

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTRE D'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE A, MIRA -BEJAIA



## Mémoire de fin d'étude

*Faculté : science et technologie*

*Filière : électrotechnique*

*Spécialité : commande électrique*

---

# *Convertisseur multi niveaux, topologie et technique de la commande*

---

**Présenté par :**

- Bali Melissa
- Laggoune Nadjjet

**Encadré par :**

- Mr Barboucha Ali

**Année universitaire**

**2020-2021**



## Remerciement

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, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de **Mr Ali berboucha**, on le remercie pour la qualité de son exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

On remercie **Mr Atroune** pour son encouragement et son soutien moral et son aide durant nos études universitaires.

On remercie aussi **Mr Ghedamsi**, **Mr Azzib** pour leurs aides, leurs générosités et leurs encouragements.

J'adresse aussi mes vifs remerciements aux membres des jurys pour avoir bien voulu examiner et juger ce travail.

## Dédicaces

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail

À l'être le plus cher de ma vie, à la femme qui a souffert sans me laisser souffrir qui m'a tout donné sans rien attendre en retour, et qui m'a soutenu et encouragé durant toute ma vie scolaire à celle qui m'a arrosé de tendresse amour et d'espoir. Ma chère mère quoi que je dise je ne saurais te remercier comme il se doit

### Je t'aime chère maman

À celui qui as fait de moi une femme, qui est toujours été là à mes coté pour me soutenir et m'encourager, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect.

### Mon papa

A ma grande sœur **Thiziri** (ma deuxième maman) qui n'a jamais manqué de m'aider et de me soutenir j'en manquerais pas ces encouragement et son affection

A mon adorable petite sœur **Mayline** qui sait toujours comment procurer la joie, l'amour et le bonheur pour toute la famille

A ma chère grand-mère **Mahiha**

A mes oncles (**Daoud** ,**Mazouni** ,**Boualem** ) et ma tante **Kahina**

A ma famille paternelle **Bali** et ma famille maternelle **Sadi**

A tous mes amis formidables avec qui j'ai passé des moments extraordinaires durant ces année : **Tina, Nadjjet, Lisa, Takfa, Zahir, Rafik, Kenza, Lynda, Sila.**

A ma binôme avec qui j'ai partagé ce mémoire et mes année : **Nadjjet**

**Melissa**

## Dédicace

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail :

À l'être le plus cher de ma vie, à la femme qui a souffert sans me laisser souffrir qui m'a tout donné sans rien attendre en retour, et qui m'a soutenu et encouragé durant toute ma vie scolaire à celle qui m'a arrosé de tendresse amour et d'espoir. Ma cher maman quoi que je fasse ou que je dise je ne saurais jamais te remercier comme il se doit.

### **Merci maman**

À celui qui as fait de moi une femme, qui est toujours été là à mes coté pour me soutenir et m'encourager, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect.

### **Mon cher papa**

A mes chers frères **Halim et Mounir**

A ma chère sœur **Soraya**

Pour leurs soutiens moral et leurs conseils précieux tout au long de mes études.

A ma famille paternelle **LAGGOUNE** et ma famille maternelle **BOUBEKA**.

A tous mes amis formidables avec qui j'ai passé des moments extraordinaires durant ces années : Mely, Linda, Kenza, Takfa, Sila, Wiwi, Sara.

A mes chères tantes et leurs enfants.

A mes chers oncles et leurs enfants.

A ma meilleure voisine **Manel**.

A ma binôme avec qui j'ai partagé ce mémoire et mes années : **Mélissa**

**Nadjet**

# Table des matières

## Chapitre I

Introduction Générale .....	1
I.1 Introduction .....	2
I.2 Convertisseur statique .....	2
I.3 Convertisseur DC-AC .....	3
I.3.1 Onduleur monophasé .....	4
I.3.2 Onduleur de tension triphasé .....	4
I.3.3 Onduleur de tension .....	5
I.3.4 Onduleurs de courant .....	5
I.3.5 Onduleurs autonomes .....	6
I.3.6 Onduleurs non autonomes .....	6
I.3.7 Onduleurs hybrides .....	7
I.3.8 Applications des onduleurs .....	7
I.3.9 Principe de fonctionnement de l'onduleur triphasé à deux niveaux de tension .....	8
I.4 Conclusion .....	10

## Chapitre II

II.1 Introduction .....	11
II.2 Les différentes structures d'onduleurs multiniveaux .....	11
II.1.1 Topologies NPC classiques .....	11
II.1.2 Les onduleurs multiniveaux à condensateur flotteur (ou FC) .....	14
II.1.3 Les onduleurs multiniveaux en pont H (H-Bridge) .....	16
II.1.4 Les onduleurs multiniveaux à structure NPP .....	18
II.1.5 Les onduleurs multiniveaux à structure ANPC .....	21
II.1.6 Onduleur à structure MMC .....	23
II.3 Les onduleurs multiniveaux hybrides .....	26
II.4 Conclusion .....	28

## Chapitre III

III.1 Introduction .....	29
III.2 Modulation MLI sinusoïdale (GHadamsi) .....	29
III.2.1 MLI sinusoïdale- triangulaire à une seule porteuse unipolaire .....	29
III.2.1.1 Structure NPC .....	30

III.2.1.2	Structure FC .....	33
III.2.1.3	Structure ANPC.....	36
III.2.1.4	Structure NPP.....	38
III.2.1.5	Structure H-Bridge .....	41
III.2.1.6	Structure MMC .....	43
III.2.2	MLI sinusoïdale- triangulaire à deux porteuses.....	46
III.2.2.1	Structure NPC.....	47
III.2.2.2	Structure FC.....	50
III.2.2.3	Structure ANPC.....	52
III.2.2.4	Structure H-Bridge .....	55
III.2.2.5	Structure MMC.....	57
III.2.2.6	Structure NPP .....	60
III.3	Conclusion.....	64
	Conclusion Générale .....	65

# Liste Des Figures

## Liste des figures

### Chapitre I

Figure I.1 Principe de fonctionnement de l'onduleur monophasé .....	4
Figure I.2 Forme d'onde de la tension $U_d$ .....	4
Figure I.3 Circuit de Puissance d'un onduleur triphasé .....	5
Figure I.4(a) Onduleur de courant en pont monophasé .....	5
Figure I.4(b) Signaux de commande et forme d'onde de courants .....	5
Figure I.5 Onduleur autonome .....	6
Figure I.6 Onduleur non autonome .....	6
Figure I.7 Boitier onduleur hybride IMEON Energy .....	7
Figure I.8 Exemple d'application des onduleurs .....	8
Figure I.9 Schéma représentatif d'un onduleur triphasé à deux niveaux de tension .....	9
Figure I.10(a) La caractéristique statique d'un interrupteur .....	9
Figure I.10(b) Mise en parallèle d'un transistor et d'une diode .....	9

### Chapitre II

Figure II.1 Schéma d'un convertisseur NPC 3 niveaux .....	12
Figure II.2 Configuration possible d'un bras d'onduleur à trois niveaux de type NPC .....	13
Figure II.3 Schéma d'un convertisseur FC 3 niveaux .....	14
Figure II.4 Configuration possible d'un bras d'onduleur à trois niveaux de type FC .....	15
Figure II.5 Schéma d'un convertisseur H-bridge 3 niveaux .....	17
Figure II.6 Configuration possible d'un bras d'onduleur à trois niveaux de type H-bridge .....	17
Figure II.7 Convertisseur triphasé NPP 3 niveaux .....	19
Figure II.8 Configuration possible d'un bras d'onduleur à trois niveaux de type NPP .....	19
Figure II.9 Convertisseur ANPC 3 niveaux triphasé .....	21
Figure II.10 Configuration possible d'un bras d'onduleur à trois niveaux de type ANPC .....	22
Figure II.11 Schéma d'un convertisseur MMC 3 niveaux .....	24
Figure II.12 Configuration possible d'un bras d'onduleur à trois niveaux de type MMC .....	25
Figure II.13 Onduleur hybride en pont .....	27
Figure II.14 Onduleur hybride en cascade .....	27
Figure II.15 Onduleur hybride cote à cote .....	27

### Chapitre III

Figure III.1 Signal de référence et la porteuse pour un seul bras .....	30
Figure III.2 Allure de tension à la sortie de l'onduleur .....	30
Figure III.3 Allure du courant à la sortie de l'onduleur .....	31
Figure III.4 Analyse spectrale de la tension à la sortie de l'onduleur .....	31
Figure III.5 Analyse spectrale du courant à la sortie de l'onduleur .....	32
Figure III.6 Analyse spectrale de la tension après filtrage .....	33
Figure III.7 Allure de tension à la sortie de l'onduleur .....	33
Figure III.8 Allure du courant à la sortie de l'onduleur .....	34
Figure III.9 Analyse spectrale de la tension à la sortie de l'onduleur .....	34
Figure III.10 Analyse spectrale du courant à la sortie de l'onduleur .....	35



## Liste Des Figures

---

Figure III.11 Analyse spectrale de la tension après filtrage.....	35
Figure III.12 Allure de tension à la sortie de l'onduleur .....	36
Figure III.13 Allure du courant à la sortie de l'onduleur .....	36
Figure III.14 Analyse spectrale de la tension à la sortie de l'onduleur.....	37
Figure III.15 Analyse spectrale du courant à la sortie de l'onduleur.....	37
Figure III.16 Analyse spectrale de la tension après filtrage.....	38
Figure III.17 Allure de tension à la sortie de l'onduleur .....	38
Figure III.18 Allure du courant à la sortie de l'onduleur .....	39
Figure III.19 Analyse spectrale de la tension à la sortie de l'onduleur.....	39
Figure III.20 Analyse spectrale du courant à la sortie de l'onduleur.....	40
Figure III.21 Analyse spectrale de la tension après filtrage.....	40
Figure III.22 Allure de tension à la sortie de l'onduleur .....	41
Figure III.23 Allure du courant à la sortie de l'onduleur .....	41
Figure III.24 Analyse spectrale de la tension à la sortie de l'onduleur.....	42
Figure III.25 Analyse spectrale du courant à la sortie de l'onduleur.....	42
Figure III.26 Analyse spectrale de la tension après filtrage.....	43
Figure III.27 Allure de tension à la sortie de l'onduleur .....	43
Figure III.28 Allure du courant à la sortie de l'onduleur .....	44
Figure III.29 Analyse spectrale de la tension à la sortie de l'onduleur.....	44
Figure III.30 Analyse spectrale du courant à la sortie de l'onduleur.....	45
Figure III.31 Analyse spectrale de la tension après filtrage.....	45
Figure III.32 Le signal de référence et les signaux de porteuse pour un convertisseur à 3 niveaux....	47
Figure III.33 Allure de tension à la sortie de l'onduleur .....	47
Figure III.34 Allure du courant à la sortie de l'onduleur.....	48
Figure III.35 Analyse spectrale de la tension à la sortie de l'onduleur.....	48
Figure III.36 Analyse spectrale du courant à la sortie de l'onduleur .....	49
Figure III.37 Analyse spectrale de la tension après filtrage.....	49
Figure III.38 Allure de tension à la sortie de l'onduleur .....	50
Figure III.39 Allure du courant à la sortie de l'onduleur.....	50
Figure III.40 Analyse spectrale de la tension à la sortie de l'onduleur.....	51
Figure III.41 Analyse spectrale du courant à la sortie de l'onduleur .....	51
Figure III.42 Analyse spectrale de la tension après filtrage.....	52
Figure III.43 Allure de tension à la sortie de l'onduleur .....	52
Figure III.44 Allure du courant à la sortie de l'onduleur.....	53
Figure III.45 Analyse spectrale de la tension à la sortie de l'onduleur.....	53
Figure III.46 Analyse spectrale du courant à la sortie de l'onduleur .....	54
Figure III.47 Analyse spectrale de la tension après filtrage.....	54
Figure III.48 Allure de tension à la sortie de l'onduleur .....	55
Figure III.49 Allure du courant à la sortie de l'onduleur.....	55
Figure III.50 Analyse spectrale de la tension à la sortie de l'onduleur.....	56
Figure III.51 Analyse spectrale du courant à la sortie de l'onduleur .....	56
Figure III.52 Analyse spectrale de la tension après filtrage.....	57
Figure III.53 Allure de tension à la sortie de l'onduleur .....	57
Figure III.54 Allure du courant à la sortie de l'onduleur.....	58
Figure III.55 Analyse spectrale de la tension à la sortie de l'onduleur.....	58
Figure III.56 Analyse spectrale du courant à la sortie de l'onduleur .....	59
Figure III.57 Analyse spectrale de la tension après filtrage.....	59
Figure III.58 Allure de tension à la sortie de l'onduleur .....	60

## Liste Des Figures

---

Figure III.59 Allure du courant à la sortie de l'onduleur.....	60
Figure III.60 Analyse spectrale de la tension à la sortie de l'onduleur.....	61
Figure III.61 Analyse spectrale du courant à la sortie de l'onduleur.....	61
Figure III.62 Analyse spectrale de la tension après filtrage.....	62

# Liste Des Tableaux

---

## Liste des tableaux

### Chapitre II

Tableau II .1 Phase de fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC a trois niveaux .....	13
Tableau II .2 Phase de fonctionnement d'un bras d'onduleur FC a trois niveaux .....	16
Tableau II .3 Phase de fonctionnement d'un bras d'onduleur H-Bridge a trois niveaux .....	18
Tableau II .4 Phase de fonctionnement d'un bras d'onduleur NPP a trois niveaux.....	20
Tableau II .5 Phase de fonctionnement d'un bras d'onduleur ANPC a trois niveaux .....	23
Tableau II .6 Phase de fonctionnement d'un bras d'onduleur MMC a trois niveaux .....	26

### Chapitre III

Tableau III.1 Tableau récapitulatif des résultats de simulation .....	46
Tableau III.2 Tableau récapitulatif des résultats de simulation .....	63
Tableau III.3 Nombre de composant constituant chaque topologie.....	64
Tableau III.4 Représente les paramètres de réglage.....	64

## Notation

---

AC	Courant/ tension alternatif
DC	Courant/ tension continue
IGBT	Insulated gate Bipolar Transistor
PID	Proportionnel intégral dérivé
MPC	Multiple point clamped
NPC	Neutral point clamped
FC	Condensateur flotteur
ANPC	Active Neutral point clamped
NPP	Neutral point piloted
MMC	Modular Multilevel converter
MLI	Modulation de largeur d'impulsion
Udc	Tension de la source
Sa	IGBT
Dn	Diode
C	Condensateur
H	H-bridge (pont H)
Va	Tension de reference
S	nombre de source continue
n	Nombre de niveaux
ns	Nombre des sources indépendantes
k	coefficient
THD	Total harmonic distortion
HVDC	Transmission en courant continue THT
MOSFET	Metal Oxide Semi-conductor Field Effect Transistor

## **Introduction Générale**

## Introduction

Dans le domaine du Génie Electrique, l'électronique de puissance représente une part importante des travaux de recherche. On peut notamment constater dans la littérature scientifique qu'une large part de ces recherches cible plus particulièrement les convertisseurs de puissance multiniveaux. Avec l'émergence des composants de puissance (thyristor, transistor), les convertisseurs de puissance multiniveaux ont fait leur apparition à partir des années 1960. Grace à ces convertisseurs, de grandes avancées ont pu être faites quant à la réduction du taux d'harmoniques en sortie des convertisseurs, ainsi qu'au niveau du rendement. Les convertisseurs de puissance multiniveaux ont vocation à être utilisés pour des applications de plusieurs kV, par exemple le transport HVDC pour l'éolien offshore. Ainsi, l'intérêt majeur et croissant porté à ce domaine est principalement lié au fait que ces convertisseurs concernent des applications toujours plus performantes, permettant d'atteindre des niveaux de puissance des plus élevés. Bien que les structures à 3 niveaux soient devenues classiques, comme par exemple les topologies NPC ou bien encore NPP, de nouvelles structures émergent, permettant d'augmenter encore davantage le niveau de tension en sortie du convertisseur. Les principales motivations qui conduisent à élever le niveau de la tension de sortie sont d'une part l'augmentation de la puissance par le biais de la génération de tensions plus élevées et d'autre part la réduction du contenu harmonique. Dans un premier temps, avant d'aborder la continuité de service de ces convertisseurs multiniveaux, il est important de présenter les principales structures de conversion possibles ainsi que les commandes qui peuvent y être associées. Ainsi, dans ce premier chapitre, un état de l'art des structures de convertisseurs multiniveaux est tout d'abord présenté. Les structures à deux et trois niveaux, considérées comme les structures de base de la conversion multiniveaux, sont d'abord brièvement rappelées. Ensuite, les différentes structures à 3 niveaux sont étudiées. Dans un second temps, nous nous intéresserons à la commande de ces convertisseurs à travers un état de l'art des stratégies de commande. Nous verrons comment l'adaptation de ces algorithmes de commandes peuvent être envisagée, pour des différentes structure d'onduleur trois niveaux.

**Chapitre I :**  
**Convertisseur DC /AC**

## I.1 Introduction

Les convertisseurs statiques comme la structure multicellulaire occupent plusieurs domaines d'application. Dans ce premier chapitre au début nous allons parler généralement sur les convertisseurs statiques qui sont des systèmes permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur données. Il existe différent convertisseurs :

- Les onduleurs qui convertissent la tension continue / alternative
- Les redresseurs qui réalisent la conversion alternative / continue
- Les hacheurs qui réalisent une conversion continue / continue
- Les gradateurs qui réalisent une conversion alternative / alternative

Nous allons nous intéresser dans ce chapitre aux les onduleurs et leurs fonctionnement (principe type application)

## I.2 Convertisseur statique

Les convertisseurs statiques sont des circuits électriques utilisant des semi-conducteurs de puissance (diodes, thyristors, transistors ...) utilisés comme des interrupteurs, dans le but de transformer le spectre du signal (amplitudes, fréquences, phases) pour adapter la source à la charge. L'étude et la conception de ces dispositifs est souvent appelée électronique de puissance. On distingue les différents convertisseurs suivants : [1]

- **Les redresseurs** : C'est un convertisseur alternatif-continu. La tension de sortie est non alternative (valeur moyenne non nulle). Cette valeur moyenne peut être réglée dans le cas d'un redresseur commandé. Ils sont utilisés principalement pour alimenter des charges fonctionnant avec une tension continue ou pour recharger des batteries (en effet, un redresseur est toujours intégré dans les chargeurs de vos PC ou vos téléphones portables). [1]
- **Les onduleurs** : L'onduleur est un convertisseur continu-alternatif, utilisé principalement pour alimenter les charges fonctionnant avec une tension alternative lorsqu'on dispose d'une source continue (batteries par exemple) ou pour injecter l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques dans le réseau. [1]



- **Les hacheurs** : Ce sont des convertisseurs continu-continu, permettant la variation d'une tension continue pour l'adapter à la charge ou pour varier la vitesse d'un moteur à courant continu ou pour régler le degré de luminosité d'une lampe. Le découpage se fait à une fréquence élevée. C'est l'analogue, pour les sources de tensions continues, du gradateur utilisé en régime alternatif. Si la tension délivrée en sortie est inférieure à la tension appliquée en entrée, le hacheur est dit dévolteur (ou abaisseur ou Buck). Dans le cas contraire, il est dit survolteur (ou élévateur ou Boost). Il existe des hacheurs capables de travailler des deux manières (Buck-Boost). [1]
- **Les gradateurs** : C'est un convertisseur alternatif-alternatif, qui donne en sortie une tension alternative de même fréquence que la tension d'entrée et dont on peut réduire la valeur efficace de façon continue. Ce convertisseur est essentiellement utilisé pour la varier la vitesse des moteurs alternatifs comme les moteurs asynchrones ou synchrones en variant leur tension d'alimentation.
- **Les cyloconvertisseurs** : C'est un convertisseur alternatif-alternatif, qui donne en sortie une tension alternative de fréquence et valeur efficace différentes de celles de la tension d'entrée. Les cyloconvertisseurs sont utilisés pour la varier la vitesse des moteurs alternatifs en variant la fréquence ou la valeur efficace de la tension d'alimentation. [1]

Dans ce mémoire nous nous intéressons aux onduleurs uniquement.

### I.3 Convertisseur DC-AC

Un onduleur est un dispositif d'électronique de puissance permettant de générer des tensions et des courants alternatifs à partir d'une source d'énergie électrique de tension continue. C'est la fonction inverse d'un redresseur. Il permet la conversion DC /AC, Un onduleur n'est pas uniquement destiné à pallier les coupures de courant. Son rôle est également de stabiliser la tension électrique et d'éliminer les parasite électrique. Il utilise la technologie des interrupteurs de la même manière qu'un hacheur quatre quadrants. C'est grâce à une loi de commande particulière qu'il permet d'obtenir un signal sinusoïdal. [2]

#### I.3.1 Onduleur monophasé

Pour expliquer le fonctionnement d'un onduleur on procède à réaliser un onduleur monophasé. Pour cela il suffit de disposer d'une source de tension continue  $E$  et un interrupteur inverseur  $K$  comme le montre la figure I.1.

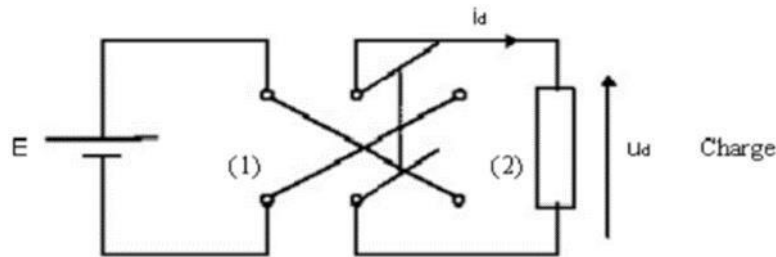


Figure I. 1. Principe de fonctionnement de l'onduleur monophasé

La tension de sortie  $U_d$  ne peut prendre que deux valeurs :  $E$  et  $-E$ . Lorsque  $K$  est à la position (1), on obtient une tension aux bornes de la charge  $U_d=E$ . Lorsque  $K$  est à la position (2),  $U_d=-E$ . La forme d'onde de la tension aux bornes de la charge est représentée dans la figure I.2. [3]

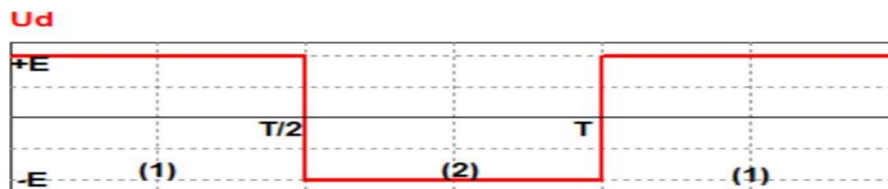


Figure I. 2. Forme d'onde de la tension  $U_d$

.2

### I.3.2 Onduleur de tension triphasé

Pour obtenir un onduleur triphasé, il suffit de regrouper, en parallèle, trois demi ponts d'onduleurs monophasés et commander les interrupteurs de façon à avoir à la sortie trois phases décalées de  $120^\circ$ . En fait, ce regroupement donne un onduleur triphasé à six interrupteurs, deux pour chaque bras représenté par la figure I.3. Pour s'assurer que la source de tension  $U_{dc}$  ne soit jamais court-circuitée et les circuits de courant  $i_a$ ,  $i_b$  et  $i_c$  ne soient jamais ouverts, les interrupteurs présentent dans le même bras ne doivent jamais commuter simultanément, ce qui leur impose des signaux de commande complémentaires.

Ces interrupteurs doivent être bidirectionnelle en courant, afin de pouvoir imposer les tensions de sorties quel que soit le courant de la charge. Ces interrupteurs sont formés d'une diode montée en antiparallèle à un semi-conducteur commandé à l'ouverture et à la fermeture. Selon la puissance mise en jeu, ces interrupteurs peuvent être réalisés avec des MOSFET, des IGBT ou des GTO associés à une diode pour assurer la réversibilité en courant. [3]

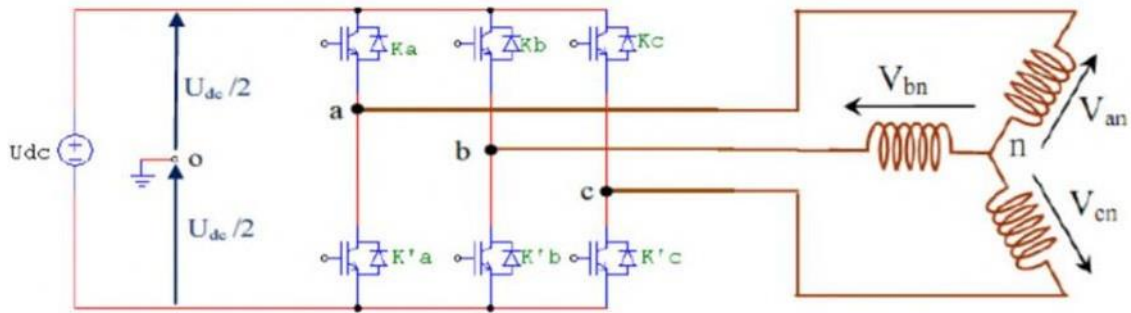


Figure I. 3. Circuit de puissance d'un onduleur triphasé

### I.3.3 Onduleur de tension

Un onduleur de tension est un onduleur qui est alimenté par une source de tension continue (source d'impédance interne négligeable), la tension de sortie «V» n'est pas affectée par les variations du courant de charge «i», la source continue impose la tension à l'entrée de l'onduleur et donc à sa sortie. Le courant «i» dépend de la charge placée du côté alternatif. Cette charge peut être quelconque à la seule condition qu'il ne s'agisse pas d'une autre source de tension (capacité ou f. e. m alternative) directement branchée entre les bornes de sortie. [3]

### I.3.4 Onduleurs de courant

Un onduleur de courant (souvent appelé commutateur de courant) est alimenté par une source de courant, c'est-à-dire par une source d'inductance interne si grande que le courant «i» qui la traverse ne peut être affecté par les variations de la tension «u» à ses bornes. [4]

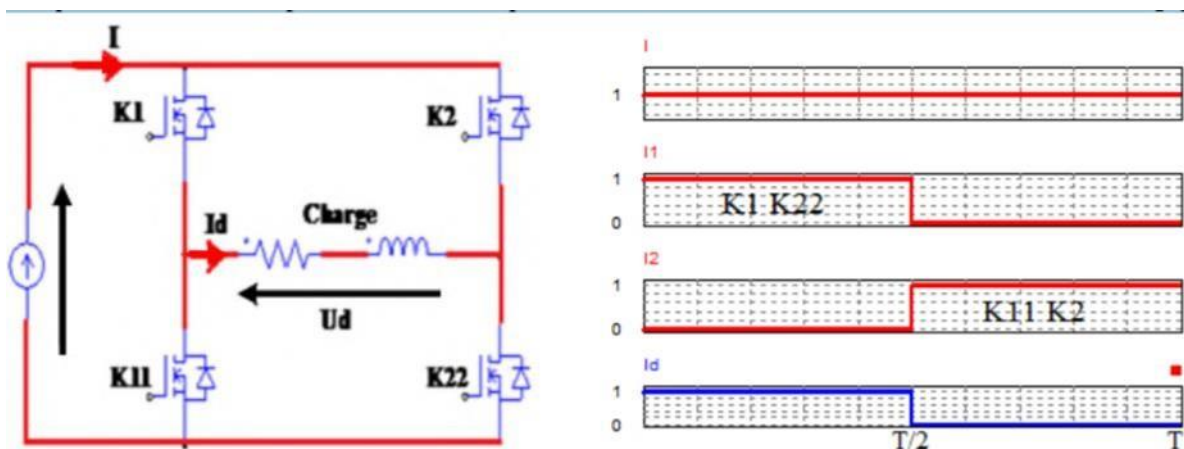


Figure I. 4. Onduleur de courant en pont monophasé, signaux de commande et forme d'onde de courants

### I.3.5 Onduleurs autonomes

Un onduleur autonome délivre une tension avec une fréquence soit fixe, soit ajustable par l'utilisateur. Il n'a pas toujours besoin de réseau électrique pour fonctionner. (Par exemple un convertisseur de voyage que l'on branche sur la prise allume-cigare d'une voiture utilise le 12 V continu du véhicule pour générer du 120 ou 230 V, alternatif en 50 ou 60 Hz). [5]



Figure I. 5. Onduleur autonome

### I.3.6 Onduleurs non autonomes

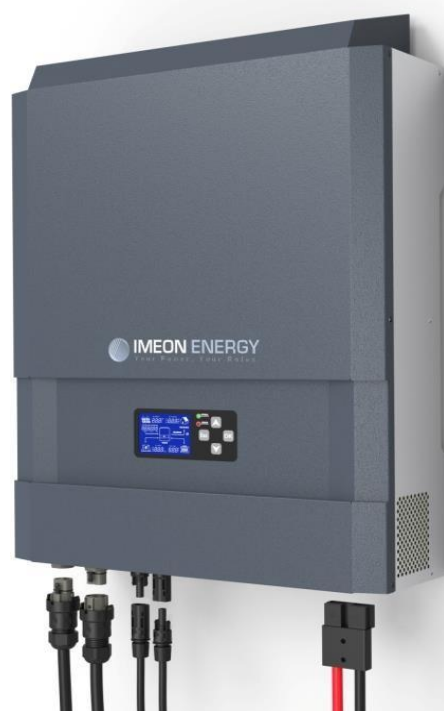
Un onduleur non autonome est un montage redresseur tout thyristors qui en commutation naturelle assistée par le réseau, auquel il est raccordé, permet un fonctionnement en onduleur (par exemple : par récupération de l'énergie lors des périodes de freinage dans les motrices électriques). À la base du développement des entraînements statiques à vitesse variable pour moteurs à courant continu et alternatif, cyclo-convertisseurs, onduleurs de courant pour machines synchrones et asynchrones, jusqu'à des puissances de plusieurs Mégawatt, ce type de montage est progressivement supplanté, au profit de convertisseurs à IGBT ou GTO. [5]



Figure I. 6. Onduleur non autonome

### I.3.7 Onduleurs hybrides

Les onduleurs hybrides ou intelligents sont une nouvelle génération dédiée aux applications d'énergie renouvelable pour l'autoconsommation et en particulier pour les panneaux solaires photovoltaïques (onduleur solaire). L'énergie des panneaux solaires photovoltaïques est active seulement pendant la journée et essentiellement lorsque le Soleil est au zénith (point d'intersection de la verticale du panneau et du soleil) : elle est donc fluctuante et non synchronisée avec la consommation des habitations. De ce fait, il est nécessaire de stocker l'excédent de production avant utilisation.[5]



*Figure I. 7. Boîtier onduleur hybride IMEON Energy.*

### I.3.8 Applications des onduleurs

L'onduleur est l'un des montages les plus répandus de l'électronique de puissance, il a de multiples applications :

- les alimentations de secours
- les alimentations sans interruption.
- le raccord des panneaux solaires au réseau électrique.
- les nombreux dispositifs nécessitant de fonctionner à une fréquence spécifique comme :
  - générateurs d'ultrasons ou d'électricité utilisés dans le domaine médical.
  - L'alimentation des lampes dites à cathode froide pour le rétro-éclairage des afficheurs à cristaux liquides.

