

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE  
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

**Mémoire de Fin d'Etudes**  
**De MASTER PROFESSIONNEL**  
Domaine : Sciences et Technologies  
Filière : Génie Electrique  
Spécialité : **Electrotechnique Industrielle**

*Présenté par*  
**Khaled SAIDOUN**  
**Mourad SI MOUSSI**

Thème  
**Commande MLI d'un onduleur multi-niveaux**

*Mémoire soutenu publiquement le 29 /09/ 2015 devant le jury composé de :*

**M<sup>r</sup> Slimane REZGUI**  
Maitre assistant Classe A, UMMTO, Président

**M<sup>r</sup> Arezki DICHE**  
Maitre assistant Classe A, UMMTO, rapporteur

**M<sup>r</sup> Kaci GHEDAMSI**  
Maitre de conférences Classe A, UAM Bejaia, co-rapporteur

**M<sup>r</sup> Farid NAMANI**  
Maitre Assistant Classe A, UMMTO, Examineur

**M<sup>me</sup> Ferroudja BOUALI-DJADEL**  
Maitre Assistant Classe A, UMMTO, Examinatrice

## *Remerciements*

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

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

*Nous remercions le membre de jury pour nous avoir fait l'honneur d'évaluer notre travail.*

*Nous tonnons aussi à tout personne ayant contribué de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail.*

## **DEDICACE**

*Je dédie ce modeste travail à :*

***Ma mère : Ouiza***

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

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

***Mon père : Mohammed Youcef***

*Puisse ce modeste travail constituer une légère compensation  
pour tous les nobles sacrifices que tu t'es imposé pour assurer  
mon bien être et mon éducation.*

***Mes frères et sœurs***

*Tous mes ami (es) : Amar ; Smail ; Nouara ; les deux  
Rachid..... à tous ceux que j'aime.*

.

***S, Khaled***

## **DEDICACE**

*Je dédie ce modeste travail à :*

***Ma mère : Zahra***

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

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

***Mon père : Mohammed***

*Puisse ce modeste travail constituer une légère compensation  
pour tous les nobles sacrifices que tu t'es imposé pour assurer  
mon bien être et mon éducation.*

***Mes frères et sœurs :***

*Ali et sa famille, Saïd et sa famille, Nacer, Djamila, Djedjiga  
ainsi que son mari sans oublier Mahdi*

*Yasmine et Lydia.*

*Tous mes ami (es) : Amar ; Smail ; Sadjia ; les deux Rachid.....  
à tous ceux que j'aime.*

***S, Mourad***

# Table de matière

## Introduction générale

### Chapitre I : généralité sur les onduleurs

I.1 : Introduction.....	2
I.2 : définition de l'onduleur.....	2
I.3 : Classification des onduleurs.....	3
I.3.1 : Onduleur autonome.....	3
I.3.2 : Onduleur non autonome.....	3
I.4 : Principe de fonctionnement de l'onduleur .....	3
I.4.1 : Onduleur monophasé.....	5
I.4.1.1 : Montage en demi-pont.....	5
I.4.1.2 : Montage en pont.....	6
I.4.2 : Onduleur triphasé en pont.....	6
I.4.2.1 : Principe de fonctionnement (une phase).....	7
I.4.3 : Convertisseur matriciel.....	8
I.4.3.1 : Avantage du convertisseur matriciel.....	8
I.4.3.2 : Inconvénients du convertisseur matriciel.....	8
I.4.4 : Convertisseur multi-niveaux.....	9
I.4.4.1 : Avantage du convertisseur multi-niveaux.....	9
I.4.4.2 : Inconvénients du convertisseur multi-niveaux.....	9
I.5 : Application des onduleurs.....	9
I.5.1 : Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone.....	10
I.6 : Conclusion.....	11
<b>Chapitre II : modalisation d'un onduleur multi-niveaux</b>	
II.1 : Introduction.....	12
II.2 : Modélisation d'un onduleur a trois niveaux à structure NPC.....	12

II.2.1 : Structure de l'onduleur a trois niveaux.....	12
II.2.2 : Configuration et fonctionnement d'un bras de l'onduleur à trois niveaux.....	14
II.3 : Modélisation d'un onduleur a cinq niveaux à structure NPC.....	15
II.3.1 : Structure de l'onduleur a cinq niveaux à structure NPC.....	15
II.3.2 : Différentes configurations d'un bras de l'onduleur NPC a cinq niveaux.....	17
II.4 : Les fonctions de conversion.....	20
II.4.1 : Fonction de connexion des interrupteurs.....	21
II.4.2 : Fonction de conversion des interrupteurs.....	21
II.5 : Modulation de largeur d'impulsions .....	21
II.5.1 : Modulation de largeur d'impulsion sinus-triangle.....	22
II.5.2 : Principe modulation de largeur d'impulsions sinus-triangle.....	22
II.6 : Montée en puissance.....	24
II.7 : Conclusion.....	25

### **Chapitre III : simulation d'un onduleur multi-niveaux**

III.1 : Introduction.....	27
III.2 :Alimentation d'une charge RLC.....	27
III.2.1 : Onduleur a deux niveaux.....	27
III.2.1.1 : Pour m=9.....	27
III.2.1.2 : Pour m=15.....	29
III.2.1.3 : Pour m=21.....	31
III.2.2 : Simulation de l'onduleur trois niveaux.....	33
III.2.2.1 : Pour m=9.....	33
III.2.2.2 : Pour m=15.....	35
III.2.2.3 : Pour m=21.....	37
III.2.3 : Simulation d'un onduleur à cinq niveaux.....	39
III.2.3.1 : Pour m=9.....	39
III.2.3.2 : Pour m=15.....	41

III.2.3.3 : Pour $m=21$ .....	43
III.2.4 : Interprétation des résultats .....	45
III.3 : Alimentation d'une charge RL en régime dégradé.....	46
III.3.1 : Onduleur à deux niveaux.....	46
III.3.2 : Onduleur à trois niveaux.....	48
III.3.3 : Onduleur à cinq niveaux.....	50
III.6 : Interprétation et résultats.....	52
III.4 : Application d'un onduleur à la conduite de la machine asynchrone.....	53
III.4.1 : Alimentation via un onduleur à deux niveaux.....	53
III.4.2 : Alimentation via un onduleur à trois niveaux.....	56
III.4.3 : Alimentation via un onduleur à cinq niveaux.....	57
III.5 : Conclusion.....	59

## **Conclusion générale**

## **Annexe**

## **Bibliographie**

## Introduction générale

Une des branches de l'électronique en pleine expansion est l'électronique de puissance. Elle permet de traiter et de contrôler l'énergie électrique ainsi que sa conversion, afin de fournir des tensions et des courants aux différents types de charges selon les applications.

On distingue fondamentalement les conversions suivantes : alternatif/continu, continu/ alternatif, alternatif/ alternatif, continu/continu et la conversion alternatif/continu/ alternatif.

L'électronique de puissance a pour avantages : une utilisation plus souple et plus adaptée de l'énergie électrique, une amélioration de la gestion, du transport et de la distribution de l'énergie électrique.

Les premiers convertisseurs ont été réalisés avec des machines électriques couplées mécaniquement. Une machine à courant continu d'autre part dont l'excitation commandée permettait de disposer d'une tension continue variable en sortie. Le développement des composants de puissance au milieu du 20<sup>ème</sup> siècle (électronique de puissance) a permis de développer des convertisseurs de puissance électrique sans machines tournante. La technologie des composants utilisés (semi-conducteurs) ne cesse d'évoluer : faible coût ; puissance commutées élevées ; facilité de contrôle. On contrôle l'amplitude des tensions ou des courants ainsi que leur fréquence.

Dans ce travail, on s'intéresse à la conversion continu/alternatif, cependant, nous utiliserons une des commandes que nous avons implantées pour s'assurer de sa fonctionnalité. Le but de ce travail est de faire une synthèse de la technique utilisée pour la commande des convertisseurs monophasé et triphasé, la commande de largeur d'impulsion pour les raisons suivantes ; elle permet à l'onduleur de :

- Générer une onde de sortie très proche de la forme idéale.
- D'obtenir le contrôle linéaire de l'amplitude de la tension et du courant de sortie avec la commande des interrupteurs.

Le manuscrit se compose en trois chapitres :

- Premier chapitre : généralités sur les onduleurs MLI.
- Deuxième chapitre: modélisation d'un onduleur multi-niveaux.
- Troisième chapitre : simulation et résultats.

## I.1 : Introduction

La technologie de conversion de l'énergie continu-alternatif, en utilisant les convertisseurs statiques tels que les onduleurs de tension constituent une fonction incontournable de l'électronique de puissance et est en pleine croissance. Ils sont présents dans des domaines d'application les plus variés, dont le plus connu est sans doute celui de la variation de vitesse des machines à courants alternatifs, utilité d'interconnexion, alimentation de sécurité ...

La forte évolution de cette fonction s'est appuyée, d'une part, sur le développement de composants à semi-conducteur entièrement commandables, puissants, robustes et rapides, et d'autre part, sur l'utilisation quasi-généralisée des techniques dites de modulation de largeur d'impulsion [1].

Cela permet d'adapter pour chaque application la structure de l'onduleur et la stratégie de commande qui lui conviennent le mieux.

Malgré leurs nombreux avantages, les onduleurs conventionnels présentent certains inconvénients tels que [14] :

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

Ce chapitre est consacré à la présentation des principales structures d'onduleurs de tension.

## I.2 : Définition de l'onduleur

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC) [2], [3]. En fait cette conversion d'énergie est satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (semi-conducteur). Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant une séquence adéquate de commande.

## I.3 : Classification des onduleurs

Il existe plusieurs centaines de schémas d'onduleurs, chacun correspondant à un type d'application déterminé ou permettant des performances recherchées. Les onduleurs sont en général classés selon les modes de commutation de leurs interrupteurs [4].

### I.3.1 : Onduleur autonome

C'est un système qui nécessite des composants commandes à la fois à la fermeture et à l'ouverture [5], de fréquence variable, dont les instants de commutations sont imposés par des circuits externes. La charge est quelconque cet onduleur n'est pas réversible.

### I.3.2 : Onduleur non autonome

Dans ce cas, les composants utilisés peuvent être de simples thyristors commandés uniquement à la fermeture et la commutation est «naturelle » contrairement à l'onduleur autonome [5].

L'application principale de ce type d'onduleur se trouve dans les variateurs pour moteurs synchrones de très forte puissance où les thyristors sont souvent les seuls composants utilisables.

### I.4 : Principe de fonctionnement de l'onduleur

Le principe de fonctionnement d'un onduleur est basé sur l'électronique de commutation. On génère une onde de tension alternative à partir d'une tension continue comme le montre la figure (I.1). On peut dire qu'il existe deux moyens pour réaliser cette conversion.

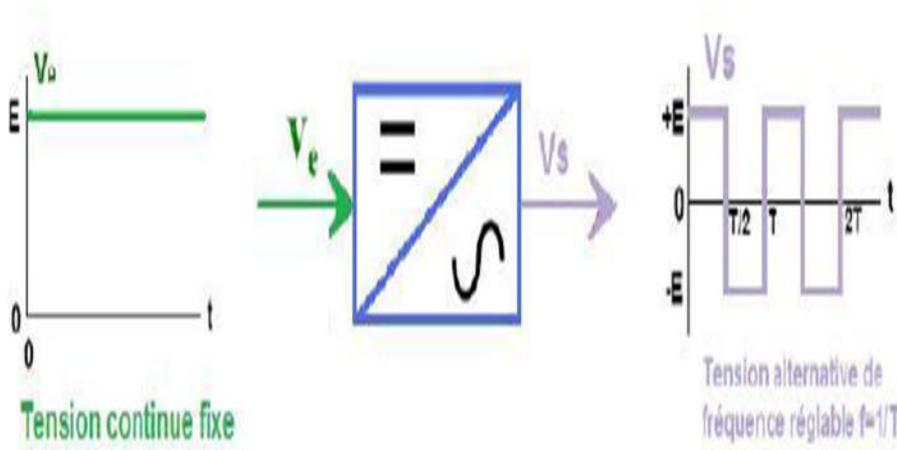


Fig. (I.1) : symbole et signal d'un onduleur

- L'utilisation directe d'une paire d'interrupteurs de base qui consiste à régler la fréquence et la durée des interconnexions de la source avec la sortie. Il est donc plutôt temporel et débouche sur les techniques de modulation de largeur d'impulsion.
- Contrôler l'amplitude soit de façon continue en créant une source réglable (ce qui suppose l'existence d'un autre étage de conversion), soit de façon discrète en disposant d'un nombre suffisant de sources.

Quand S1 – S2 sont Fermé (On) et S3 – S4 sont Ouvert (Off) pour  $t_1 < t < t_2$  on obtient une alternance positive  $U(t) = V_{ds}$  comme le montre la figure (I.2) ci-dessous :

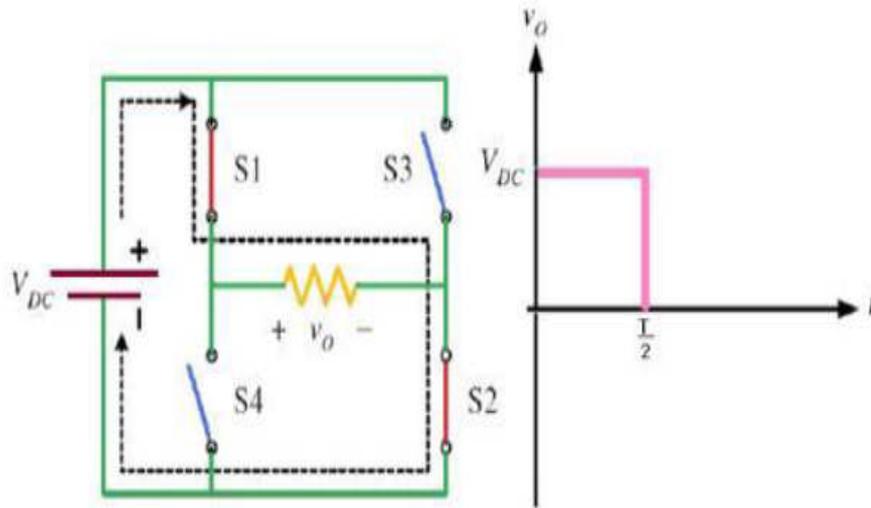


Fig (I.2): fonctionnement et signal de l'ondeur dans le 1<sup>ère</sup> demi cycle

Quand S1 – S2 sont Ouvert (Off) et S3 – S4 sont Fermé (On) pour  $t_2 < t < t_3$  on obtient une alternance négative  $U(t) = -V_{dc}$  comme le montre la figure (I.3) :

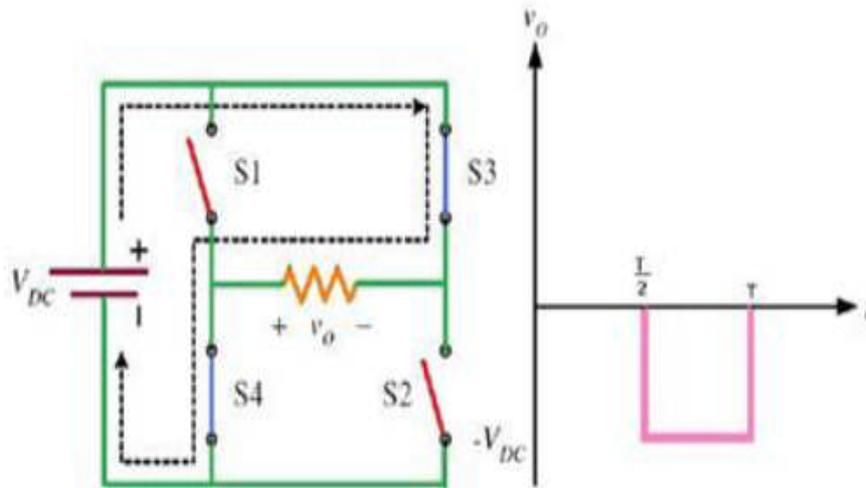
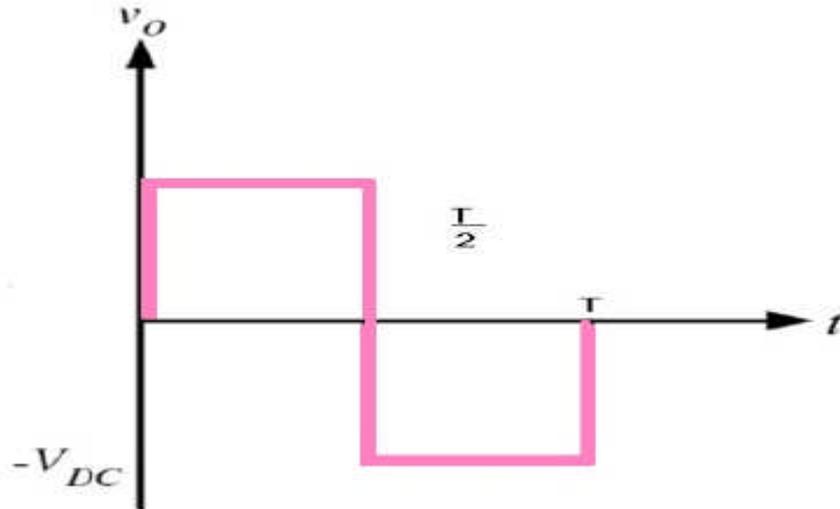


Fig (I.3): fonctionnement et signal de l'ondeur dans le 2<sup>ème</sup> demi cycle

Pour obtenir le signal résultant sur la période complète qui est présenté sur la figure (I.4)



Fig(I.4) : signal complet de l'ondeur

### I.4.1 : Onduleur monophasé :

Pour réaliser un onduleur monophasé il suffit de disposer d'un interrupteur inverseur K, et d'une source de tension continue E comme le montre la figure (I.5)

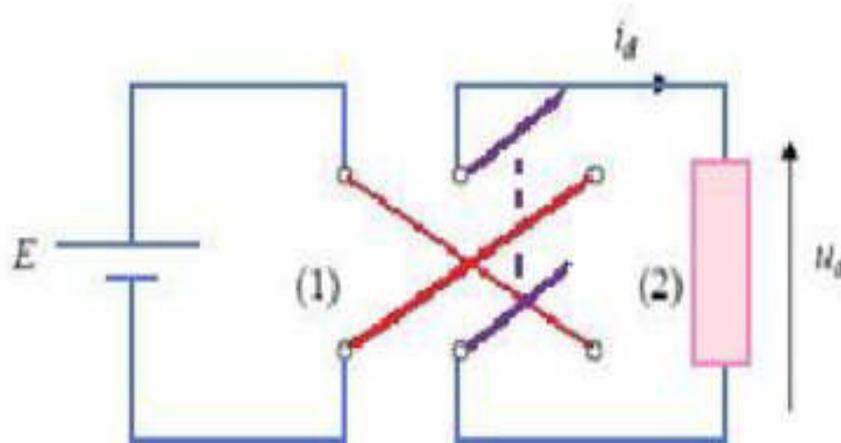


Fig.(I.5) : montage d'un onduleur monophasé

Montages pratiques : Deux types de montages sont utilisés :

#### I.4.1.1 : Montage en demi-pont

Dans ce type de montage (figure (I.6)), on fait l'hypothèse que la capacité «C» des deux condensateurs, est suffisamment grande pour que l'on puisse considérer qu'en régime permanent la tension à leur bornes reste toujours égale à  $E/2$ .

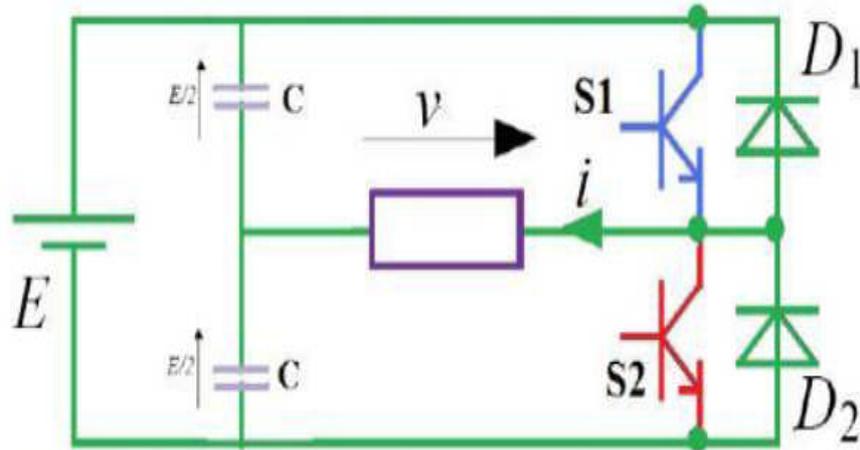


Fig. (I.6) : montage d'un onduleur en demi- pont.

#### I.4.1.2 : Montage en pont

Il est constitué de deux cellules de commutation et la charge est connectée entre les sorties S1 et S2 de chacune des deux cellules (figure (I.7)). La tension de sortie est donc la différence entre les tensions élémentaires  $v_{s1}$  et  $v_{s2}$  de chaque cellule.

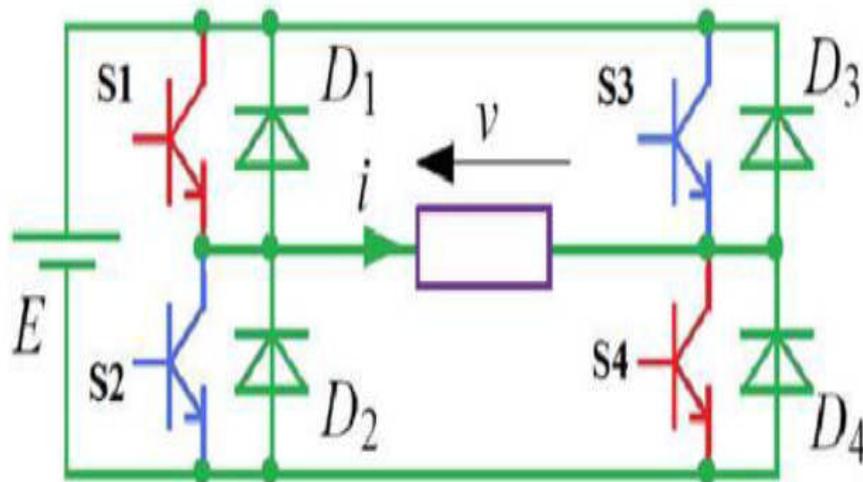


Fig. (I.7): montage d'un onduleur en pont complet.

