduleurs multi-niveaux). Université Saad Dahlab, Blida. Algérie. 2020.
- [22] B. HOCINE.S. MOHCIN (Etude et analyse des commandes d'un onduleur de tension triphasé). Mémoire .Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi. Algérie 2021

ANNAXE

PARAMATRES	VALEURS
Fréquence Nominale	50Hz
Tension d'alimentation	400V
Résistance	150hms
Inductance	24200H

Source Block Parameters: Sine Wave

Output a sine wave:

$$O(t) = \text{Amp} * \sin(\text{Freq} * t + \text{Phase}) + \text{Bias}$$

Sine type determines the computational technique used. The parameters in the two types are related through:

Samples per period = $2 * \pi / (\text{Frequency} * \text{Sample time})$

Number of offset samples = $\text{Phase} * \text{Samples per period} / (2 * \pi)$

Use the sample-based sine type if numerical problems due to running for large times (e.g. overflow in absolute time) occur.

Parameters

Sine type: Time based

Time (t): Use simulation time

Amplitude: 0.85

Bias: 0

Frequency (rad/sec): $2 * \pi * 50$

Phase (rad): 0

Sample time: 0

Interpret vector parameters as 1-D

OK Cancel Help Apply

Source Block Parameters: Sine Wave2

Sine Wave

Output a sine wave:

$$O(t) = \text{Amp} * \sin(\text{Freq} * t + \text{Phase}) + \text{Bias}$$

Sine type determines the computational technique used. The parameters in the two types are related through:

Samples per period = $2 * \pi / (\text{Frequency} * \text{Sample time})$

Number of offset samples = $\text{Phase} * \text{Samples per period} / (2 * \pi)$

Use the sample-based sine type if numerical problems due to running for large times (e.g. overflow in absolute time) occur.

Parameters

Sine type: Time based

Time (t): Use simulation time

Amplitude: 0.85

Bias: 0

Frequency (rad/sec): $2 * \pi * 50$

Phase (rad): $2 * \pi / 3$

Sample time: 0

Interpret vector parameters as 1-D

OK Cancel Help Apply