- les variateurs de vitesse des machines alternatives : la tension du réseau est redressée puis un onduleur fabrique une tension dont la fréquence et la forme sont réglables.
- les convertisseurs de tension continue/continue à découpage : la tension continue est d'abord ondulée en haute fréquence (quelques dizaines ou centaines de kHz) puis appliquée à un transformateur en ferrite et enfin redressée.
- dans le domaine de la soudure à l'arc les onduleurs sont souvent appelés inverters
- les onduleurs dans les postes à l'arc vont générer un courant alternatif monophasé à moyenne fréquence (entre 5 kHz et 20 kHz), ce qui permet d'utiliser des transformateurs élévateurs de courant nettement plus petits et légers que ceux employés traditionnellement à la fréquence du réseau, soit 50 Hz ou 60 Hz.
- dans le domaine de la réception hertzienne nomade TV grand public, les onduleurs (12V > 230 V) permettent de brancher un téléviseur sur la prise allume-cigare. [5]

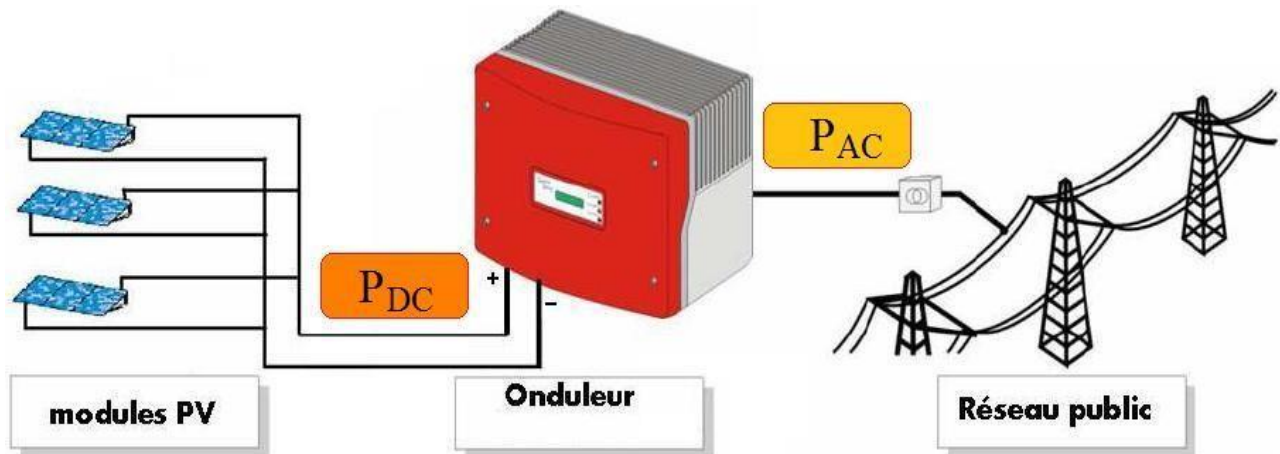


Figure I. 8. Exemple d'application des onduleurs

### I.3.9 Principe de fonctionnement de l'onduleur triphasé à deux niveaux de tension

Les onduleurs sont des convertisseurs statiques de type continu ou alternatif, un onduleur se définit comme un appareil électronique de puissance. Il est capable de fournir des courants alternatifs. Ils sont « statiques » car ils ne font intervenir aucun mouvement mécanique (contrairement aux moteurs). La figure I.9 donne le schéma de principe de l'onduleur de tension triphasé. IL est placé entre une source de tension continue supposée parfaite, donc de tension  $E$  constante, et une source de courant alternatif triphasé supposée elle aussi parfaite, donc des courants  $i_a$ ,  $i_b$  et  $i_c$  formant un système triphasé sinusoïdal équilibré

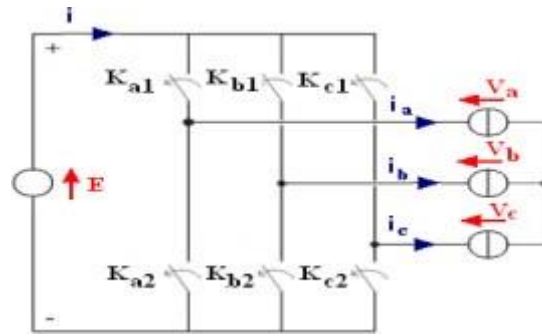


Figure I. 9. Schéma représentatif d'un onduleur triphasé à deux niveaux de tension

L'onduleur triphasé est l'assemblage de trois demi ponts monophasés chacun est formé de deux "interrupteurs" en série, ( $K_{a1}$ ,  $K_{a2}$ ), ( $K_{b1}$ ,  $K_{b2}$ ) et ( $K_{c1}$ ,  $K_{c2}$ ).

Les interrupteurs d'un même demi-point doivent être complémentaires pour que la source de tension  $E$  ne soit jamais en court-circuit, pour que les circuits des courants  $i_a$ ,  $i_b$  et  $i_c$  ne soient jamais ouverts. Pour que les six interrupteurs puissent imposer les tensions de sortie, quels que soient les courants  $i_a$ ,  $i_b$  et  $i_c$ , il faut que ces interrupteurs soient bidirectionnels en courant. Chacun d'eux est formé d'un semi-conducteur à ouverture et fermeture commandées et d'une diode montée en antiparallèle (figure I.10b),  $K_{a1}$  et  $D_{a1}$ ,  $K_{a2}$  et  $D_{a2}$ ,  $K_{b2}$  et  $D_{b2}$ ,... [7].

- La branche 1 correspond à l'état bloquant du transistor et de la diode (figure I.10a).
- La branche 2 correspond à la conduction du transistor.
- La branche 3 correspond à la conduction de la diode [8],[9].

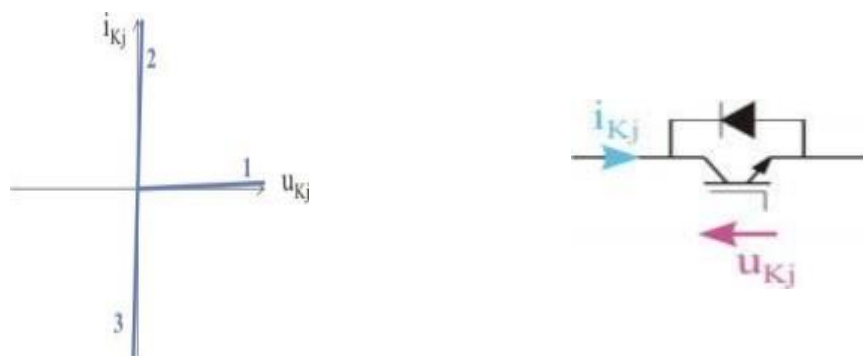


Figure I. 10. (a) La caractéristique statique d'un interrupteur, (b) Mise en parallèle d'un transistor et d'une diode

### **I.4 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons consacré l'étude sur les convertisseurs, au début nous avons commencé par présenter et définir en générales les convertisseurs statique (redresseurs, onduleur, hacheur, gradateur et cyloconvertisseurs), nous avons approfondie notre étude sur les onduleurs en présentant leur principe de fonctionnement, leur type et leur application.



**Chapitre II :**  
**TOPOLOGIES DES**  
**CONVERTISSEURS MULTINIVEAUX**

## II.1 Introduction

Les topologies d'onduleurs à trois niveaux ont gagné en attrait pour les applications à haute puissance en raison de leurs avantages par rapport à topologies d'onduleurs à deux niveaux. Les Avantages typiques de trois niveaux les topologies d'onduleurs par rapport aux topologies d'onduleurs a deux niveaux sont inférieures contenu harmonique dans la forme d'onde du courant de sortie nécessitant composants de filtre plus petits, perte de commutation réduite et perturbations électromagnétiques réduite.

Deux catégories d'onduleurs multiniveaux sont actuellement répertoriées. La première catégorie regroupe les onduleurs principaux en trois groupes :

- les onduleurs à diodes de bouclage (en anglais clamping diodes appelé diode clamp) Neutral Point Clamped (NPC) et Multiple Point Clamped (MPC)
- l'onduleur à condensateur flotteur [ou Flying Capacitor (FC)]
- l'onduleur à pont en cascade H-bridge.

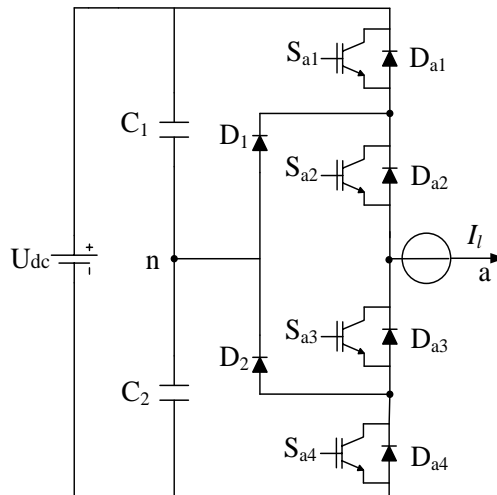
La deuxième catégorie des onduleurs multiniveaux comporte les assemblages hybrides des onduleurs de la première catégorie. Ainsi, on peut citer entre autres

- NPC en cascade (CDC),
- H-bridge en cascades (CMH),
- NPC et H-bridge en cascade (CDCH)

## II.2 Les différentes structures d'onduleurs multiniveaux

### II.2.1 Topologies NPC classiques

L'onduleur Neutral Point Clamped (NPC) est proposé par Baker [BR1]. Cet onduleur permet d'avoir un niveau impair de tension. Le premier onduleur NPC a été développé pour une tension de sortie à trois niveaux par la superposition de deux interrupteurs élémentaires alimentés chacun par une source de tension continue distincte. Après le premier onduleur NPC breveté par Baker, d'autres chercheurs ont développé les différentes structures basées sur NPC [10, 11,12].L'onduleur NPC permet de disposer d'un nombre impair de niveaux dans le motif de la tension en sortie. Cependant, l'onduleur Multiple Point Clamped (MPC) a été développé dans les années 90 pour un nombre pair de tensions. La Figure. II.1 illustré le bras d'un onduleur trois niveaux de type NPC.



*Figure II. 1. Schéma d'un convertisseur NPC 3 niveaux*

Les principaux avantages de l'onduleur NPC à trois niveaux par rapport à un onduleur classique à deux niveaux sont :

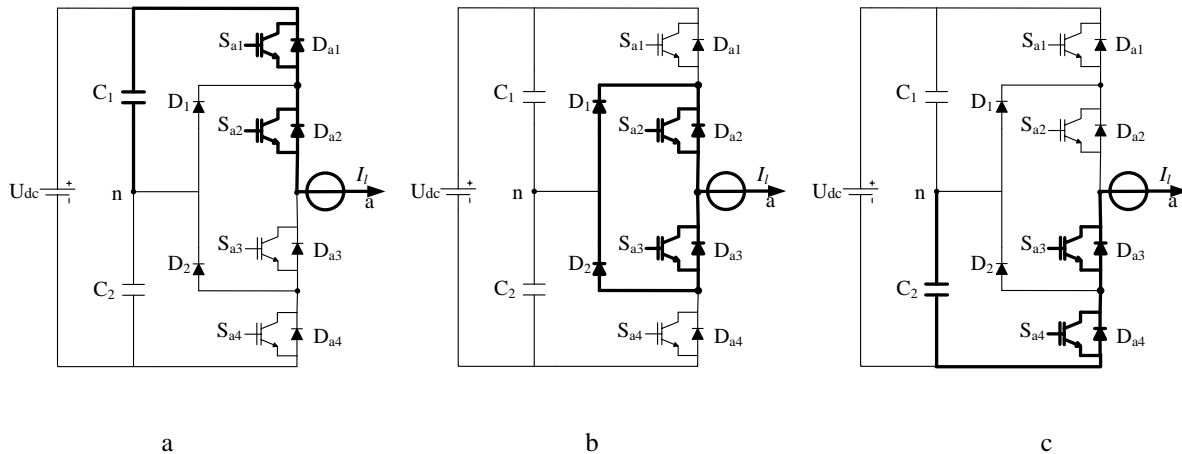
- Les semi-conducteurs de puissance bloquent une tension inverse égale à la moitié de la tension de l'étage continu
- La topologie de base peut être facilement généralisée pour générer un convertisseur avec un nombre de niveaux supérieur.

Cependant, pour les topologies avec diodes de bouclage, la pratique a révélé plusieurs difficultés techniques qui compliquent ses applications au cas des grandes puissances. Entres autres, on peut citer:

- Le NPC exige des diodes de bouclage à vitesse de commutation élevée qui doivent être capables de supporter le courant de la pleine charge.
- Pour les topologies avec plus de trois niveaux, les diodes de bouclage (clamping diodes) peuvent augmenter les contraintes en tension. Une connexion série des diodes pourrait donc être exigée ce qui complique la conception et soulève des questions de fiabilité, et de coût de réalisation.
- Le maintien de l'équilibre de la charge des condensateurs demeure toujours une question ouverte pour les topologies des onduleurs NPC avec plus de trois niveaux. Bien que le NPC à trois niveaux fonctionne avec un facteur de puissance élevé, l'onduleur NPC multiniveaux est employé surtout dans les circuits de compensation. Cela est dû au problème d'équilibrage des capacités. [13]

## TOPOLOGIES DES CONVERTISSEURS MULTINIVEAUX

La Figure II.2 représente les configurations possibles du convertisseur trois niveaux à structure NPC. Les ordres de commandes des interrupteurs  $S_{a1}$  et  $S_{a3}$  sont complémentaire ainsi que ceux des interrupteurs  $S_{a2}$  et  $S_{a4}$ . Ce principe de commande complémentaire ne présume en rien de la conduction effective des composants commander à la fermeture.



*Figure II. 2. Configuration possible d'un bras d'onduleur à trois niveaux de type NPC*

- Si tous les interrupteurs du hauts  $S_{a1}$  et  $S_{a2}$  sont fermés on obtient le niveau de tension de sortie  $V_a = \frac{U_{dc}}{2}$  (cas a).
- Si tous les interrupteurs du bas  $S_{a3}$  et  $S_{a4}$  sont fermés, on obtient le niveau de tension de sortie  $V_a = -\frac{U_{dc}}{2}$  (cas c).
- Si tous les interrupteurs du milieu  $S_{a2}$  et  $S_{a3}$  sont fermés, on obtient le niveau de tension de sortie  $V_a = 0$  (cas b).

Le tableau II.1 résume le fonctionnement du bras de l'onduleur NPC à trois niveaux en fonction du sens de circulation du courant de charge.

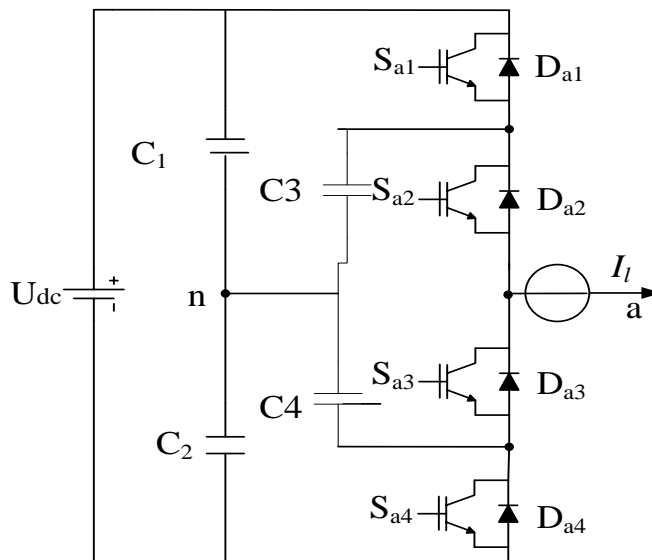
Tableau II.1 Phases de fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC à trois niveaux

Sens de courant	Le courant circule à travers	Niveaux de tension
$I_l > 0$	$S_{a1}$ et $S_{a2}$	$U_{dc}/2$
	$D_1$ et $S_{a2}$	0

	Da3 et Da4	-Udc/2
$I_l < 0$	Da1 et Da2	Udc/2
	D2 et Sa3	0
	Sa3 et Sa4	-Udc/2

**II.2.2 Les onduleurs multiniveaux à condensateur flotteur (ou FC)**

Le convertisseur à condensateurs flottants (Flying Capacitor Multilevel Inverters) ou convertisseur multicellulaire est une topologie de conversion d'énergie qui repose sur la mise en série d'interrupteurs commandés. Elle est apparue au début des années 1990 à la suite d'un brevet déposé par Meynard et Foch. Cet onduleur est obtenu par raccordement de cellules de condensateurs de bouclage. Le premier avantage de cette topologie est l'absence des diodes de bouclage propres aux topologies des onduleurs NPC et MPC. De plus, les contraintes en tension imposées aux composants de puissance sont naturellement limitées : on note une faible valeur de  $dv/dt$  aux bornes des composants. Des "redondances" de commutation dans les séquences de fonctionnement introduisent des états qui peuvent être utilisés pour le maintien de l'équilibre des charges des condensateurs. Ainsi, par phase, une seule source DC est nécessaire. Les onduleurs FC peuvent présenter des nombres pairs ou impairs de niveaux, comme montre la Figure II.3.



*Figure II. 3. Schéma d'un convertisseur FC 3 niveaux*

Le FC a quelques inconvénients comme [14, 15, 12, 16, 17, 18, 19, 20, 21]:

## TOPOLOGIES DES CONVERTISSEURS MULTINIVEAUX

- Le contrôleur de la charge du condensateur augmente la complexité du contrôle du circuit entier.
- Il exige des condensateurs mis en parallèle, dont, les forts courants pourront circuler à travers ces condensateurs.
- Il existe un potentiel de résonance parasite entre les condensateurs découplés. [13]

La Figure II.4 illustre les configurations possible du convertisseur trois niveaux à structure FC selon le signe de courant  $I$ . Les interrupteurs  $S_{a1}$  et  $S_{a4}$  sont complémentaires ainsi que les interrupteurs  $S_{a2}$  et  $S_{a3}$ .

- Pour obtenir le niveau de tension de sortie  $V_a = \frac{U_{dc}}{2}$ , tous les interrupteurs du hauts  $S_{a1}$  et  $S_{a2}$  sont fermés (cas a).
- Pour obtenir le niveau de tension de sortie  $V_a = -\frac{U_{dc}}{2}$ , tous les interrupteurs du bas  $S_{a3}$  et  $S_{a4}$  sont fermés (cas d).
- Pour obtenir le niveau de tension de sortie  $V_a = 0$ , les interrupteurs  $S_{a1}$  et  $S_{a3}$  ou  $S_{a2}$  et  $S_{a4}$  sont fermés (cas b et c).

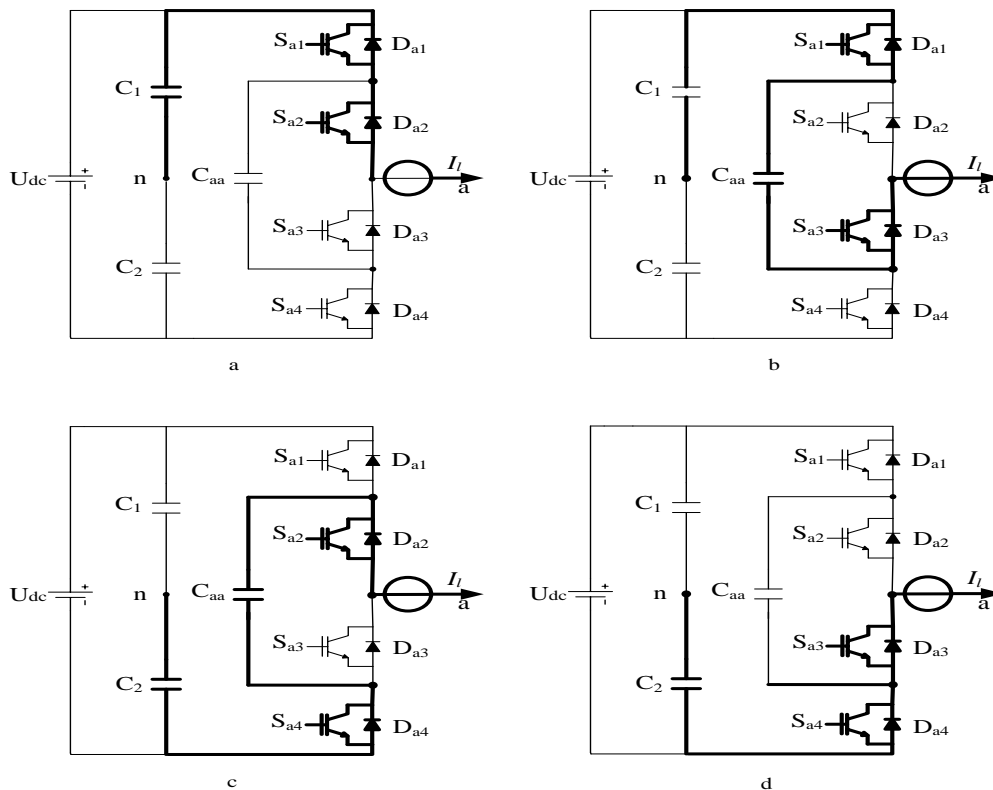


Figure II. 4. Configuration possible d'un bras d'onduleur à trois niveaux de type FC

Le tableau II.2 résume le fonctionnement du bras de l'onduleur FC à trois niveaux en fonction du sens de circulation du courant de charge.

Tableau II.2 Phases de fonctionnement d'un bras d'onduleur FC à trois niveaux

Sens de courant	Le courant circule à travers	Niveaux de tension
$I_l > 0$	$S_{a1}$ et $S_{a2}$	$U_{dc}/2$
	$C_{aa}$ , $S_{a1}$ et $D_{a3}$	0 ( $C_{aa}$ se charge)
	$C_{aa}$ , $S_{a2}$ , $D_{a4}$	0 ( $C_{aa}$ se décharge)
	$D_{a3}$ et $D_{a4}$	$-U_{dc}/2$
$I_l < 0$	$D_{a1}$ et $D_{a2}$	$U_{dc}/2$
	$C_{aa}$ , $D_{a1}$ et $S_{a3}$	0 ( $C_{aa}$ se décharge)
	$C_{aa}$ , $D_{a2}$ et $S_{a4}$	0 ( $C_{aa}$ se charge)
	$S_{a3}$ et $S_{a4}$	$-U_{dc}/2$

### II.2.3 Les onduleurs multiniveaux en pont H (H-Bridge)

Le premier modèle d'onduleur était l'onduleur en pont H (en anglais H-bridge), apparu en 1975 [22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 16, 33, 34, 35, 36, 37]. Un progrès des onduleurs multiniveaux a été dû au modèle en pont H cascadié en série. La première application d'onduleur pont H était pour la stabilisation des plasmas en 1988 [38]. Les sorties des onduleurs en pont sont connectées en série de telle sorte que l'onde de la tension synthétisée soit la somme des tensions de sortie. L'avantage majeur de cette approche est que le nombre de paliers sur la tension de sortie peut être augmenté sans aucun ajout de nouveaux composants. L'utilisation de cellules de conversion de puissance en série permet d'accroître le nombre de niveau de tension et de puissance du convertisseur. Mais l'inconvénient majeur de cette topologie est le grand nombre de tensions continues isolées exigées pour chaque pont.

Cependant, les cellules peuvent être alimentées par des transformateurs à phase décalée de moyenne tension afin de fournir une puissance plus élevée. Dans ce cas, si  $N_s$  est le nombre de sources indépendantes, le nombre de niveaux de la tension en sortie  $N_n$  est donné par [39,40, 41] :  $N_n = 2N_s + 1$ . [13]

La Figure. II.5 illustré le bras d'un onduleur trois niveaux de type H bridge.

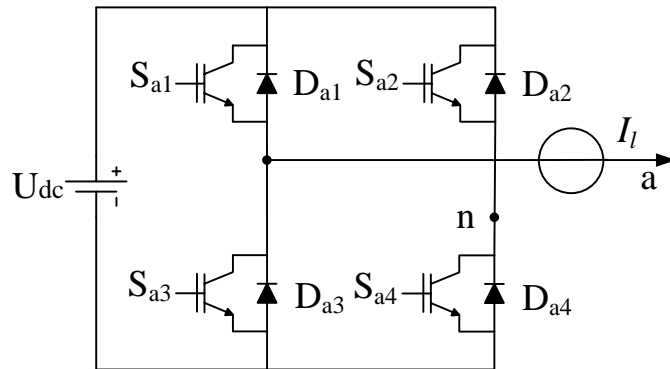


Figure II. 5. Schéma d'un convertisseur H-bridge 3 niveaux

La Figure II.6 illustre ces différents cas de conduction des composants selon le signe de courant I. Les interrupteurs complémentaires sont (Sa1 et Sa3) ou (Sa2 et Sa4).

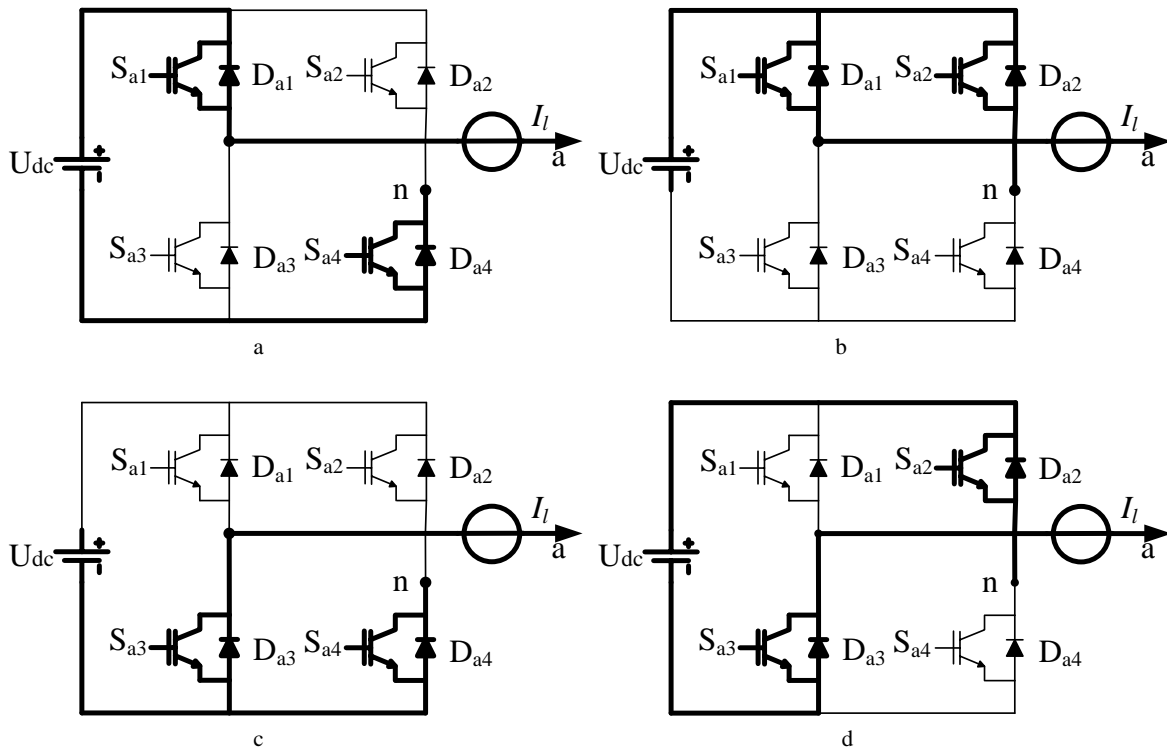


Figure II. 6. Configuration possible d'un bras d'onduleur à trois niveaux de type H-bridge



## TOPOLOGIES DES CONVERTISSEURS MULTINIVEAUX

- Pour obtenir le niveau de tension de sortie  $V_a = U_{dc}$ , les interrupteurs  $S_{a1}$  et  $S_{a4}$  sont fermés (cas a).
- Pour obtenir le niveau de tension de sortie  $V_a = -U_{dc}$ , les interrupteurs  $S_{a2}$  et  $S_{a3}$  sont fermés (cas d).
- Pour obtenir le niveau de tension de sortie  $V_a = 0$ , les interrupteurs  $S_{a1}$  et  $S_{a2}$  ou  $S_{a3}$  et  $S_{a4}$  sont fermés (cas b et c).

Le tableau II.3 résume le fonctionnement du bras de l'onduleur H-bridge à trois niveaux en fonction du sens de circulation du courant de charge.