L'intérêt des montages en pont ou en demi-pont réside dans l'utilisation d'une seule source de tension E.

La diode parallèle est utilisée quand le courant dans le commutateur est négatif. La diode inverse est décentrée quand le courant est positif dans le commutateur.

#### I.4.2 : Onduleur triphasé en pont

L'onduleur triphasé en pont est constitué de trois cellules de commutation (figure (I.8)). On retrouve évidemment une structure différentielle dans laquelle les tensions triphasées sont obtenues de façon composée sur les trois bornes de sortie.

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

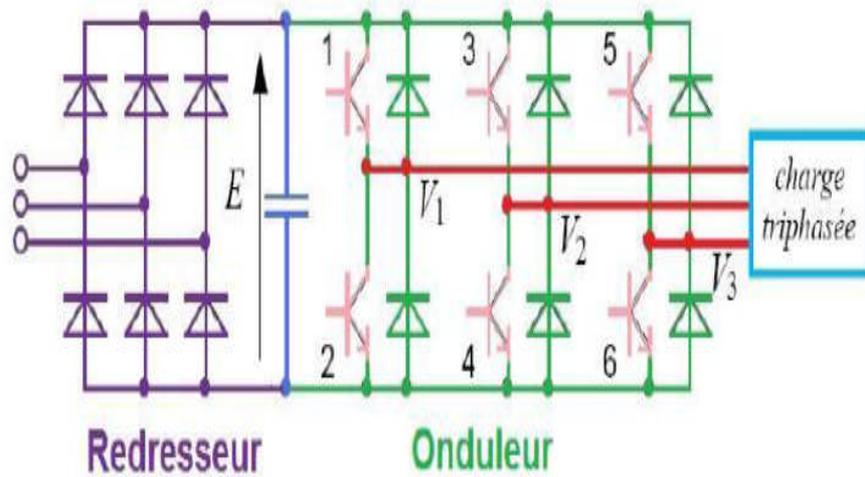


Fig. (I.8): Montage d'un onduleur triphasé.

### I.4.2.1 : Principe de fonctionnement (une phase)

Dans la configuration différentielle de l'onduleur triphasé, la cellule de commutation peut donc être considérée comme une phase de l'onduleur, la composante alternative de sa tension de sortie constituant une tension simple comme le montre la figure (I.9) ci-dessous pour chaque tension.

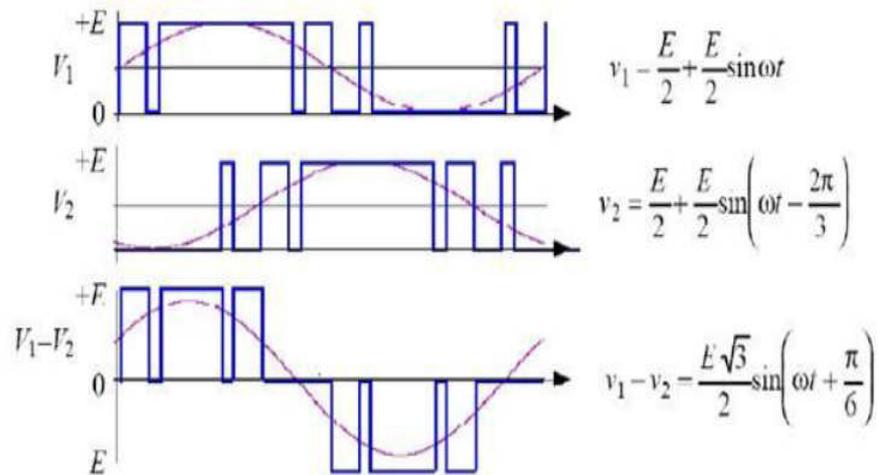


Fig. (I.9) : Allure des tensions simples de l'onduleur triphasé.

### I.4.3 : Convertisseur matriciel

La topologie de convertisseur matriciel est donnée par la figure suivante :

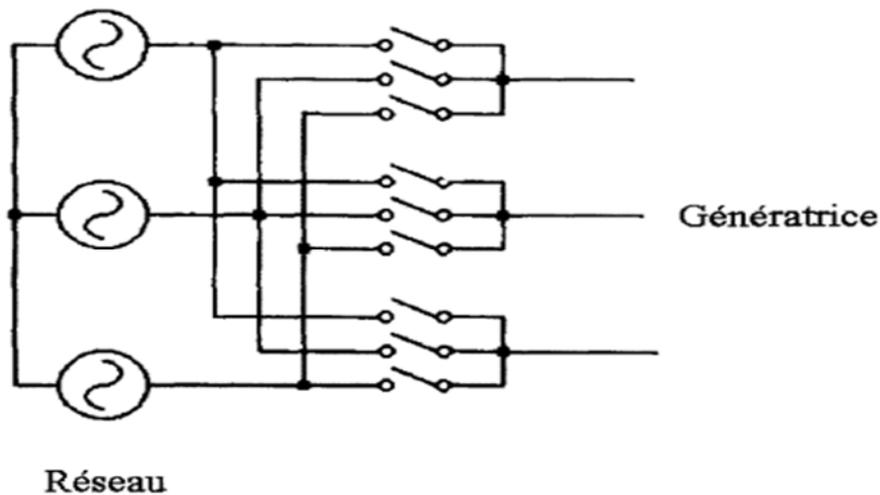


Fig. (I.10) : convertisseur matriciel.

L'idée fondamentale du convertisseur matriciel est la suivante : Considérant le réseau (entrée) comme une source de tension et la sortie comme une source de courant triphasée. En reliant correctement les bornes de sortie du convertisseur aux bornes d'entrée, on peut imposer le courant d'entrée ainsi que la tension de sortie à la fréquence désirée. Afin de protéger le convertisseur, les deux règles suivantes de commande doivent être satisfaites : on ne doit jamais permettre à deux (ou trois) commutateurs dans un bras de sortie d'être fermés en même temps. Toutes les trois phases de sortie doivent être reliées en tout temps à l'une des phases d'entrée.

La commutation du courant entre deux phases d'entrée consiste à transférer un courant inductif d'une source de tension à l'autre, on est pris entre deux modes impossibles : ou bien court-circuiter deux phases d'entrée, ou bien interrompre un courant de sortie inductif.

#### I.4.3.1 : Avantages du convertisseur matriciel

Bien que le convertisseur matriciel inclue six commutateurs de puissance additionnels comparé au système redresseur-onduleur de tension à MLI, l'absence du condensateur de bus continu peut augmenter l'efficacité et la durée de vie du convertisseur [6], [7].

#### I.4.3.2 : Inconvénients du convertisseur matriciel

Dans plusieurs articles traitant du convertisseur matriciel, on signale que l'absence d'un véritable commutateur bidirectionnel est un des obstacles principaux à l'essor du convertisseur matriciel. En raison de l'absence de lien courant continu, il n'y a aucun découplage entre l'entrée et la sortie du convertisseur et cela pourrait entraîner des problèmes de stabilité. En outre, la protection du convertisseur matriciel dans une situation de défaut présente un problème [8], [9].

### I.4.4 : Convertisseur multi-niveaux

Depuis le développement de l'onduleur de tension à trois niveaux NPC (Neutral-Point-Clamped), proposé la première fois en 1981 par Nabae, plusieurs autres topologies multi-niveaux de convertisseur ont été rapportées dans la littérature. Le principe des cinq topologies est illustré à la figure suivante :

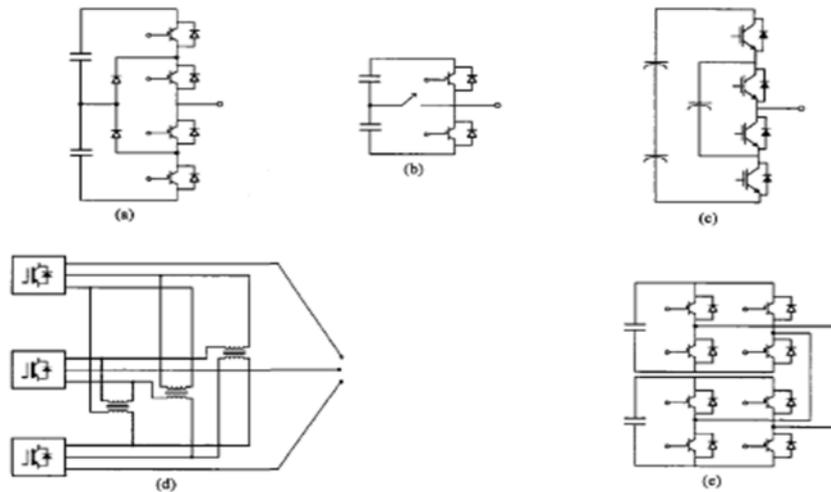


Fig. (I.11) : topologies multi-niveaux.

- Configuration à diodes de bouclage (diode clamps).
- Configuration à commutateurs d'interconnexion bidirectionnels.
- Configuration à condensateur flotteur (flying capacitor).
- Configuration à onduleurs triphasés multiples.
- Configuration à onduleurs monophasés en pont cascades.

L'idée générale derrière la technologie de convertisseur multi-niveaux est de créer une tension sinusoïdale (en forme d'escalier) à partir de plusieurs niveaux de tension.

Chaque phase est capable de produire trois niveaux ( $-U_{dc}$ ,  $0$ ,  $U_{dc}$ ) à la sortie, ce qui permet des schémas de modulation très sophistiqués souvent basés sur la modulation [SVPWM]. Un avantage majeur pour les applications à haute tension est que la tension maximale courant continu, appliquée aux commutateurs est la moitié de la tension du lien courant continu. Ceci provient des diodes connectées à la prise milieu du lien courant continu. Rien ne garantit que la tension des condensateurs conserve sa valeur à la demie de la tension du lien courant continu. Plusieurs solutions ont été proposées pour maintenir la tension du point milieu. Un contrôle actif par la commande appropriée des durées de commutation tout en produisant une forme d'onde de sortie correcte semble être une solution attrayante [9].

### I.4.4.1 : Avantages du convertisseur multi-niveaux

Au début, le but principal du convertisseur multi-niveaux était la possibilité de réaliser des convertisseurs ayant des capacités de tension plus élevées. À mesure que la dimension des composants augmente et que les propriétés de commutation et de conduction s'améliorent, les avantages à utiliser des convertisseurs multi-niveaux deviennent de plus en plus évidents. Pour obtenir la même performance harmonique, la fréquence de commutation d'un convertisseur multi-niveaux peut être réduite à 25% de la fréquence de commutation d'un convertisseur à deux niveaux, ce qui entraîne une réduction des pertes par commutation [10].

### I.4.4.2 : Inconvénients du convertisseur multi-niveaux

L'inconvénient le plus généralement rapporté des convertisseurs multi-niveaux avec un lien courant continu, à prises multiples, provient du déséquilibre de tension entre les condensateurs qu'il contient [11].

## I.5 : Applications des onduleurs

### I.5.1 : Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone

La vitesse d'un moteur synchrone est fixée par la pulsation des courants statiques. Pour changer de vitesse il faut donc changer la fréquence des tensions d'alimentation. Il faut donc redresser la tension du réseau puis l'onduler à la fréquence désirée [12].

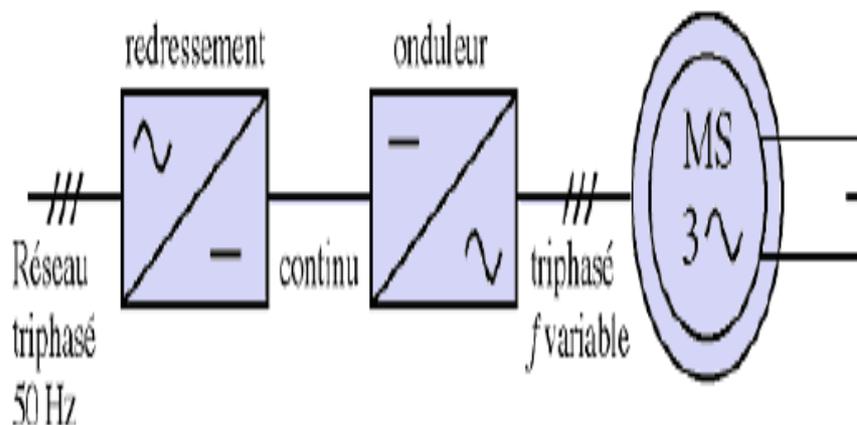


Fig. (I.12) : réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone

### Remarque

Pour que la puissance du moteur reste nominale lorsque la fréquence varie, il faut en fait conserver le rapport  $(f/V)$  constant. (Si la fréquence augmente, il faut augmenter la tension d'alimentation proportionnellement).

### **I.6 : Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté la théorie sur les onduleurs, sa constitution physique élémentaire, leur fonctionnement, leurs principales applications et nous avons présenté les différentes structures des onduleurs.

Dans le chapitre qui suit, nous présenterons la modélisation des onduleurs.

### II.1 : Introduction

Avec le développement de l'électronique de puissance et des composants à semi-conducteurs, la technique des onduleurs multi niveaux représente un domaine de recherche important. D'autre part, on cherche à obtenir des grandeurs de sortie ayant une meilleure définition, c'est-à-dire présentant un contenu harmonique réduit. Il existe plusieurs topologies de la conversion multi niveaux [14].

La première topologie a été initialement proposée par A.Nabac en 1981 pour la génération de plusieurs niveaux de tension.

Dans ce chapitre, nous allons étudier en détail l'onduleur de tension à trois niveaux de type NPC (structure et principe de fonctionnement). Nous présenterons aussi brièvement l'onduleur à cinq et à sept niveaux de type NPC.

Dans le cadre de cette étude nous établissons le modèle mathématique de l'onduleur à trois niveaux de tension de type NPC en mode commandable, en utilisant la notion de fonctions de connexion des interrupteurs et des demi-bras [14].

### II.2 : Modélisation d'un onduleur à trois niveaux à structure NPC

#### II.2.1 : Structure de l'onduleur à trois niveaux

L'idée de base de l'onduleur NPC est l'obtention d'une tension de sortie à trois niveaux par la superposition de deux interrupteurs élémentaires alimentés chacun par une source de tension continue distincte.

L'onduleur triphasé à trois niveaux utilisé est constitué de trois bras et de deux sources de tension continue. Chaque bras comporte quatre interrupteurs en série et deux diodes médianes. Chaque interrupteur est composé d'un transistor et une diode montée en tête bêche, [14].

Le point milieu de chaque bras est relié à une alimentation continue, de force électromotrice (E). A l'aide d'un diviseur de tension capacitif formé par les condensateurs de filtrage C1 et C2 de même capacité, on obtient deux sources secondaires de tension continue délivrant chacune une demi tension ( $E/2$ ). Étant connectés entre eux en un point neutre noté O. Ces derniers sont identiques de manière à éviter le déséquilibre de charge ( $C1=C2$  c'est-à-dire  $U_{c1}=U_{c2}$ ).

Le point O est connecté avec les deux diodes médianes (DDK1, DDK2) [15]. La figure (II.1) fournit une représentation schématique de cet onduleur.

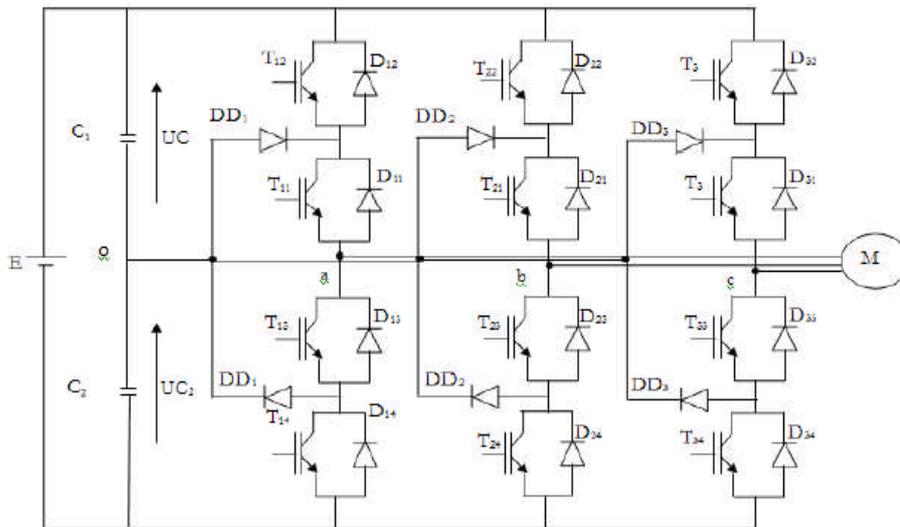


Fig. (II.1): Onduleur triphasé à trois niveaux

Pour simplifier la complexité de la structure de l'onduleur à trois niveaux, on présente chaque paire (Transistor - diode) par un seul interrupteur bidirectionnel TDKS (Fig. (II-1-a)), et vue la symétrie de la structure, on présente la configuration d'un seul bras (Fig. (II-1-b)).



Fig.(II-1-a): Interrupteur bidirectionnel équivalent de la paire Transistor – diode

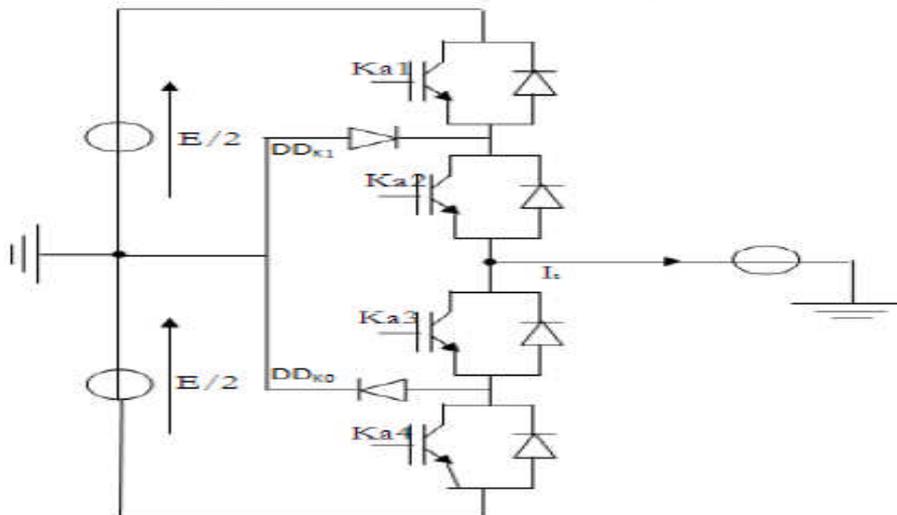


Fig.(II-1-b): Un bras de l'onduleur à trois niveaux de type NPC

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs dépend de :

- La commande externe BKS (l'ordre d'amorçage ou de blocage du semi-conducteur bidirectionnel TKS).
- Une commande interne définie par les signes du courant du bras.

- Pour éviter la mise en conduction simultanée des quatre interrupteurs d'un seul bras, qui provoque un court circuit aux bornes des sources continues, et par conséquent, le risque de distorsion des condensateurs et des composants semi-conducteurs par surintensité, qui peut engendrer la destruction par surtension des interrupteurs lors d'ouvertures simultanée de ces derniers, on adopte la solution classique suivante : On doit réaliser une commande complémentaire des différents interrupteurs d'un même bras de l'onduleur [15].

### II.2.2 : Configurations et fonctionnement d'un bras de l'onduleur à trois niveaux

Il faut déterminer les valeurs que peut prendre la tension simple  $V_{ao}$  entre la borne (a) de la charge et le point neutre 0. Cette tension est entièrement définie par l'état (0 ou 1) des quatre interrupteurs  $Ka1$ ,  $Ka2$ ,  $Ka3$  et  $Ka4$  du bras.

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

L'onduleur à trois niveaux étant symétrique, l'étude peut se limiter au fonctionnement d'un seul bras, (où on distingue trois configurations possibles).

On donne ci-dessous le tableau récapitulatif tableau (II-1) qui représente la tension de sortie  $V_{ao}$  d'un onduleur NPC à trois niveaux en fonction de l'état des interrupteurs. La tension aux bornes des interrupteurs de puissance n'excède jamais la moitié du bus d'entrée, [16].

A la différence de l'onduleur à deux niveaux, chaque demi-bras de l'onduleur à trois niveaux utilise non pas un interrupteur bidirectionnel mais deux. Ce qui permet d'effectuer une commande décalée [16].