Tableau II.3 Phases de fonctionnement d'un bras d'onduleur H-bridge à trois niveaux

Sens de courant	Le courant circule à travers	Niveaux de tension
$I_l > 0$	$S_{a1}$ et $S_{a4}$	$U_{dc}$
	$S_{a1}$ et $D_{a2}$	0
	$D_{a3}$ et $S_{a4}$	0
	$D_{a2}$ et $D_{a3}$	$-U_{dc}$
$I_l < 0$	$D_{a1}$ et $D_{a4}$	$U_{dc}$
	$D_{a1}$ et $S_{a2}$	0
	$S_{a3}$ et $D_{a4}$	0
	$S_{a2}$ et $S_{a3}$	$-U_{dc}$

### II.2.4 Les onduleurs multiniveaux à structure NPP

La topologie Neutral point Piloted (NPP) a été présentée pour la première fois par J. Holtz en 1977 [42], puis développée par A. Nabae en 1981 [43]. Le convertisseur triphasé NPP présenté les Figure II.7, utilise la mise en série d'interrupteurs commandables de type IGBT, montés en antiparallèle avec des diodes. La différence entre cette topologie et le T-type est que le NPP comporte deux interrupteurs en série verticaux alors que le T-type n'en utilise qu'un seul. La mise en série de composants permet de doubler, si nécessaire, la valeur du niveau de tension en sortie du convertisseur. Deux condensateurs de même capacité sont également mis en œuvre afin de diviser en deux la tension d'entrée. De plus, deux autres interrupteurs bidirectionnels en courant, constitués pour chacun de 2 diodes et de 2 IGBT (interrupteurs

## TOPOLOGIES DES CONVERTISSEURS MULTINIVEAUX

horizontaux), permettent d'obtenir un niveau de tension supplémentaire (niveau zéro Volt) par rapport au convertisseur 2 niveaux classique. L'ajout de ces interrupteurs trois segments permet également de mieux répartir la dissipation des pertes dans les différents composants [42], [44].[45]

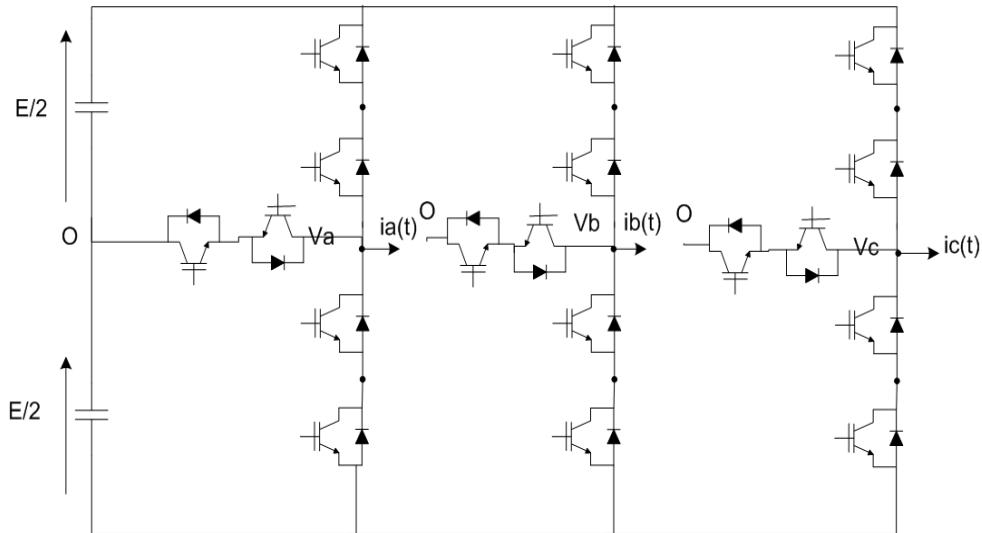


Figure II. 7. Convertisseur triphasé NPP 3 niveaux

La Figure II.8 montre les séquences de conduction possible trois niveaux à structure NPP

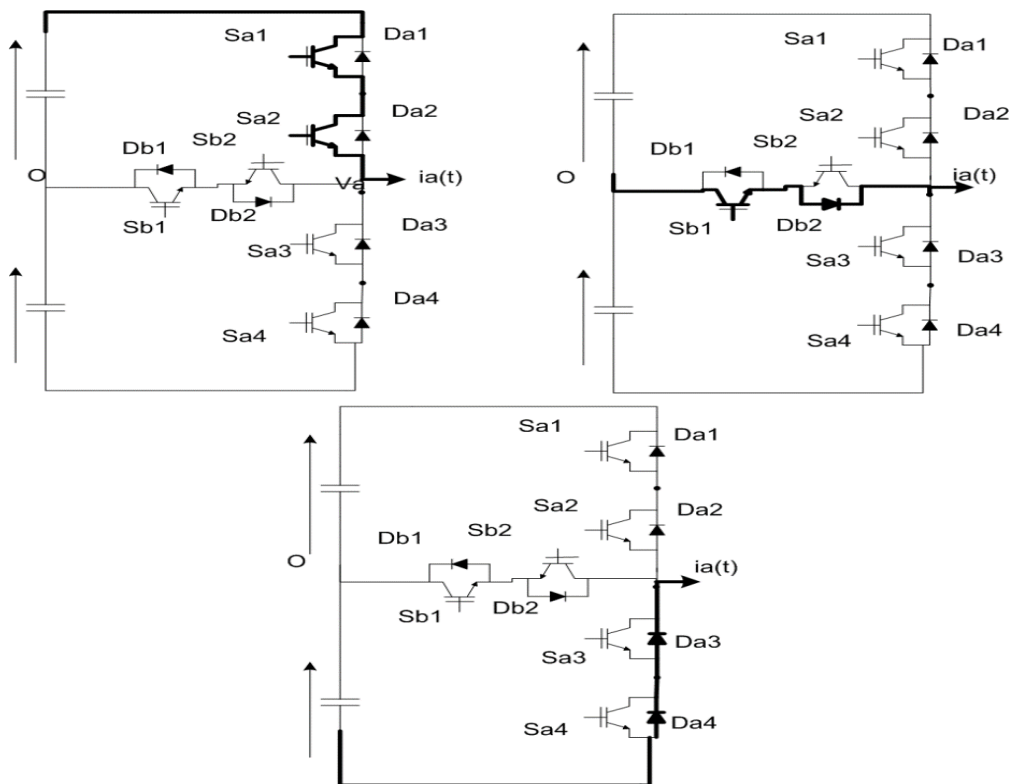


Figure II. 8. Configuration possible d'un bras d'onduleur à trois niveaux de type NPP

## TOPOLOGIES DES CONVERTISSEURS MULTINIVEAUX

---

- Si tous les interrupteurs du hauts  $S_{a1}$  et  $S_{a2}$  sont fermés on obtient le niveau de tension de sortie  $V_a = \frac{U_{dc}}{2}$ .
- Si tous les interrupteurs du bas  $S_{a3}$  et  $S_{a4}$  sont fermés, on obtient le niveau de tension de sortie  $V_a = -\frac{U_{dc}}{2}$ .
- Si tous les interrupteurs du milieu  $S_{b1}$  et  $S_{b2}$  sont fermés, on obtient le niveau de tension de sortie  $V_a = 0$ .

Selon le signe de courant  $I$ . Les interrupteurs  $S_{a1}$  et  $S_{a3}$  sont complémentaires ainsi que  $S_{a2}$  et  $S_{a4}$ .

Tableau II.4 Phases de fonctionnement d'un bras d'onduleur NPP à trois niveaux

Sens de courant	Le courant circule à travers	Niveaux de tension
<b><math>I_1 &gt; 0</math></b>	Sa1 et Sa2	$U_{dc} / 2$
	Da3 et Da4	$-U_{dc} / 2$
	Sb1 et Db2	0
<b><math>I_1 &lt; 0</math></b>	Da1 et Da2	$U_{dc} / 2$
	Db2 et Sb2	0
	Sa3 et Sa4	$-U_{dc} / 2$

**II.2.5 Les onduleurs multiniveaux à structure ANPC**

Le convertisseur Clampé Activement par le Neutre (ANPC Figure II.9) est une variante de la topologie NPC. Pour ce convertisseur, des IGBT sont connectés en antiparallèle avec les diodes de clampe de la structure NPC [46], [47]. L'ajout de ces interrupteurs commandables permet de mieux dissiper et répartir les pertes dans les composants. En effet, dans la topologie NPC, à faible taux de modulation, ce sont les diodes de clampe qui sont les plus sollicitées. Grâce à la topologie Active NPC, il y a deux chemins possibles pour effectuer le niveau zéro Volt de tension lorsque le courant de sortie est positif et également deux chemins possibles lorsque le courant est négatif. Ainsi, cette diversité de possibilités permet de mieux répartir les pertes dans les différents composants.[45]

La Figure. II.9 illustré les trois d'un onduleur trois niveaux de type ANPC.

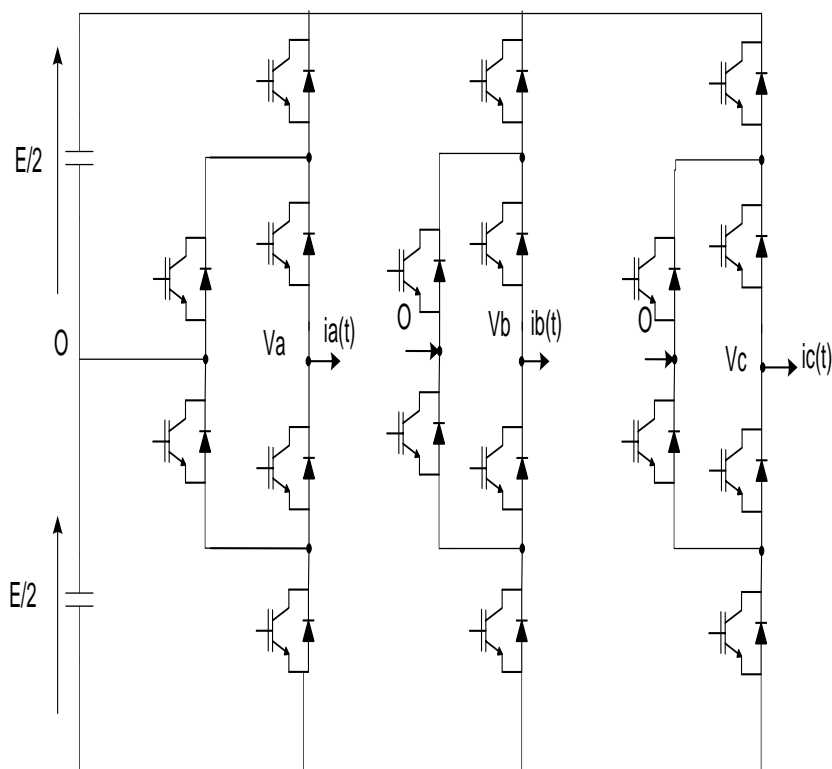


Figure II. 9.Convertisseur ANPC 3 niveaux triphasé.

## TOPOLOGIES DES CONVERTISSEURS MULTINIVEAUX

La Figure II.10 illustre ces différents cas de conduction des composants de convertisseurs (onduleur) selon le signe de courants trois niveaux à structure ANPC. Les ordres de commande des interrupteurs Sa1 et Sa3 sont complémentaires ainsi que ceux des interrupteurs Sa2 et Sa4

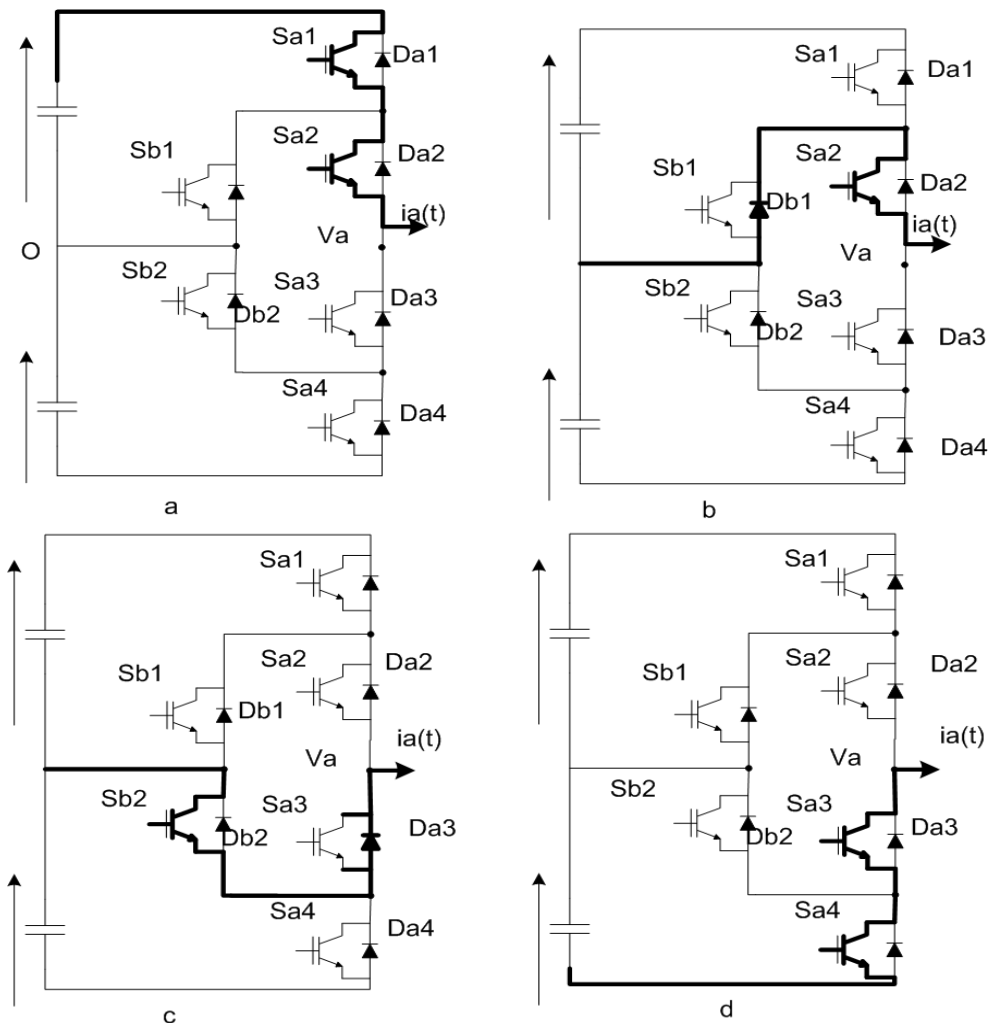


Figure II. 10. . Configuration possible d'un bras d'onduleur à trois niveaux de type ANPC

- Pour obtenir le niveau de tension de sortie  $V_a = U_{dc}$ , les interrupteurs  $S_{a1}$  et  $S_{a2}$  sont fermés.
- Pour obtenir le niveau de tension de sortie  $V_a=0$  les interrupteurs  $S_{b2}$  et  $S_{a3}$  ou  $S_{b1}$  et  $S_{a2}$  sont fermés.
- Pour obtenir le niveau de tension de sortie  $V_a=-U_{dc}$  les interrupteurs  $S_{a3}$  et  $S_{a4}$  sont fermés.

Tableau II.5 Phases de fonctionnement d'un bras d'onduleur ANPC à trois niveaux

Sens de courant	Le courant circule à travers	Niveaux de tension
$I_i > 0$	$S_{a1}$ et $S_{a2}$	$U_{dc}/2$
	$D_{b1}$ et $S_{a2}$	0
	$S_{b2}$ et $D_{a3}$	0
	$S_{a3}$ et $S_{a4}$	$-U_{dc}/2$
$I_i < 0$	$D_{a1}$ et $D_{a2}$	$U_{dc}/2$
	$D_{a2}$ et $S_{b1}$	0
	$S_{a3}$ et $D_{b2}$	0
	$D_{a3}$ et $D_{a4}$	$-U_{dc}/2$

### II.2.6 Onduleur à structure MMC

La topologie MMC (Modular Multilevel Converter) a été introduite par *MARQUARDT* en 2001 [48], chaque phase de ce convertisseur est composée d'un bras supérieur et d'un bras inférieur connectés en série entre les bornes de la source continue et chaque bras est constitué de N sous modules (SM) connectés en série et une inductance.

La Figure II.11 montre une phase d'un convertisseur trois niveaux

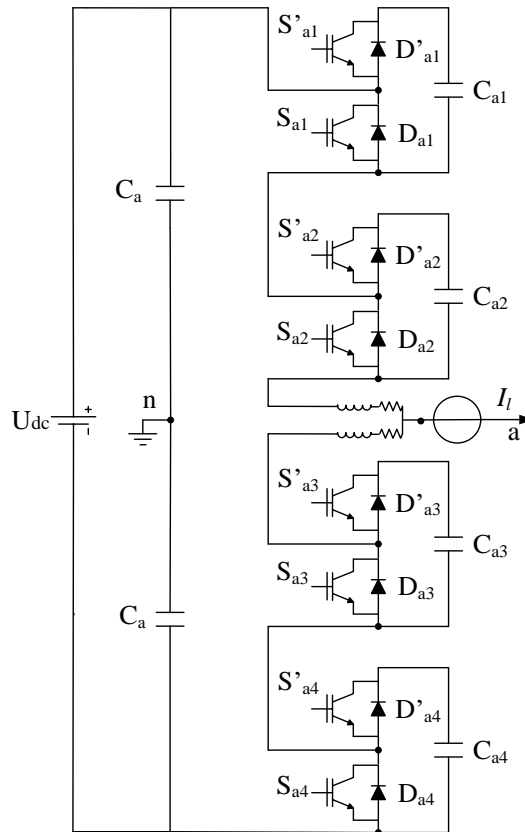


Figure II. 11. . Schéma d'un convertisseur MMC 3 niveaux

La Figure II.12 illustre les configurations possible du convertisseur trois niveaux à structure MMC,  $S_{a1}$  et  $S'_{a1}$ ,  $S_{a2}$  et  $S'_{a2}$ ,  $S_{a3}$  et  $S'_{a3}$ ,  $S_{a4}$  et  $S'_{a4}$ , sont commandés de manière complémentaire, à chaque instant, quatre interrupteurs doivent être fermés (un interrupteur pas SM).

- Pour obtenir le niveau de tension de sortie  $V_a = \frac{U_{dc}}{2}$ , les interrupteurs  $S_{a1}$ ,  $S_{a2}$ ,  $S'_{a3}$  et  $S'_{a4}$  sont fermés (cas a).
- Pour obtenir le niveau de tension de sortie  $V_a = 0$ , les interrupteurs  $S_{a1}$ ,  $S'_{a2}$ ,  $S_{a3}$  et  $S'_{a4}$  ou  $S_{a1}$ ,  $S'_{a2}$ ,  $S'_{a3}$  et  $S_{a4}$  ou  $S'_{a1}$ ,  $S_{a2}$ ,  $S_{a3}$  et  $S'_{a4}$  ou  $S'_{a1}$ ,  $S_{a2}$ ,  $S'_{a3}$  et  $S_{a4}$  sont fermés (cas b, c, d et e).
- Pour obtenir le niveau de tension de sortie  $V_a = -\frac{U_{dc}}{2}$ , les interrupteurs  $S'_{a1}$ ,  $S'_{a2}$ ,  $S_{a3}$  et  $S_{a4}$  sont fermés (cas f).

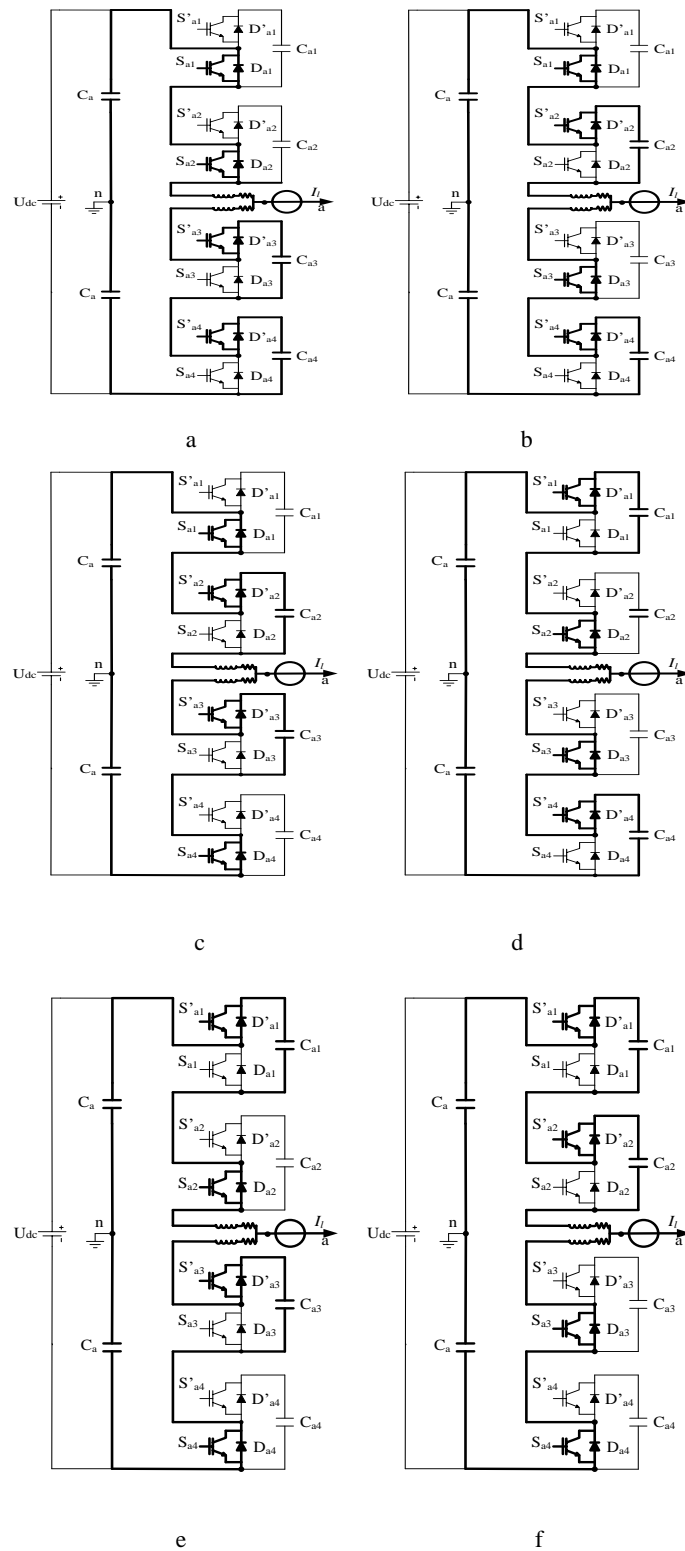


Figure II. 12. Configuration possible d'un bras d'onduleur à trois niveaux de type MMC



Le tableau II.6 résume le fonctionnement du bras de l'onduleur MMC à trois niveaux en fonction du sens de circulation du courant de charge.

Tableau II.6 Phases de fonctionnement d'un bras d'onduleur MMC à trois niveaux

Sens de courant	Le courant circule à travers	Niveaux de tension
$I_1 > 0$	$C_{a3}, C_{a4}, S_{a1}, S_{a2}, S'_{a3}$ et $S'_{a4}$	$U_{dc}/2$ ( $C_{a3}$ se décharge et $C_{a4}$ se décharge)
	$C_{a2}, C_{a4}, S_{a1}, D'_{a2}, D_{a3}$ et $S'_{a4}$	0 ( $C_{a2}$ se charge et $C_{a4}$ se décharge)
	$C_{a2}, C_{a4}, S_{a1}, D'_{a2}, S'_{a3}$ et $D_{a4}$	0 ( $C_{a2}$ se charge et $C_{a3}$ se décharge)
	$C_{a1}, C_{a4}, D'_{a1}, S_{a2}, D_{a3}$ et $S'_{a4}$	0 ( $C_{a1}$ se charge et $C_{a4}$ se décharge)
	$C_{a1}, C_{a3}, S'_{a1}, D_{a2}, S'_{a3}$ et $D_{a4}$	0 ( $C_{a1}$ se charge et $C_{a3}$ se décharge)
	$C_{a1}, C_{a2}, D'_{a1}, D'_{a2}, D_{a3}$ et $D_{a4}$	$-U_{dc}/2$ ( $C_{a1}$ se charge et $C_{a2}$ se charge)
$I_1 < 0$	$C_{a3}, C_{a4}, D_{a1}, D_{a2}, D'_{a3}$ et $D'_{a4}$	$U_{dc}/2$ ( $C_{a3}$ se charge et $C_{a4}$ se charge)
	$C_{a2}, C_{a4}, D_{a1}, S'_{a2}, S_{a3}$ et $D'_{a4}$	0 ( $C_{a2}$ se décharge et $C_{a4}$ se charge)
	$C_{a2}, C_{a4}, D_{a1}, S'_{a2}, D'_{a3}$ et $S_{a4}$	0 ( $C_{a2}$ se décharge et $C_{a3}$ se charge)
	$C_{a1}, C_{a4}, S'_{a1}, D_{a2}, S_{a3}$ et $D'_{a4}$	0 ( $C_{a1}$ se décharge et $C_{a4}$ se charge)
	$C_{a1}, C_{a3}, D'_{a1}, S_{a2}, D'_{a3}$ et $S_{a4}$	0 ( $C_{a1}$ se décharge et $C_{a3}$ se charge)
	$C_{a1}, C_{a2}, S'_{a1}, S'_{a2}, S_{a3}$ et $S_{a4}$	$-U_{dc}/2$ ( $C_{a1}$ se décharge et $C_{a2}$ se décharge)

### II.3 Les onduleurs multiniveaux hybrides

L'onduleur multiniveau triphasé hybride est spécialement dédié grâce à la mise en série ou en parallèle d'onduleurs de base. La combinaison réelle de différentes topologies est basée sur les méthodes de la théorie des graphes [49-50]. Les topologies hybrides permettent d'améliorer la qualité de puissance et l'augmentation de nombre de niveau de la tension en utilisant moins de sources de tension continue à l'entrée et moins de commutations.

## TOPOLOGIES DES CONVERTISSEURS MULTINIVEAUX

Trois types d'hybridation sont développés dans l'industrie :

- Hybridation en pont, généralement entre onduleurs de même nature, Figure II.13.
- Hybridation en cascade, les topologies fournissent un effet multiplicateur du nombre de niveaux selon le modèle de structuration Figure, II.14.
- Hybridation côte-à-côte pour alimenter deux charges Figure, II.15.

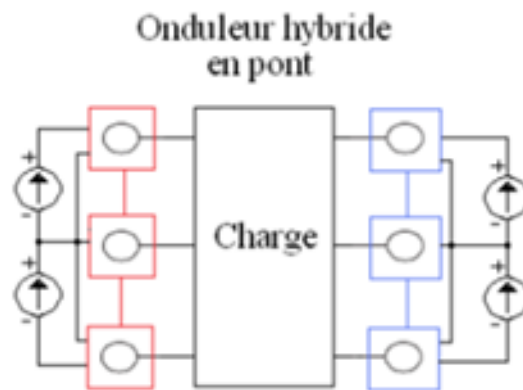


Figure II. 13. Onduleur hybride en pont

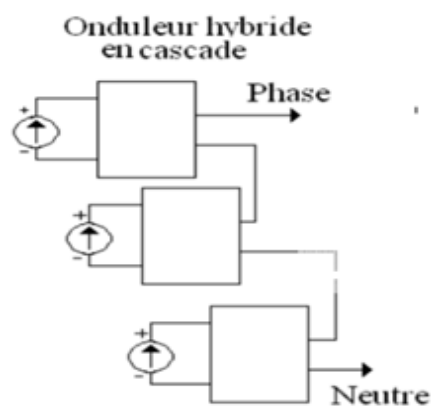


Figure II. 14. Onduleur hybride en cascade

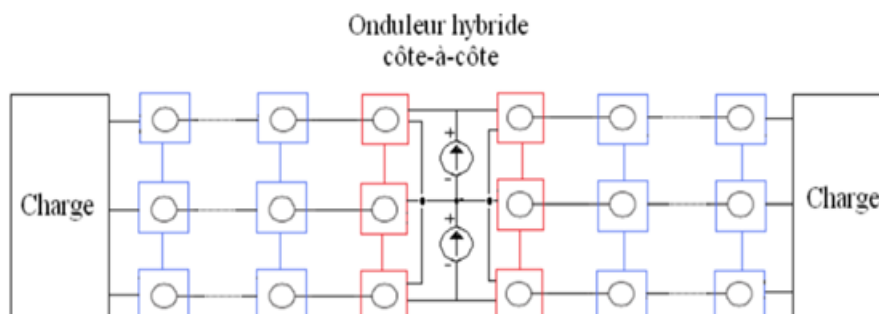


Figure II. 15. Onduleur hybride cote á cote

## **II.4 Conclusion**

Dans ce deuxième chapitre nous avons présenté les différentes structures d'onduleurs multiniveaux (NPC, ANPC, NPP, FC, H-BRIDGE, MMC, HYBRIDE) en se basant sur leurs topologies, le chapitre suivant sera consacré à la commande des onduleurs multiniveaux, où des techniques de commandes seront appliquées aux différentes topologies présentées dans ce chapitre.

**Chapitre III :**  
**TECHNIQUES DE COMMANDE DES**  
**CONVERTISSEURS MULTINIVEAUX**

### III.1 Introduction

Au chapitre précédent nous avons présenté les différentes Structure d'onduleur trois niveaux et dans ce chapitre nous avons commencé par choisir la commande MLI stratégie triangulo-sinusoïdale une seule porteuse et deux porteuses. Ce modèle est simulé au moyen du logiciel Matlab Simulink. Nous observons les résultats correspondent dans ce chapitre.

### III.2 Modulation MLI sinusoïdale

Cette technique est similaire à la technique de multiple impulsion, mais ici le signal de référence est un signal sinusoïdal. Ce changement donne comme résultat des impulsions de différente largeur, proportionnelle à l'amplitude de l'onde de référence. Les signaux de commande des interrupteurs sont toujours générés par l'intersection d'un signal porteuse triangulaire de fréquence  $F_p$  avec un signal sinusoïdal de référence de fréquence  $F$  [51] [52]

Après l'analyse théorique nous abordons maintenant la simulation, tous les résultats sont obtenus à l'aide du logiciel de simulation Matlab Simulink sur une charge résistive.

Nous présentant les Allures de tension et de courant et les taux distorsion d'harmonique (THD) des onduleurs trois niveaux (NPC, ANPC, FC, NPP, H-Bridge et MMC)

#### III.2.1 MLI sinusoïdale- triangulaire à une seule porteuse unipolaire

Le principe de cette stratégie de commande, est de comparer le signal de référence ou modulante  $V_{réf}$  (sinusoïdal) avec le signal d'une porteuse  $V_{pn}$  (triangulaire), comme le montre la figure III.1

Les tensions de référence de l'onduleur triphasé à trois niveaux ainsi que la porteuse triangulaire sont données par les équations :

$$\begin{cases} V_{réf1} = V_m \sin \omega t \\ V_{réf2} = V_m \sin \left( \omega t - \frac{2}{3} \pi \right) \\ V_{réf3} = V_m \sin \left( \omega t - \frac{4}{3} \pi \right) \end{cases} \quad (III.1)$$

$$U_p(t) = \begin{cases} 2U_p \frac{t}{T_p} & 0 \leq t \leq \frac{T_p}{2} \\ 2U_p \left( 1 - \frac{t}{T_p} \right) \frac{T_p}{2} & \frac{T_p}{2} \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (III.2)$$

Avec  $T_p = \frac{1}{f_p}$ .

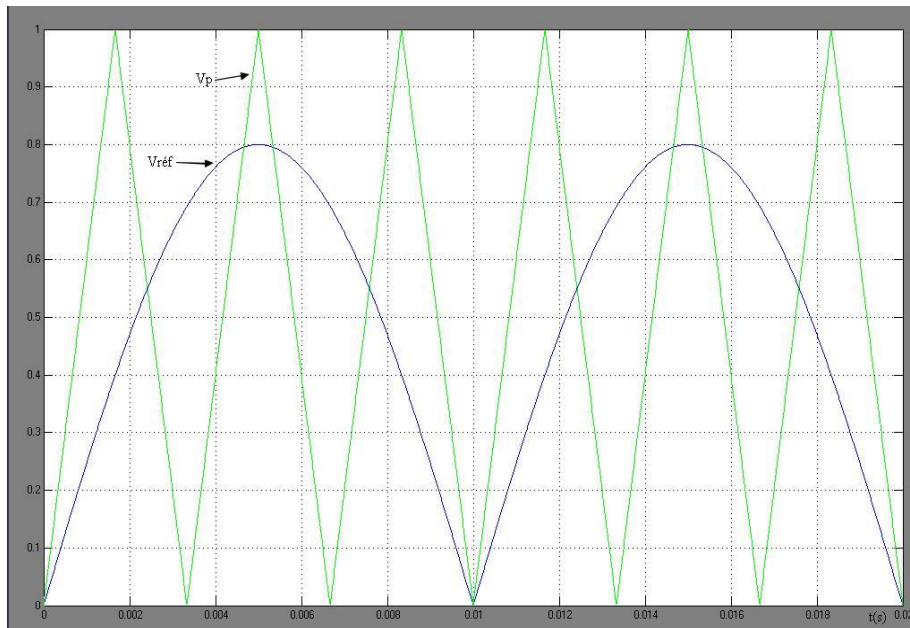


Figure III 1 Signal de référence et la porteuse pour un seul bras

L’algorithme de la commande triangulo-sinusoidale à une seul porteuse unipolaire pour le trois niveaux se résume pour un bras  $k$  par :

$$\begin{cases} Si (|V_{réfk}| \leq U_p) \rightarrow V_s = 0 \\ Si (|V_{réfk}| > U_p) et V_{réfk} > 0 \rightarrow V_s = U \\ Si (|V_{réfk}| > U_p) et V_{réfk} < 0 \rightarrow V_s = -U \end{cases} \quad (III.3)$$

**III.2.1.1 Structure NPC**

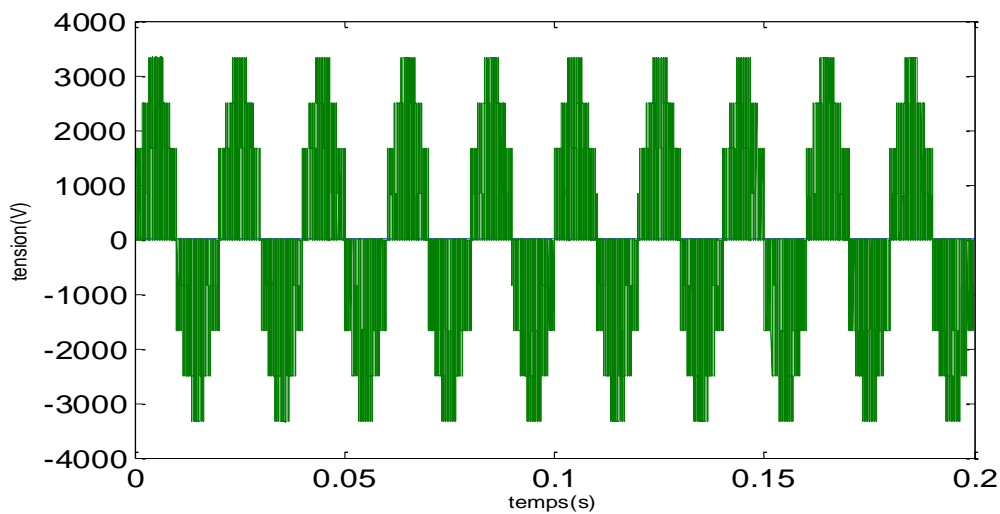


Figure III 2 Allure de tension à la sortie de l’onduleur

La Figure III.2 représente la tension entre deux phase, on remarque que cette forme de tension elle prend un signal triangulo-sinusoïdale, la valeur maximale est égale à 3341.5 v

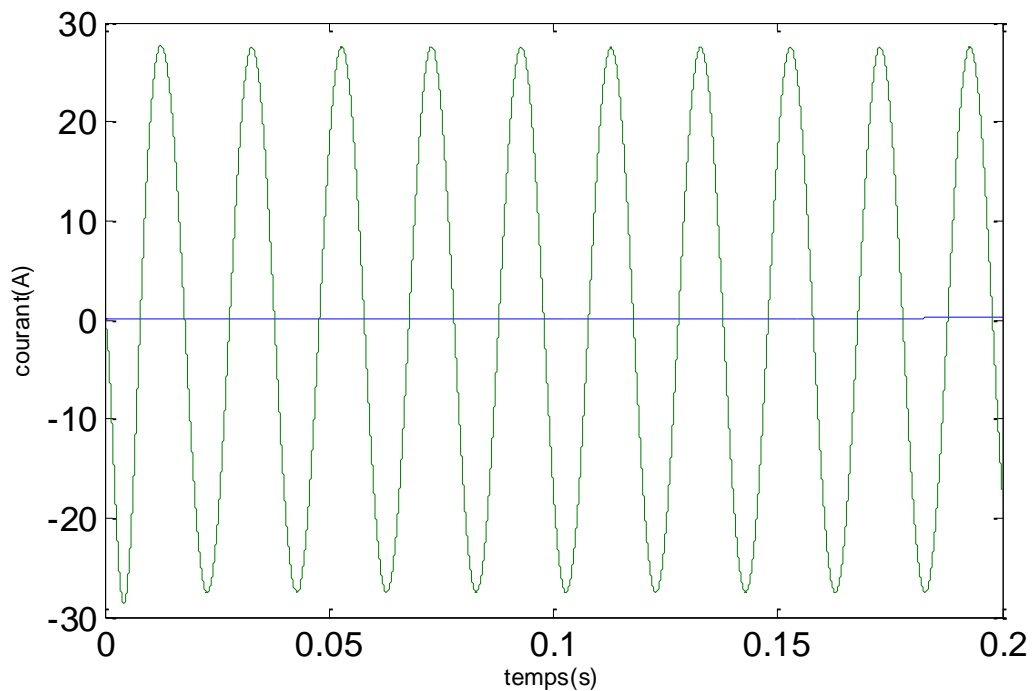


Figure III 3 Allure du courant à la sortie de l'onduleur

La figure III.3 montre le courant aux borne de la charge sous forme d'une sinusoïde a une valeur de 27.72 A

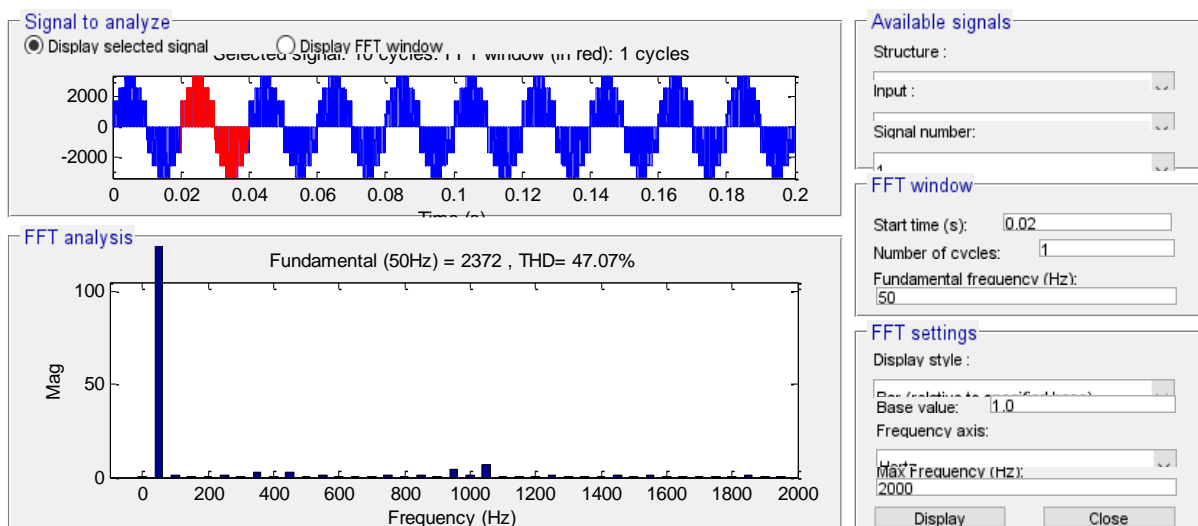


Figure III 4 Analyse spectrale de la tension à la sortie de l'onduleur

La figure III.4 représente l'analyse spectrale d'harmonique de tension nous avons obtenu un THD=47.07%, On remarque que le taux d'harmonique est assez élevé

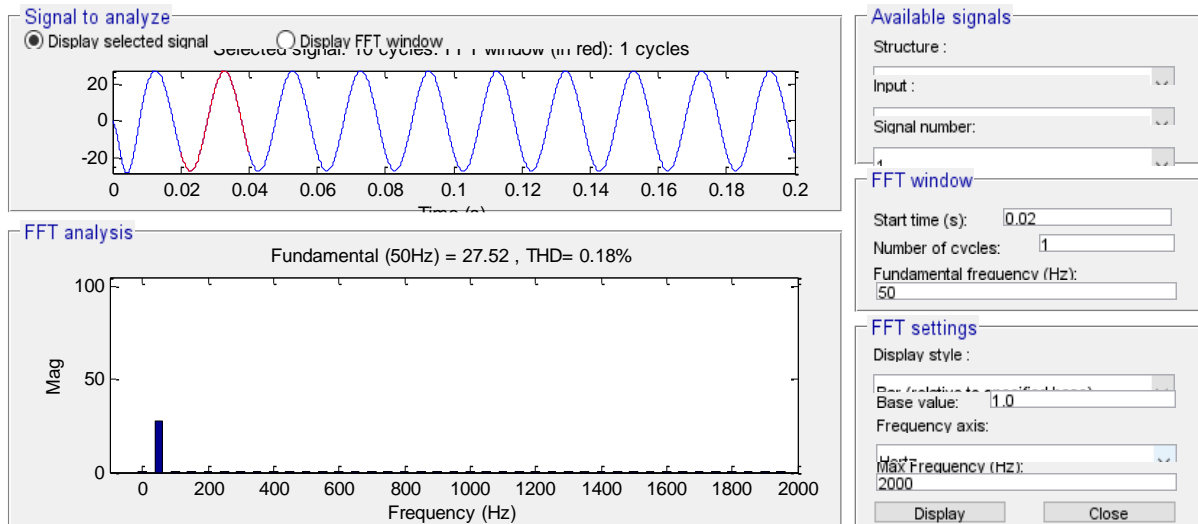


Figure III 5. Analyse spectrale du courant à la sortie de l'onduleur

La figure III.5 représente l'analyse spectrale d'harmonique du courant on a relevé un THD=0.18%, on remarque que le taux d'harmonique est très faible

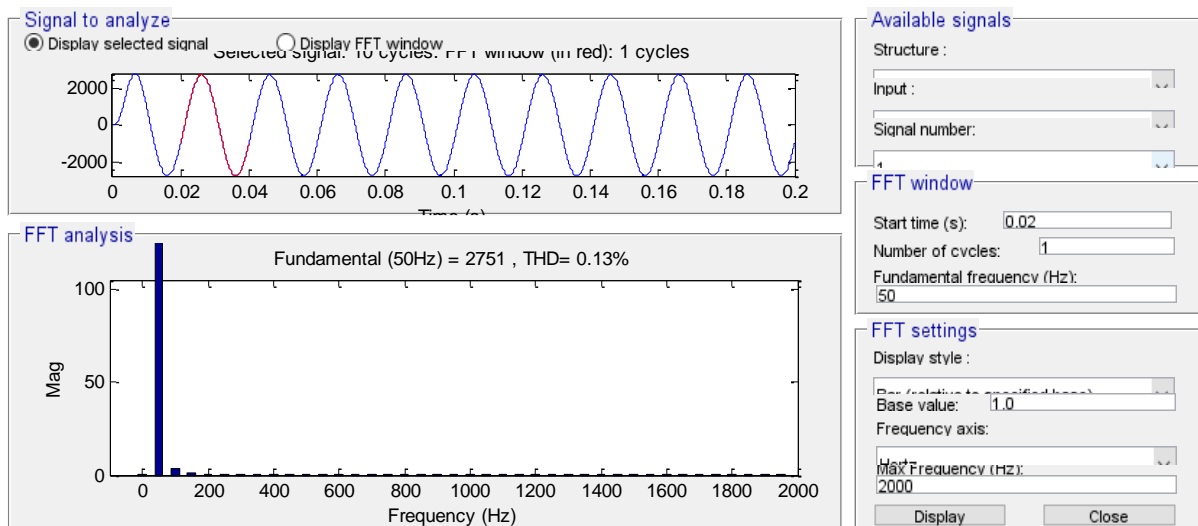


Figure III 6. Analyse spectrale de la tension après filtrage



La figure III.6 représente l'analyse spectrale d'harmonique de la tension filtrée on a relevé un THD=0.13, On remarque que le taux d'harmonique est très faible

## III.2.1.2 Structure FC

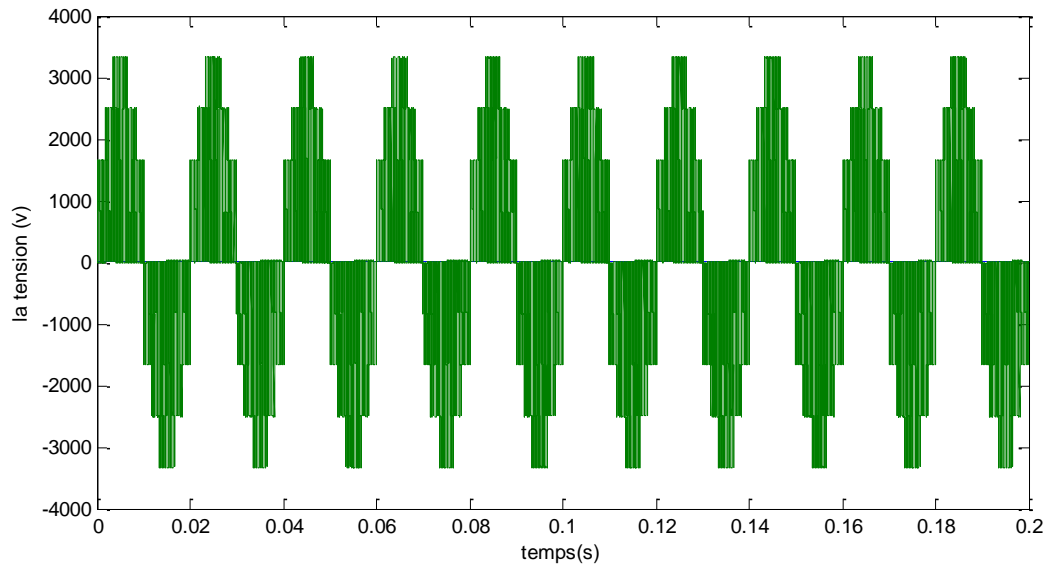


Figure III 7. Allure de la tension à la sortie de l'onduleur

La figure III.7 représente la tension entre deux phases sous forme d'une triangulo sinusoïdale et la valeur maximale est égale à 3341.5 v

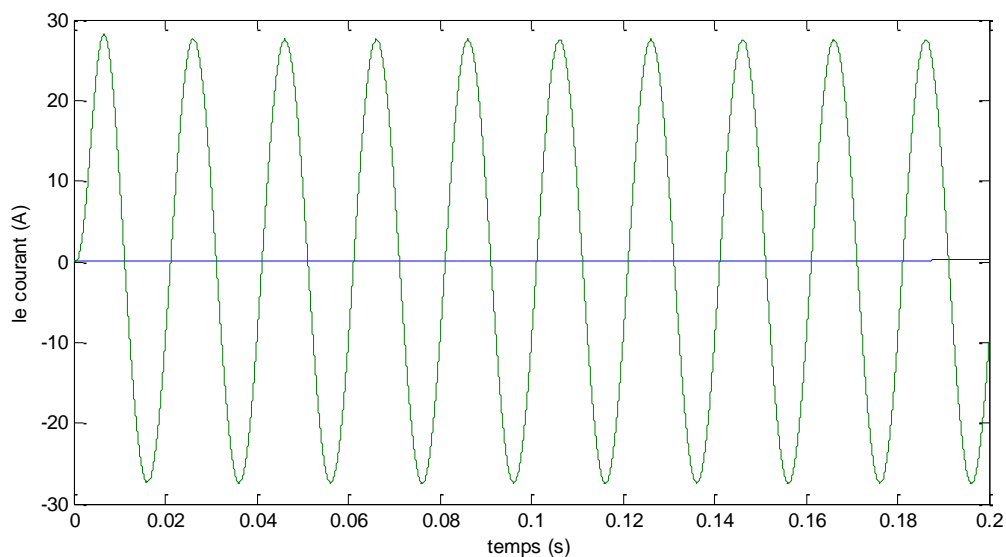


Figure III 8 .Allure du courant à la sortie de l'onduleur

La figure III.8 représente l'allure de courant sous forme d'une sinusoïde d'une valeur égale à 28.1 A

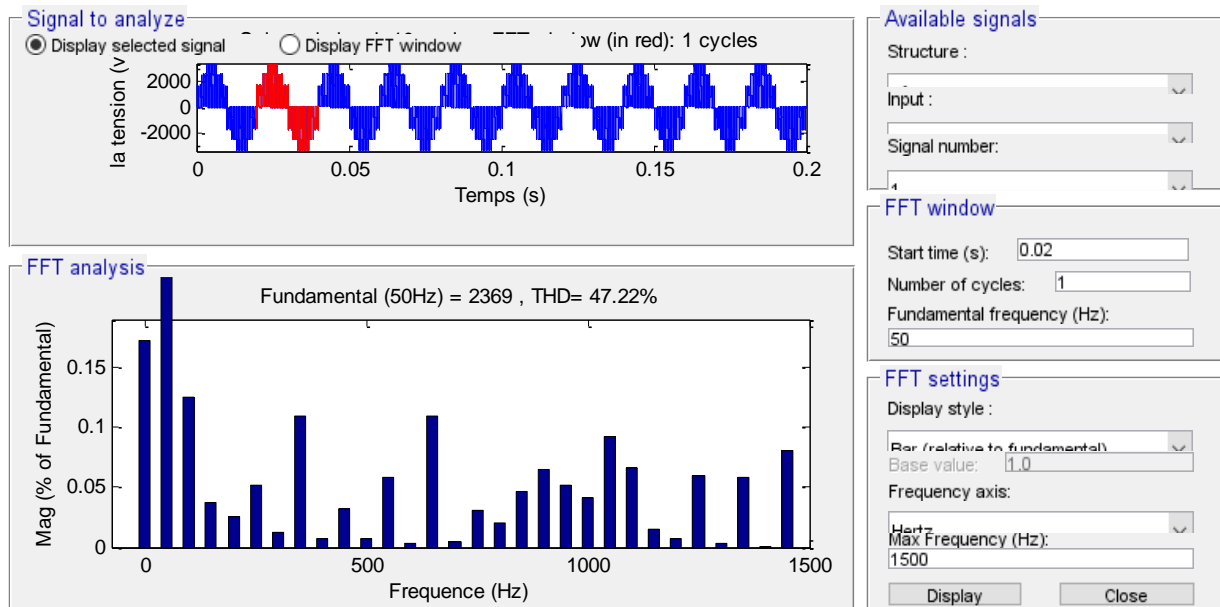


Figure III 9. Analyse spectrale de la tension à la sortie de l'onduleur

La figure III.9 montre l'analyse spectrale d'harmonique de tension nous avons obtenu un THD=47.22% on remarque que le taux d'harmonique est élevé

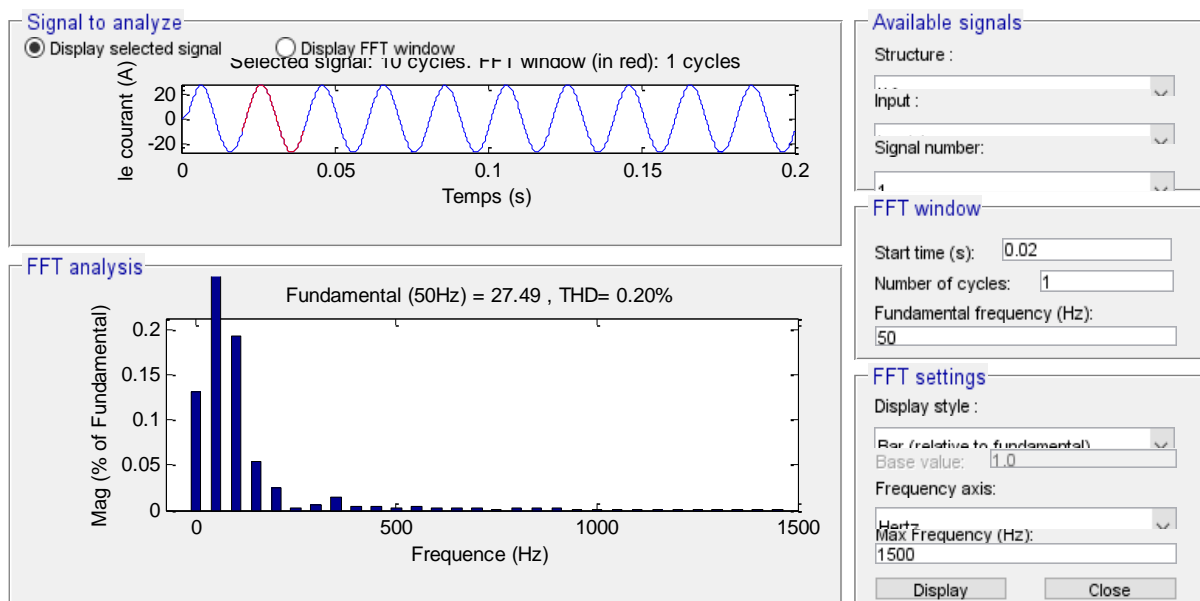


Figure III 10. Analyse spectrale du courant à la sortie de l'onduleur

La figure III.10 monte l'analyse spectrale d'harmonique du courant on relevé la valeur du THD=0.20% on remarque que le taux d'harmonique faible

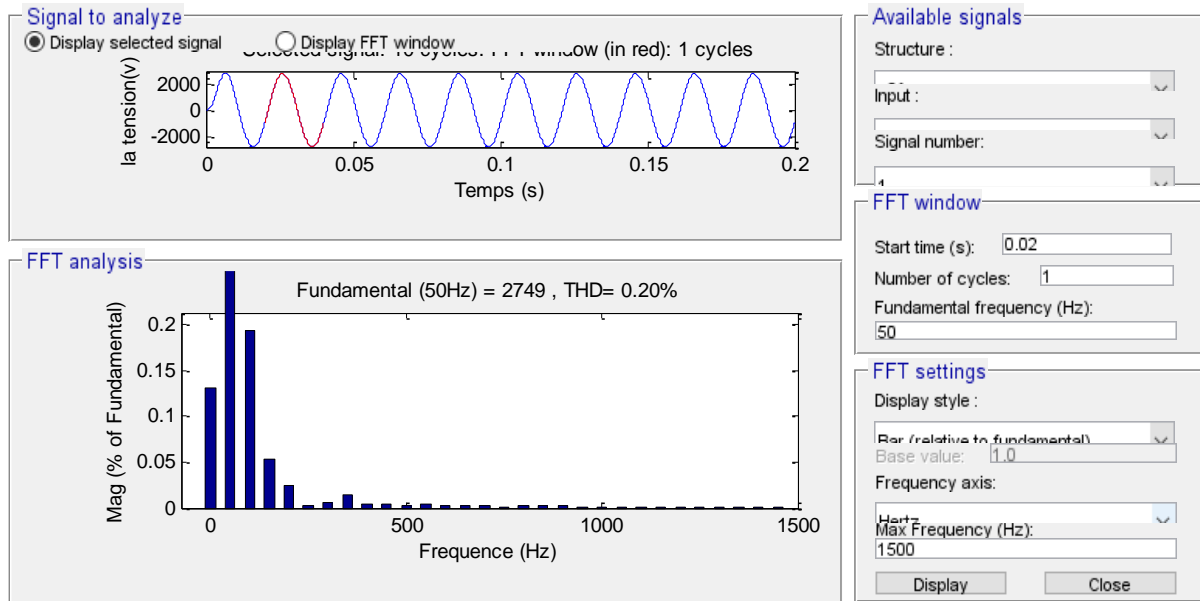


Figure III 11 .Analyse spectrale de la tension après filtrage

La figure III.2 représente l'analyse spectrale d'harmonique de tension filtrée on a relevé un THD=0.20 on remarque que le taux d'harmonique est faible

### III.2.1.3 Structure ANPC

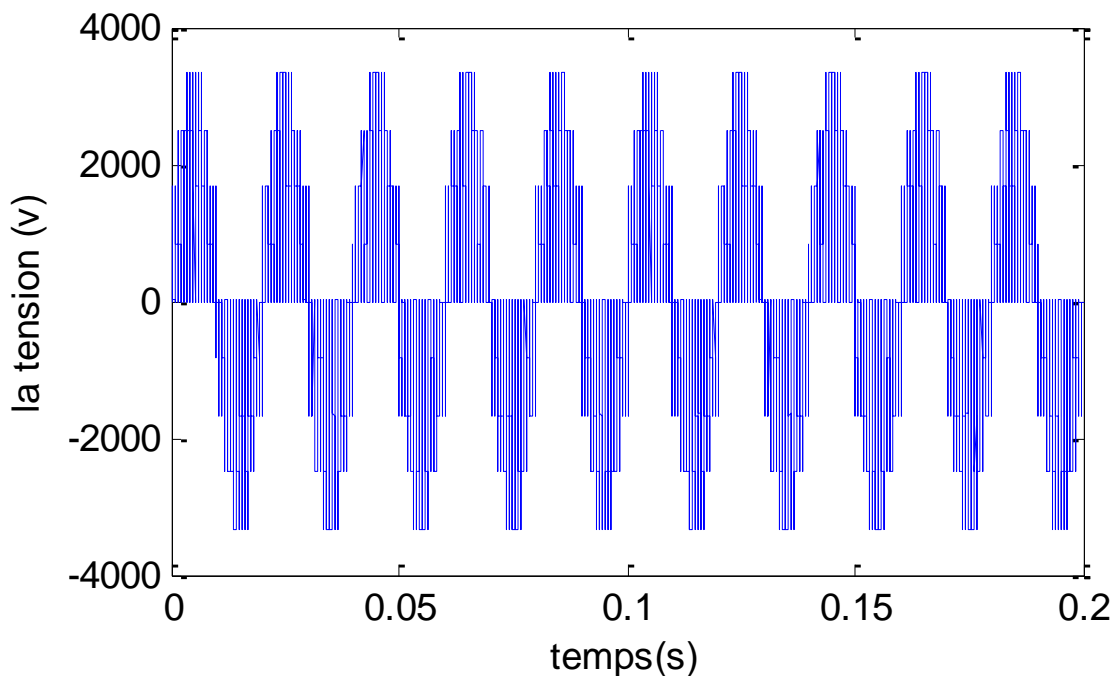


Figure III 12. Allure de tension à la sortie de l'onduleur

La figure III.12 montre l'allure de tension entre deux phases sous forme d'une triangulo sinusoïdale d'une valeur maximale de 3341.5 v

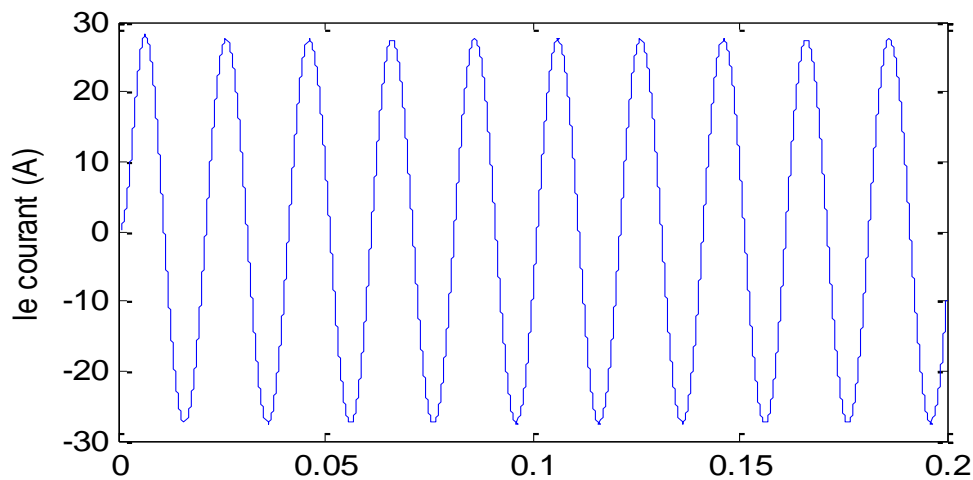


Figure III 13 .Allure du courant à la sortie de l'onduleur

La figure III.14 représente l'allure du courant de charge sous forme sinusoïdale d'une valeur de 28.16 A

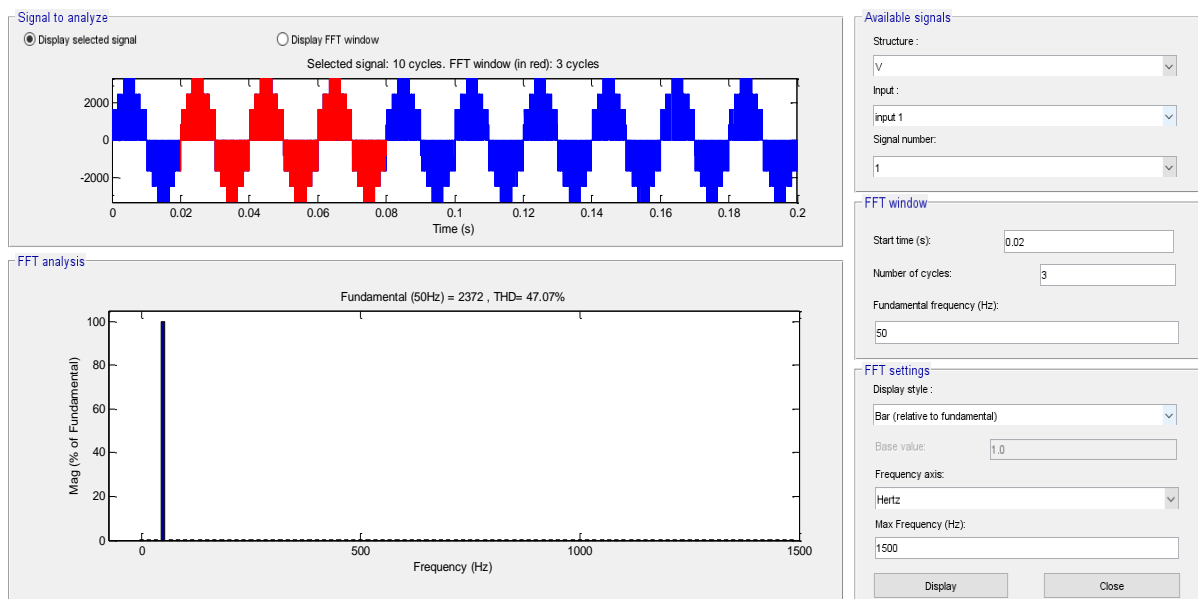


Figure III 14 .Analyse spectrale de la tension à la sortie de l'onduleur

La figure III.14 montre l'analyse spectrale d'harmonique de tension, nous avons obtenu un THD=47.07% on remarque que le taux d'harmonique est élevé