#### ➤ Première configuration {1100}

$Ka1$ ,  $Ka2$  sont passants et  $Ka3$  et  $Ka4$  sont bloqués (figure (II.2)). La valeur de tension simple  $V_{ao}$  est donnée par l'équation suivante :

$$V_{ao} = +E/2$$

La tension inverse aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{ka3} = V_{ka4} = +E/2$$

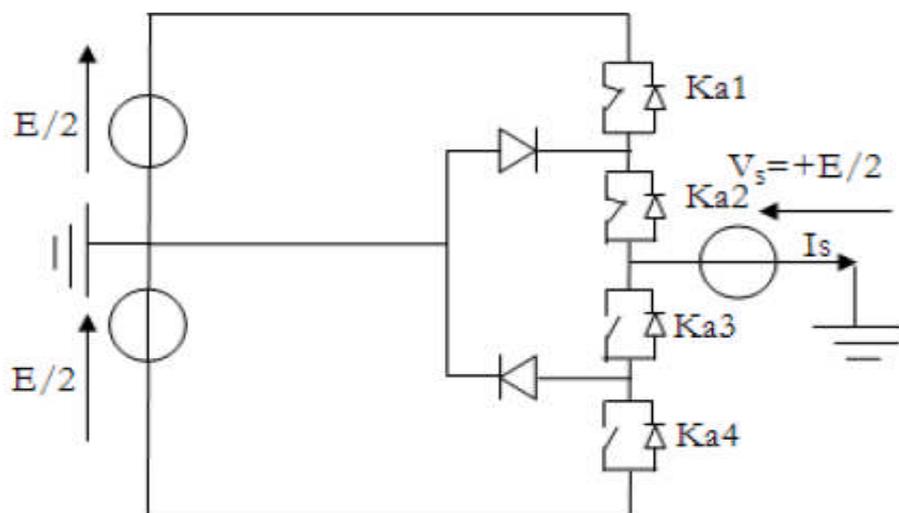


Fig. (II-2): 1<sup>ère</sup> configuration du 1<sup>er</sup> bras

➤ **Deuxième configuration {0110}**

Ka2, Ka3 sont passants et Ka1 et Ka4 sont bloqués (figure (II-3)), le point a est relié directement au point neutre 0. La tension simple  $V_{ao}$  est nulle :

$$V_{ao} = 0$$

La tension inverse aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{ka1} = V_{ka4} = +E/2$$

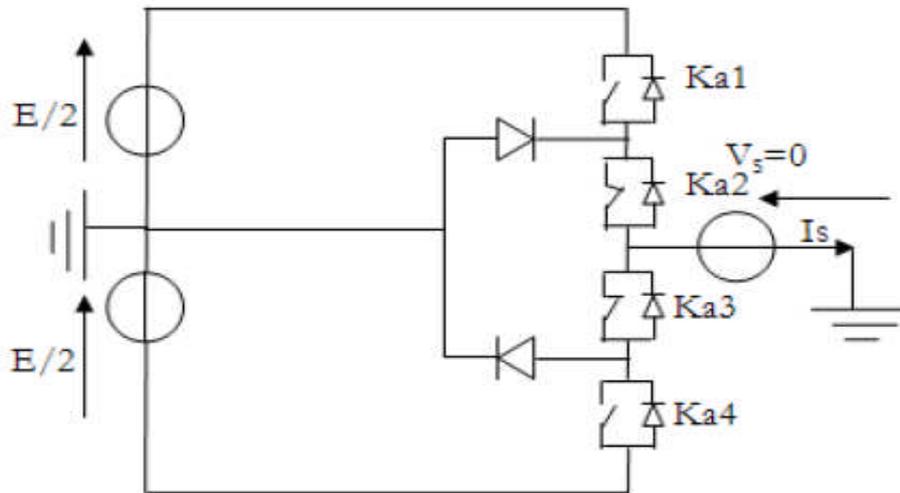


Fig. (II-3): 2<sup>ème</sup> configuration du 1<sup>er</sup> bras

➤ **Troisième configuration {0011}**

Ka3, Ka4 sont passants et Ka1 et Ka2 sont bloqués (figure (II-4)), la valeur de tension simple  $V_{ao}$  est donnée par l'équation suivante :

$$V_{ao} = -E/2$$

La tension inverse aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{ka1} = V_{ka2} = +E/2$$

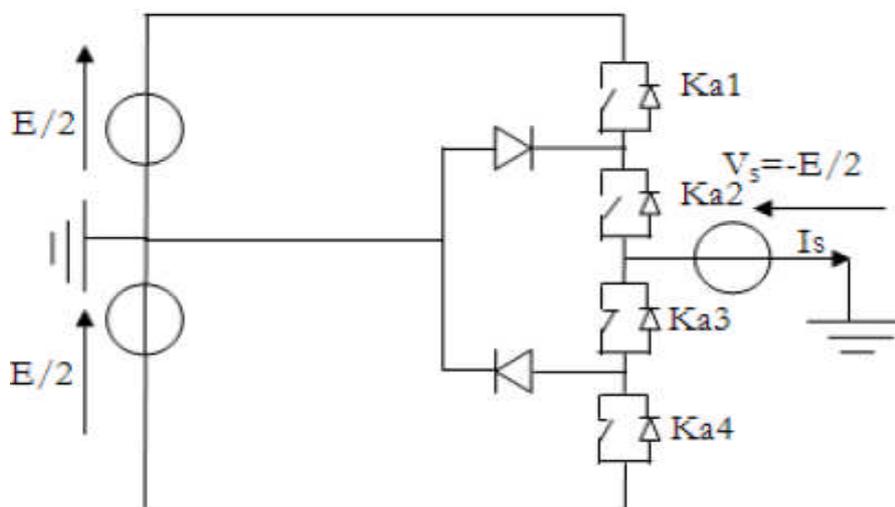


Fig. (II-4): 3<sup>ème</sup> configuration du 1<sup>er</sup> bras

Ce tableau résume les états des interrupteurs

Etat des interrupteurs				Tension De sortie $V_{ao}$
Ka1	Ka2	Ka3	Ka4	
1	1	0	0	$E/2$
0	1	1	0	0
0	0	1	1	$-E/2$

Tableau. II-1: Grandeur connue pour chacune des configurations d'un bras de l'onduleur NPC à trois niveaux

### II.3 : Modélisation d'un onduleur à cinq niveaux à structure NPC

#### II.3.1 : Structure de l'onduleur à cinq niveaux à structure NPC

L'onduleur triphasé à cinq niveaux étudié est constitué de trois bras et quatre sources de tension continue. Chaque bras comporte huit interrupteurs, plus deux diodes. Chaque interrupteur est composé d'un transistor et une diode montés en tête bêche. La figure (II.3) donne une représentation schématique d'un bras de cet onduleur [17].

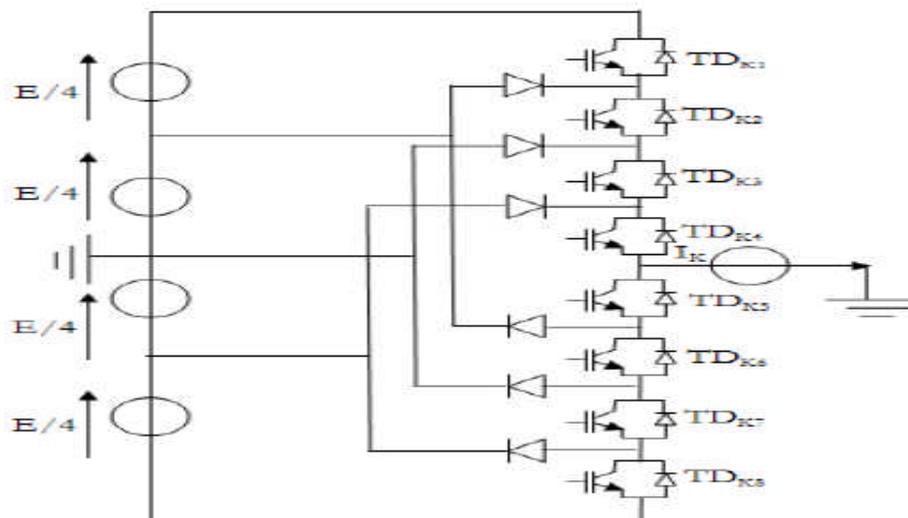


Fig. (II.3): Bras d'un onduleur NPC à cinq niveaux

### II.3.2 : Différentes configurations d'un bras de l'onduleur NPC à cinq niveaux

Une analyse topologique d'un bras montre cinq configurations possibles. Pour définir les séquences de fonctionnement de cet onduleur, définissons d'abord les différents états que peut prendre la tension simple (la tension entre le bras de l'onduleur et le point milieu fictif), par exemple. La tension simple  $V_{ao}$  est définie par l'état de huit quadruplet qui peuvent être un transistor, un GTO ou bien un IGBT ou autre avec une diode en antiparallèle. Les états possibles d'un seul bras d'interrupteurs est de  $2^5 = 32$  états que l'on peut représenter par un quadruplet de 0 et 1. Seules les cinq états suivants sont possibles [18].

➤ **Première configuration {11110000}**

$Ka1$ ,  $Ka2$ ,  $Ka3$  et  $Ka4$  sont passants et  $Ka5$ ,  $Ka6$ ,  $Ka7$  et  $Ka8$  sont bloqués (figure II-4)), la valeur de tension simple  $V_{ao}$  est donnée par l'équation suivante :

$$V_{ao} = +E/2$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{ka5} = V_{ka6} = V_{ka7} = V_{ka8} = +E/4$$

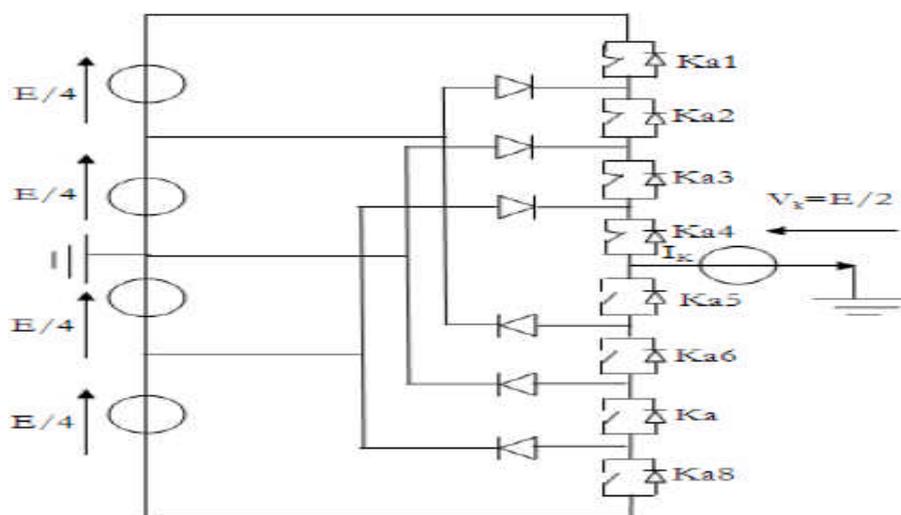


Fig. (II.4): 1<sup>ère</sup> configuration du 1<sup>er</sup> bras

➤ **Deuxième configuration {01111000}**

$Ka2$ ,  $Ka3$ ,  $Ka4$  et  $Ka5$  sont passants et  $Ka6$ ,  $Ka7$ ,  $Ka8$  et  $Ka1$  sont bloqués (figure(II.5)), la valeur de tension simple  $V_{ao}$  est donnée par l'équation suivante :

$$V_{ao} = +E/4$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{ka1} = V_{ka6} = V_{ka7} = V_{ka8} = +E/4$$

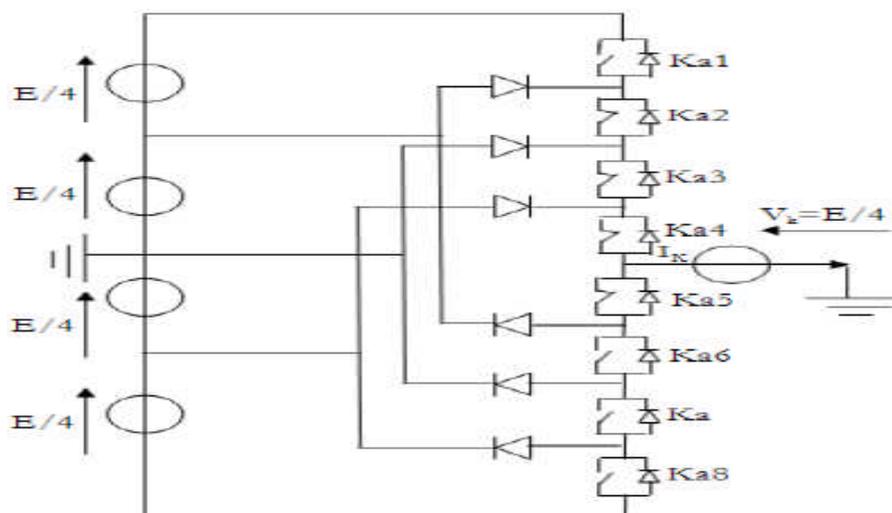


Fig. (II.5): 2<sup>ème</sup> configuration du 1<sup>er</sup> bras

➤ **troisième configuration {00111100}**

Ka3, Ka4, Ka5 et Ka6 sont passants et Ka7, Ka8, Ka1 et Ka2 sont bloqués (figure(II.6)), la valeur de tension simple  $V_{ao}$  est donnée par l'équation suivante :

$$V_{ao} = 0$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{ka1} = V_{ka2} = V_{ka7} = V_{ka8} = +E/4$$

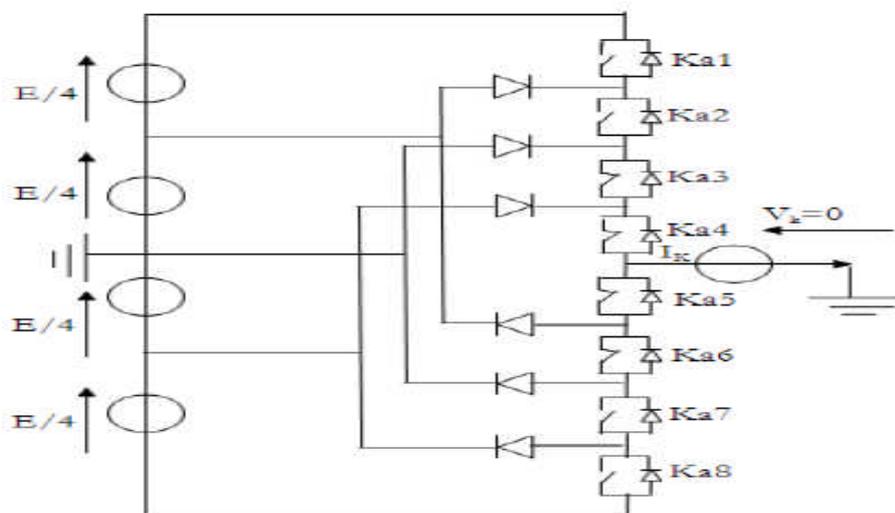


Fig.(II.6): 3<sup>ème</sup> configuration du 1<sup>er</sup> bras

➤ **quatrième configuration {00011110}**

Ka4, Ka5, Ka6 et Ka7 sont passants et Ka8, Ka1, Ka2 et Ka3 sont bloqués (figure(II.7)), la valeur de tension simple  $V_{ao}$  est donnée par l'équation suivante :

$$V_{ao} = - E/4$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{ka1} = V_{ka2} = V_{ka3} = V_{ka8} = +E/4$$

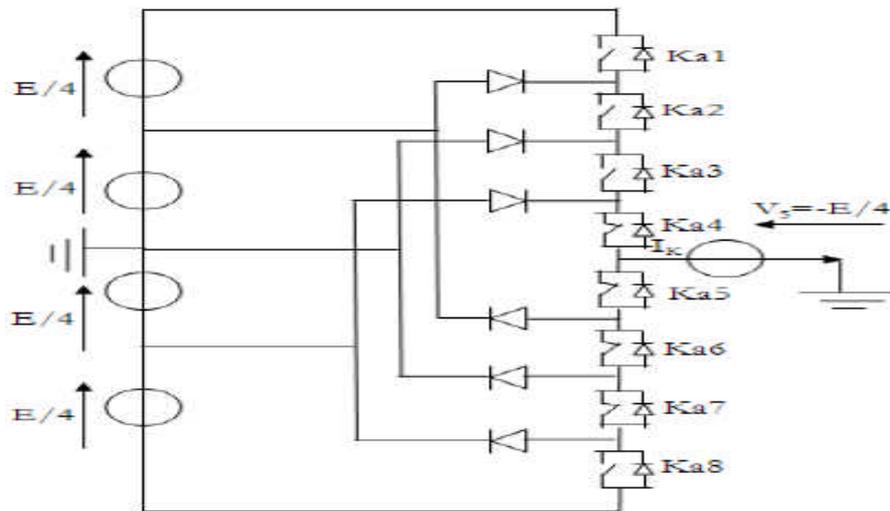


Fig. (II.7): 4<sup>ème</sup> configuration du 1<sup>er</sup> bras

➤ **Cinquième configuration {00001111}**

Ka5, Ka6, Ka7 et Ka8 sont passants et Ka1, Ka2, Ka3 et Ka4 sont bloqués (figure (II.8)), la valeur de tension simple  $V_{ao}$  est donnée par l'équation suivante :

$$V_{ao} = -E/2$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{ka1} = V_{ka2} = V_{ka3} = V_{ka4} = +E/4$$

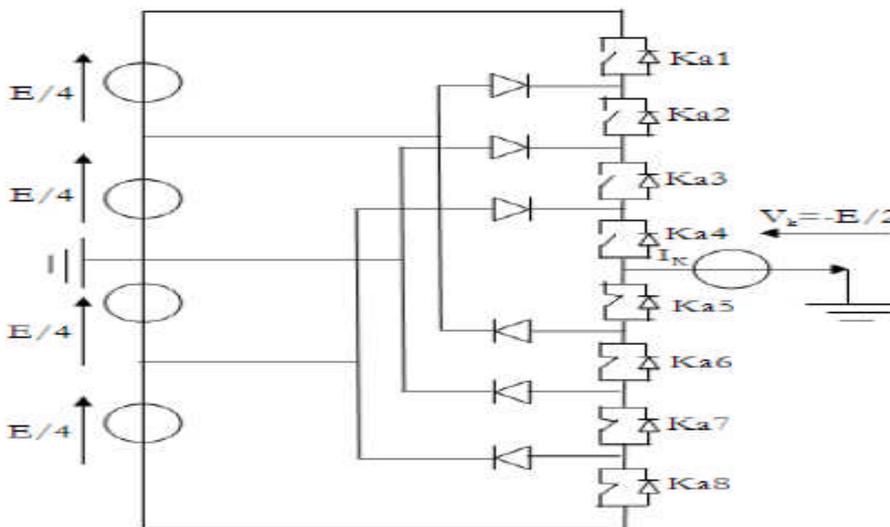


Fig. (II.8): 5<sup>ème</sup> configuration du 1<sup>er</sup> bras

## Modélisation d'un onduleur multi niveaux

Ce tableau résume les commutations de l'onduleur NPC à 5 niveaux

Etat des interrupteurs								Tension De sortie $V_{ao}$
Ka1	Ka2	Ka3	Ka4	Ka5	Ka6	Ka7	Ka8	
1	1	1	1	0	0	0	0	$E/2$
0	1	1	1	1	0	0	0	$E/4$
0	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	0	$-E/4$
0	0	0	0	1	1	1	1	$-E/2$

Tableau II.2: Table de commutation de l'onduleur NPC à 5 niveaux

### II.4 : Les fonctions de conversion

Un convertisseur statique est un procédé de traitement électrique de l'énergie électrique, il n'est rien d'autre qu'un modulateur de la puissance transitant par un assemblage d'interrupteurs disposés entre deux sources polyphasées. Cette modulation résulte à la fois d'une fonction spatiale des connexions réalisées par les semi-conducteurs et d'une fonction temporelle de leurs états imposés par la commande. Il en découle une ou plusieurs fonctions de conversion globales qui apparaissent comme étant les grandeurs de réglage du transfert énergétique.

Nous présentons les fonctions de conversion sous forme de structures matricielles, puisque dans le cas général, on envisage un réglage de la puissance échangée entre deux sources polyphasées [19].

Pour des besoins de modélisation, nous présentons le schéma de la figure (II.9) où les semi-conducteurs sont remplacés par des interrupteurs mécaniques.

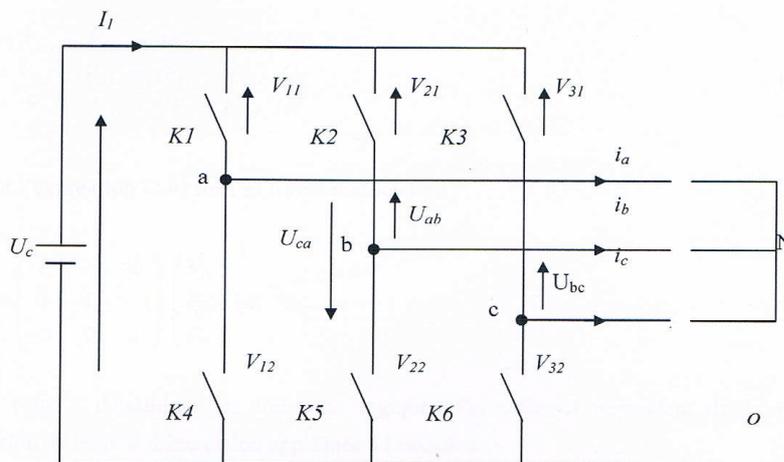


Fig.(II.9) : schéma électrique équivalent de l'onduleur de tension.

### II.4.1 : Fonction de connexion des interrupteurs

Chaque interrupteur  $K_i$  (avec  $i=1,2,\dots,6$ ) idéal introduit une fonction de connexion  $F_{kl}$  qui vaut :

$$F_{kl} = 1 \text{ Si } K_{kl} \text{ est fermé.}$$

$$F_{kl} = 0 \text{ Si } K_{kl} \text{ est ouvert.}$$

Avec :

$$k=1, 2,3$$

$$l=1,2$$

### II.4.2 : Fonction de conversion des interrupteurs

Les deux interrupteurs d'un même bras sont commandés d'une manière complémentaire. Quand l'un est conducteur, l'autre est impérativement bloqué.

$$V_{a0} = F_{11}.U_c$$

$$V_{b0} = F_{21}.U_c$$

$$V_{c0} = F_{31}.U_c$$

$U_c$  : La tension d'alimentation de l'onduleur par rapport au neutre.

$$U_{ab} = V_{a0} - V_{b0} = (F_{11} - F_{21}).U_c$$

$$U_{bc} = V_{b0} - V_{c0} = (F_{21} - F_{31}).U_c$$

$$U_{ac} = V_{a0} - V_{c0} = (F_{11} - F_{31}).U_c$$

Ecrivant l'expression (2.2) sous sa forme matricielle :

$$\begin{pmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} F_{11} \\ F_{21} \\ F_{31} \end{pmatrix} \cdot U_c$$

Il reste à déterminer les fonctions logiques  $F_{kl}$ , celles-ci dépendent de la stratégie de modulation de largeur d'impulsion appliquée à l'onduleur.

### II.5 : Modulation de largeur d'impulsions

L'onduleur de tension à MLI est habituellement choisi pour sa réponse très rapide et ses performances élevées. Il permet d'imposer à la machine des ondes de tension à amplitude et fréquence variables.

A partir d'un réseau d'alimentation standard (220/380V, 50 Hz) après redressement et filtrage, la tension  $U_c$  (étage continu) est appliquée à l'onduleur. Plusieurs types de MLI se présentent pratiquement, parmi lesquelles on peut citer :

- Les modulations sinus-triangle effectuent la comparaison d'un signal de référence sinusoïdal à une porteuse généralement triangulaire.
- Les modulations pré-calculées pour lesquelles les angles de commutation sont calculés hors ligne pour annuler certaines composantes du spectre de la tension, et donner une certaine onde fondamentale.
- Les modulations post-calculées appelées aussi MLI régulières symétriques ou MLI vectorielles dans lesquelles les angles de commutation sont calculés en ligne.

### II.5.1 : Modulation de largeur d'impulsions sinus-triangle

La MLI permet de former à la sortie d'un onduleur chaque alternance de la tension à l'aide d'une succession de créneaux rectangulaires, dont la largeur varie suivant une loi de commande qui a pour but de :

- Repousser les harmoniques à des fréquences élevées pour faciliter leur filtrage.
- Faire varier la valeur efficace du fondamental de la tension de sortie.
- Faire varier la fréquence du fondamental de la tension de sortie.

### II.5.2 : Principe Modulation de largeur d'impulsions sinus-triangle

Elle consiste à convertir une modulante  $V_{ref}(t)$  (tension de référence au niveau commande), généralement sinusoïdale, en une tension sous forme de créneaux successifs générée à la sortie de l'onduleur (niveau puissance).

D'un point de vue électronique, son principe repose sur la comparaison de la modulante avec la porteuse  $V_{p(t)}$  (tension à haute fréquence de commutation) figure(II.10).

Le signal de commande de l'interrupteur électronique d'un bras de l'onduleur triphasé  $K_i=1, 2, 3$  est fermé si l'onde de référence de la phase correspondante est supérieure ou égale à la porteuse triangulaire.

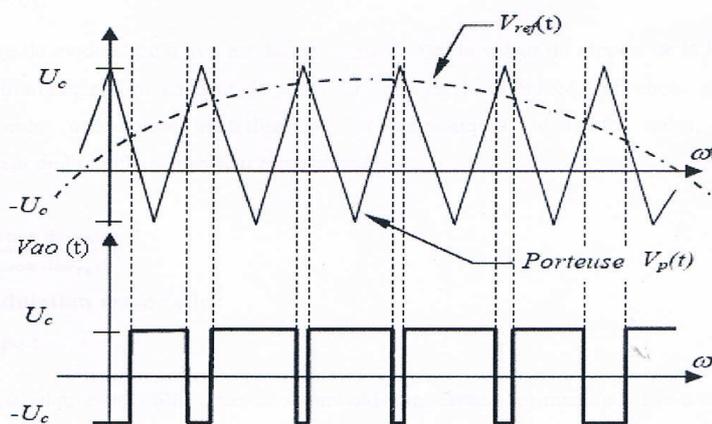


Fig.(II.10) : MLI sinus triangle

Selon la figure (II.10) la tension de sortie de l'onduleur a les caractéristiques suivantes :

$$\text{Si : } V_{ref}(t) > V_p(t) \quad \Rightarrow \quad V_{ao} = U_c$$

$$\text{Si : } V_{ref} < V_p(t) \quad \Rightarrow \quad V_{ao} = -U_c$$

La fréquence de la MLI est égale à la fréquence de la tension de la porteuse  $V_p(t)$ .

- L'amplitude est contrôlée par l'amplitude de  $V_{ref}(t)$ .
- La fréquence du fondamental est contrôlé par la fréquence de  $V_{ref}(t)$ .

On peut régler la tension à la sortie de l'onduleur en agissant sur le coefficient de réglage 'r' défini comme suit :

$$r = \frac{V_{ref}}{V_p} = \frac{\max(V_{a0})_1}{U_c}$$

$(V_{a0})_1$ : Fondamental de la tension  $V_{a0}$  ;

$V_p$  : valeur crête de la porteuse.

La valeur maximale de la tension fondamentale (à la sortie de l'onduleur) vaut :

$$(V_{a0})_{max} = U_c r$$

L'indice de modulation « m » est défini comme étant la valeur du rapport de la fréquence de la porteuse triangulaire (ou en dent de scie) sur celle de la référence, son choix procède d'un compromis entre une bonne neutralisation de faibles rangs, et un bon fonctionnement de l'onduleur (meilleur rendement).

$$m = \frac{\text{frequence de } V_p(t)}{\text{frequence de } V_{ref}(t)}$$

## II.6 : Montée en puissance

### ➤ Pour un onduleur à deux niveaux

Pour des besoins de modélisation, nous présentons le schéma de la figure (II.11) où les semi-conducteurs sont remplacés par des interrupteurs mécaniques.

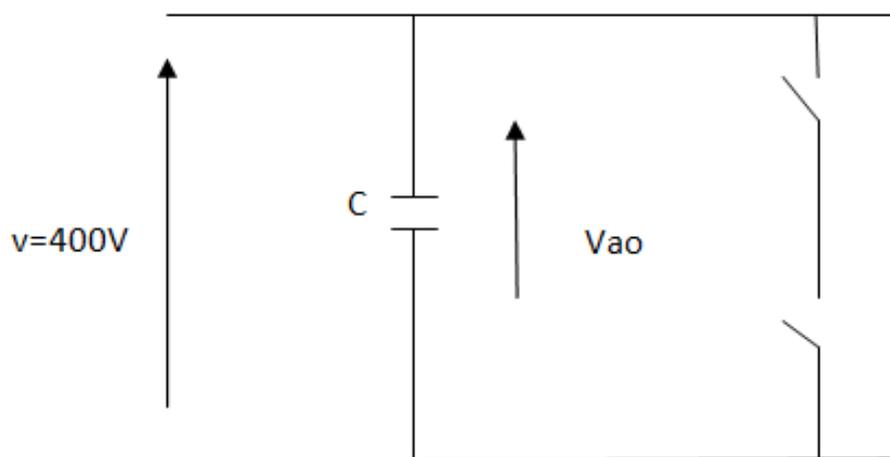


Fig.(II.11) : schéma électrique équivalent de l'onduleur de tension à deux niveaux.

D'après la figure(II.11), on trouve :

$$V=V_{ao}$$

### ➤ Pour un onduleur à trois niveaux

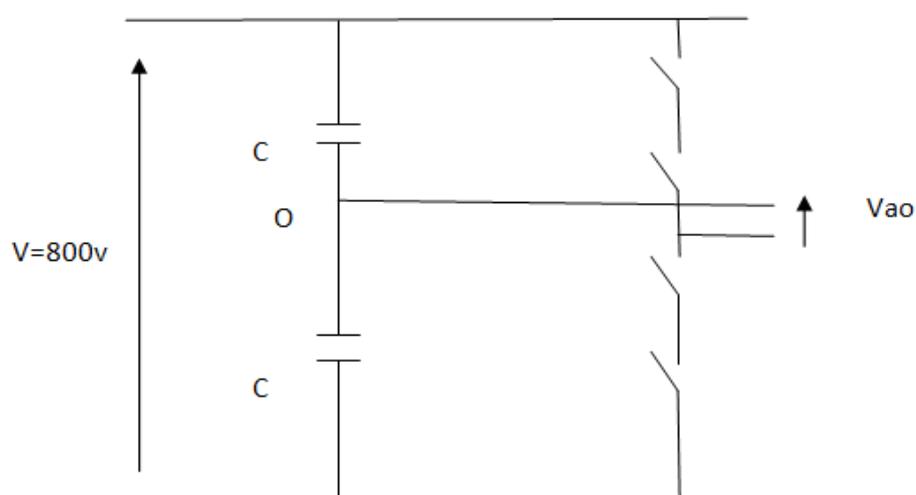


Fig.(II.12) : schéma électrique équivalent de l'onduleur de tension à trois niveaux.

D'après la figure(II.12), on trouve :

$$V=V_{ao}/2$$

### ➤ Pour un onduleur à cinq niveaux

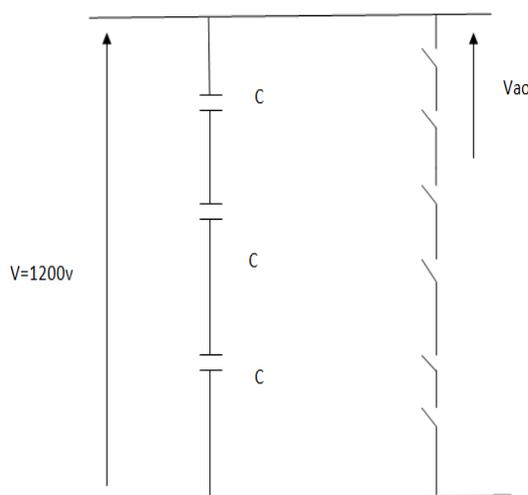


Fig.(II.13) : schéma électrique équivalent de l'onduleur de tension à cinq niveaux.

D'après la figure (II.13), on trouve :

$$V=V_{ao}/3$$

D'après les figures (II.11, 12,13), on conclue que :

Les onduleurs multi niveaux jouent un rôle très important dans les domaines de puissance. La montée en niveaux assure de grandes puissances à la sortie d'onduleur.

### II.7 : Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la structure topologique d'un onduleur multi niveaux de tension triphasé de type NPC (Neutral Point Clpamp Converter), onduleur à trois niveaux, ainsi que l'onduleur à cinq niveaux et leur principe de fonctionnement.

La forme des ondes de tensions obtenues  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$  n'est pas sinusoïdale, elle est très riche en harmonique. Pour les applications de basse et moyenne puissance les ondes de tension rectangulaires ou en escalier sont acceptables. Mais pour les applications de forte puissance, les ondes de faibles perturbations sont nécessaires, avec la disponibilité du semi conducteur de puissance.

Les harmoniques peuvent être réduits à l'aide de la technique MLI. Il existe plusieurs stratégies de commande pour varier le gain de l'onduleur, parmi ces stratégies on peut citer la MLI sinus-triangle, que nous aborderons dans le prochain chapitre.

### III.1. Introduction

La commande souvent adaptée aux convertisseurs statiques est la stratégie MLI, plusieurs méthodes ont été développées avec l'objectif de générer à la sortie de l'onduleur une tension sinusoïdale ayant le moins d'harmoniques possibles [20]. Dans notre cas, nous utilisons la technique de la modulation de largeur d'impulsion (MLI).

Après avoir rappelé le principe de la commande MLI, nous allons l'implémenter sous environnement MATLAB/SIMULINK.

La simulation du système à l'aide de MATLAB/SIMULINK est tout à fait justifiable en raison de ses divers avantages uniques comme la facilité et l'efficacité de programmation élevées, l'interface graphique élégante et son architecture ouverte permettant l'adaptation à un grand nombre de cas.

### III.2. Alimentation d'une charge RL

Dans cette partie d'étude nous avons associé à la charge RL un onduleur, commandé par MLI pour une fréquence  $f=50$  Hz, afin de visualiser l'effet de l'indice de modulation « m ».  $R=10\Omega$  ;  $L=100\text{mH}$ .

#### III.2.1. Onduleur à deux niveaux

##### III.2.1.1. Pour $m=9$

La figure (III.1) suivante donne l'allure du courant de charge pour un indice de modulation  $m=9$ .

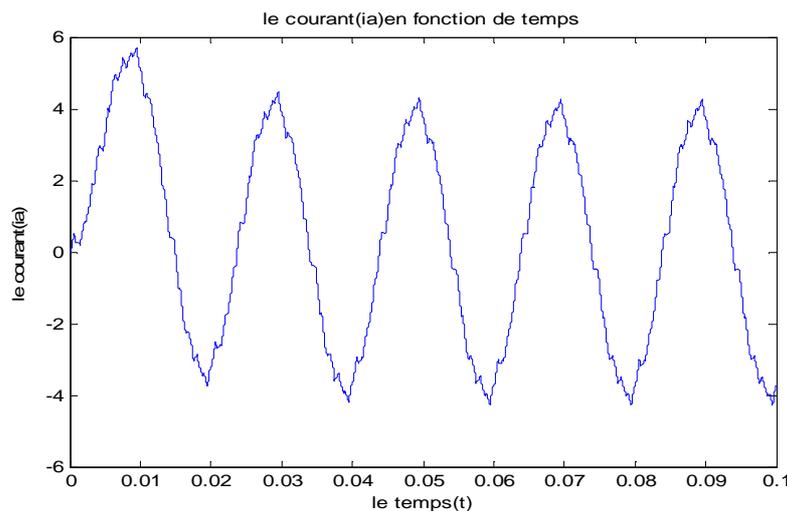


Fig. (III.1) : Courant de sortie d'un onduleur à deux niveaux pour un indice de modulation  $m=9$ .

Le spectre d'harmoniques du courant de sortie de l'onduleur à deux niveaux pour un indice de modulation  $m=9$ , est représenté par la figure suivante.

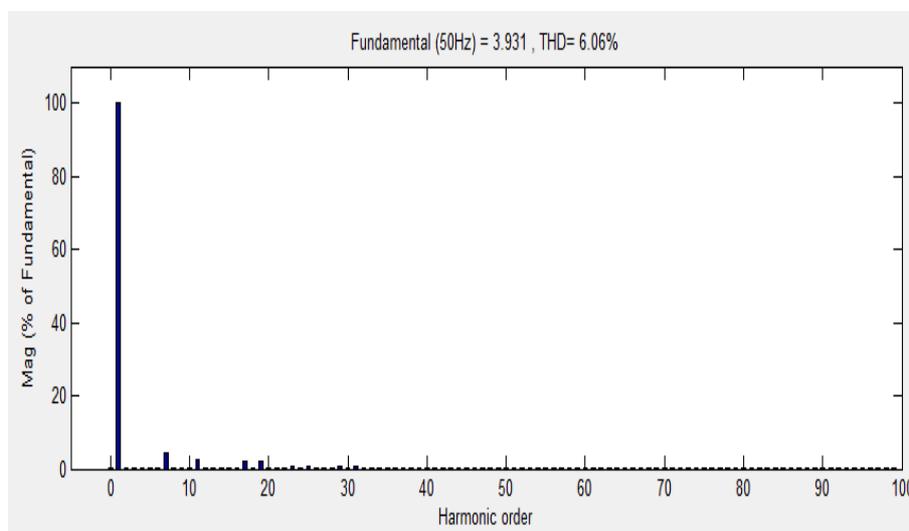


Fig. (III.2) : spectre d'harmoniques de courant de sortie de l'onduleur à deux niveaux pour un indice de modulation  $m=9$ .

La figure (III.3) suivante donne l'allure de la tension aux bornes la de charge pour un indice de modulation  $m=9$ .

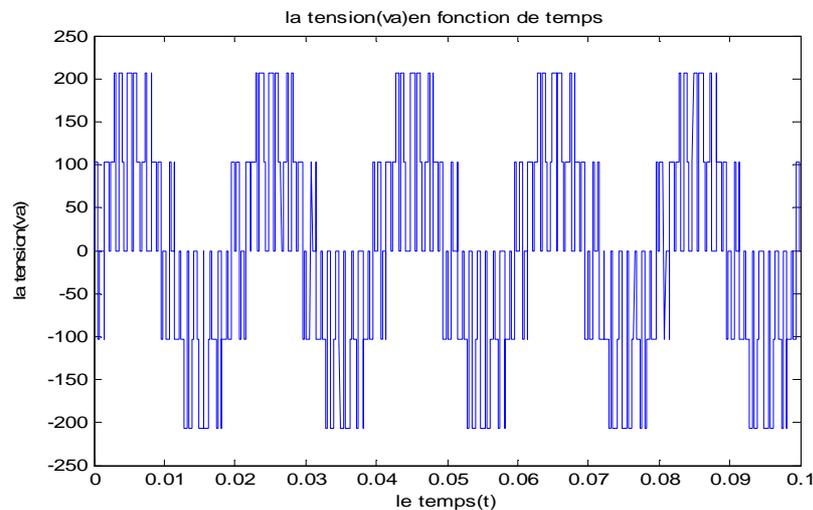


Fig. (III.3) : La tension de sortie d'un onduleur à deux niveaux pour  $m=9$ .

Le spectre d'harmoniques de la tension de sortie de l'onduleur à deux niveaux pour un indice de modulation  $m=9$  est représenté par la figure suivante :

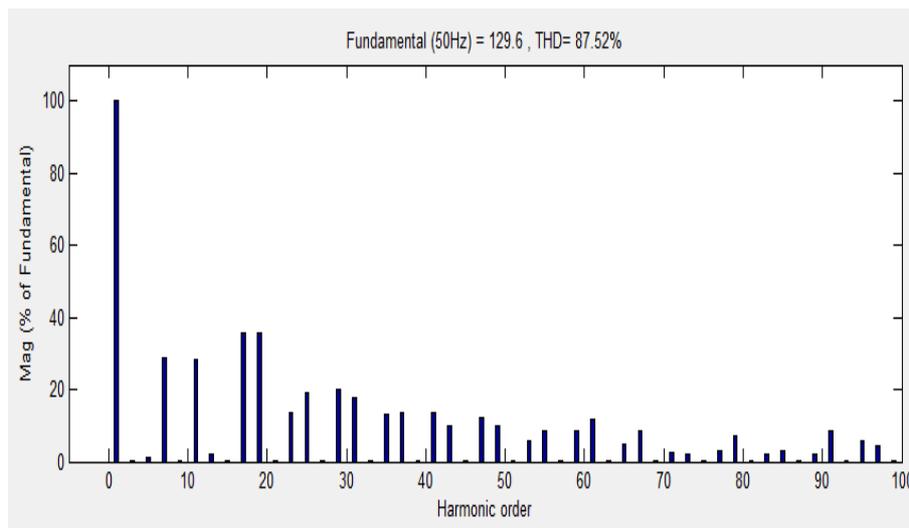


Fig. (III.4) : spectre d'harmoniques de la tension de sortie simple de l'onduleur à deux niveaux pour l'indice de modulation  $m=9$

### III.2.1.2. Pour $m=15$

Dans ce cas, on considère  $m=15$  ; et on étudie son influence sur l'évolution de la tension et du courant. La figure (III.5) représente le courant de charge.

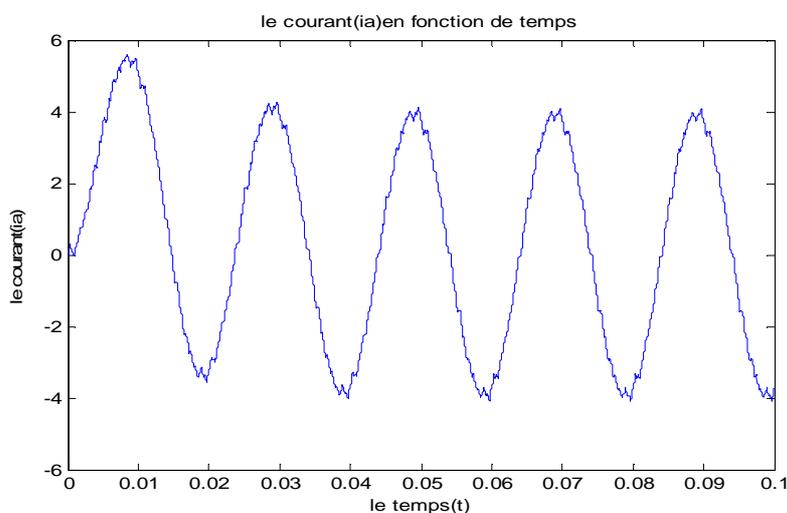


Fig. (III.5) : Le courant de sortie d'un onduleur à deux niveaux pour indice de modulation  $m=15$

Le spectre d'harmoniques du courant de sortie de l'onduleur à deux niveaux pour un indice de modulation  $m=15$  est représenté par la figure suivante :

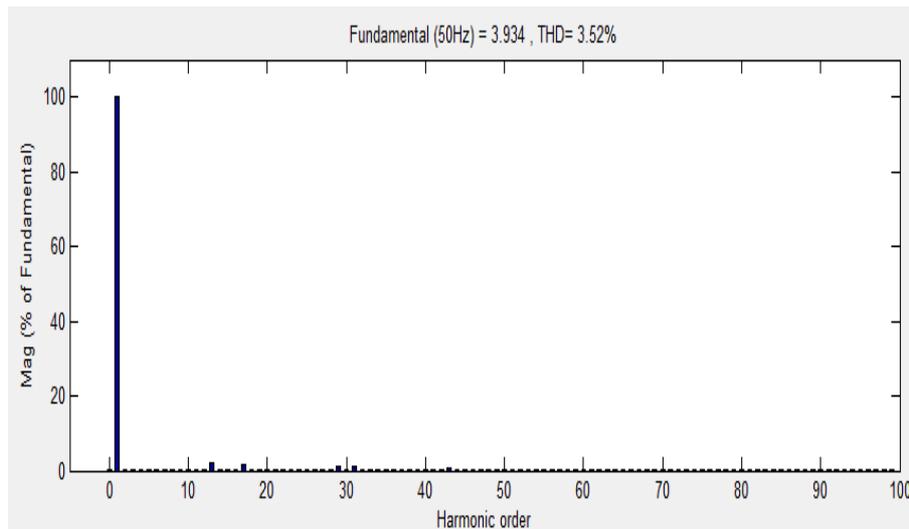


Fig. (III.6) : spectre d'harmoniques de courant de sortie de l'onduleur à deux niveaux pour Un indice de modulation  $m=15$ .

La figure (III.6) suivante donne l'allure de la tension aux bornes la de charge pour un indice de modulation  $m=15$ .

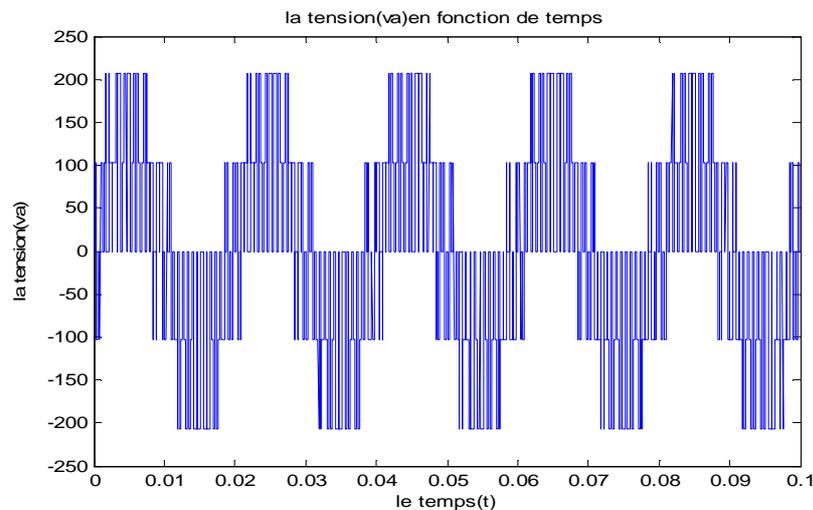


Fig. (III.6) : La tension de sortie d'un onduleur à deux niveaux pour  $m=15$

Le spectre d'harmoniques de la tension de sortie de l'onduleur à deux niveaux pour un indice de modulation  $m=15$  est représenté par la figure suivante :

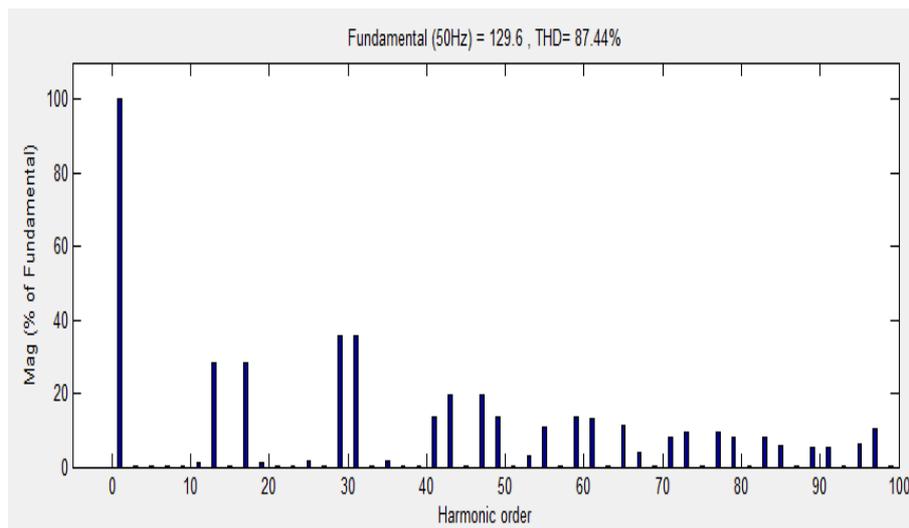


Fig. (III.7) : spectre d'harmoniques de la tension de sortie simple de l'onduleur à deux niveaux pour l'indice de modulation  $m=15$

### III.2.1.3. Pour $m=21$

L'allure du courant pour  $m=21$ , est donnée par la figure (III.8) suivante.