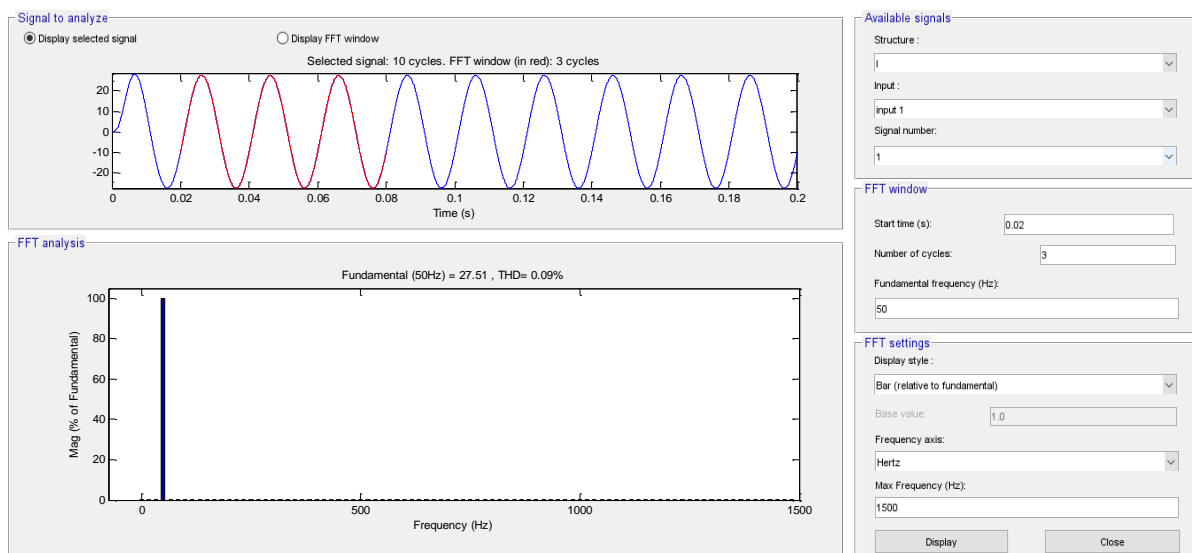


Figure III 15 .Analyse spectrale du courant à la sortie de l'onduleur

La figure III.16 représente l'analyse spectrale d'harmonique de courant on a relevé un THD=0.09% on remarque que le taux d'harmonique est très faible

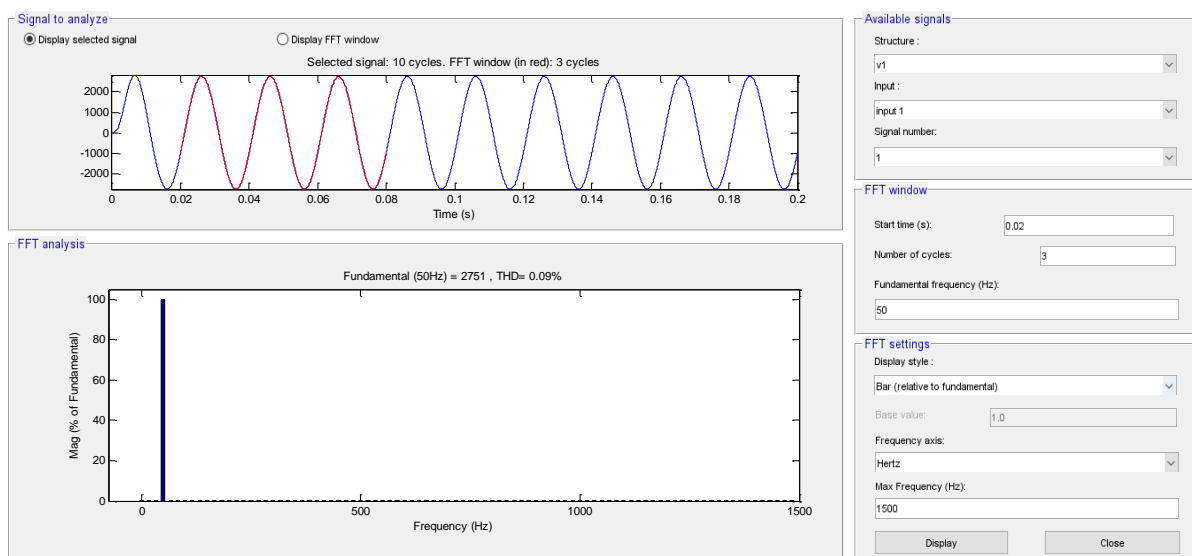


Figure III 16. Analyse spectrale de la tension après filtrage

La figure III.17 représente l'analyse spectrale d'harmonique de tension filtrée nous avons obtenu un THD=0.09% on remarque que le taux d'harmonique très faible

## III.2.1.4 Structure NPP

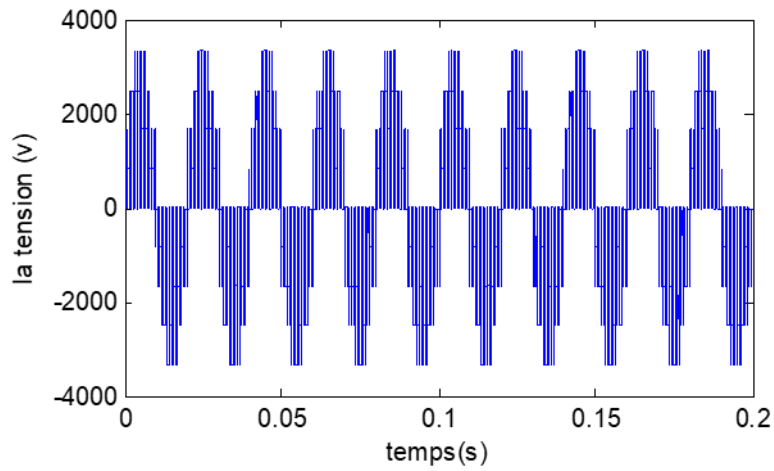


Figure III 17. Allure de la tension à la sortie de l'onduleur

La figure III.17 montre l'allure de tension entre deux phases sous forme d'une triangulo-sinusoïdale d'une valeur maximale égale a 3342 v

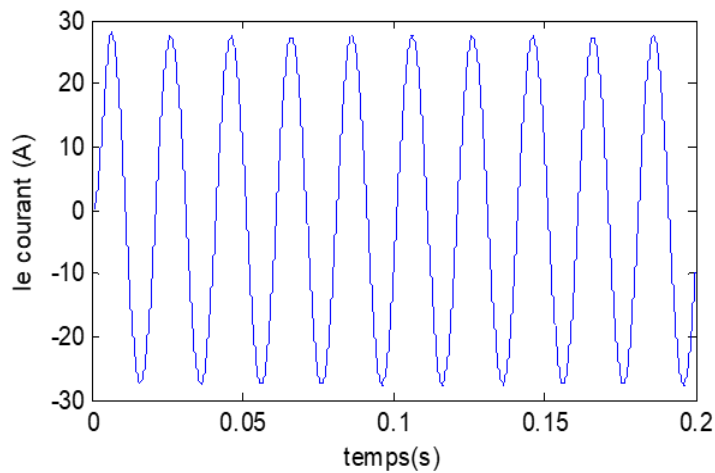


Figure III 18. . Allure du courant à la sortie de l'onduleur

La figure III.18 montre l'allure de courant aux bornes de la charge sous forme d'une sinusoïde d'une valeur de 28.17 A

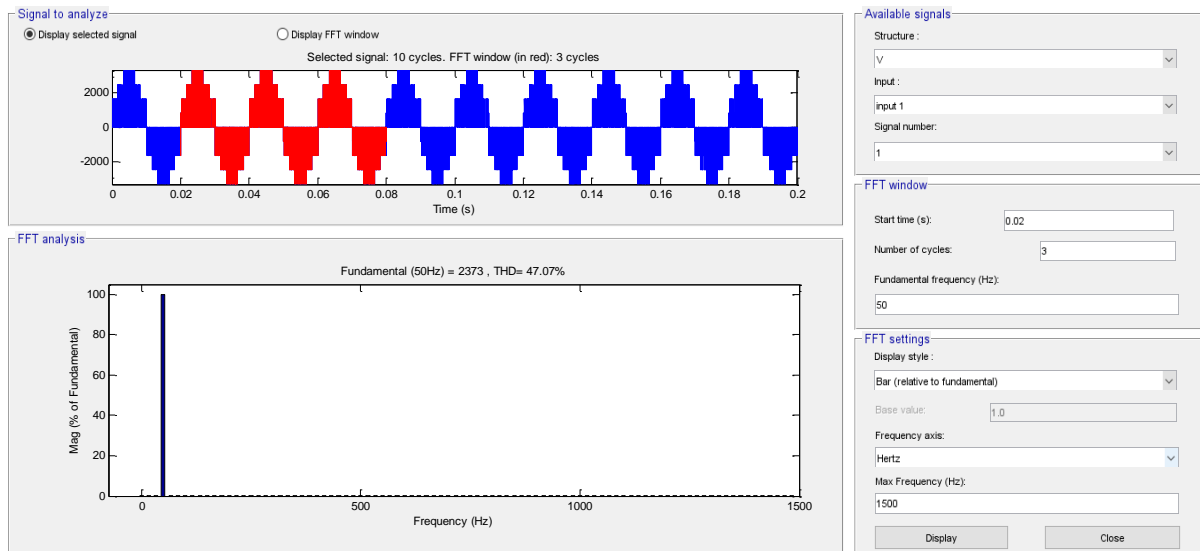


Figure III 19. Analyse spectrale de la tension à la sortie de l'onduleur

La figure III.19 montre l'analyse spectrale d'harmonique de tension on a relevé un THD =47.07% on remarque que le taux d'harmonique est élevé

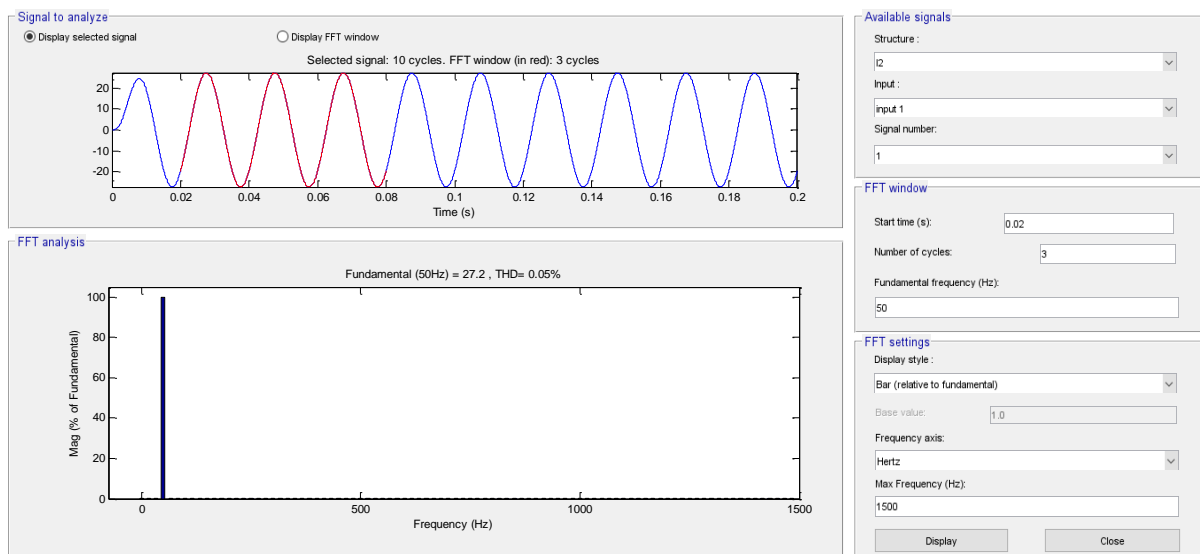


Figure III 20. Analyse spectrale du courant à la sortie de l'onduleur

La figure III.20 représente l'analyse spectrale d'harmonique du courant nous avons obtenu un THD=0.08% on remarque que le taux d'harmonique est très faible

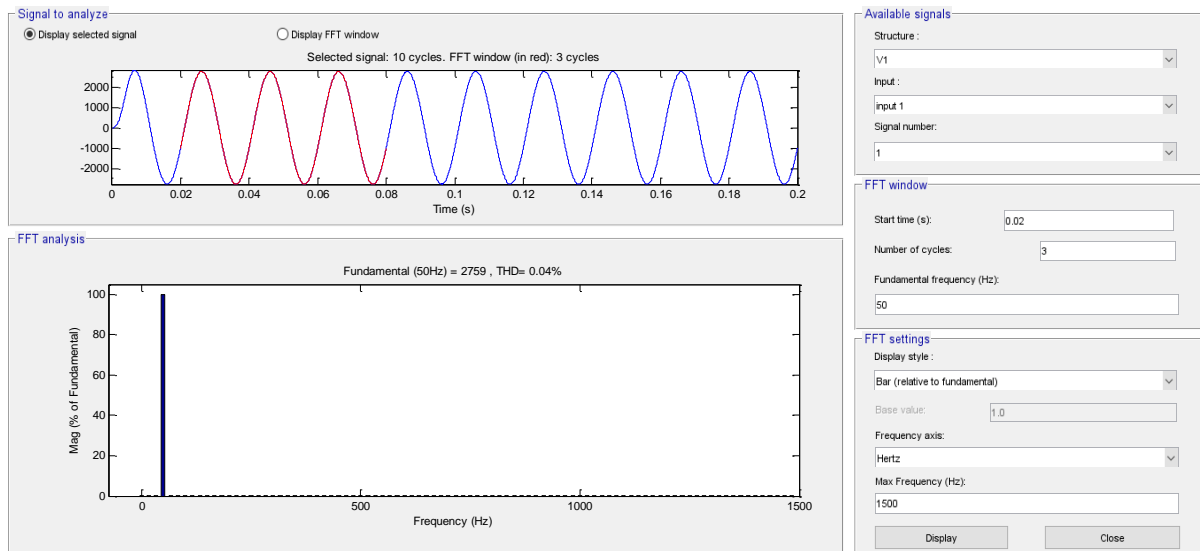


Figure III 21. Analyse spectrale de la tension après filtrage

La figure III.21 représente l'analyse spectrale d'harmonique de tension filtrée on obtient un THD=0.08% on remarque que le taux d'harmonique est très faible

### III.2.1.5 Structure H-Bridge

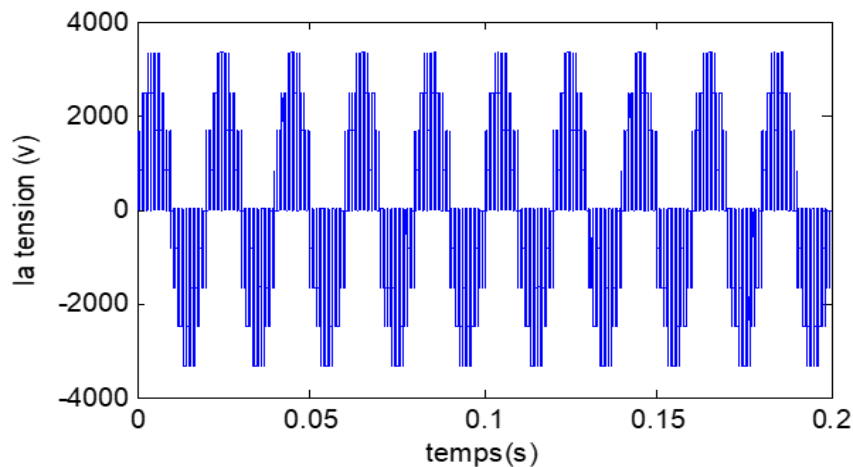


Figure III 22. Allure de la tension à la sortie de l'onduleur

La figure III.22 montre l'allure de tension entre deux phases sous forme d'une triangulo-sinusoidale d'une valeur de 3341.15 v



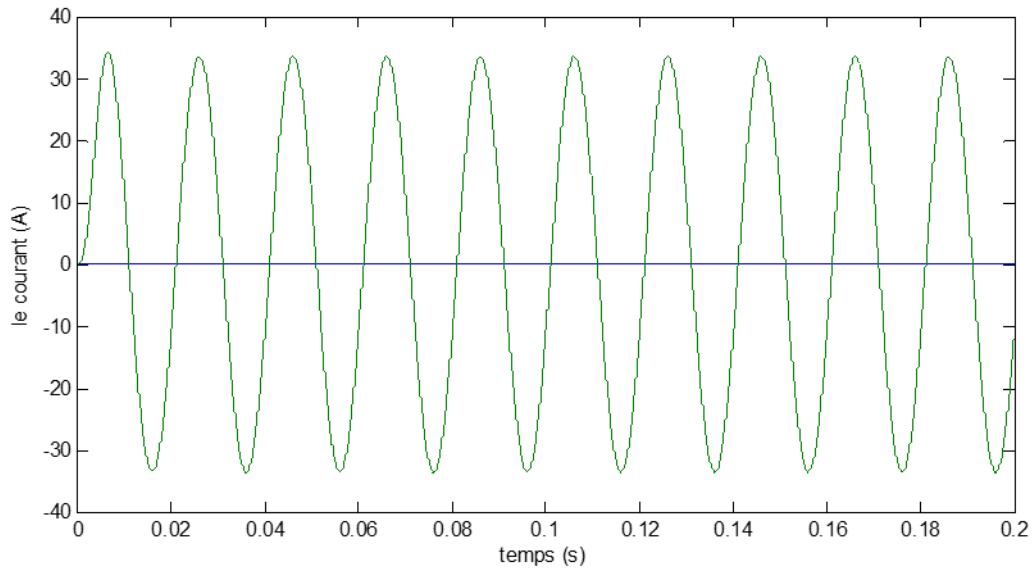


Figure III 23. Allure du courant à la sortie de l'onduleur

La figure III.23 montre l'allure de courant aux bornes de la charge sous forme d'une sinusoïde d'une valeur égale à 28.23 A

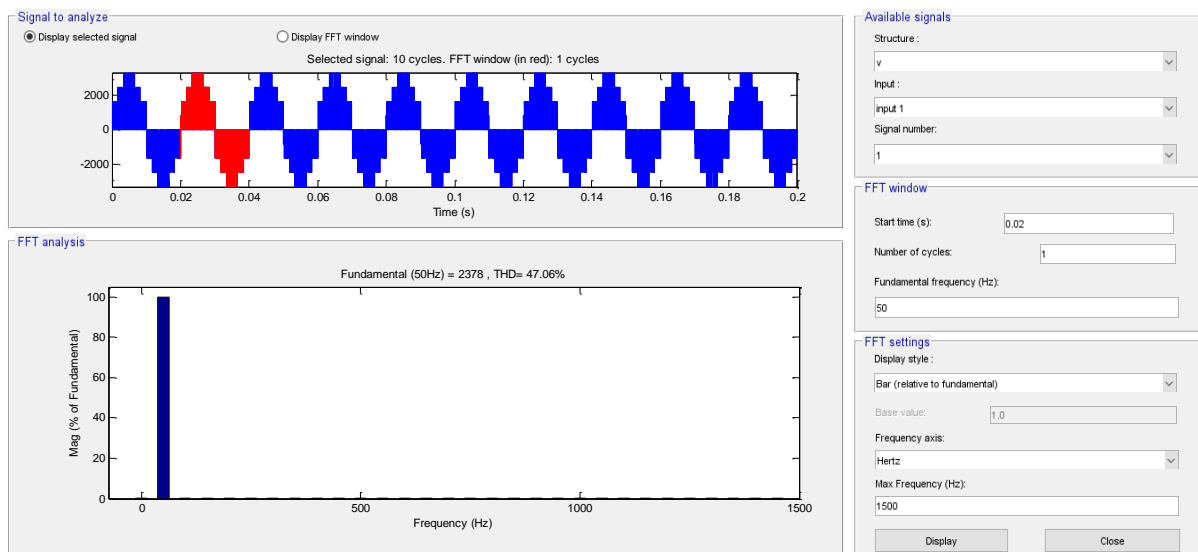


Figure III 24. Analyse spectrale de la tension à la sortie de l'onduleur

La figure III.24 représente l'analyse spectrale de tension on a relevé un THD=47.07% on remarque que le taux d'harmonique est élevé

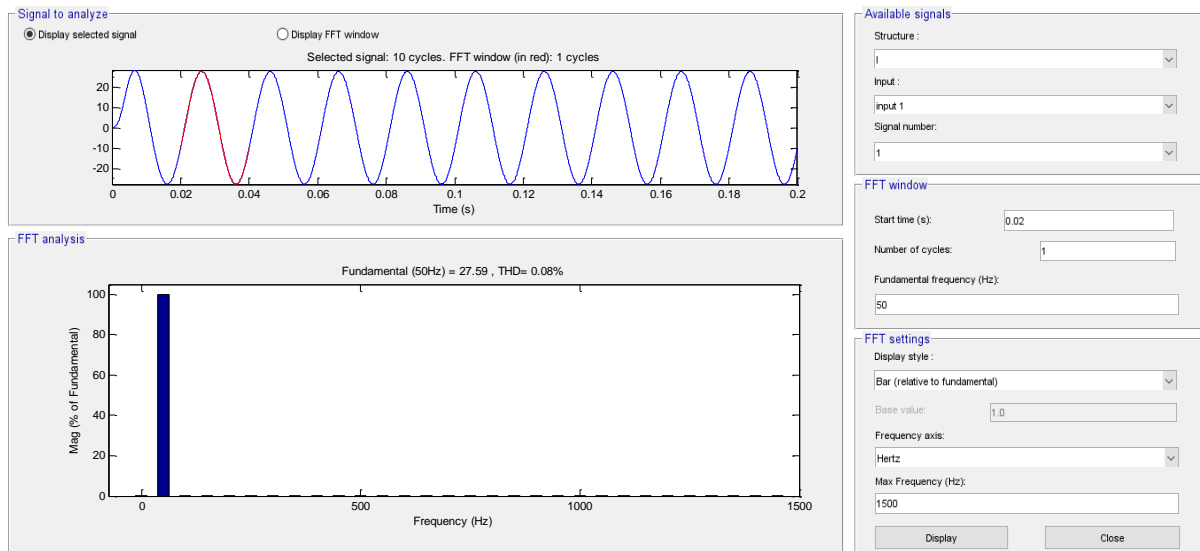


Figure III 25. Analyse spectrale du courant à la sortie de l'onduleur

La figure III.25 montre l'analyse spectrale d'harmonique du courant et on obtient un THD=0.08 % on remarque que le taux d'harmonique est très faible

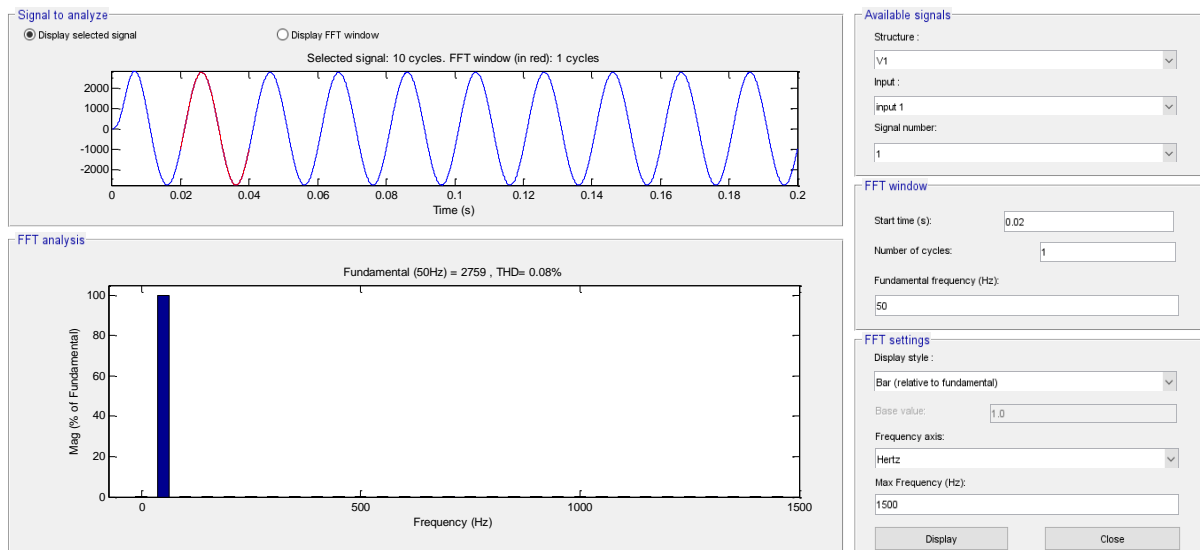


Figure III 26. Analyse spectrale de la tension après filtrage

La figure III.26 représente l'analyse spectrale d'harmonique de tension filtrée et on obtient un THD=0.08% on remarque que le taux d'harmonique est très faible

III.2.1.6 Structure MMC

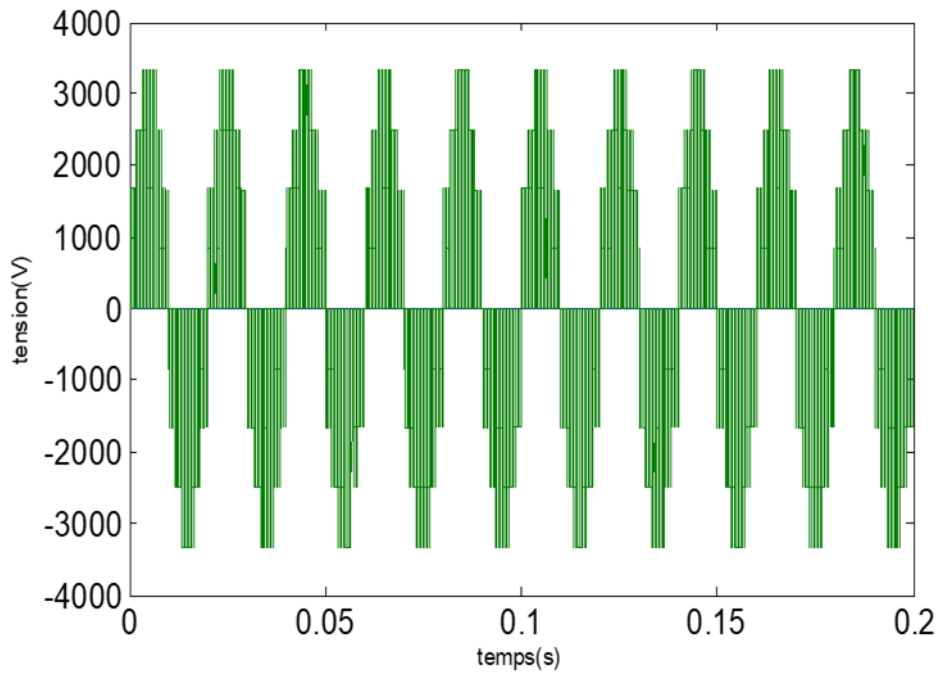


Figure III 27. Allure de la tension à la sortie de l'onduleur

La figure III.27 montre l'allure de tension entre deux phases sous forme d'une triangulo-sinusoidale d'une valeur maximale de 3341.03 v

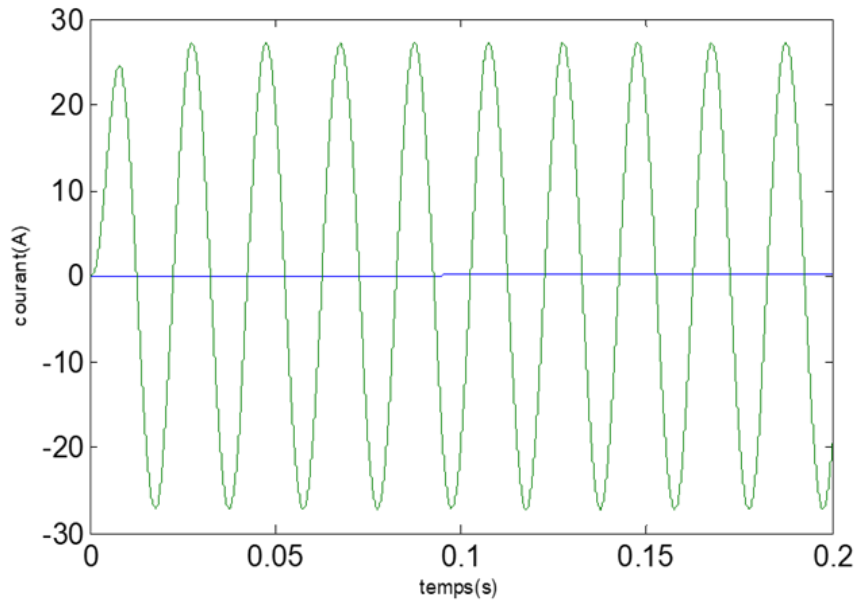


Figure III 28. Allure du courant à la sortie de l'onduleur

La figure III.28 représente l'allure du courant aux bornes de la charge sous forme d'une sinusoïde d'une valeur de 27.27 A

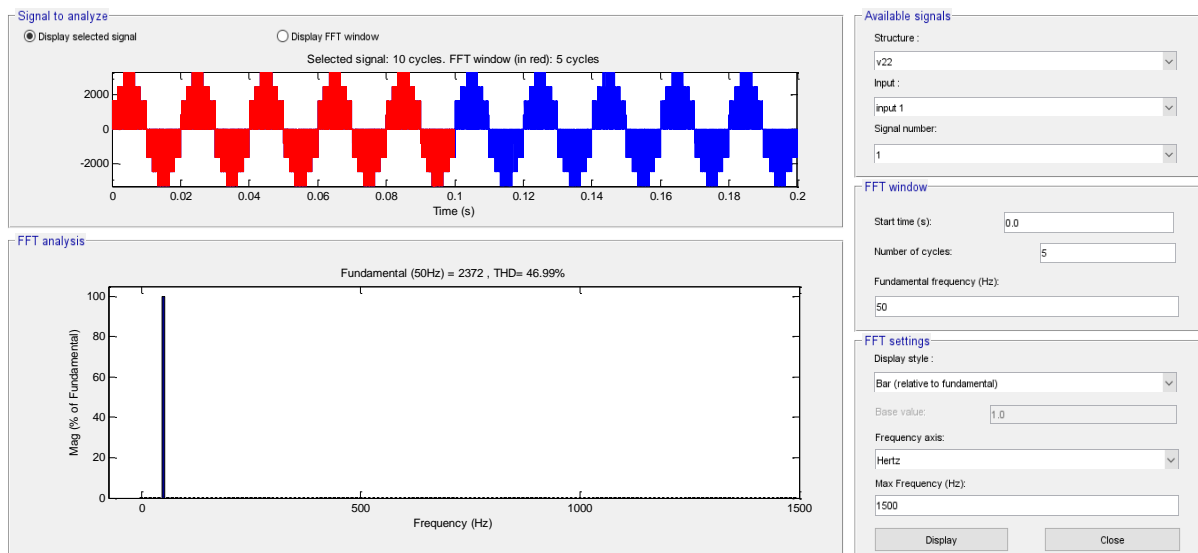


Figure III 29. Analyse spectrale de la tension à la sortie de l'onduleur

La figure III.29 montre l'analyse spectrale d'harmonique de tension et on obtient un THD=46.96%, on remarque que le taux d'harmonique est élevé