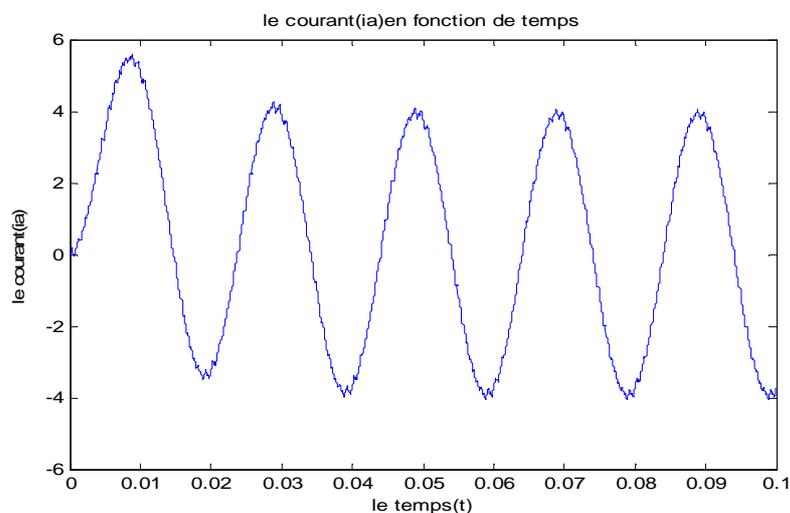


Fig. (III.8) : Le courant de sortie d'un onduleur à deux niveaux pour indice de modulation  $m=21$

Le spectre d'harmoniques du courant de sortie de l'onduleur à deux niveaux pour un indice de modulation  $m=21$  est représenté par la figure suivante :

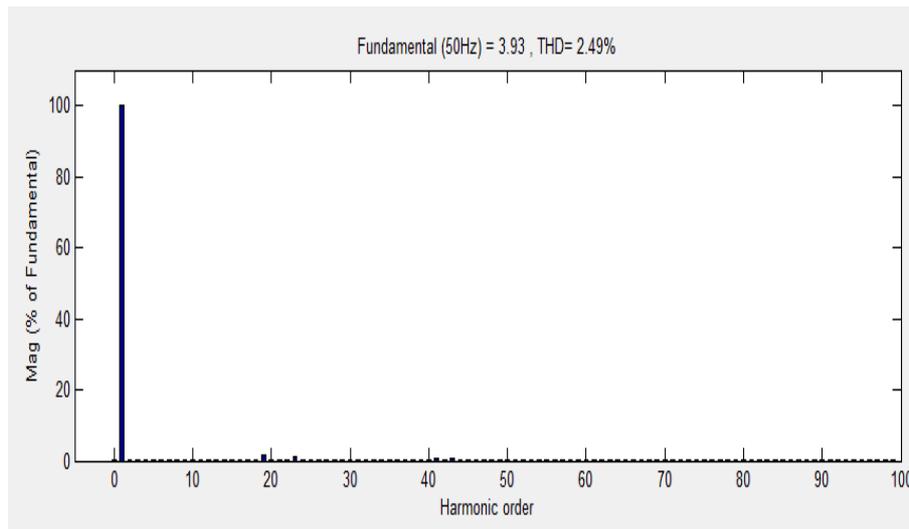


Fig. (III.9) : spectre d'harmoniques de courant de sortie de l'onduleur à deux niveaux pour un indice de modulation  $m=21$ .

Dans le cas où  $m=21$ , l'évolution de la tension aux bornes de la charge est illustrée par la figure (III.10) ci-après.

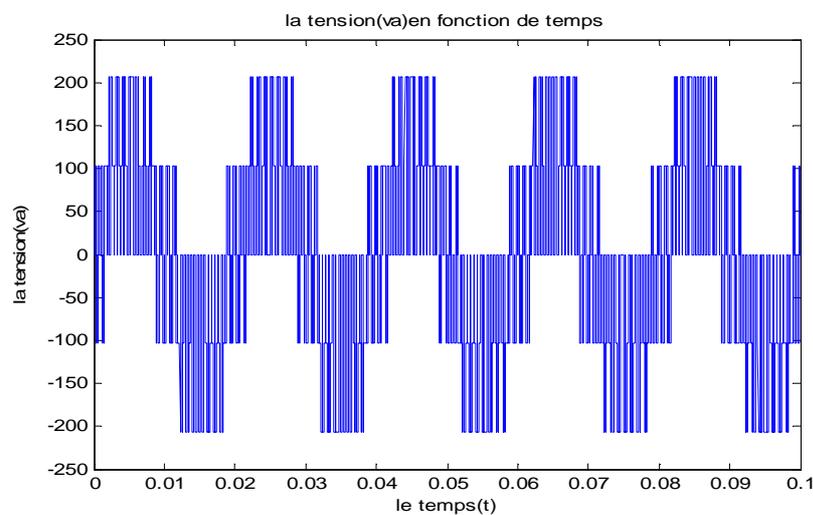


Fig. (III.10) : La tension de sortie d'un onduleur à deux niveaux pour  $m=21$

Le spectre d'harmoniques de la tension de sortie de l'onduleur à deux niveaux pour un indice de modulation  $m=21$  est représenté par la figure suivante :

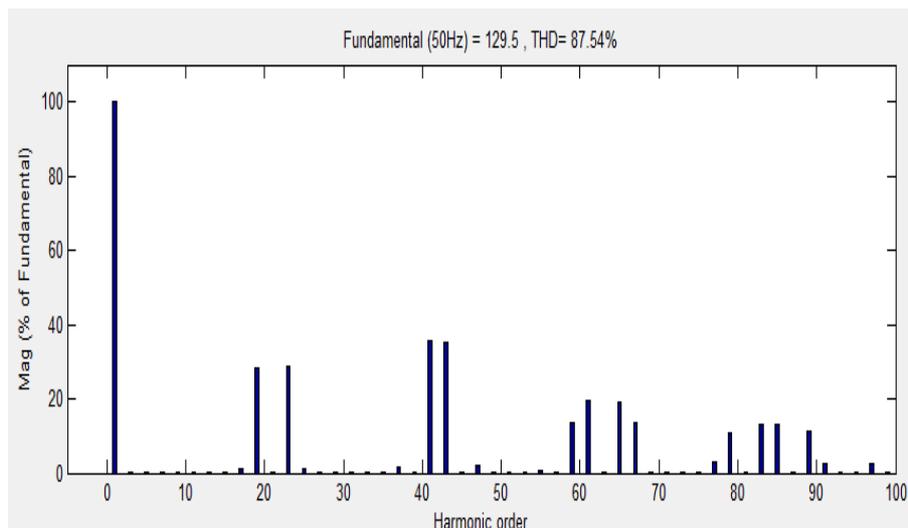


Fig. (III.11) : spectre d'harmoniques de la tension de sortie simple de l'onduleur à deux niveaux pour l'indice de modulation  $m=21$ .

### III.2.2.Simulation de l'onduleur trois niveaux

Dans cette partie, on se propose d'étudier les performances de l'onduleur à trois niveaux commandé par MLI. On s'intéresse à l'influence de l'indice de modulation  $m$ , sur l'évolution du courant de charge ainsi que la tension aux bornes de la charge.

#### III.2.2.1. Pour $m=9$

La figure (III.12) donne l'évolution du courant.

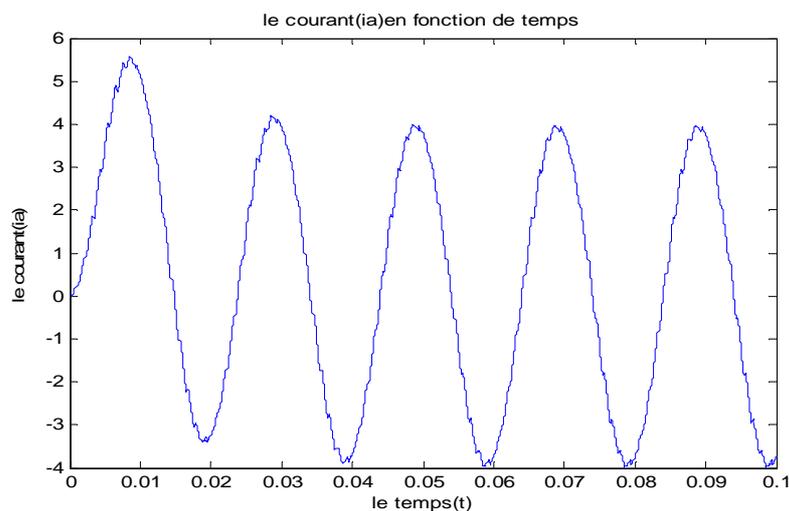


Fig. (III.12) : Le courant de sortie d'un onduleur à trois niveaux pour indice de modulation  $m=9$ .

Le spectre d'harmoniques du courant de sortie de l'onduleur à trois niveaux pour un indice de modulation  $m=9$  est représenté par la figure suivante :

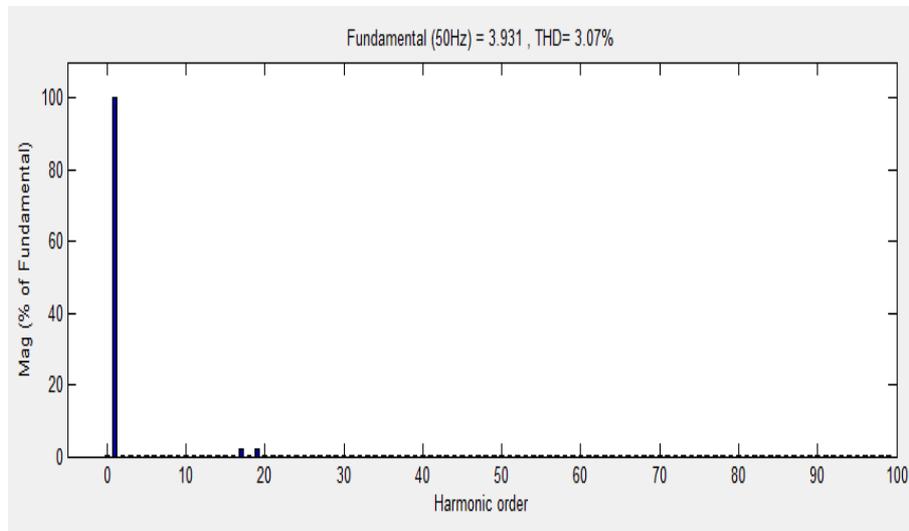


Fig. (III.13) : spectre d'harmoniques de courant de sortie de l'onduleur à trois niveaux pour un indice de modulation  $m=9$ .

La tension aux bornes de la charge RL considérée, est telle qu'illustrée par la figure (III.14) ci-dessous.

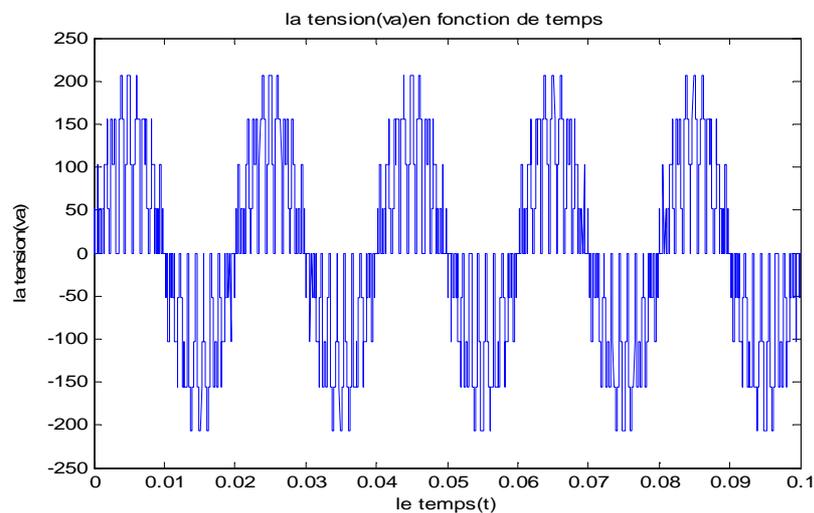


Fig. (III.14) : La tension de sortie d'un onduleur à trois niveaux pour  $m=9$

Le spectre d'harmoniques de la tension de sortie de l'onduleur à trois niveaux pour un indice de modulation  $m=9$  est représenté par la figure suivante :

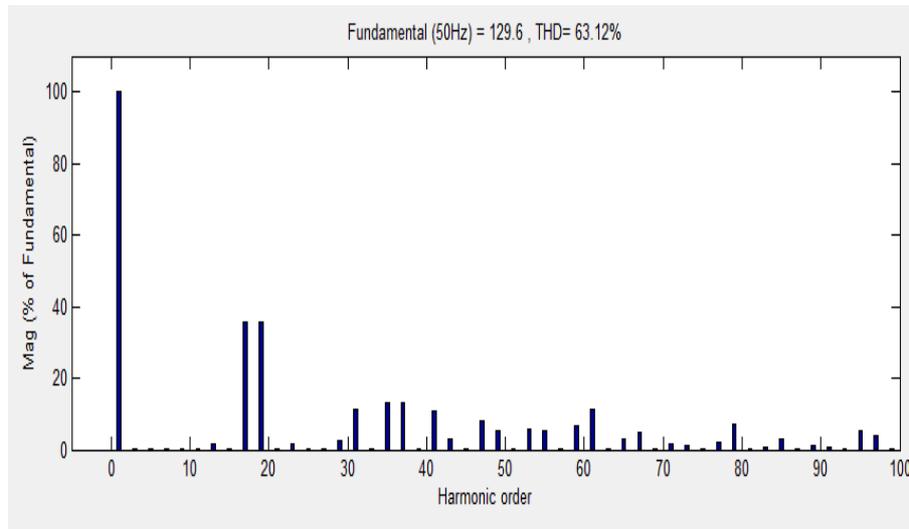


Fig. (III.15) : spectre d'harmoniques de la tension de sortie simple de l'onduleur à trois niveaux pour l'indice de modulation  $m=9$ .

### III.2.2.2. Pour $m=15$

La figure (III.16) suivante donne l'allure du courant pour  $m=15$ .

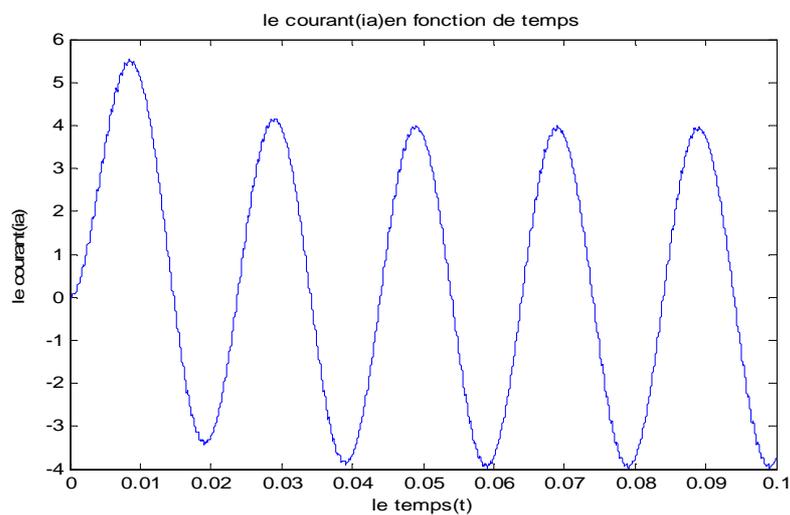


Fig. (III.16) : Le courant de sortie d'un onduleur à trois niveaux pour indice de modulation  $m=15$ .

Le spectre d'harmoniques du courant de sortie de l'onduleur à trois niveaux pour un indice de modulation  $m=15$  est représenté par la figure suivante :

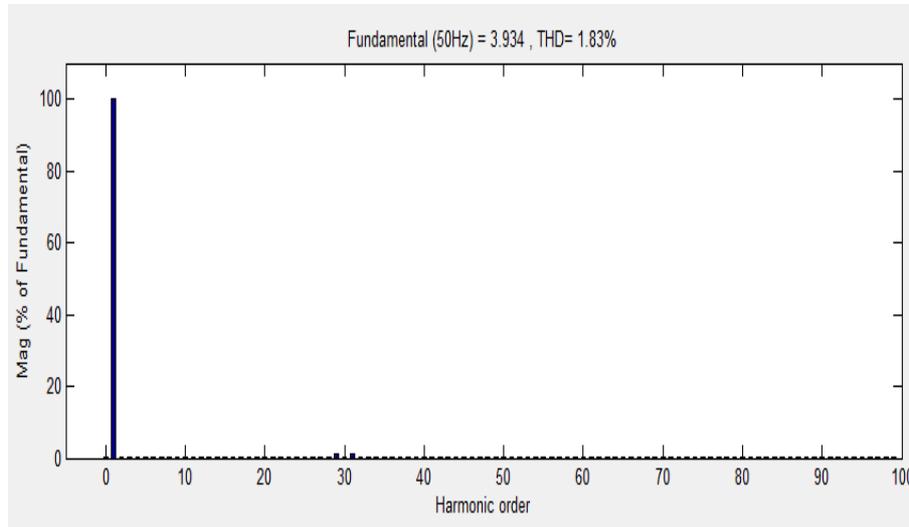


Fig. (III.17) : spectre d'harmoniques du courant de sortie de l'onduleur à trois niveaux pour un indice de modulation  $m=15$ .

La figure (III.18) représente la tension aux bornes de la charge, pour  $m=15$ .

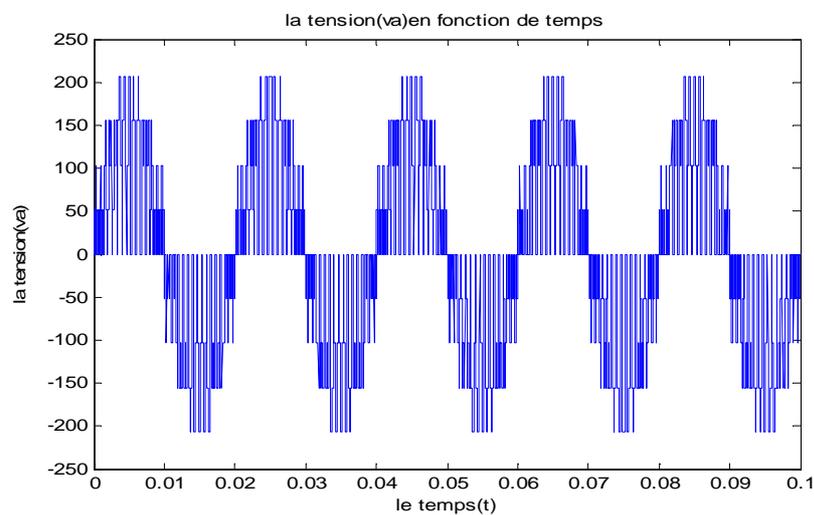


Fig. (III.18) : La tension de sortie d'un onduleur à trois niveaux pour  $m=15$

Le spectre d'harmoniques de la tension de sortie de l'onduleur à deux niveaux pour un indice de modulation  $m=15$  est représenté par la figure suivante :

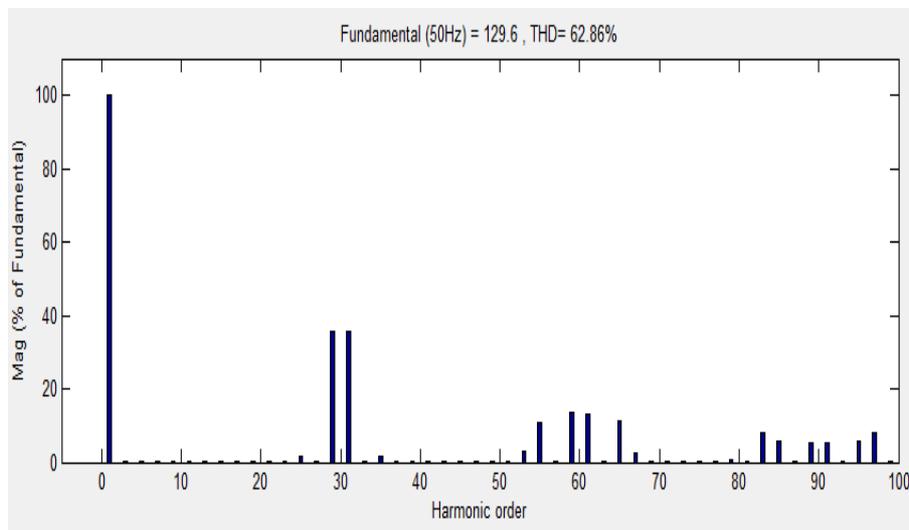


Fig. (III.19) : spectre d'harmoniques de la tension de sortie simple de l'onduleur à trois niveaux pour l'indice de modulation  $m=15$ .