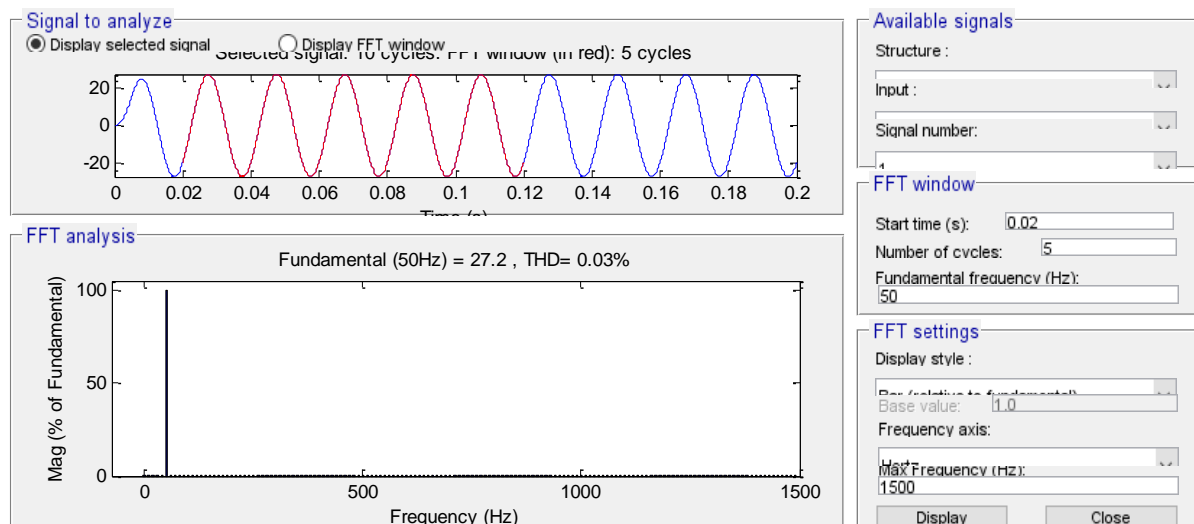


Figure III 30. Analyse spectrale du courant à la sortie de l'onduleur

La figure III.30 montre l'analyse spectrale d'harmonique du courant on a relevé un THD=0.03% on remarque que le taux est très faible

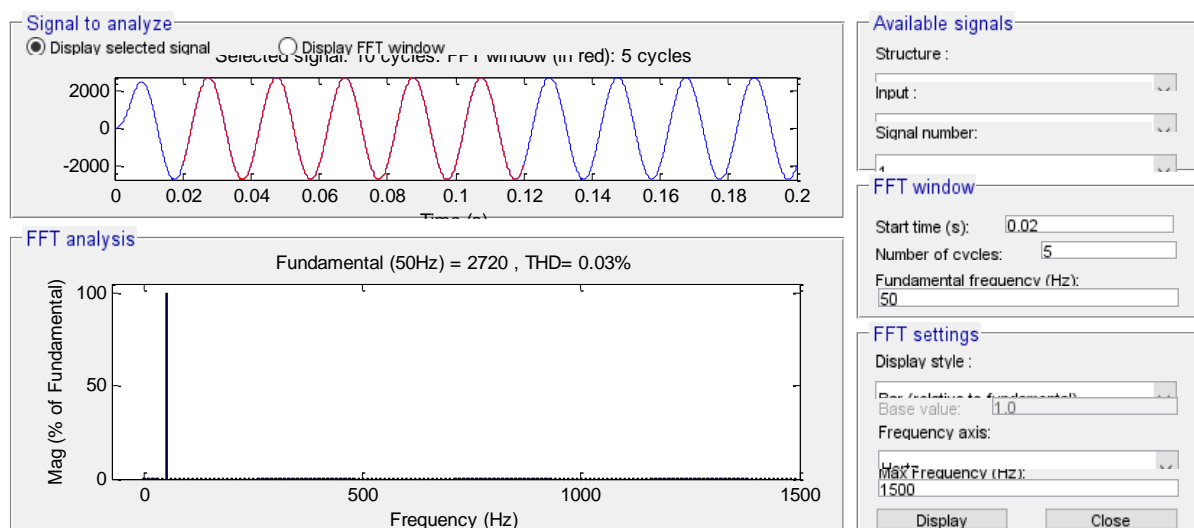


Figure III 31. Analyse spectrale de la tension après filtrage

La figure III.31 représente l'analyse spectrale d'harmonique de tension filtrée on obtient un THD=0.03% et on remarque que le taux d'harmonique est très faible

# TECHNIQUES DE COMMANDE DES CONVERTISSEURS MULTINIVEAUX

Tableau III.1. Tableau récapitulatif des résultats de simulation

<b>Une seule porteuse</b>									
	<b>Tension (v)</b>	<b>Courant(A)</b>	<b>Tension Filtrée (v)</b>	<b>THD de tension (%)</b>	<b>Fondamental De tension</b>	<b>THD de courant (%)</b>	<b>Fondamental De courant</b>	<b>THD de tension Filtrée (%)</b>	<b>Fondamental de tension filtrée</b>
<b>NPC</b>	3341.5	27.72	2816.19	47.07	2372	0.18	27.52	0.13	2751
<b>FC</b>	3341.5	28.15	2815.87	47.22	2369	0.20	27.49	0.20	2749
<b>ANPC</b>	3341.5	28.16	2816.27	47.07	2372	0.09	27.51	0.09	2751
<b>H- Bridge</b>	3341.15	28.23	2823.23	47.06	2378	0.08	27.59	0.08	2579
<b>NPP</b>	3342	28.17	2817.34	47.07	2373	0.07	27.2	0.04	2759
<b>MMC</b>	3341.03	27.28	2728.2	46.98	2372	0.03	27.2	0.03	2720

## III.2.2 MLI sinusoïdale- triangulaire à deux porteuses

Le signal de référence et les signaux de porteuse pour une phase d'un convertisseur à trois niveaux sont représentés sur la Figure III.32.

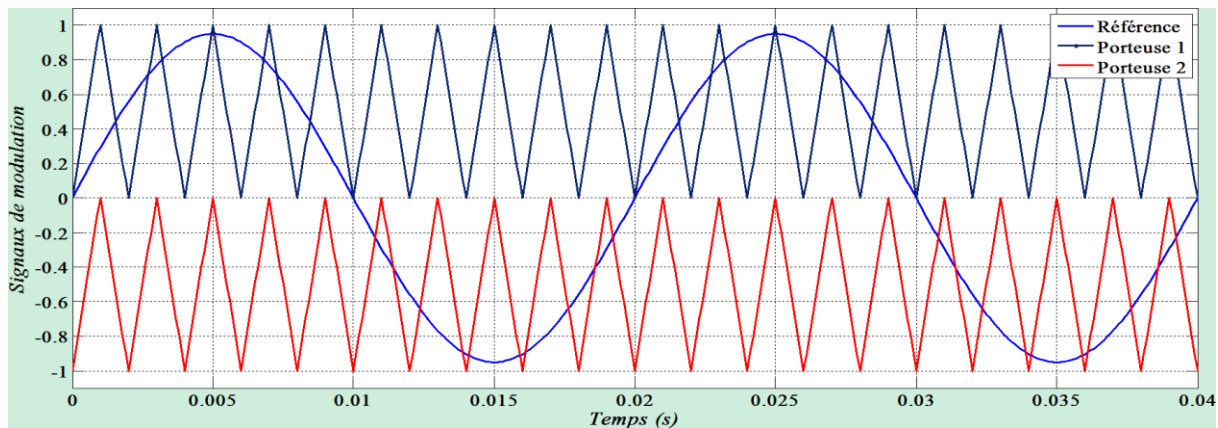


Figure III 32. Le signal de référence et les signaux de porteuse pour un convertisseur à trois niveaux

L'algorithme de cette stratégie de commande pour une phase  $k$  est donné par :

$$\begin{cases} Si (V_{rk} \geq V_{p1} \text{ et } V_{rk} \geq V_{p2}) \Rightarrow V_k = \frac{U_{dc}}{2} \\ Si (V_{rk} < V_{p1} \text{ et } V_{rk} \geq V_{p2}) \Rightarrow V_k = 0 \\ Si (V_{rk} < V_{p1} \text{ et } V_{rk} < V_{p2}) \Rightarrow V_k = -\frac{U_{dc}}{2} \end{cases}$$

### III .2.2.1 Structure NPC

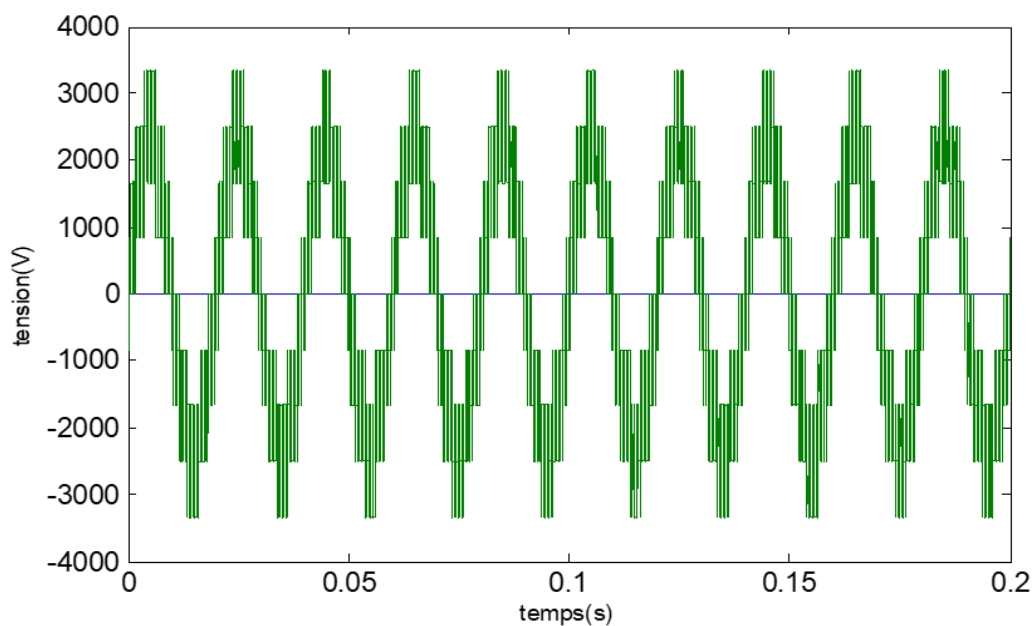


Figure III 33. Allure de la tension à la sortie de l'onduleur

La figure III.33 montre l'allure de tension entre deux phases sous forme d'une triangulo sinusoïdale d'une valeur maximale de 3341.32V

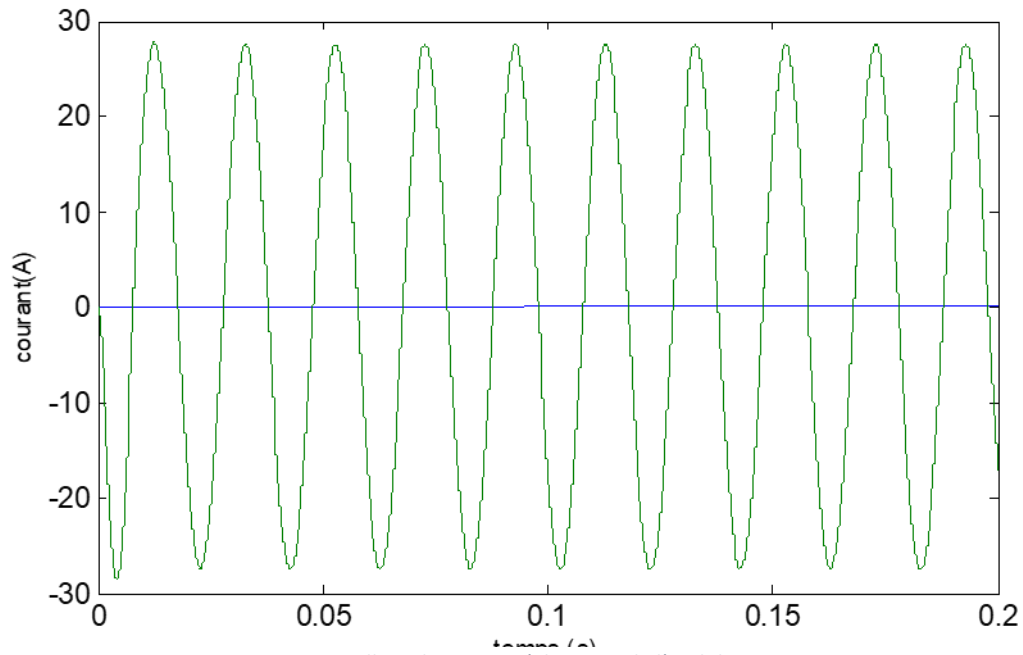


Figure III 34. Allure du courant à la sortie de l'onduleur

La figure III.34 représente l'allure de courant aux bornes de la charge sous forme d'une sinusoïdale d'une valeur 27.74A

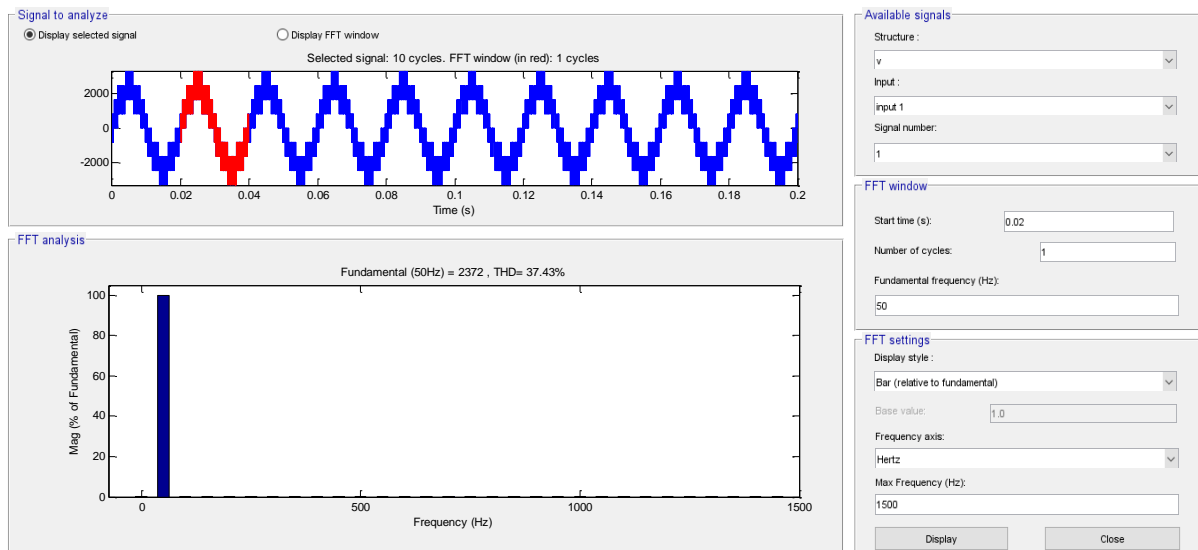


Figure III 35. Analyse spectrale de la tension à la sortie de l'onduleur



La figure III.35 montre l'analyse spectrale d'harmonique de tension nous avons obtenus un THD=37.43%, en remarque que le taux d'harmonique est très élevés.

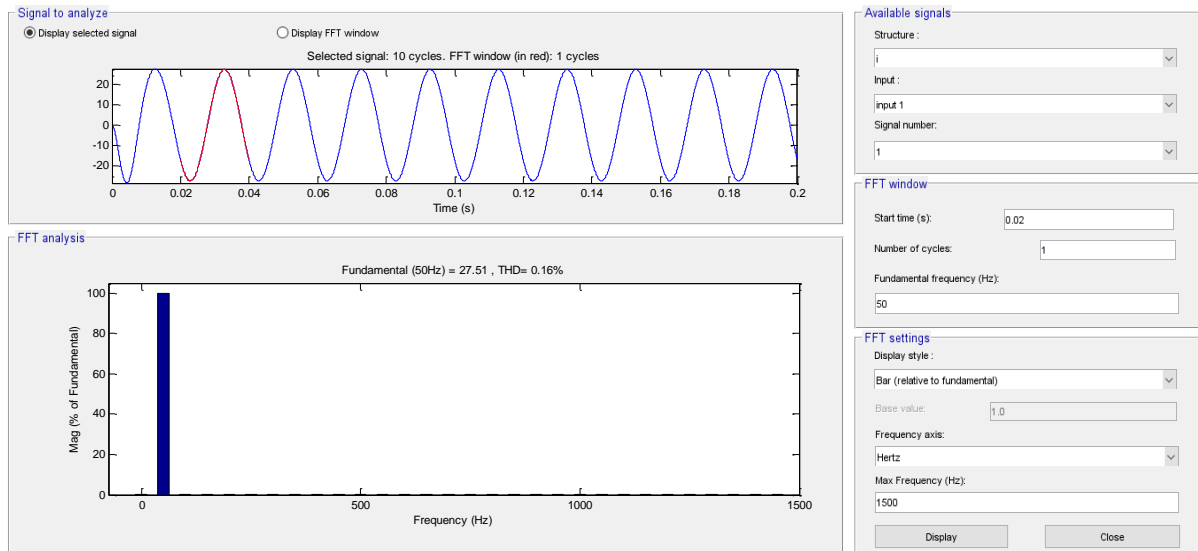


Figure III 36. Analyse spectrale du courant à la sortie de l'onduleur

La figure III.36. Représente l'analyse harmonique de courant, nous avons obtenu un THD=0.16% on remarque que le taux est très faible.

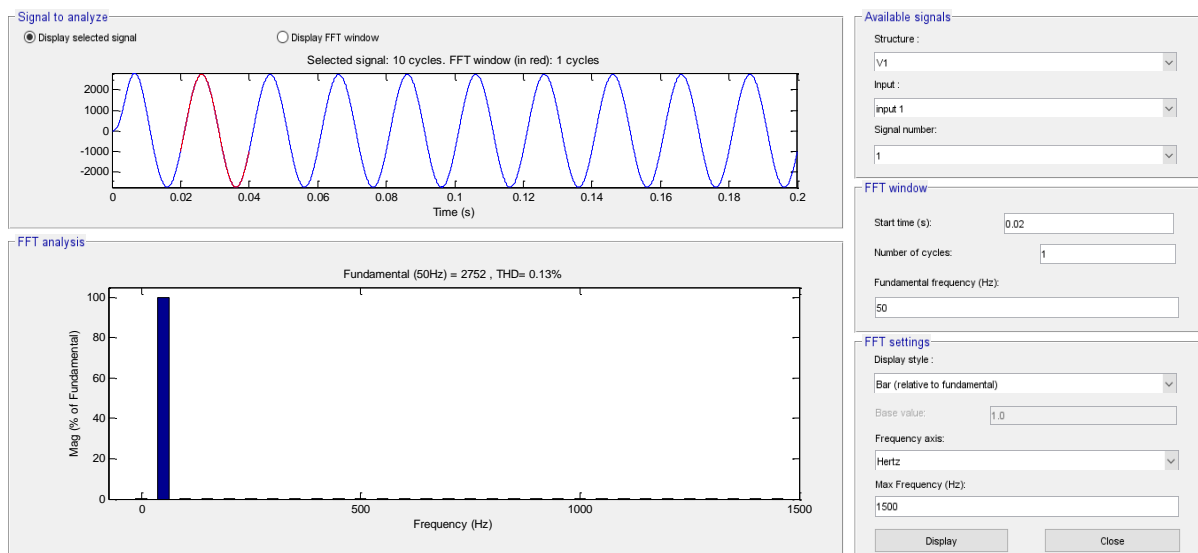


Figure III 37. Analyse spectrale de la tension après filtrage

La figure III.37. Montre l'analyse spectrale d'harmonique de tension filtrée on obtient un THD=0.13% et on remarque le taux d'harmonique est très faible.

## III.2.2.2 Structure FC

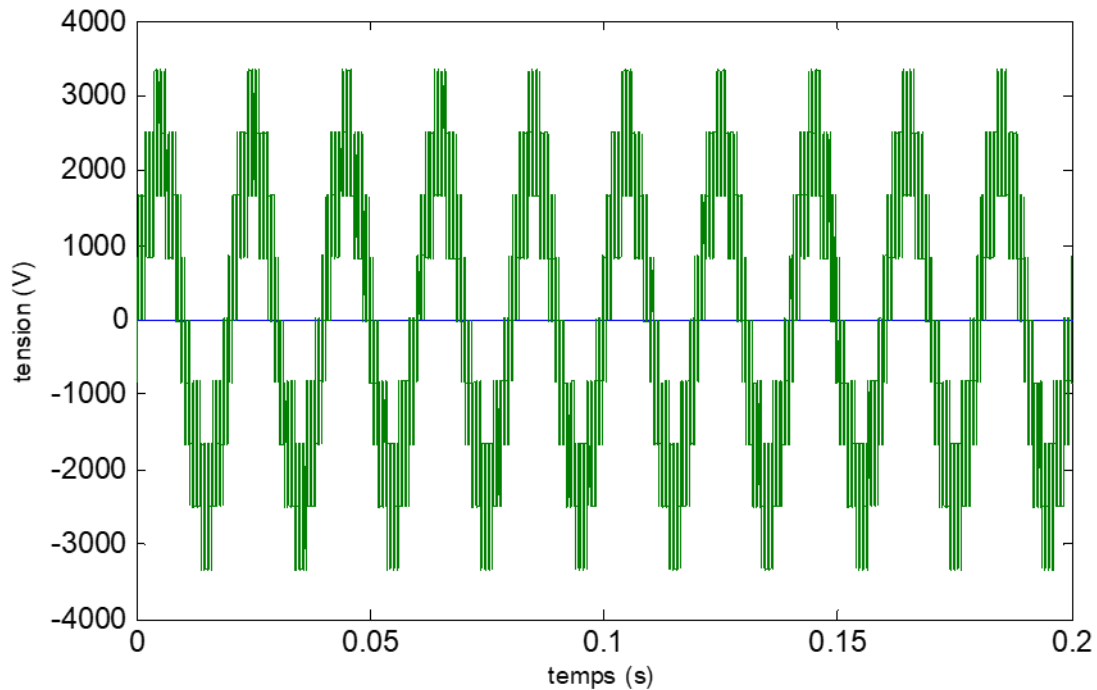


Figure III 38. Allure de la tension à la sortie de l'onduleur

La figure III.38. Représente l'allure de tension entre deux phases sous forme d'une triangulo sinusoïdale d'une valeur maximale 3341.32V

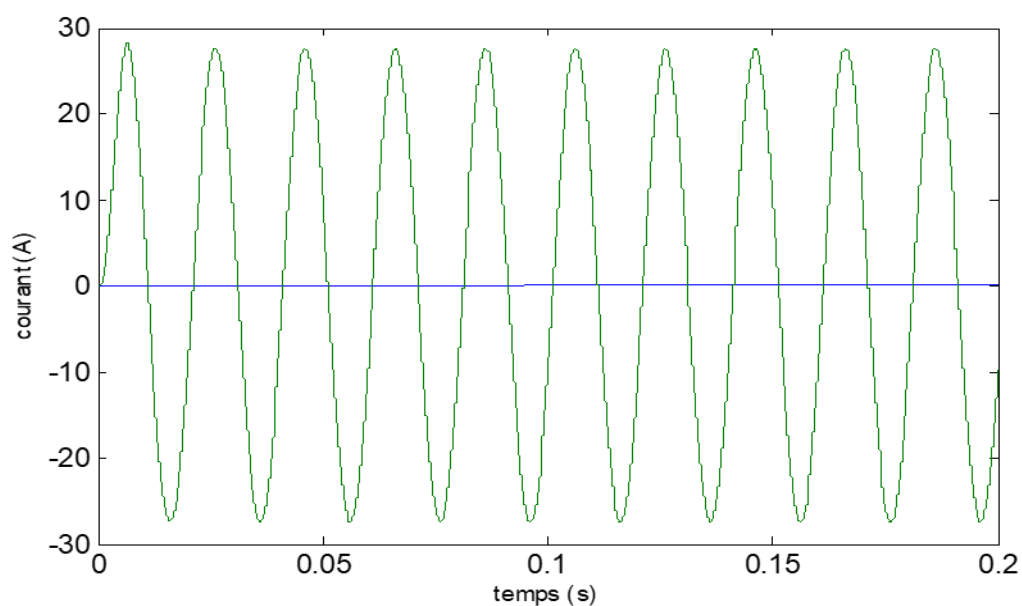


Figure III 39. Allure du courant à la sortie de l'onduleur

La figure III.39. Montre l'allure de courant aux bornes de la charge sous forme d'une sinusoïdale d'une valeur 28.2A.

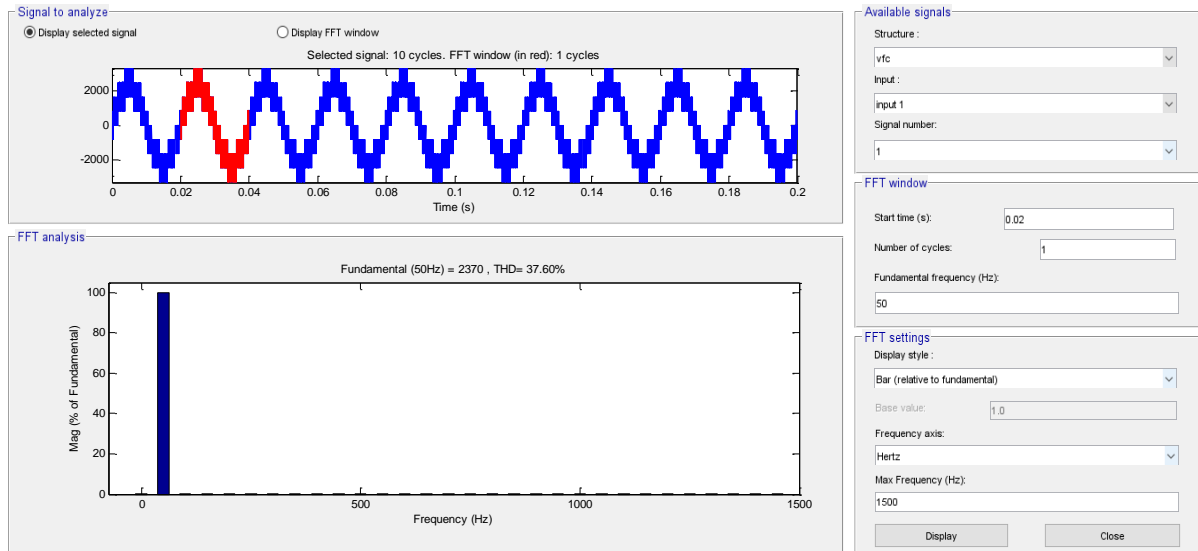


Figure III 40. Analyse spectrale de la tension à la sortie de l'onduleur

La figure III.40. Représente l'analyse spectrale harmonique de tension sous d'une triangulo sinusoïdale on a obtient un THD=37060% on remarque que le taux et très élevés.

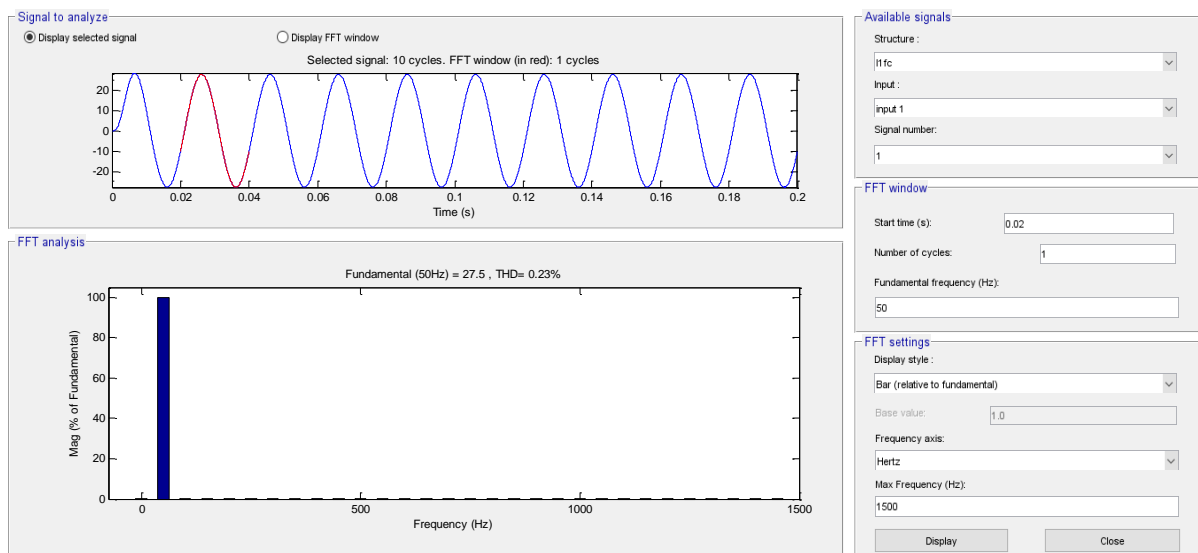


Figure III 41. Analyse spectrale du courant à la sortie de l'onduleur

La figure III.41. Montre l'analyse spectrale harmonique du courant, on a relevé un THD=0.23% on remarque que le taux est faible.