### III.2.2.3. Pour $m=21$

L'évolution du courant qui traverse la charge en fonction du temps, pour  $m=21$ , est donnée par la figure (III.20).

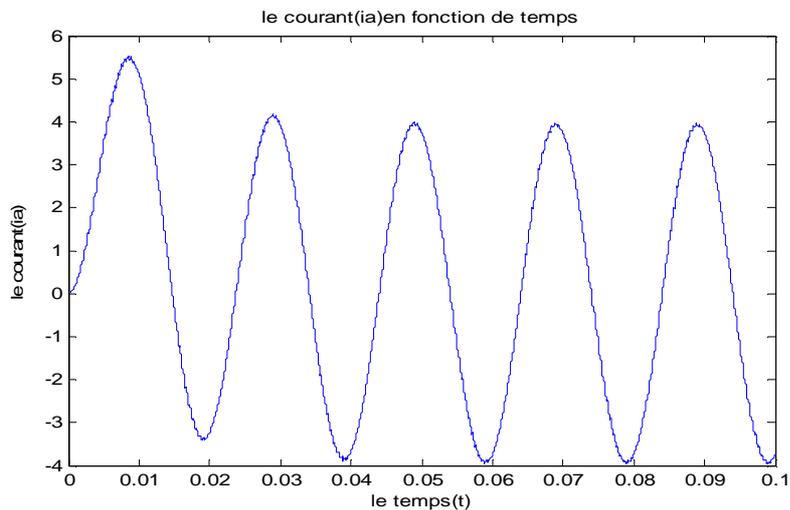


Fig. (III.20) : Le courant de sortie d'un onduleur à trois niveaux pour l'indice de modulation  $m=21$ .

Le spectre d'harmoniques du courant de sortie de l'onduleur à trois niveaux pour un indice de modulation  $m=21$  est représenté par la figure suivante :

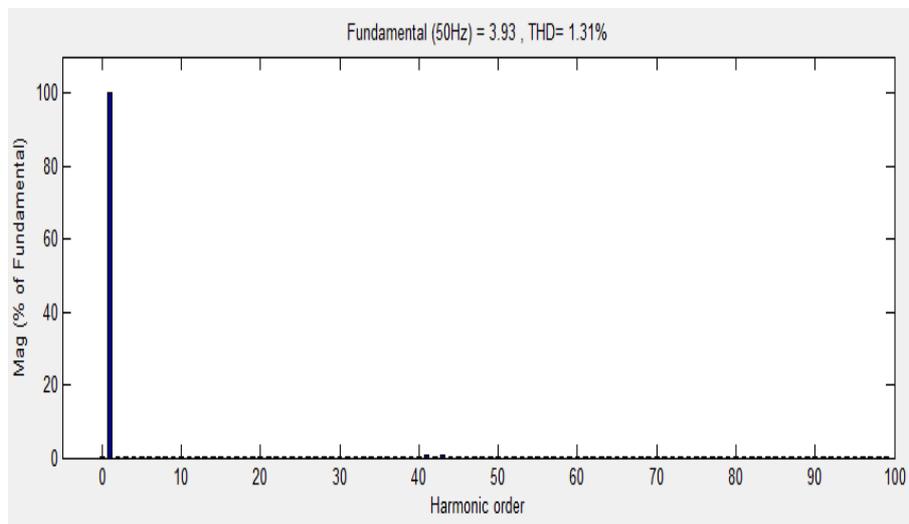


Fig. (III.21) : spectre d'harmoniques de courant de sortie de l'onduleur à trois niveaux pour un indice de modulation  $m=21$ .

La tension en fonction du temps pour  $m=21$ , est donnée par la figure (III.22) suivante.

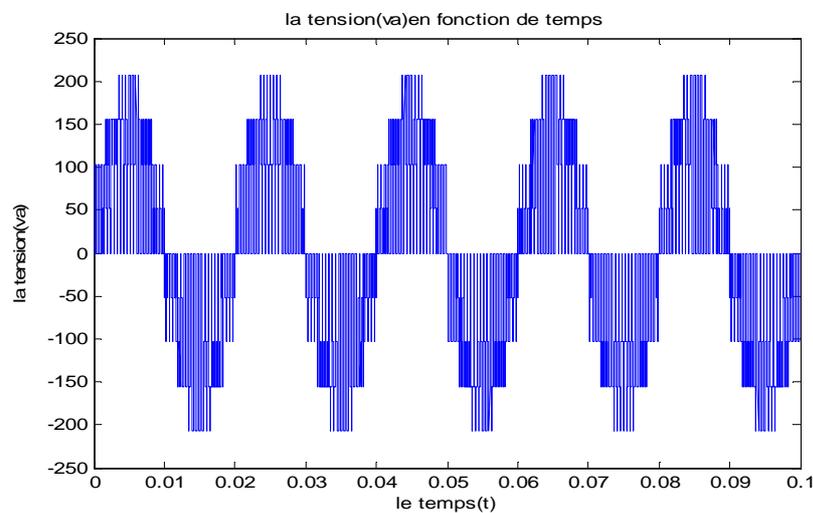


Fig. (III.22) : La tension de sortie d'un onduleur à trois niveaux pour  $m=21$

Le spectre d'harmoniques de la tension de sortie de l'onduleur à trois niveaux pour un indice de modulation  $m=21$  est représenté par la figure suivante :

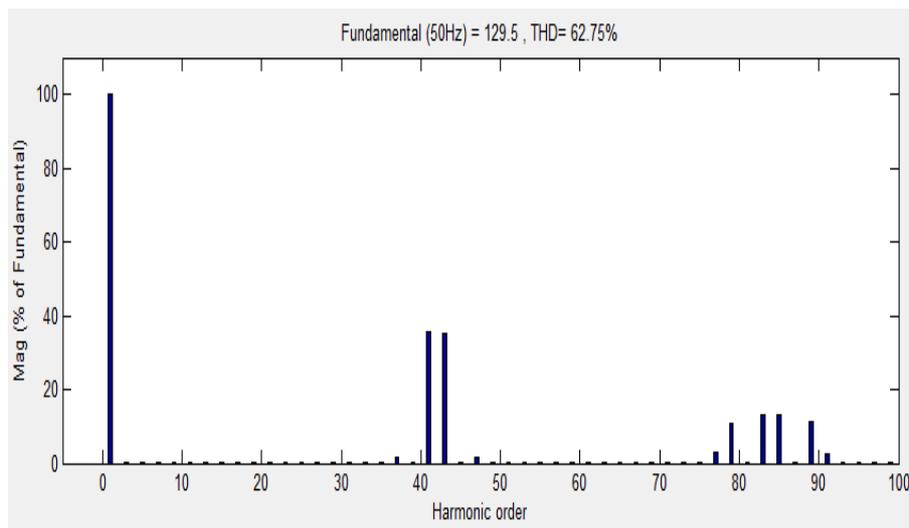


Fig. (III.23) : spectre d'harmoniques de la tension de sortie simple de l'onduleur à trois niveaux pour l'indice de modulation  $m=21$ .

### III.2.3.Simulation de l'onduleur à cinq niveaux

Dans cette partie, on s'intéresse à l'influence de l'indice de modulation  $m$ , sur l'évolution du courant de charge ainsi que la tension aux bornes de la charge, alimentée via un onduleur à cinq niveaux commandé par MLI.

#### III.2.3.1. Pour $m=9$

La figure (III.24) donne l'évolution du courant.

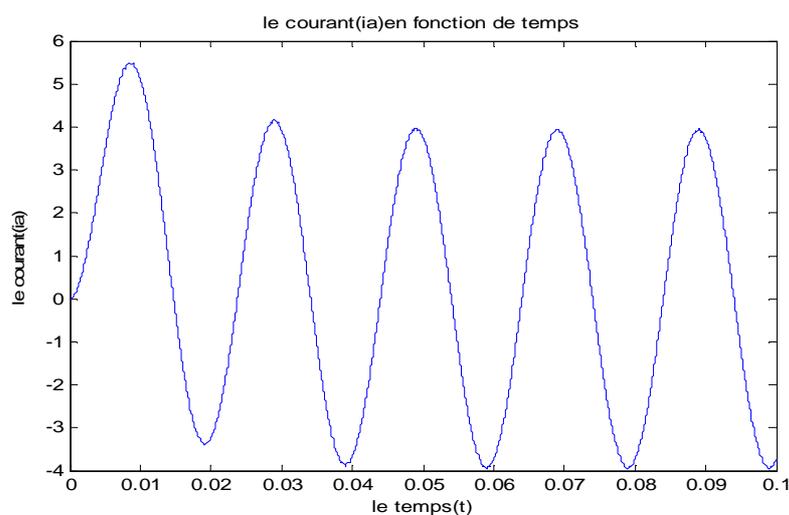


Fig. (III.24) : Le courant de sortie d'un onduleur à cinq niveaux pour indice de modulation  $m=9$ .

Le spectre d'harmonique du courant sortie de l'onduleur à cinq niveaux pour un indice de modulation  $m=9$  est représenté par la figure suivante :

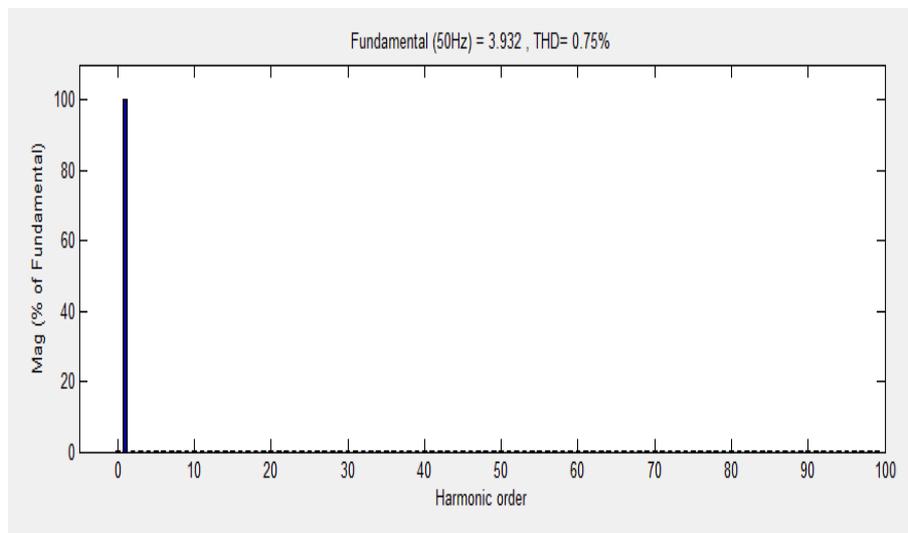


Fig. (III.25) : spectre d'harmoniques de courant de sortie de l'onduleur à cinq niveaux pour un indice de modulation  $m=9$ .

La figure (III.26) représente l'évolution de la tension aux bornes de la charge.

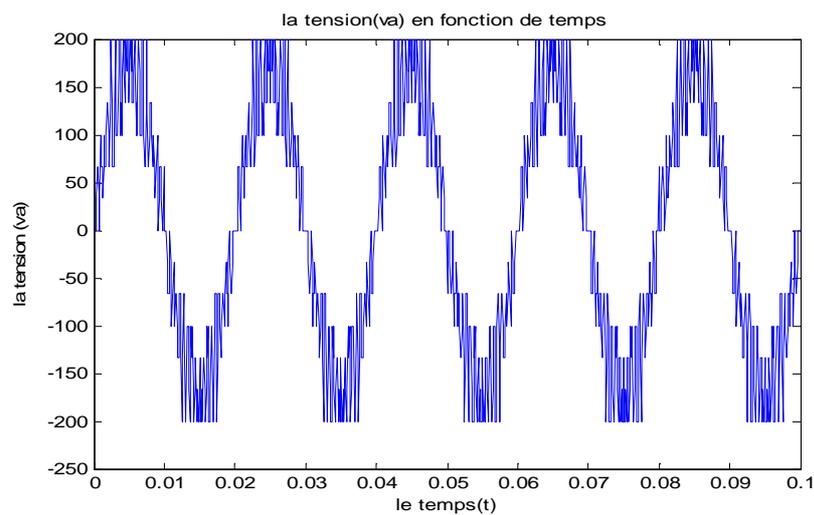


Fig. (III.26) : La tension de sortie d'un onduleur à cinq niveaux pour  $m=9$

Le spectre d'harmoniques de la tension de sortie de l'onduleur à cinq niveaux pour un indice de modulation  $m=9$  est présenté par la figure suivante :

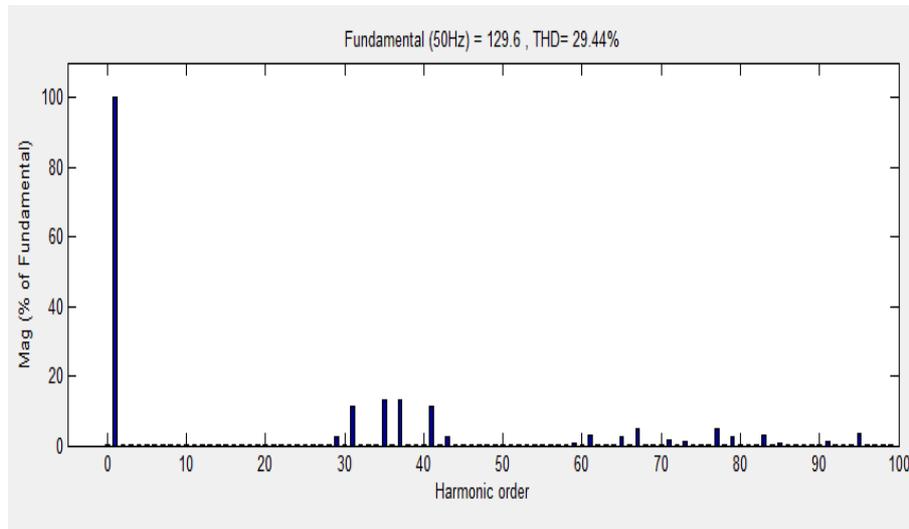


Fig. (III.27) : spectre d'harmoniques de la tension de sortie simple de l'onduleur à cinq niveaux pour l'indice de modulation  $m=9$ .

### III.2.3.2. Pour $m=15$

La figure (III.28) donne l'évolution du courant de charge pour  $m=15$ .

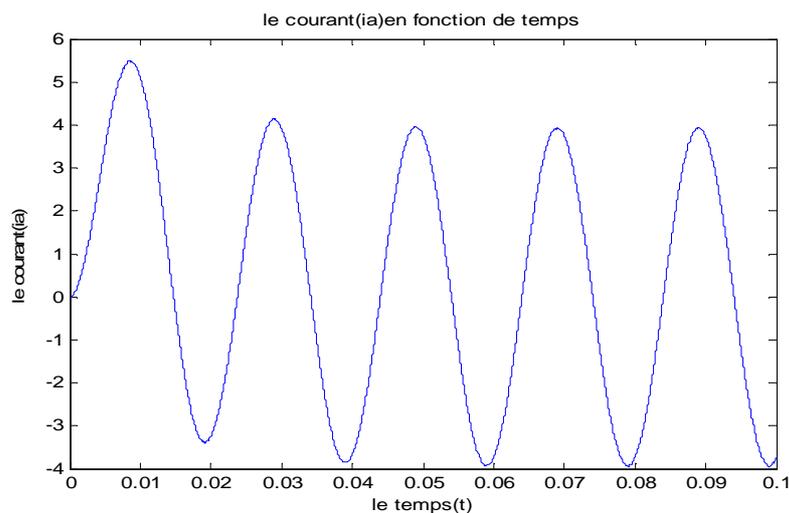


Fig. (III.28) : Le courant de sortie d'un onduleur à cinq niveaux pour indice de modulation  $m=15$ .

Le spectre d'harmoniques du courant de sortie de l'onduleur à cinq niveaux pour un indice de modulation  $m=15$  est représenté par la figure suivante :

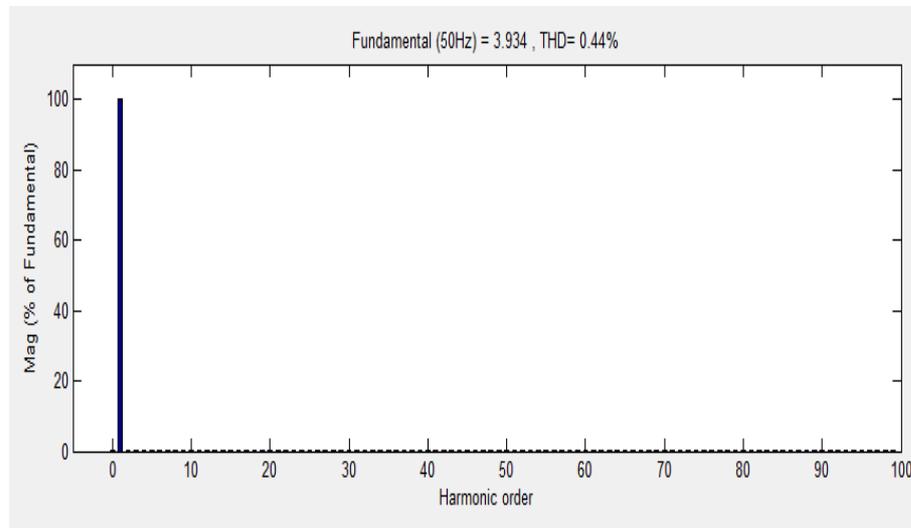


Fig. (III.29) : spectre d'harmoniques de courant de sortie de l'onduleur à cinq niveaux pour un indice de modulation  $m=15$ .

La figure (III.30) donne la tension aux bornes de la charge pour  $m=15$ .

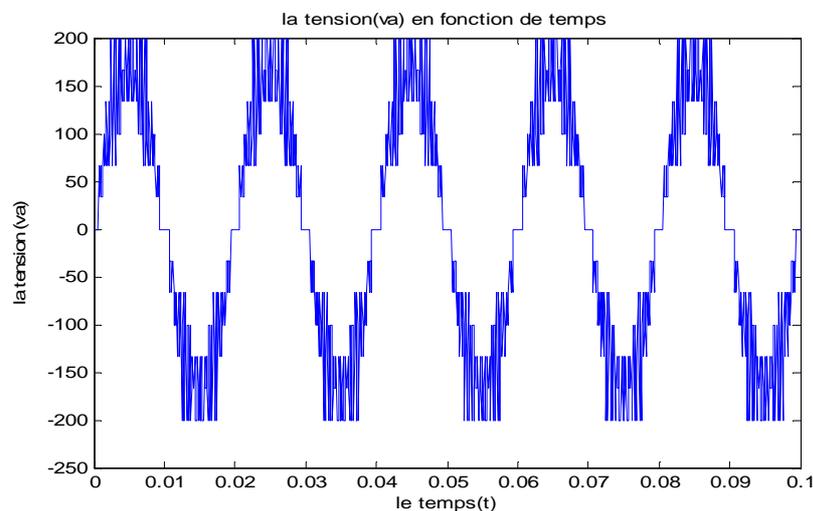


Fig. (III.30) : La tension de sortie d'un onduleur à cinq niveaux pour  $m=15$

Le spectre d'harmoniques de la tension de sortie de l'onduleur à cinq niveaux pour un indice de modulation  $m=15$  est représenté par la figure suivante :

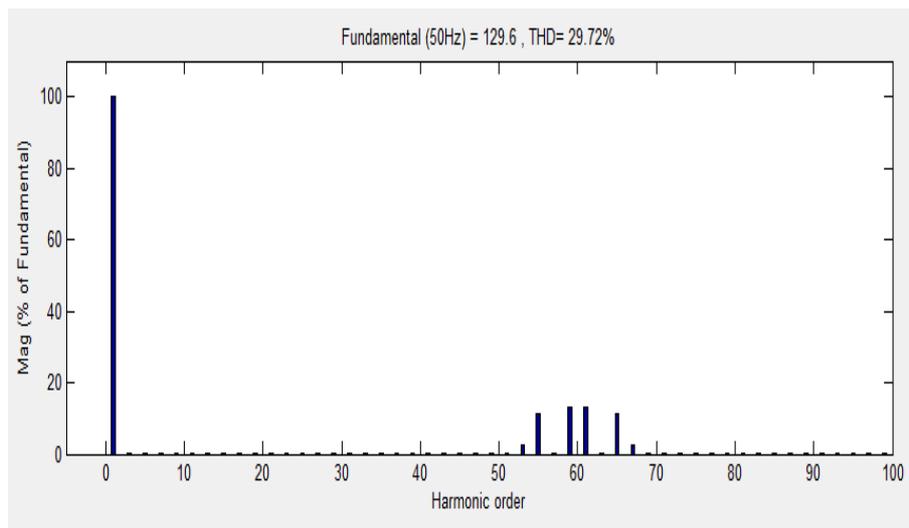


Fig. (III.31) : spectre d'harmoniques de la tension de sortie simple de l'onduleur à cinq niveaux pour l'indice de modulation  $m=15$ .

### III.2.3.3. Pour $m=21$

La figure (III.32) représente l'évolution du courant de charge en fonction du temps pour  $m=21$ , lorsqu'elle est alimentée via un onduleur cinq niveaux.

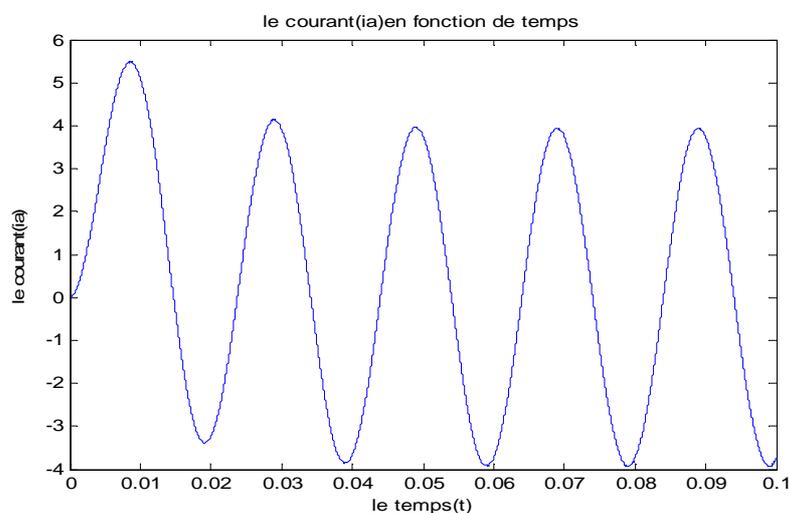


Fig. (III.32) : Le courant de sortie d'un onduleur à cinq niveaux pour indice de modulation  $m=21$ .

Le spectre d'harmoniques de courant de sortie de l'onduleur à cinq niveaux pour un indice de modulation  $m=21$ , est représenté par la figure suivante :

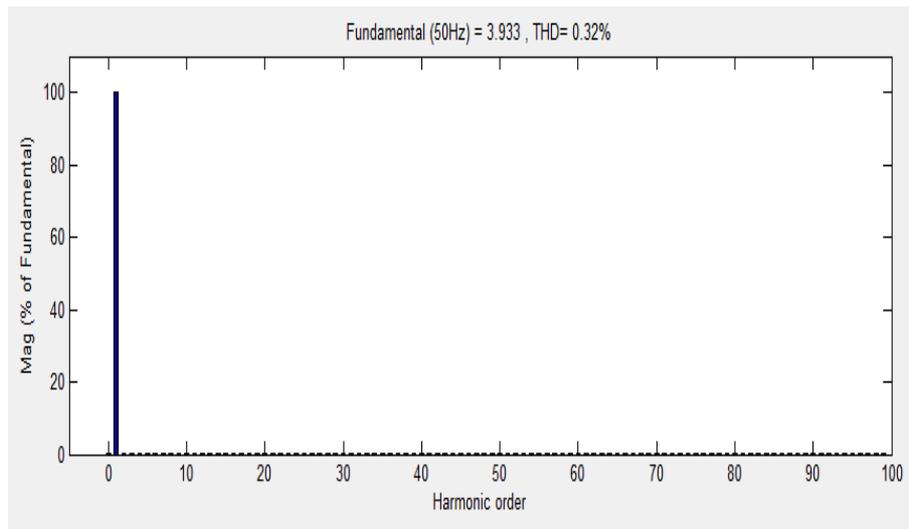


Fig. (III.33) : spectre d'harmoniques de courant de sortie de l'onduleur à cinq niveaux pour un indice de modulation  $m=21$ .

La tension à la sortie de l'onduleur à cinq niveaux est telle qu'illustrée par la figure (III.33) suivante :

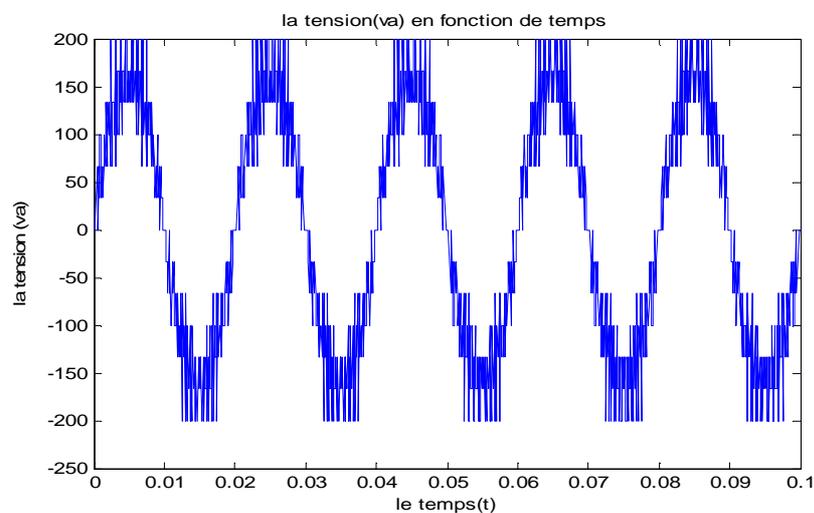


Fig. (III.34) : La tension de sortie d'un onduleur à cinq niveaux pour  $m=21$

Le spectre d'harmoniques de la tension de sortie de l'onduleur à cinq niveaux pour un indice de modulation  $m=21$  est représenté par la figure suivante :

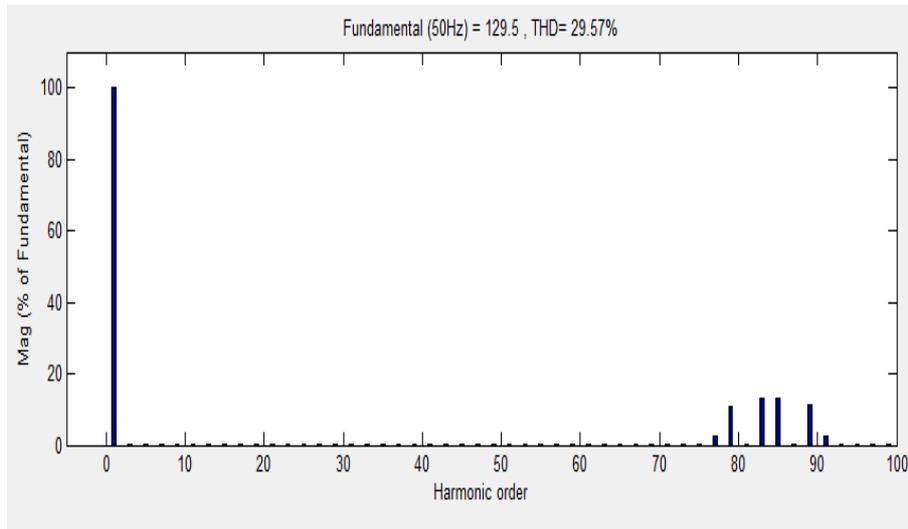


Fig. (III.35) : spectre d'harmoniques de la tension de sortie simple de l'onduleur à cinq niveaux pour l'indice de modulation  $m=21$ .

#### III.2.4. Interprétation des résultats

Dans le tableau suivant, on donne une comparaison en termes de taux de distorsion harmonique des différentes structures d'onduleur considérées, pour un indice de modulation  $m=21$ .

Rappelons que les simulations ont été effectuées dans les mêmes conditions. C'est-à-dire, même charge, même pas de simulation.

Structure de l'onduleur	THD en courant	THD en tension
2 niveaux	2.49 %	87.54%
3 niveaux	1.31%	62.75%
5 niveaux	0.32%	29.57%

Tab(III.1) : Taux de distorsion harmonique des différentes structures étudiées.

Nous remarquons que dans le cas d'onduleur à cinq niveaux, les résultats sont meilleurs que ceux dans l'onduleur à trois et à deux niveaux.

Ce résultat nous montre que l'onduleur à cinq niveaux donne de meilleurs résultats.

Les résultats obtenus confirment que la montée en niveaux réduit le THD qui passe de 2.49%(en courant)et 87.54%(en tension) en deux niveaux, à 0.32%(en courant) et 29.57% (en tension)dans le cas de l'onduleur à cinq niveaux.

Pour analyser l'influence de l'indice de modulation  $m$  sur la sortie du signal et sur le spectre harmonique pour la stratégie triangulaire-sinusoidale, nous l'avons varié. Nous avons considéré tour à tour :  $m=9$ ,  $m=15$  et  $m=21$ .

On remarque que les harmoniques sont rangées en familles centrées autour des fréquences multiples de celle de la fréquence de la porteuse. L'augmentation de l'indice de modulation permet de pousser les harmoniques les plus importants vers des fréquences élevées et donc plus facilement filtrées par la charge.

Ces nouvelles structures d'onduleurs multi niveaux, permettent d'avoir des tensions de sortie plus élevées avec un meilleur taux d'harmoniques en comparaison aux onduleurs classiques à deux ou à trois niveaux.

### III.3. Alimentation d'une charge RL en régime dégradé

Dans cette partie, on se propose d'étudier l'influence d'un défaut consistant en un court-circuit d'un bras de l'onduleur, sur l'évolution du courant et de la tension au niveau de la charge.

Nous étudierons les différentes structures d'onduleurs considérées dans les mêmes conditions de simulation : une charge RL avec  $R=10\ \Omega$ ,  $L=100\ \text{mH}$ , l'indice de modulation considéré est  $m=21$  et l'indice de réglage :  $r=0.86$ . Le court-circuit a été introduit dans la phase « a ».

#### III.3.1. Onduleur à deux niveaux

La figure (III.36) suivante donne l'allure du courant en fonction du temps avant et après le défaut.

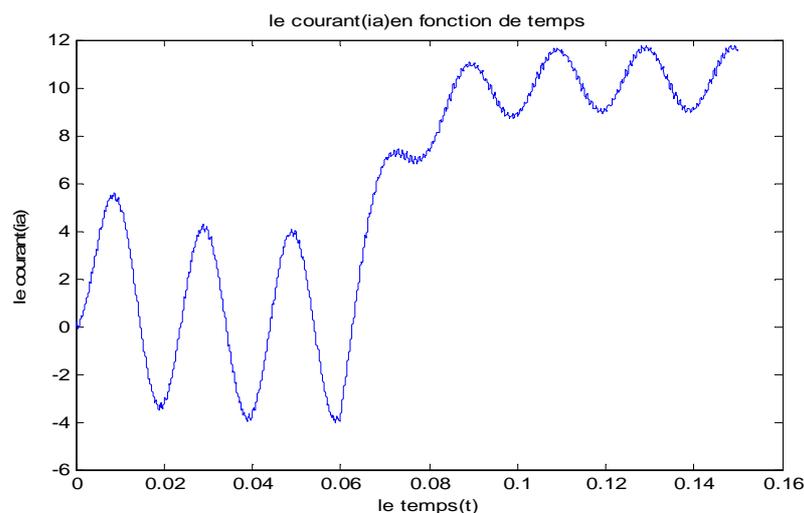


Fig. (III.36) : Le courant de sortie d'un onduleur à deux niveaux pour un indice de modulation  $m=21$ .

Le spectre d'harmoniques de courant de sortie de l'onduleur à deux niveaux pour un indice de modulation  $m=21$ , est représenté par la figure suivante :

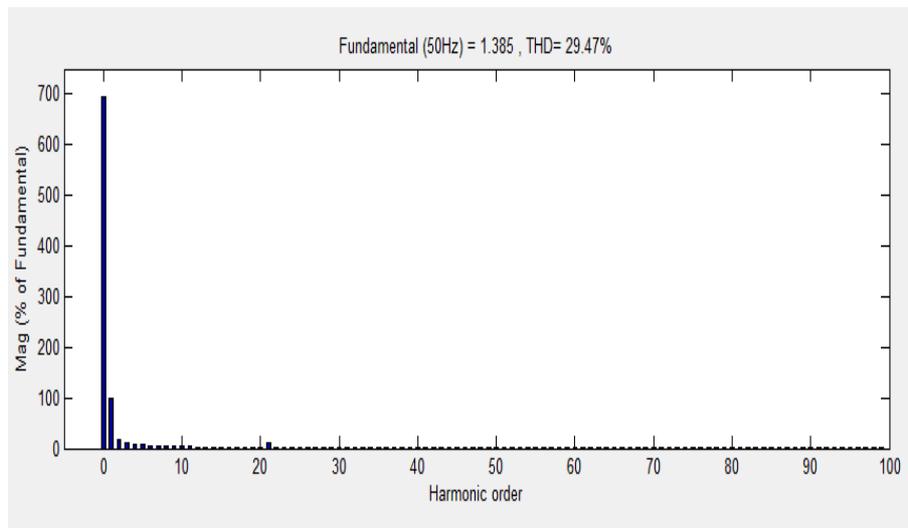


Fig. (III.37) : spectre d'harmoniques de courant de sortie de l'onduleur à deux niveaux pour un indice de modulation  $m=21$ .

L'évolution de la tension en fonction du temps avant et après le défaut, est représentée par la figure (III.38) ci-après.

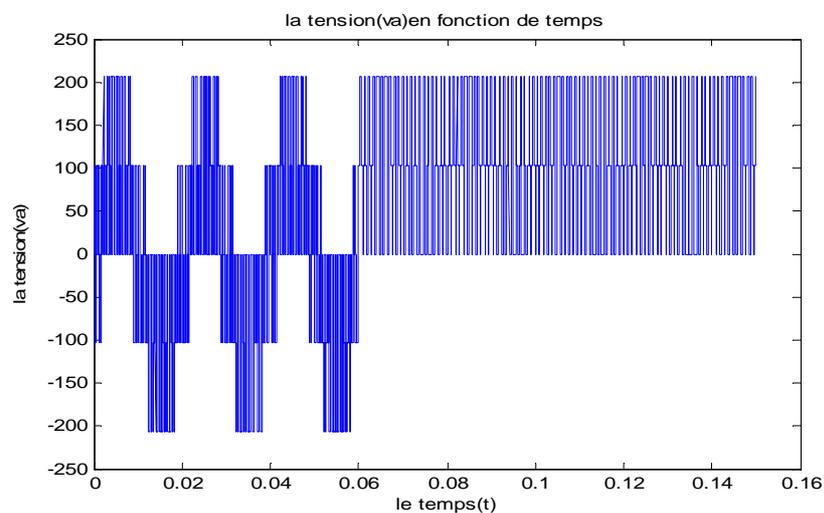


Fig. (III.38) : La tension de sortie d'un onduleur à deux niveaux pour  $m=21$ .

Le spectre d'harmoniques de la tension de sortie de l'onduleur à deux niveaux pour un indice de modulation  $m=21$  est présenté par la figure suivante :

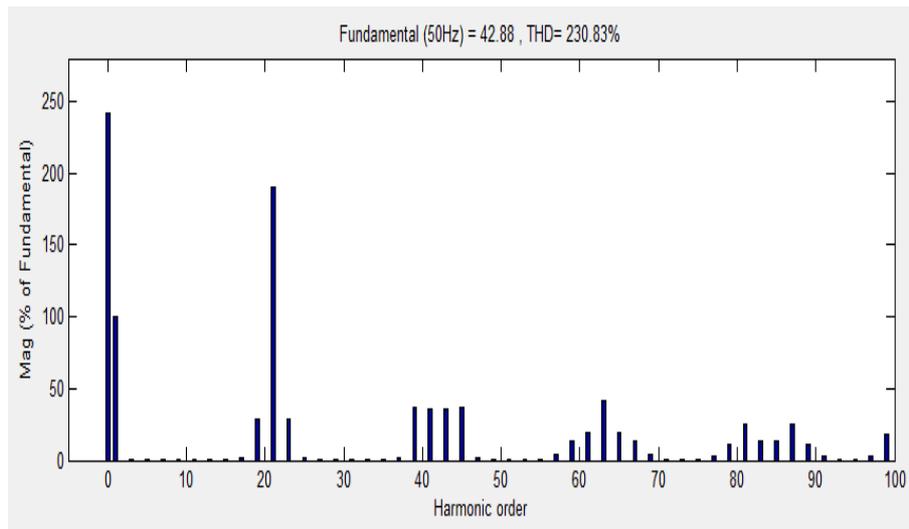


Fig. (III.39) : spectre d'harmoniques de la tension de sortie simple de l'onduleur à deux niveaux pour l'indice de modulation  $m=21$ .

### III.3.2. Onduleur à trois niveaux

La figure (III.40) suivante donne l'allure du courant en fonction du temps avant et après le défaut.

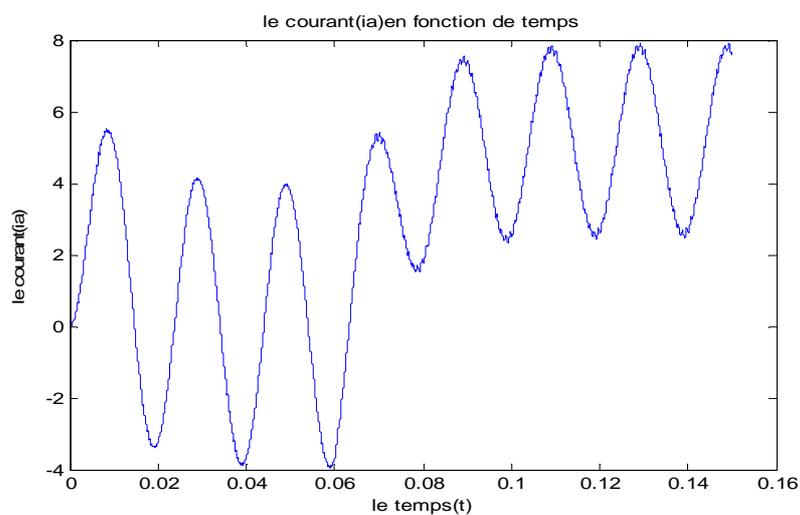


Fig. (III.40) : Le courant de sortie d'un onduleur à trois niveaux pour indice de modulation  $m=21$

Le spectre d'harmoniques de courant de sortie de l'onduleur à trois niveaux pour un indice de modulation  $m=21$ , est représenté par la figure suivante :

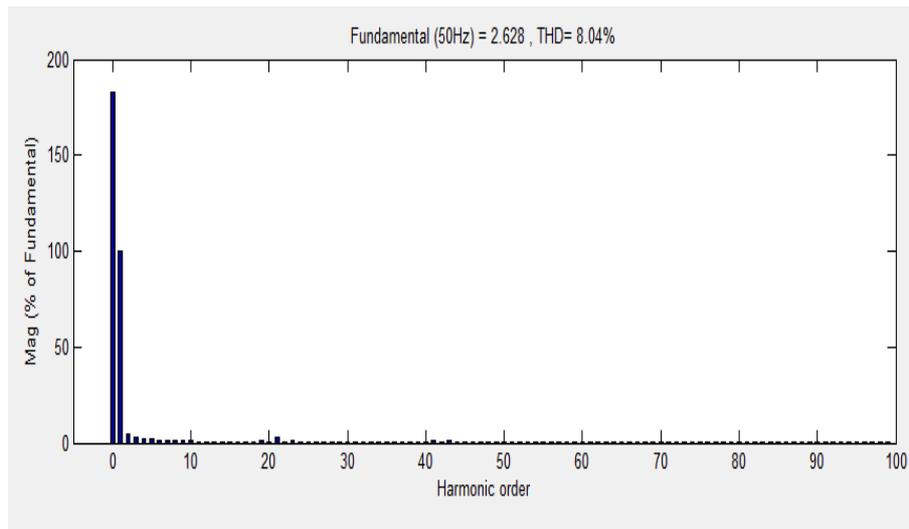


Fig. (III.41) : spectre d'harmoniques de courant de sortie de l'onduleur à deux niveaux pour un indice de modulation  $m=21$ .

La figure (III.42) suivante donne l'allure de la tension en fonction du temps avant et après le défaut.

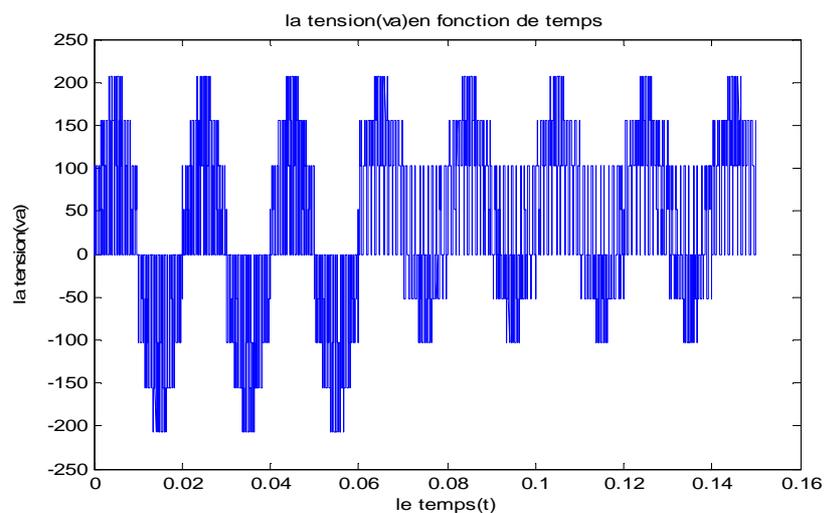


Fig.(III.42) : La tension de sortie d'un onduleur à trois niveaux pour  $m=21$

Le spectre d'harmoniques de la tension de sortie de l'onduleur à trois niveaux pour un indice de modulation  $m=21$  est présenté par la figure suivante :

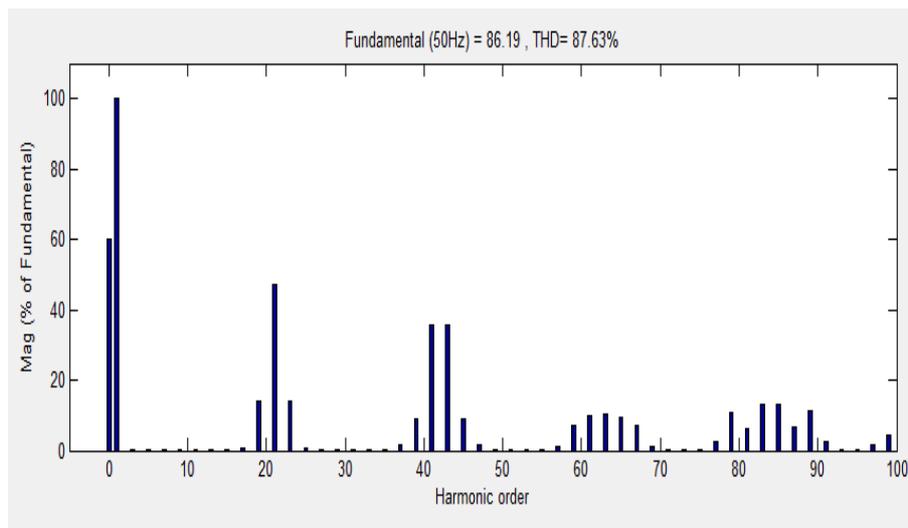


Fig. (III.43) : spectre d'harmoniques de la tension de sortie simple de l'onduleur à trois niveaux pour l'indice de modulation  $m=21$ .

### III.3.3. Onduleur à cinq niveaux

La figure (III.44) suivante donne l'allure du courant en fonction du temps avant et après le défaut.