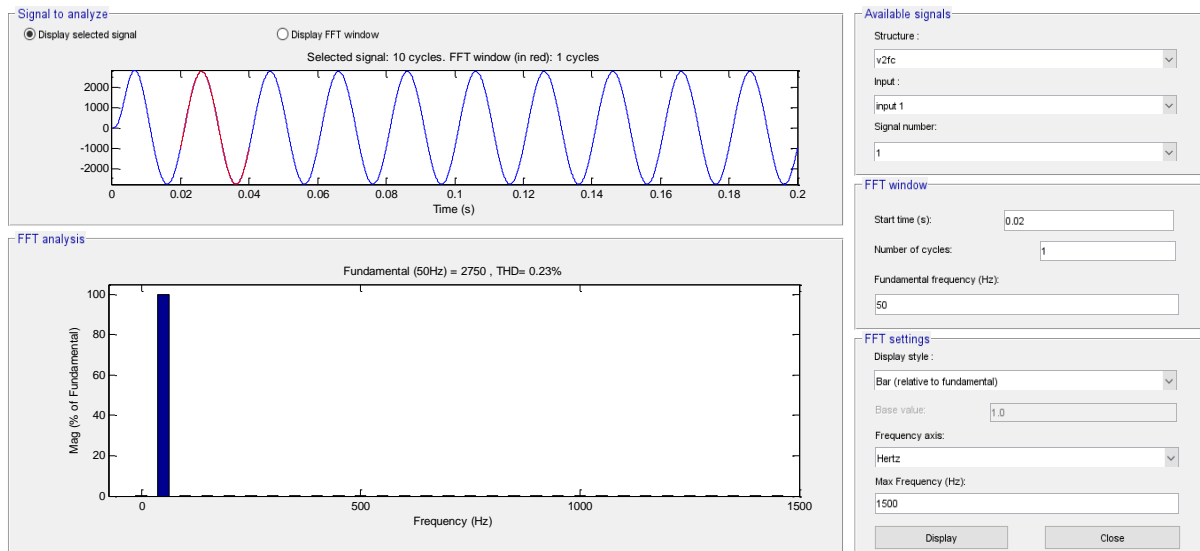


Figure III 42. Analyse spectrale de la tension après filtrage

La figure III.42. Montre l'analyse spectrale harmonique de tension filtrée, on obtient un THD=0.23% et on remarque que le taux d'harmonique est faible.

### III.2.2.3 Structure ANPC

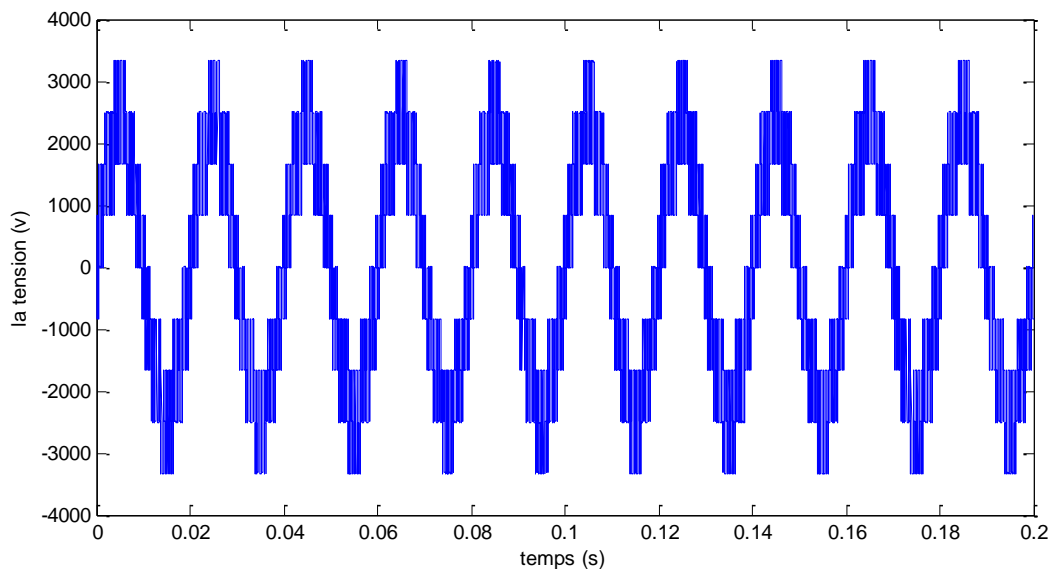


Figure III 43. Allure de la tension à la sortie de l'onduleur

La figure III.43. Représente l'allure de tension entre deux phases sous forme d'une triangulo sinusoïdale d'une valeur maximale 3341.25V

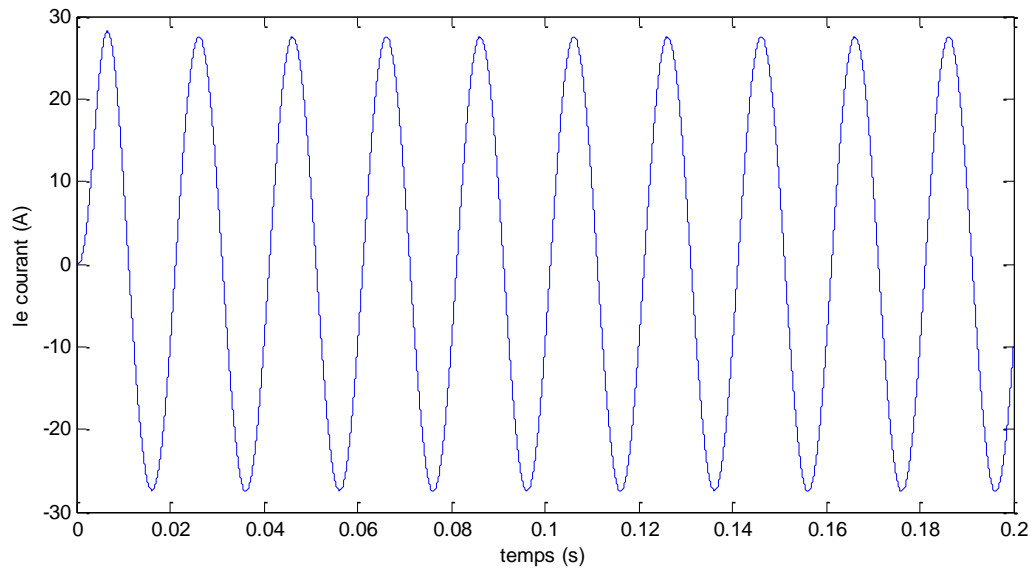


Figure III 44. Allure du courant à la sortie de l'onduleur

La figure III.44. Montre l'allure du courant aux bornes de la charge sous forme d'une sinusoïde d'une valeur 28.16A.

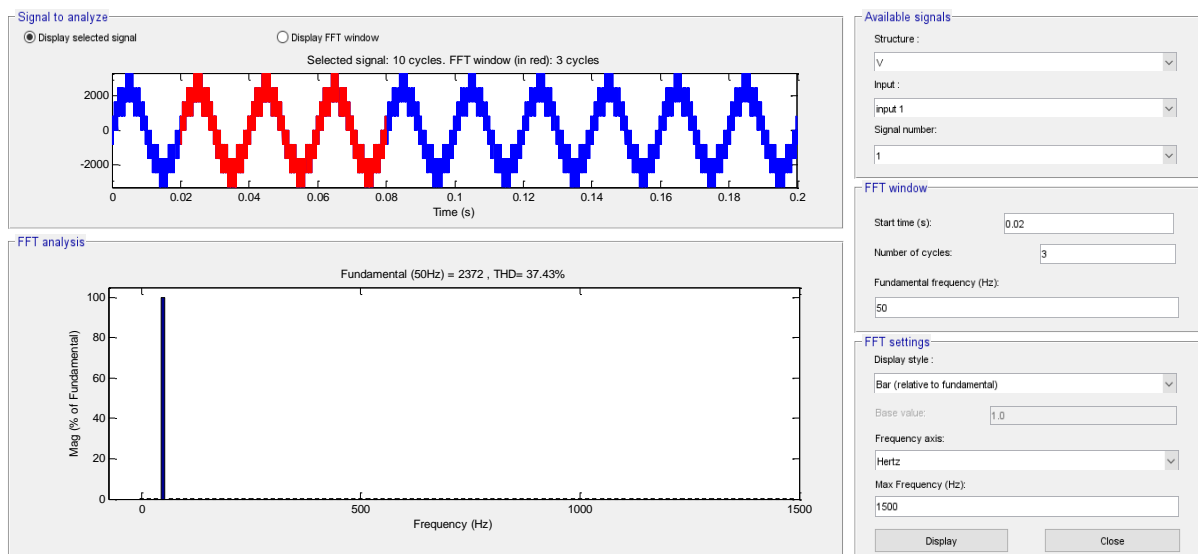


Figure III 45. Analyse spectrale de la tension à la sortie de l'onduleur

La figure III.45. Représente l'analyse spectrale harmonique de tension sous forme d'une triangulo sinusoïdale, on obtient un THD=37.43% on remarque que le taux est très élevés.

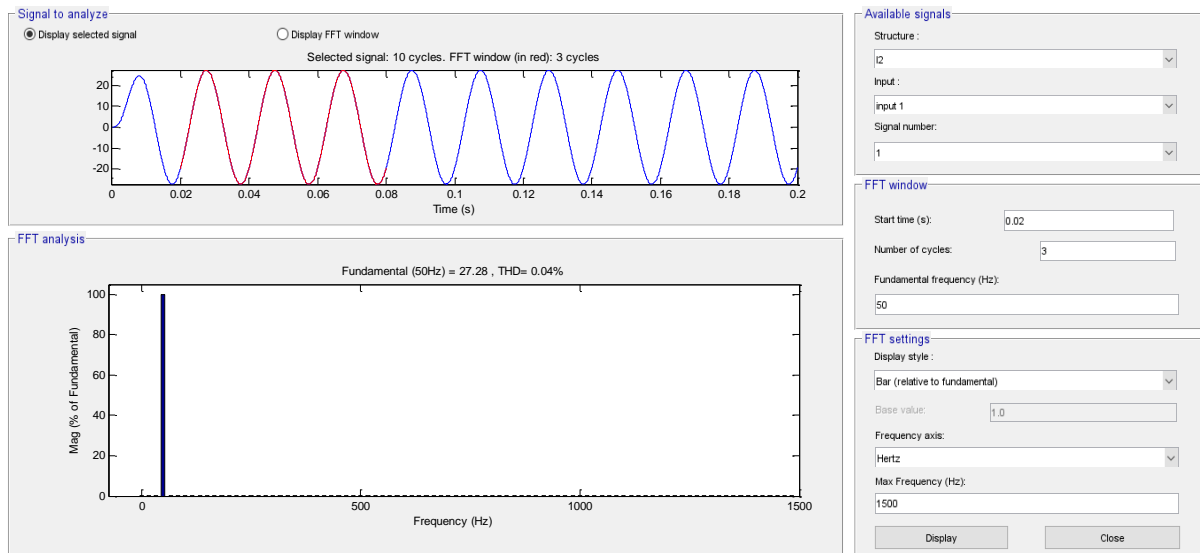


Figure III 46. Analyse spectrale du courant à la sortie de l'onduleur

La figure III.46. Montre l'analyse spectrale harmonique du courant, on a relevé un THD=0.04% et on remarque que le taux est très faible.

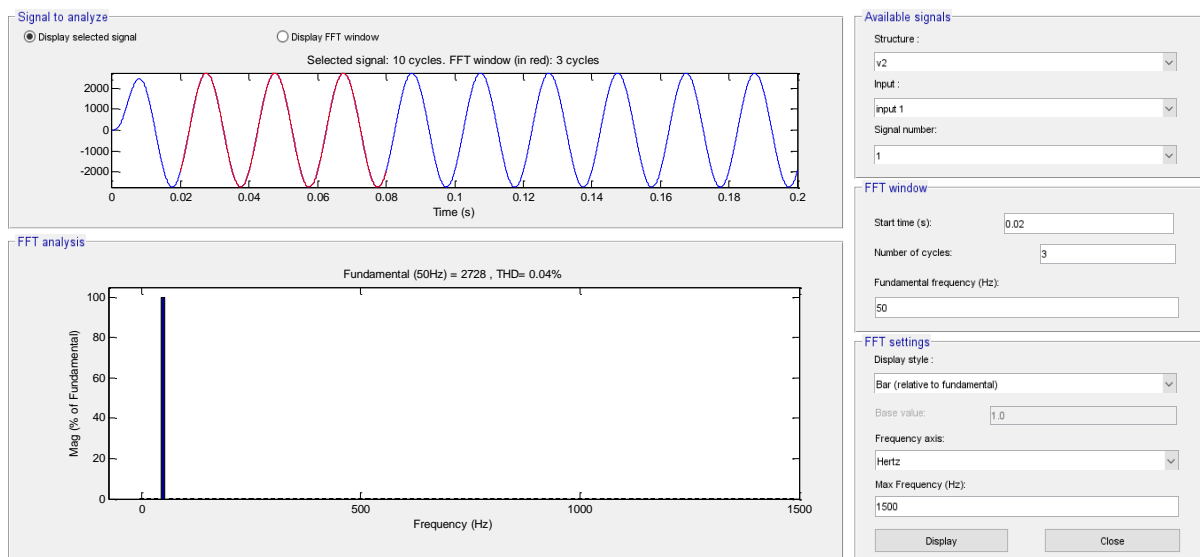


Figure III 47. Analyse spectrale de la tension après filtrage

La figure III.47. Représente l'analyse spectrale harmonique de tension filtrée, on obtient un THD=0.09% on remarque de le taux est très faible.

III.2.2.4 Structure H-Bridge

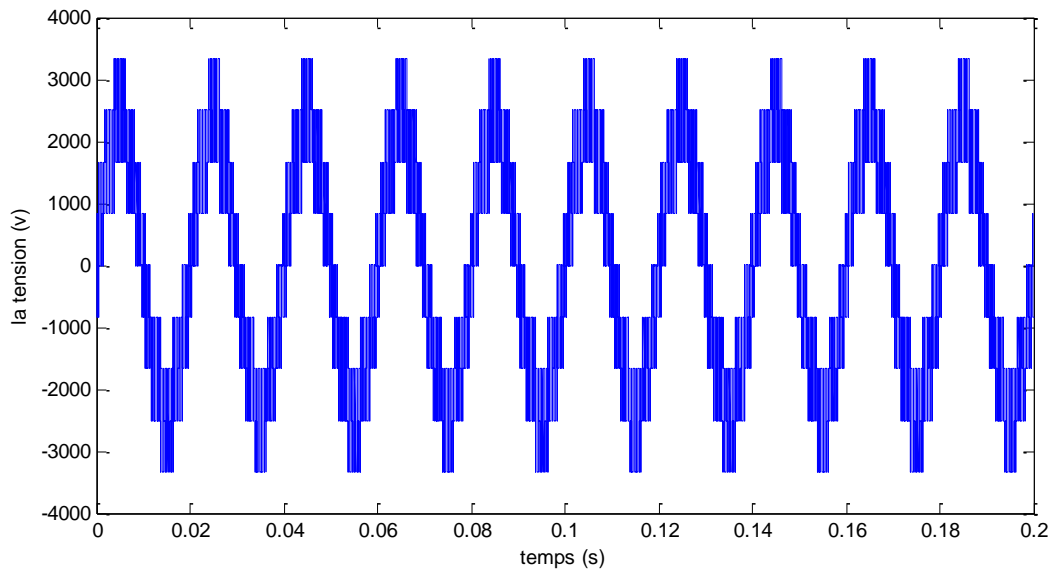


Figure III 48. Allure de la tension à la sortie de l'onduleur

La figure III.48. Montre l'allure de tension entre deux phases sous forme d'une triangulo sinusoïdale d'une valeur maximale 3341.14V.

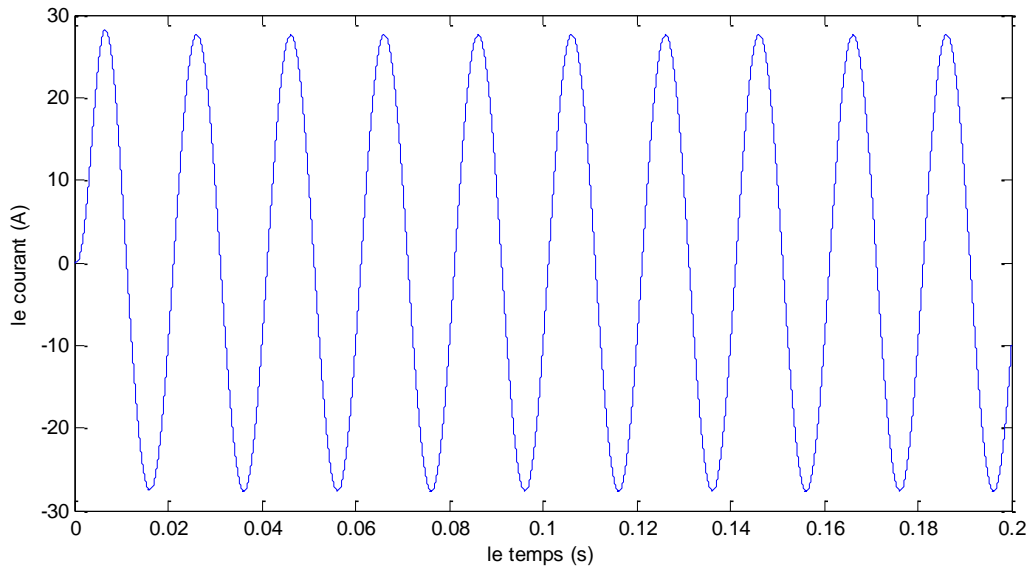


Figure III 49. Allure du courant à la sortie de l'onduleur

La figure III.49. Représente l'allure de courant aux bornes de la charge sous forme d'une sinusoïde et d'une valeur 28.22A.

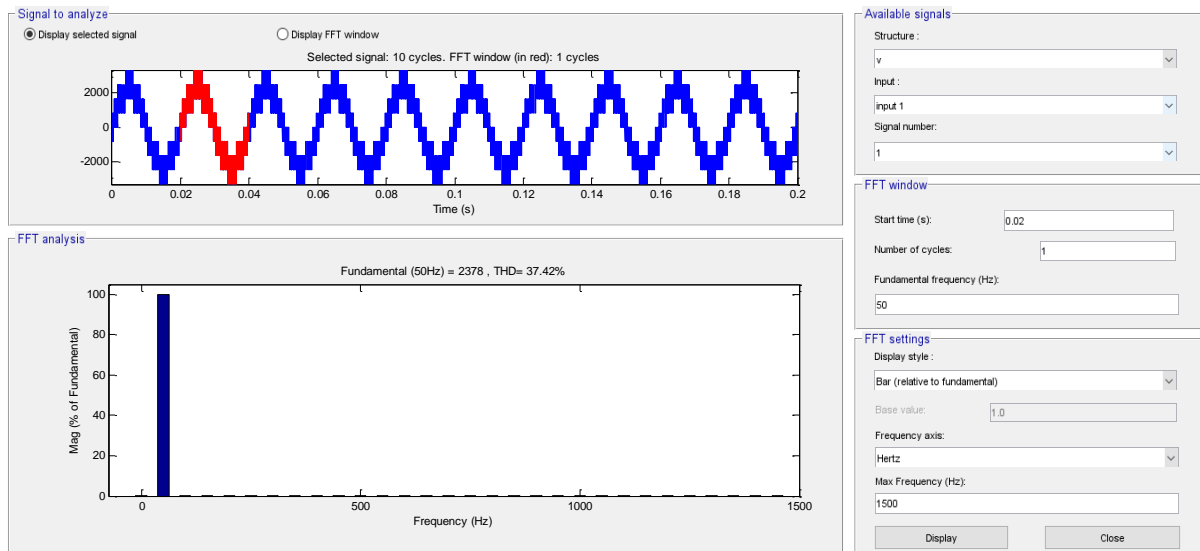


Figure III 50. Analyse spectrale de la tension à la sortie de l'onduleur

La figure III.50. Montre l'analyse spectrale harmonique de tension sous forme d'une triangulo sinusoïdale, on a relevé un THD=37.42%, on remarque que le taux et très élevés.

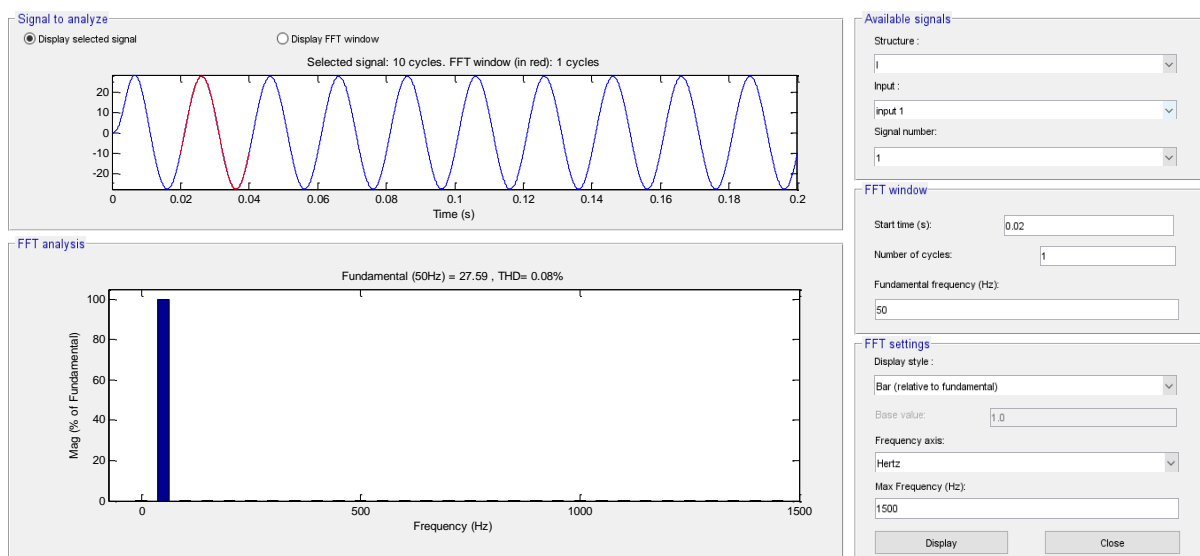


Figure III 51. Analyse spectrale du courant à la sortie de l'onduleur

La figure III.51. Représente l'analyse spectrale harmonique du courant, on obtient un THD=0.08% et on remarque que le taux d'harmonique est très faible.



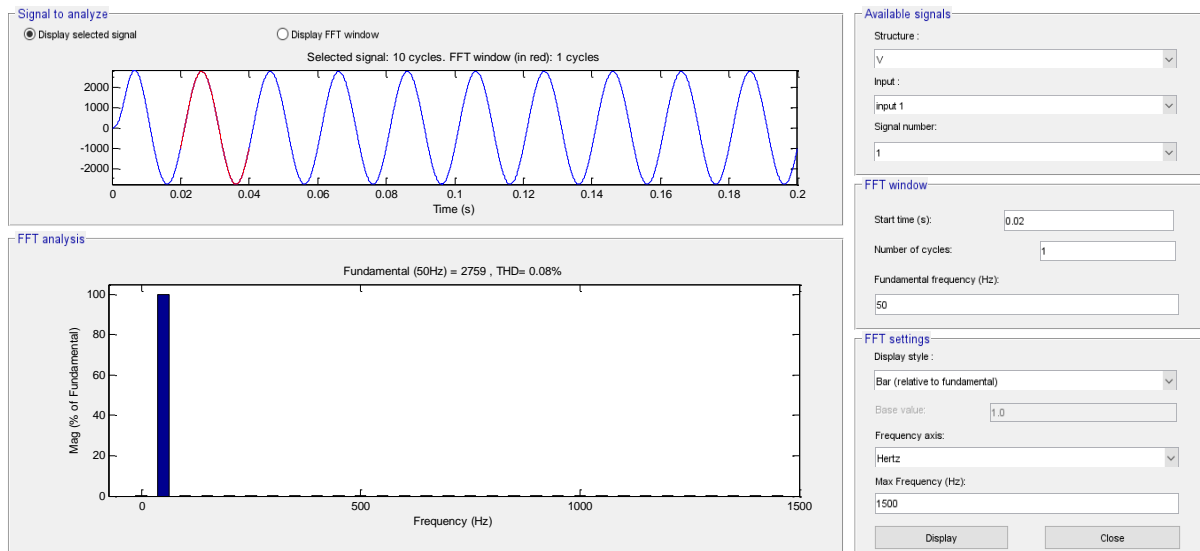


Figure III 52. Analyse spectrale de la tension après filtrage

La figure III.52. Montre l'analyse spectrale harmonique de la tension filtrée, nous avons obtenu un THD=0.08 qui est très faible.

### III.2.2.5 Structure MMC

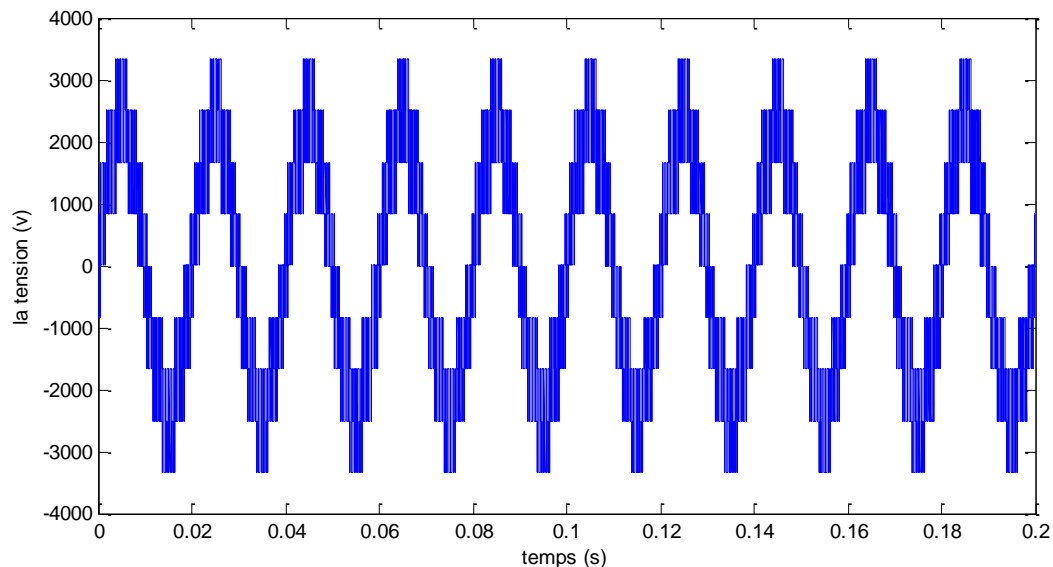
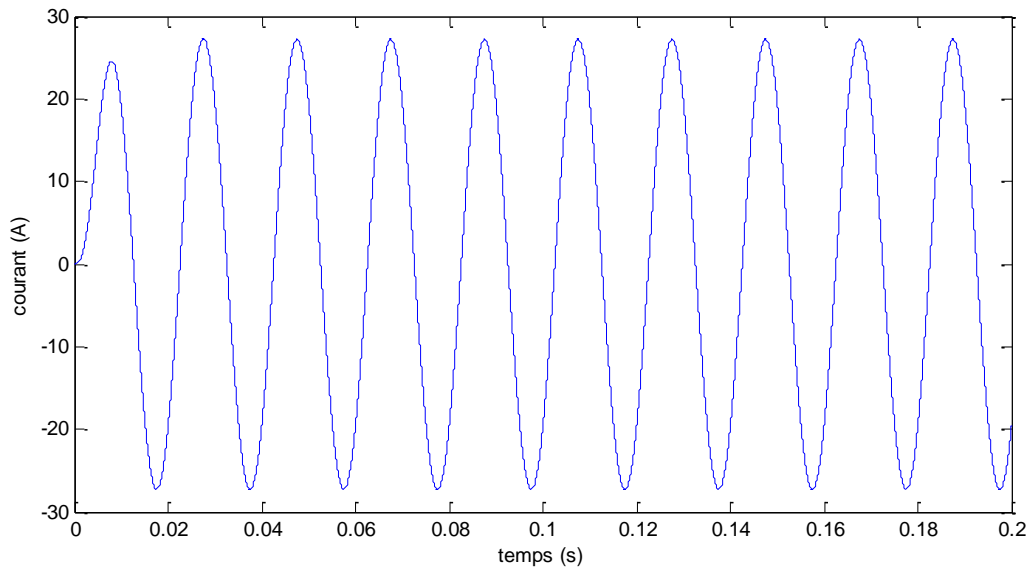


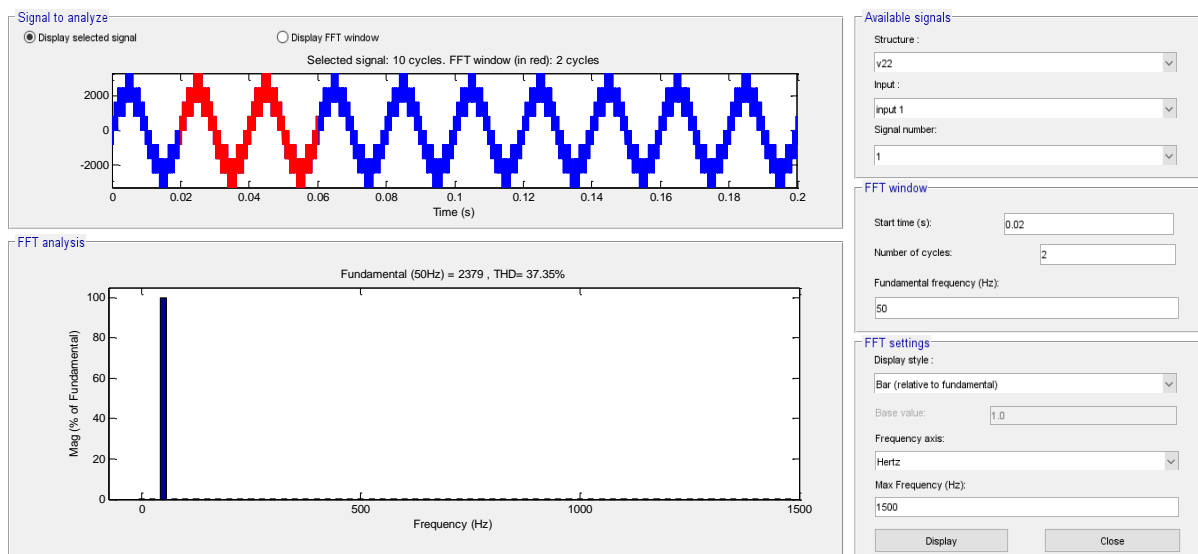
Figure III 53. Allure de la tension à la sortie de l'onduleur

La figure III.53.Représente l'allure de tension ente deux phases sous forme d'une triangulo sinusoïdale d'une valeur maximale 3342.4V.



*Figure III 54. Allure du courant à la sortie de l'onduleur*

La figure III.54. Montre l'allure de courant aux bornes de la charge sous forme d'une sinusoïde d'une valeur 28.16.



*Figure III 55. Analyse spectrale de la tension à la sortie de l'onduleur*

La figure III.55. Représente l'analyse spectrale harmonique de tension, on a relevés un THD=46.98% et on remarque que le taux est très élevés.

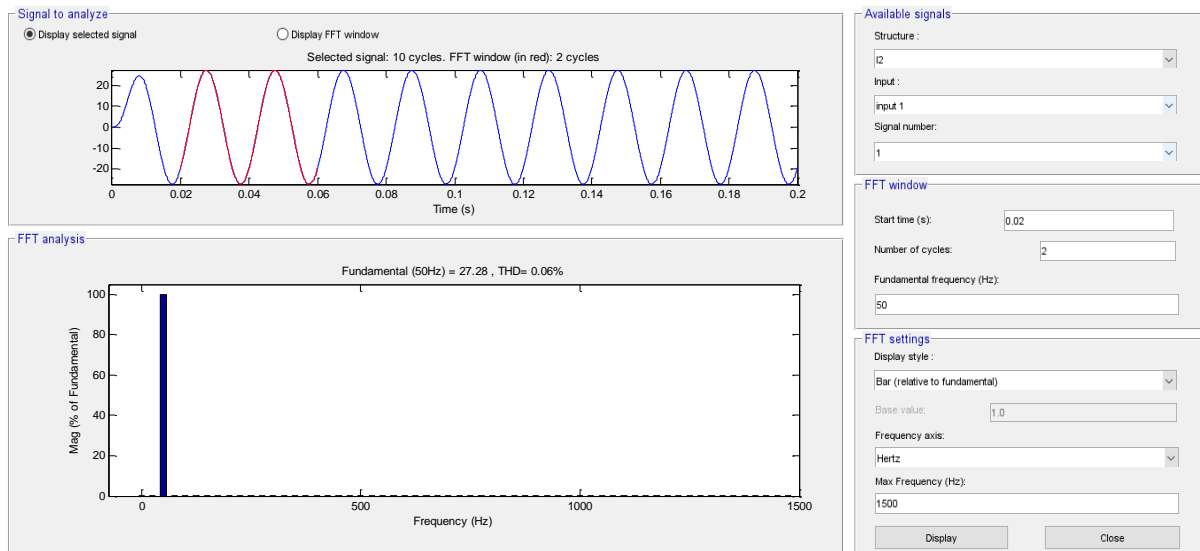


Figure III 56. Analyse spectrale du courant à la sortie de l'onduleur

La figure III.56. Montre l'analyse spectrale harmonique du courant, nous avons obtenu un THD=0.06% qui est très faible.

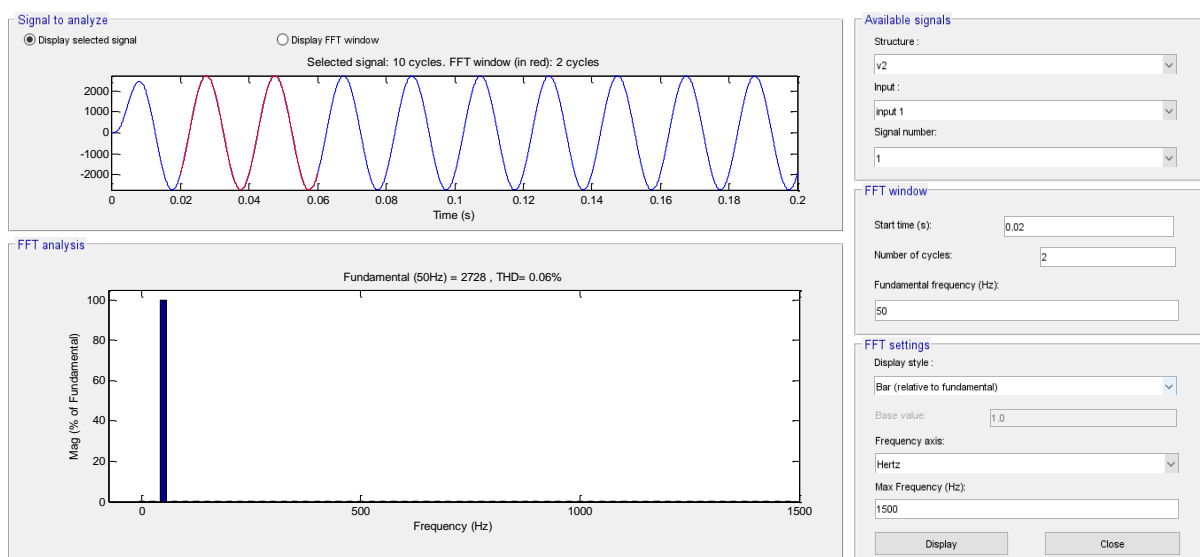


Figure III 57. Analyse spectrale de la tension après filtrage

La figure III.57. Représente l'analyse spectrale harmonique de tension filtrée, on obtient un THD=0.06% et on remarque que le taux d'harmonique est très faible.

III.2.2.6 Structure NPP

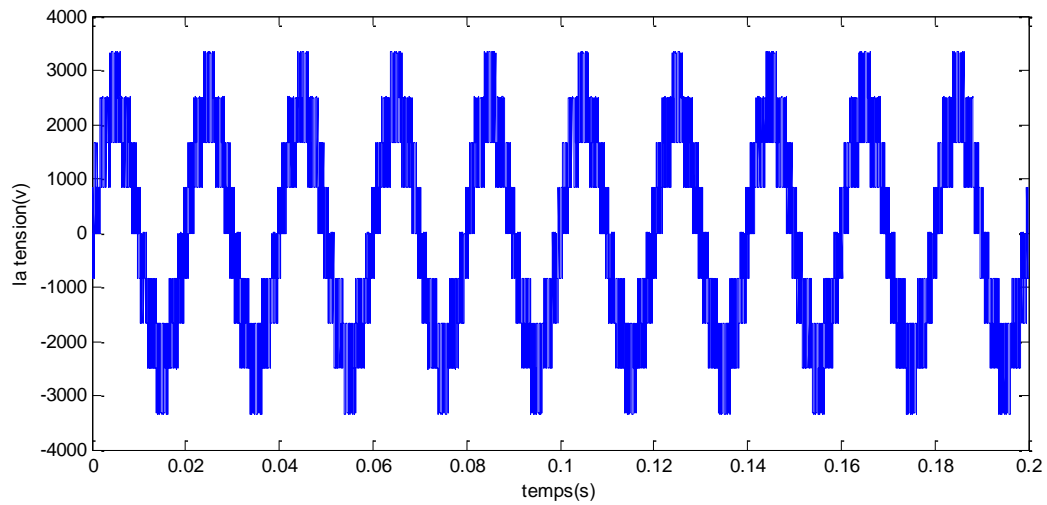


Figure III 58. Allure de la tension à la sortie de l'onduleur

La figure III.58. Monte l'allure de tension entre deux phases sous forme d'une triangulo sinusoïdale d'une valeur 3341.3V.

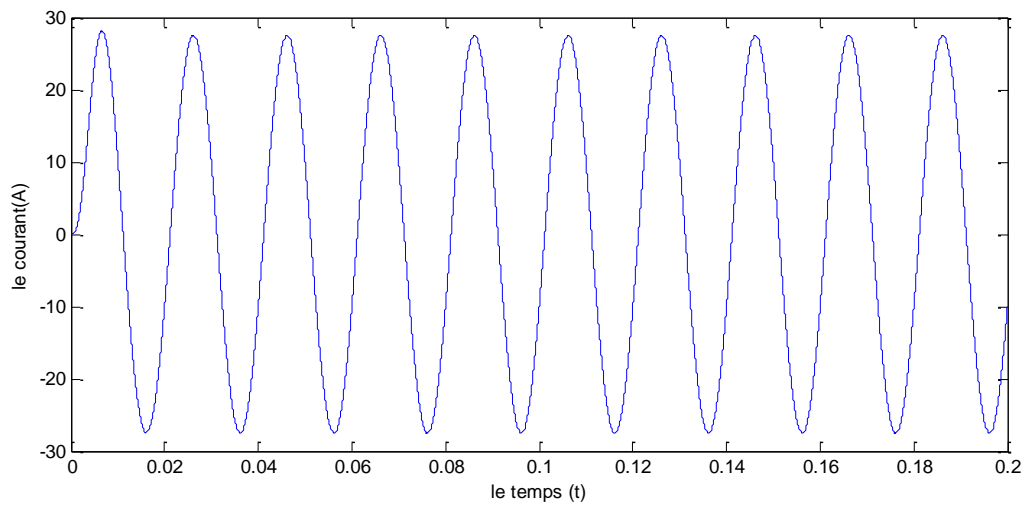
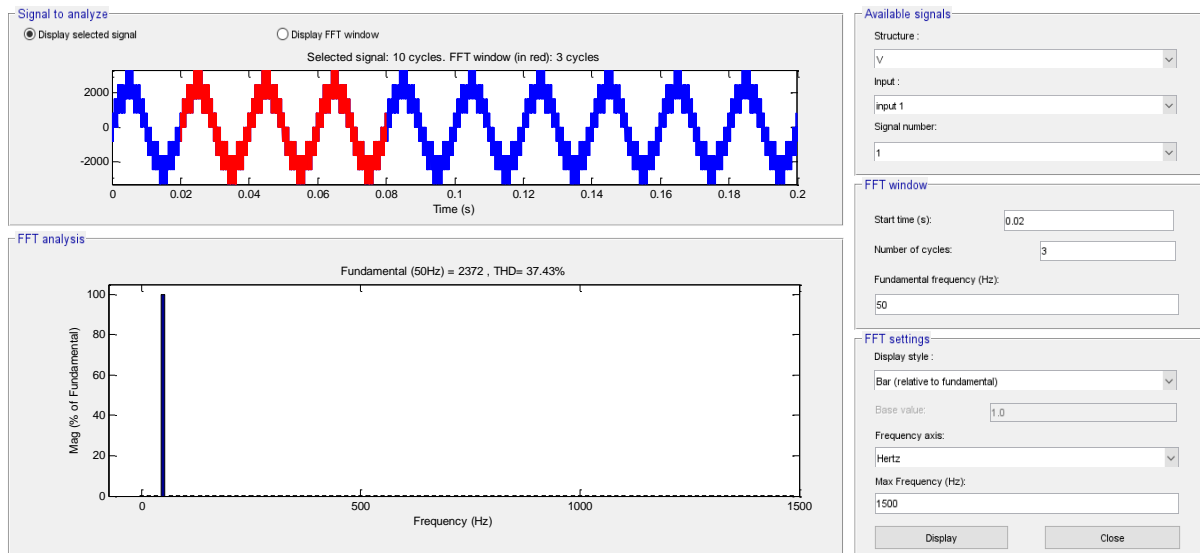


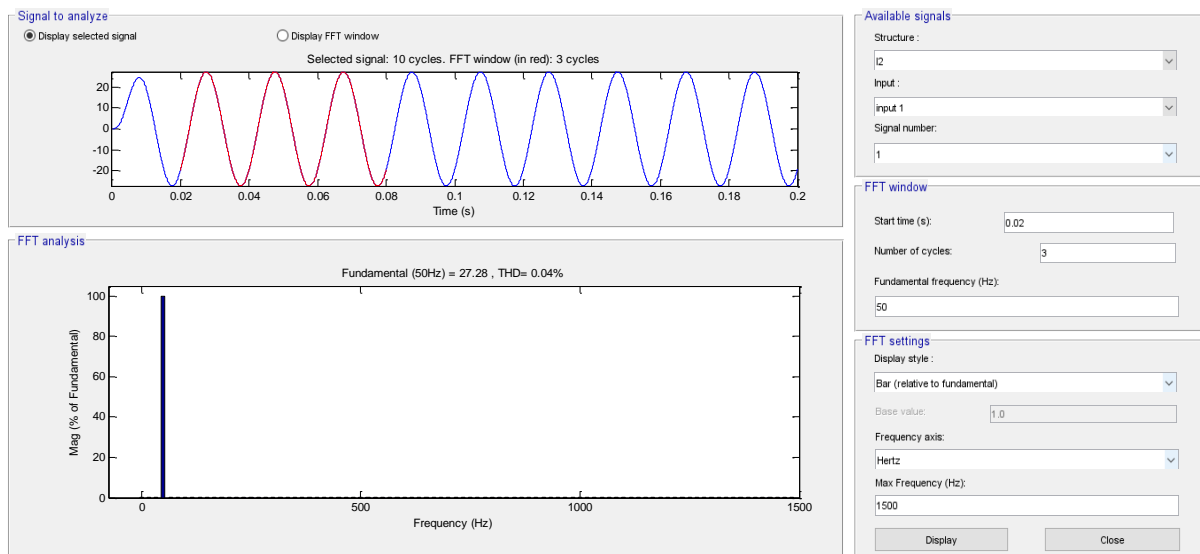
Figure III 59. Allure du courant à la sortie de l'onduleur

La figure III.59. Représente l'allure du courant aux bornes de la charge sous forme d'une sinusoïde d'une valeur 28.16A.



*Figure III 60. Analyse spectrale de la tension à la sortie de l'onduleur*

La figure III.60. Montre l'analyse spectrale harmonique de tension, nous avons obtenu un THD=37.43% et on remarque que le taux est très élevés.



*Figure III 61. Analyse spectrale du courant à la sortie de l'onduleur*

La figure III.61. Représente l'analyse spectrale du courant, on a relevé un THD=0.04% et on remarque que le taux est très faible.

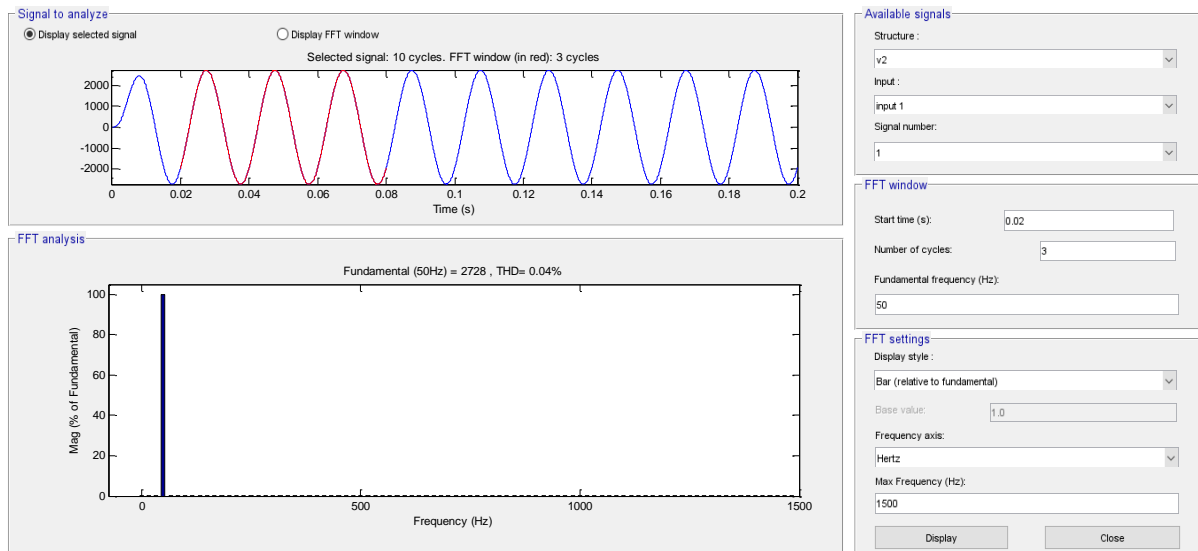


Figure III.62. Analyse spectrale de la tension après filtrage

La figure III.62. Montre l'analyse spectrale harmonique de tension filtrée, on obtient un THD=0.09% et on remarque que le taux est très faible.

## TECHNIQUES DE COMMANDE DES CONVERTISSEURS MULTINIVEAUX

Tableau III.2. Tableau récapitulatif des résultats de simulation

<b>Deux porteuses</b>									
	<b>Tension (v)</b>	<b>Courant (A)</b>	<b>Tension Filtrée (v)</b>	<b>THD de tension (%)</b>	<b>Fondamental De tension</b>	<b>THD de courant (%)</b>	<b>Fondamental De courant</b>	<b>THD de tension Filtrée (%)</b>	<b>Fondamental de tension filtrée</b>
<b>ANPC</b>	3341,25	28,16	2618 ,29	37,43	2372	0,04	27,28	0,04	2728
<b>NPC</b>	3341,22	27,74	2753,7	37,43	2372	0,16	27,51	0,13	2752
<b>FC</b>	3341,32	28,2	2821,72	37,60	2370	0,23	27,5	0,23	2750
<b>H Bridge</b>	3341,14	28,22	2822,84	37,42	2378	0,08	27,59	0,08	2759
<b>NPP</b>	3341.3	28.16	2816.29	37.43	2372	0.04	27.28	0.094	2728
<b>MMC</b>	3341,39	27.28	2728,5	37,35	2379	0,06	27.28	0,06	2728

### Commentaire :

Les signaux montrent que la commande MLI fournit la tension de sortie presque sous forme d'onde. On observe que les signaux de tension et de courant après filtrage c'est des signaux d'une sinusoïde

Avec l'outil FFT analyse :

- L'harmonique et la courbe THD de tension montre qu'il y a une grande présence d'harmonique
- Les harmoniques et les courbes THD de courant et de tension filtrée montre que les harmoniques sont presque disparus

## TECHNIQUES DE COMMANDE DES CONVERTISSEURS MULTINIVEAUX

---

- D'après l'analyse spectrale des structure le THD tant vers 0 donnant une bonne qualité de signal.
- Le THD des tensions de sortie de l'onduleur à deux porteuses est faible rapport à la technique une seule porteuse

Tableau III.3. Nombre de composant constituant chaque topologie

	<b>NPC</b>	<b>FC</b>	<b>ANPC</b>	<b>NPP</b>	<b>H-Bridge</b>	<b>MMC</b>
<b>Nombre De niveaux de tension</b>	3	3	3	3	3	3
<b>Nombre d'IGBT</b>	4	4	6	6	4	8
<b>Nombre de Diodes</b>	6	4	6	6	4	8
<b>Nombre de condensateur</b>	2	4	0	0	0	2

Tableau III.4 représente les paramètres de réglage

<b>La tension(V)</b>	<b>NPC</b>	<b>FC</b>	<b>NPP</b>	<b>ANPC</b>	<b>MMC</b>	<b>H-Bridge</b>
<b>Une porteuse</b>	5000	5000	5000	5000	5000	2500
<b>Deux porteuses</b>	5000	5000	5000	5000	5000	2500

### III.3 Conclusion

Dans ce chapitre l'onduleur trois niveaux basé sur plusieurs structure (NPC, FC, NPP, ANPC, H-Bridge, MMC) simulant ces dernières en utilisant la stratégie une et deux porteuse basée sur la tension de sortie et courant et les harmoniques et on a fini par faire une comparaison entre les structure étudié.



## **Conclusion Générale**

# Conclusion Générale

---

## Conclusion Générale :

Les convertisseurs multiniveaux sont très largement utilisés dans l'industrie et dans de nombreuses applications liées au transfert d'énergie et ces derniers sont représentés par de nombreuses structures multiniveaux qui ont été créées grâce à l'évolution de l'électronique de puissance vis-à-vis des calibres et des performances. Depuis, de nombreuses structures sont apparues ayant des propriétés assez intéressantes qui sont : NPC, ANPC, FC, NPP, H-Bridge et MMC.

Le travail exposé dans ce mémoire consiste en une étude sur les onduleurs trois niveaux qui est une mise en série de deux onduleurs à deux niveaux.

Le premier chapitre a été consacré sur les convertisseurs DC-AC en général en citant ces différents types : hacheur, gradateur, redresseurs, onduleur et cycloconvertisseur.

Ensuite, parmi les convertisseurs présentés, nous avons étudié les onduleurs et leurs fonctionnements en donnant le type, le principe et l'application, ainsi nous avons parlé brièvement sur les onduleurs à deux niveaux.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les différentes topologies des onduleurs trois niveaux qui sont :

- Topologie à diode clampées (NPC neutral point clamped) permet de clamer les interrupteurs ouverts par l'intermédiaire des diodes de clamping. Elle permet aussi de réduire le taux de distorsion harmonique, limitant ainsi la taille des éléments de filtrage.
- Topologie à condensateur flottant (FC Flying Capacitor Multilevel inverters) permet de répartir les tensions aux bornes des semi-conducteurs mis en série par l'intermédiaire des condensateurs flottants. Elle joue aussi un rôle sur la réduction du taux de distorsion harmonique.
- Topologie en cascade en pont de H (H-Bridge) présente l'énorme avantage d'être modulaire, cela veut dire qu'elle est facilement extensible à un nombre élevé de niveaux, ce qui réduit le taux de distorsion des harmoniques.
- Topologie à diode clampé activement par le neutre (ANPC Active Neutral Point clamped) est une variante de la topologie NPC.
- Topologie à diode piloté (NPP Neutral point Piloted) permet d'obtenir un niveau de tension supplémentaire.
- Topologie MMC (Modular Multilevel Converter)

## Conclusion Générale

---

En les représentant par des schémas de configuration et des tableaux de commutation.

En dernier le chapitre trois consiste la simulation des six structures commandée par MLI (technique de multiple impulsion) stratégie triangulo sinusoïdale une et deux porteuses et on a fini par relever les résultats de simulation dans des tableaux ensuite commenter et interpréter ces résultats

On conclue comme quoi le taux d'harmonique (THD) de deux porteuse est faible par rapport au THD d'une seule porteuse

# Bibliographie

---

## Bibliographie

- [1] <https://elec13.wordpress.com/2016/03/05/les-convertisseurs-statiques/>
- [2] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Onduleur>
- [3] M.Chelbi F, M. Ben Ahmed B implémentation sur DSP F28335 des stratégies de commande des convertisseurs DC/AC)
- [4] G.séguier,R. Bausière, F. Labrique ‘Les convertisseur de l’électronique de puissance la conversion alternative’, Volume 4,Édition tecanddoc,1995.
- [5] (<http://for-ge.blogspot.com/2015/08/londuleur.html>)
- [6] Subrata K.Mondal, Bimal K. Bose, Valentin Oleschuk, and Joao O. P. Pinto(Space Vector Pulse Width Modulation of Three Level Inverter Extending Operation Into Overmodulation Region ), IEEE Transactions on Power Electronics,Vol, 18 , N°2, pp, 604-611 ? March 2003
- [7] L.M.Tolbert(Multilevel Converters for Large Electric Drives),IEEE Transaction on Industry Application,Vol, 35, pp, 36-44 , January/February 1999 .
- [8] BRIGHEN.H , HALAIMIA.S ‘Etude et analyse de la commande des onduleurs Multi-niveaux par MLI sinusoïdale’
- [9] A. L. Julian, G. Oriti and T. A. Lipo, “Elimination of Common-Mode Voltage in Three-Phase Sinusoidal Power Converters”, IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 14, No. 5, September 1999.
- [10] V. K. Dhar, “Conducted EMI Analysis- A Case Study”, Proc. International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility, pp. 181-186, 1999.
- [11] F. Labrique, G. Segulier et R. Bausiere, “Les convertisseurs de l’électronique de puissance, La conversion continu – alternatif”, Édition Lavoisier, France, 1995.
- [12] Kambie ARAB TEHRANI ‘Conception,Synthèse et Application d’une nouvelle commande Robuste par PID Fractionnaire pour les onduleurs Multiniveaux
- [13] S. Chen, “Bearing Current, EMI and Soft Switching in Induction Motor Drives – A Systematic Analysis, Design and Evaluation”, Ph.D. Thesis, Univ. of Wisconsin, 1995.
- [14] E. Acha, V.G. Agelidis, O. Anaya-Lara et T.J.E. Miller, “Power Electronic Control in Electrical Systems”, Editions NEWNES, OXFORD, Grande-Bretagne, 2002.
- [15] F. Labrique, G. Segulier et R. Bausiere, “Les convertisseurs de l’électronique de puissance, La conversion continu – alternatif”, Édition Lavoisier, France, 1995.
- [16] R.H. Baker, High-Voltage Converter Circuit, U.S. Patent Number 4,203,151, May 1980.
- [17] H. Stemmler, and P. Guggenbach, "Configurations of High-Power Voltage Source Inverter Drives," Proceedings of the European Conference on Power Electronics and Applications, volume 5, pages 7-14, September 1993.
- [18] D. Busse, J. Erdman, R. J. Kerkman, D. Schlegel and G. Skibinski, “The Effects of PWM Voltage Source Inverters on the Mechanical Performance of Rolling Bearings”, IEEE, pp. 561-568, 1996.

## Bibliographie

---

- [19] Y. Cheng and M.L. Crow, "A Diode-Clamped Multi-Level Inverter for the StatCom/BESS," IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, volume 1 pages 470-475, January 2002.
- [20] K. Yamanaka, K. Yamada, A. Kumagae, and T. Terada, Three-Level Neutral Point Clamping Type Inverter Circuit, U.S. patent number 06,226,192, assigned to Kabushiki Kaisha Yaskawa Denki, May 2004.
- [21] Y. Khersonsky, Step Switched PWM Sine Generator, U.S. patent number 06,556,461, assigned to Power Paragon Incorporated, April 2003.
- [22] E. Newell, William "Power Electronics-Emerging from Limbo", Industry Applications, IEEE Transactions on , Volume: IA-10 Issue:1, Jan. 1974,pp: 7 – 11
- [23] D. Busse, J. Erdman, R. J. APEC Conference, San Jose, CA, March 1996. Kerkman, D. Schlegel and G. Skibinski, "System Electrical Parameters and Their Effects on Bearing Currents", IEEE
- [24] L. M. Tolbert, "Multilevel Converters for Large Electric Drives", IEEE Trans. on Ind. Application, Vol.35, pp. 36-44, January/February 1999.
- [25] H. Zhang, "Multilevel Inverter Modulation Schemes to Eliminate Common-Mode Voltages", IEEE Trans. Ind. Application, Vol. 36, pp. 1645-1653, Nov./Dec. 2000.
- [26] N. P. Schibli, "A Three-Phase Multilevel Converter for High-Power Induction Motors", IEEE Trans. Power Electronics, Vol.13, pp. 978-986, September 1998.
- [27] G. Oriti, A. L. Julian and T. A. Lipo, "A New Space Vector Modulation Strategy for Common Mode Voltage Reduction", IEEE- PESC '97, Vol. 2, pp. 1541 - 1546, 1997
- [28] M. N. Giteau, "Modeling Conducted EMI Noise Generation and Propagation in Boost Converters", IEEE- ISIE'2000, pp. 353-358
- [29] M. C. Caponet, F. Profumo, J. Jacobs and R. W. De Doncker, "Solutions to Minimize Conducted EMI in Power Electronic Circuits", APEC, Vol. 1, pp. 220-224, 2001.
- [30] S. Chen, "Bearing Current, EMI and Soft Switching in Induction Motor Drives – A Systematic Analysis, Design and Evaluation", Ph.D. Thesis, Univ. of Wisconsin, 1995.
- [31] E. Acha, V.G. Agelidis, O. Anaya-Lara et T.J.E. Miller, "Power Electronic Control in Electrical Systems", Editions NEWNES, OXFORD, Grande-Bretagne, 2002.

## Bibliographie

---

- [32] Y. Shakweh, E. A. Lewis, "Assessment of medium voltage PWM VSI topologies for multi-megawatt variable speed drive applications," IEEE-PESC Conference Record, vol.2, pp. 965 –971,1999.
- [33] M. Fracchia, T. Ghiara, M. Marchesoni, and M. Mazzucchelli, "Optimized Modulation Techniques for the Generalized N-Level Converter", Proceedings of the IEEE Power Electronics Specialist Conference, volume 2, pages 1205-1213, 1992.
- [34] S. Ogasawara, J. Takagaki, H. Akagi, and A. Nabe, "A Novel Control Scheme of a Parallel Current-Controlled PWM Inverter," IEEE Transactions on Industry Applications, volume 28, number 5, pages 1023-1030, September / October 1992.
- [35] H. Stemmler, and P. Guggenbach, "Configurations of High-Power Voltage Source Inverter Drives," Proceedings of the European Conference on Power Electronics and Applications, volume 5, pages 7-14, September 1993.
- [36] K.A. Corzine and S.D. Sudhoff, "High State Count Power Converters: an Alternate Direction in Power Electronics Technology," SAE Transactions, Journal of Aerospace, Section 1, pages 124-135, 1998.
- [37] D. Busse, J. Erdman, R. J. Kerkman, D. Schlegel and G. Skibinski, "The Effects of PWM Voltage Source Inverters on the Mechanical Performance of Rolling Bearings", IEEE, pp. 561-568, 1996.
- [38] N. Celanovic, "Space Vector Modulation and Control of Multilevel Converters", Ph.D Thesis, Virginia Polytechnic Institute, 2000.
- [39] K. Yamanaka, K. Yamada, A. Kumagae, and T. Terada, Three-Level Neutral Point Clamping Type Inverter Circuit, U.S. patent number 06,226,192, assigned to Kabushiki Kaisha Yaskawa Denki, May 2004.
- [40] P.W. Hammond, Medium Voltage PWM Drive and Method, U.S. patent number 05,625,545, assigned to Halmar Robicon Group, April 1997.
- [41] G.A. Duba, E.S. Thaxton, and J. Walter, Modular Static Power Converter Connected in a Multi-Level, MultiPhase, Multi-Circuit Configuration, U.S. patent number 05,933,339, assigned to Electric Boat Corporation, August 1999.
- [42] Nabae A, Takahashi I, Akagi H, "A new neutral-point-clamped PWM inverter," IEEE Trans on Industry Application, Vol. IA-17 , No.5, pp.518–523, September 1981.
- [43] J. Holtz, Selbstgeführte Wechselrichter mit treppenformiger Ausgangsspannung für große Leistung und hohe Frequenz, "Siemens Forschungs- und Entwicklungsberichte, vol. 6 no. 3, pp. 164– 171, 1977.

## Bibliographie

---

- [44] V. Guennegues, B. Gollentz, F. Meibody-Tabar, S. Rael and L. Leclere, "A converter topology for high speed motor drive applications," 2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications, Barcelona, 2009, pp. 1-8.
- [45] Florent BECKER « Contribution à la continuité de service des convertisseurs statiques multiniveaux 2017 »
- [46] T. Bruckner, S. Bernet, H. Guldner, "The active NPC converter and its loss-balancing control," IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 52, no. 3, pp. 855-868, June 2005.
- [47] Thomas Brückner, Steffen Bernet and Peter K. Steimer, "The Active NPC Converter for Medium-Voltage Applications", industry Applications Conference, 2005. Fourtieth IAS Annual Meeting, Conference Record of the 2005, Vol. 1, 2-6 Oct. 2005, pp.84 - 91.
- [48] R. Marquardt, "Stromrichterschaltungen mit verteilten Energiespeichern", German Patent 2001222923, 24 Janvier 2001.
- [49] S. Ogasawara, and H. Akagi, "Analysis of Variation of Neutral Point Potential in Neutral Clamped Voltage Source PWM Inverters," Proc. IAS'93, pp.965-70
- [50] M. Fracchia, T. Ghiara, M. Marshesoni, and M. Mazzucchelli, "Optimized Modulation Technique for the Generalized N-Level Converter," Proc.PESC'92, pp. 1205-13
- [51] Benmlra Hassan « Comme exigence partielle de la matrice en génie électrique »  
L'université en du Québec à trois rivières 2003
- [52] Bezhouh Tinhinane « Etude et stratégie de commande des convertisseurs modulaires multiniveaux » 2017
- [BR1] Bridge Converter circuit. R.H.Baker ,U.S.Patent n°4 270 163, 26 mai 1981