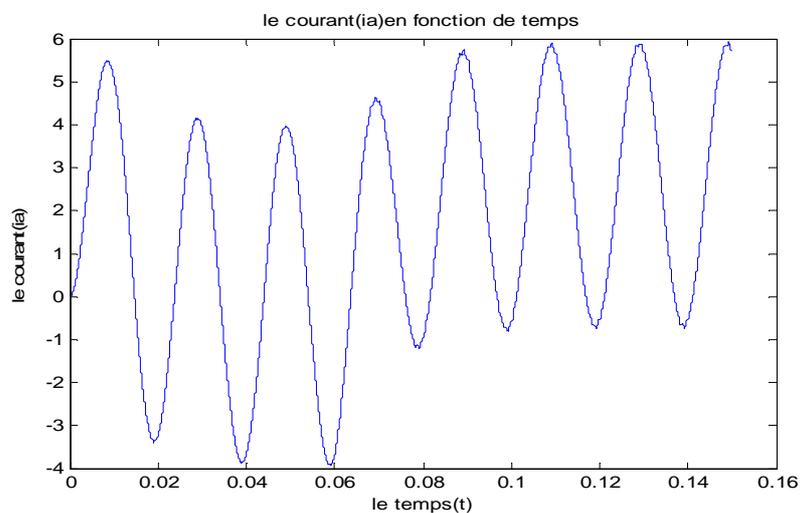


Fig. (III.44) : Le courant de sortie d'un onduleur à cinq niveaux pour indice de modulation  $m=21$ .

Le spectre d'harmoniques de courant de sortie de l'onduleur à cinq niveaux pour un indice de modulation  $m=21$ , est présenté par la figure suivante :

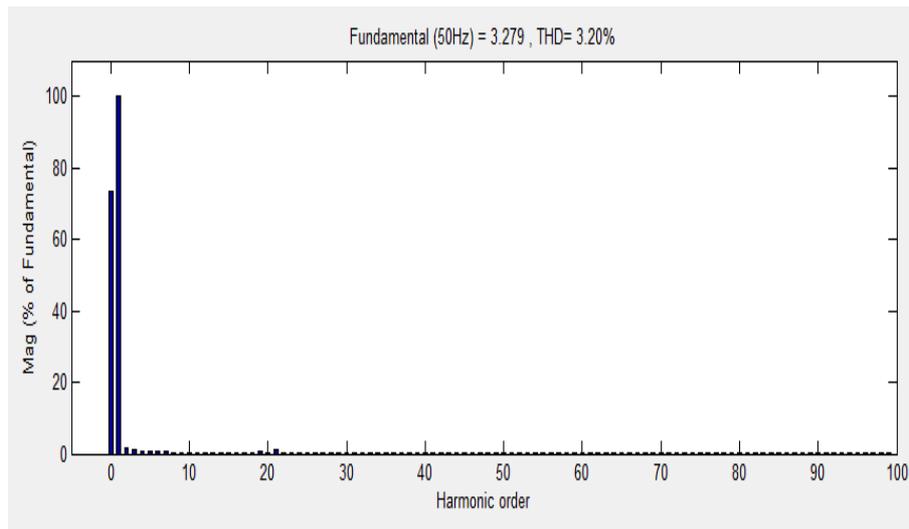


Fig. (III.45) : spectre d'harmoniques de courant de sortie de l'onduleur à cinq niveaux pour un indice de modulation  $m=21$ .

La figure (III.46) suivante représente l'allure de la tension en fonction du temps avant et après le défaut.

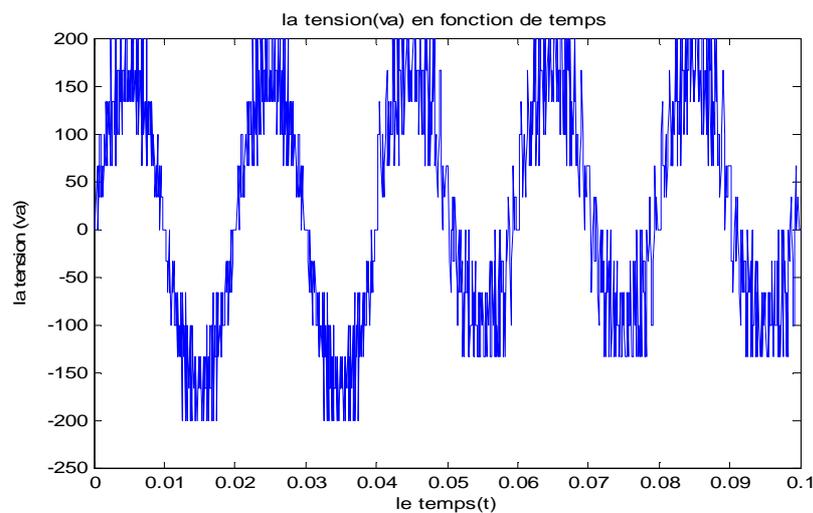


Fig. (III.46) :La tension de sortie d'un onduleur à cinq niveaux pour  $m=21$

Le spectre d'harmoniques de la tension de sortie de l'onduleur à cinq niveaux pour un indice de modulation  $m=21$  est présenté par la figure suivante :

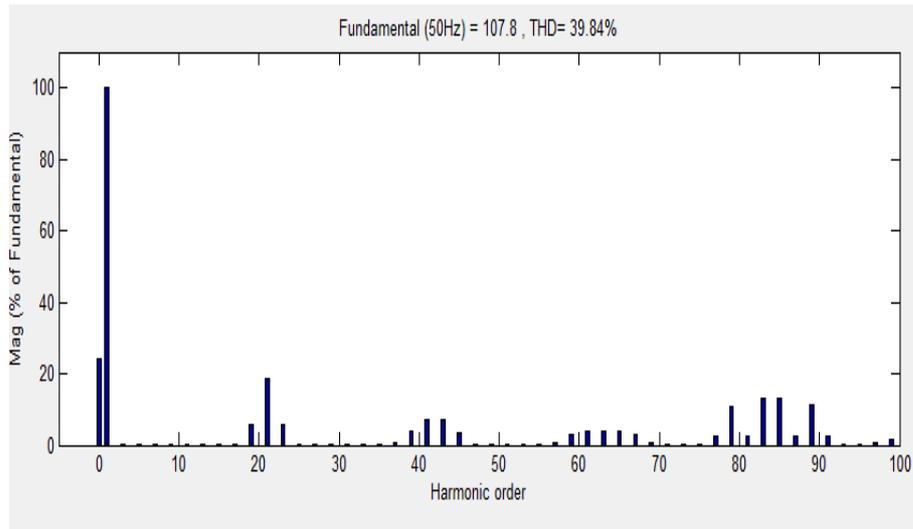


Fig. (III.47) : spectre d'harmoniques de la tension de sortie simple de l'onduleur à cinq niveaux pour l'indice de modulation  $m=21$ .

Sur la figure (III.48) suivante, nous donnons les trois courants de sortie en fonction du temps, avant et après l'introduction du défaut :

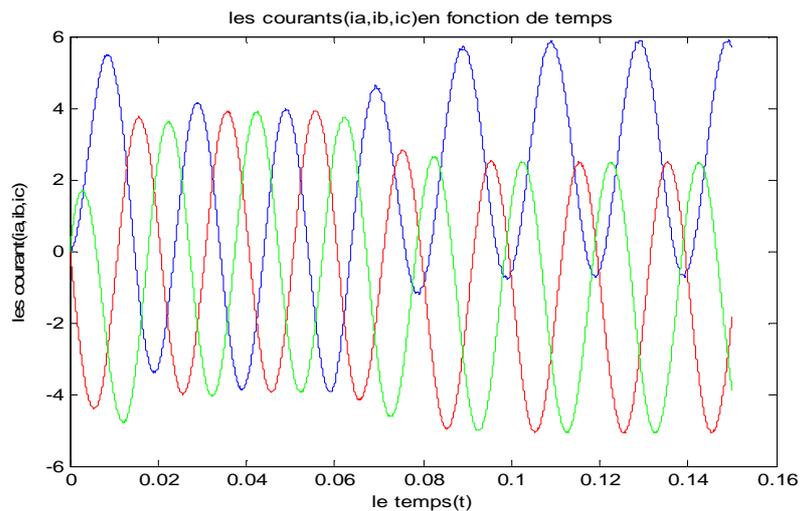


Fig. (III.48) : Les courants de sortie d'un onduleur à cinq niveaux.

### III.3.4. Interprétation des résultats

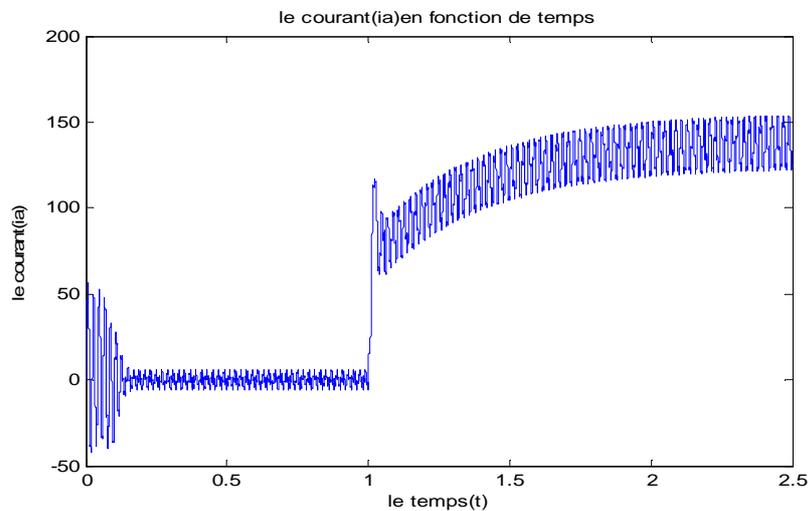
Pour analyser l'indice de fiabilité et le bon fonctionnement de l'onduleur, nous avons simulé un défaut consistant en un court-circuit sur l'un des composants de l'onduleur. Les figures (III.36) jusqu'à (III.48) représentent les différents résultats obtenus. On remarque qu'à l'instant  $t=0.06(s)$  (temps d'application de la perturbation), le signal change, il passe par un court régime transitoire avant de se stabiliser dans un nouveau régime permanent.

### III.4. Application de l'onduleur à la conduite de la machine asynchrone

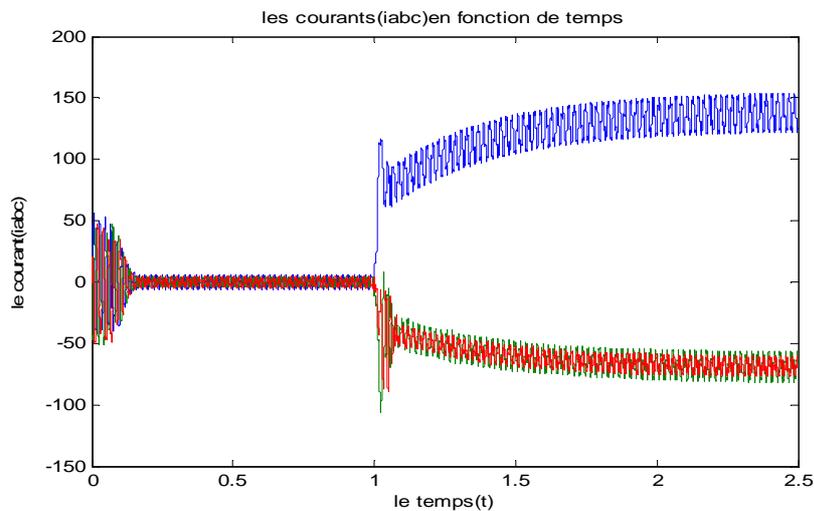
Dans cette partie du travail, on s'intéresse à la conduite de la machine asynchrone via un onduleur multi-niveaux. Le problème de la fiabilité ainsi que de la continuité de service sera abordé en simulant un défaut de court-circuit dans un bras de l'onduleur. Nous avons étudié son influence sur la vitesse de rotation de la machine ainsi que le couple. La machine a été alimentée par les différentes structures d'onduleur présentée précédemment.

#### III.4.1. Alimentation via un onduleur deux niveaux

La figure (III.49) donne l'allure du courant appelé par la machine. On remarque qu'à partir de l'instant  $t=1s$ , après l'application du défaut, le courant ( $i_a$ ), phase où le court-circuit a été réalisé, augmente brusquement et oscille autour d'une valeur moyenne de l'ordre 130 A. Les deux autres courants, par contre, enregistrent une diminution, tel qu'il peut être relevé sur la figure (III.50).

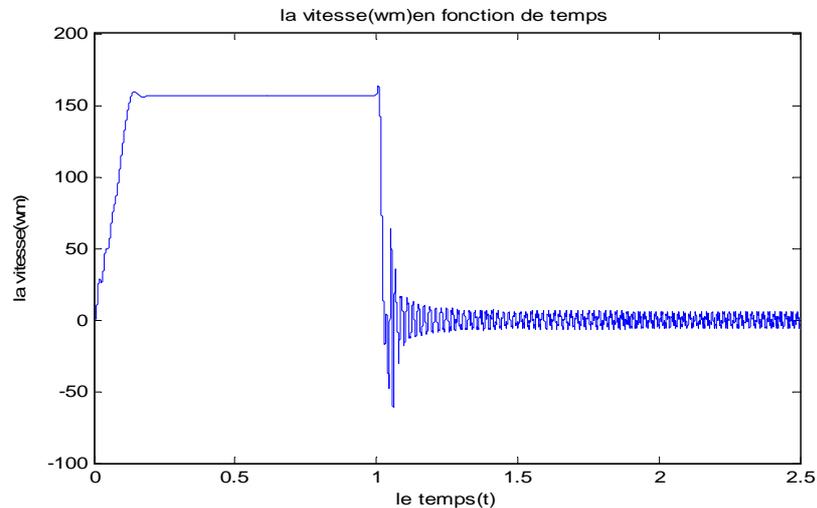


Fig(III.49) : Le courant de sortie d'un onduleur à deux niveaux pour indice de modulation  $m=21$ .

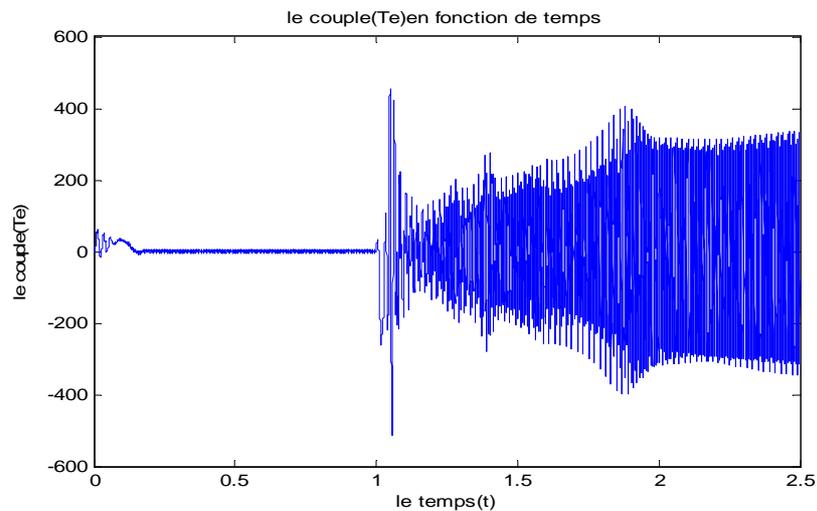


Fig(III.50) : les courants de sortie « ia », « ib » et « ic » en fonction de temps.

Les figures (III.51) et (III.52) donnent respectivement l'évolution de la vitesse de rotation de la machine ainsi que le couple. On remarque qu'à partir de l'application du défaut la vitesse chute brusquement pour osciller autour de la valeur nulle. Le couple quant à lui, enregistre des valeurs très importantes atteignant 400 N.m. Tout cela, nous conduit à conclure que dans ce cas, la machine décroche.



Fig(III.51) : la vitesse «  $w_m$  » en fonction de temps



fig(III.52) : le couple «  $T_e$  » en fonction de temps

### III.4.2. Alimentation via un onduleur trois niveaux

La figure (III.53) représente l'allure du courant appelé par la machine. On remarque qu'à partir de l'instant  $t=1s$ , après l'application du défaut, le courant ( $i_a$ ) augmente et oscille autour d'une valeur moyenne de l'ordre 40 A. Les deux autres courants, par contre, enregistrent une diminution, tel qu'il peut être relevé sur la figure (III.54).

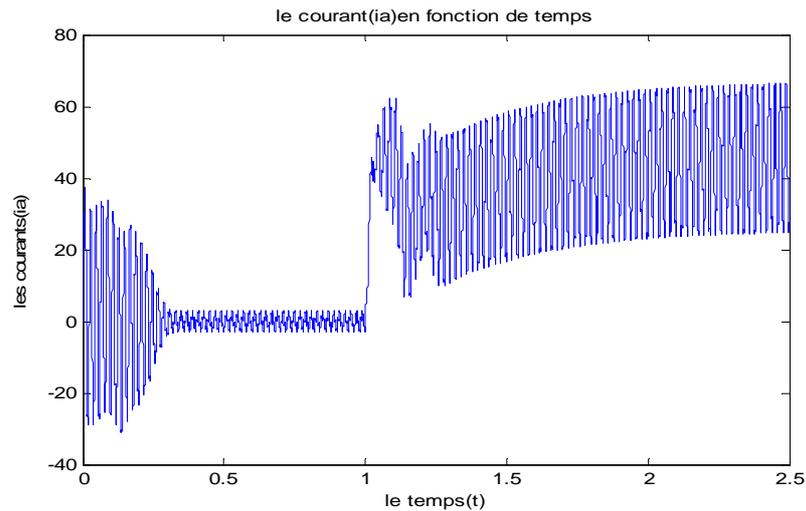
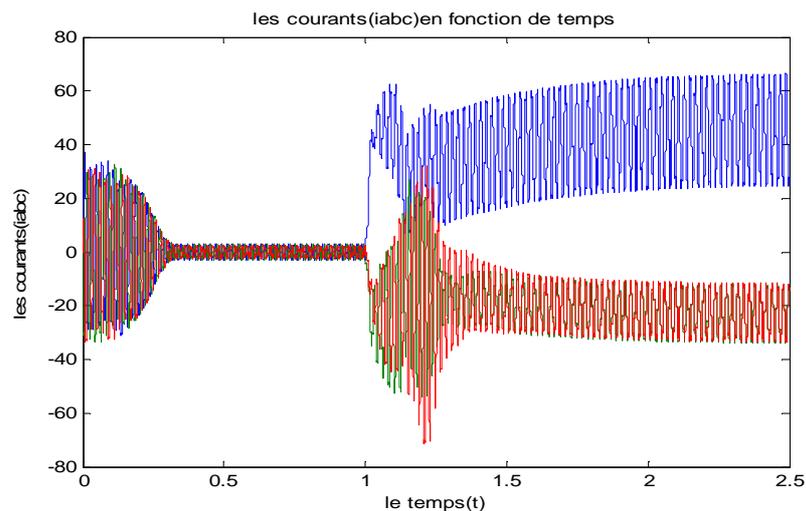
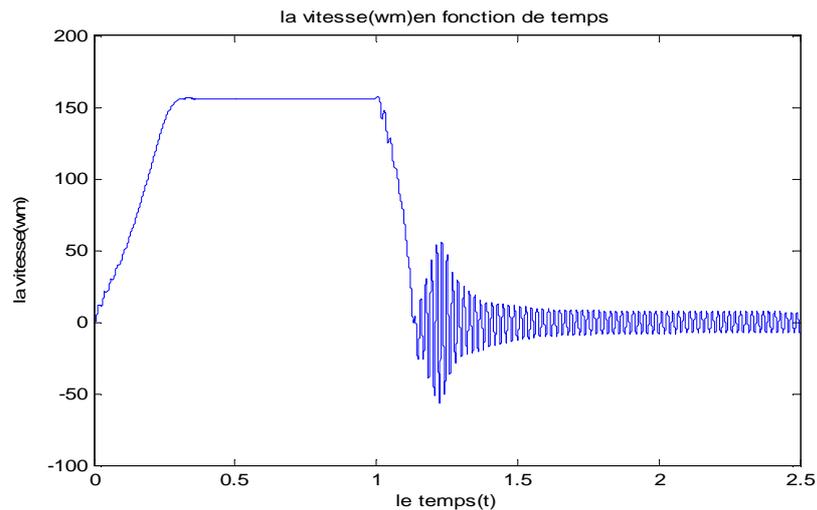


Fig. (III.53) : Le courant de sortie d'un onduleur à trois niveaux pour indice de modulation  $m=21$ .

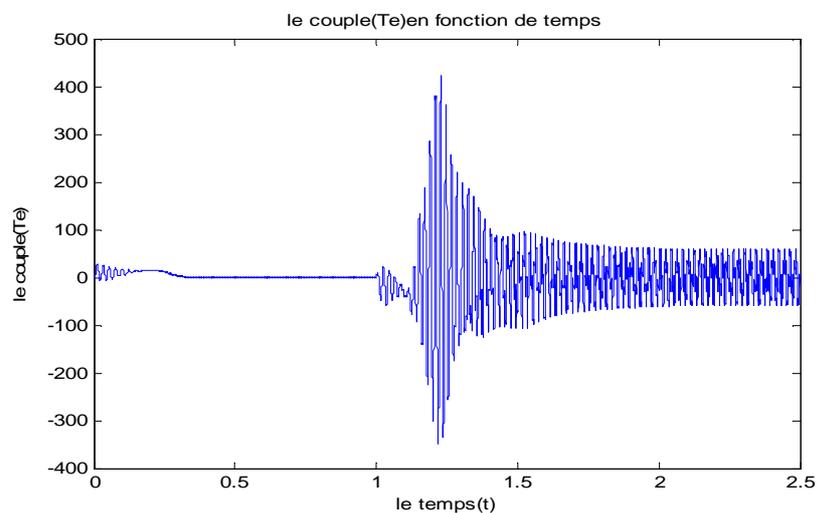


Fig(III.54) : les courants de sortie «  $i_a$  », «  $i_b$  » et «  $i_c$  » en fonction de temps

Les figures (III.55) et (III.56) donnent respectivement l'évolution de la vitesse de rotation de la machine ainsi que le couple. On remarque qu'à partir de l'application du défaut la vitesse chute progressivement pour osciller autour à la fin de la valeur nulle. Le couple quant à lui, passe par un petit régime transitoire avant d'enregistrer des valeurs atteignant 400 N.m. Cela peut s'expliquer par le fait que la machine essaie de se maintenir en fonctionnement avant de décrocher.



Fig(III.55) : la vitesse « wm » en fonction de temps.



fig(III.56) : le couple « Te » en fonction de temps.

### III.4.3. Alimentation via un onduleur cinq niveaux

La figure (III.57) représente l'allure du courant appelé par la machine. On remarque qu'à partir de l'instant  $t=1s$ , après l'application du défaut, le courant ( $i_a$ ) augmente et oscille autour d'une valeur moyenne de l'ordre 20 A. Les deux autres courants, par contre, enregistrent une diminution, tel qu'il peut être relevé sur la figure (III.57).

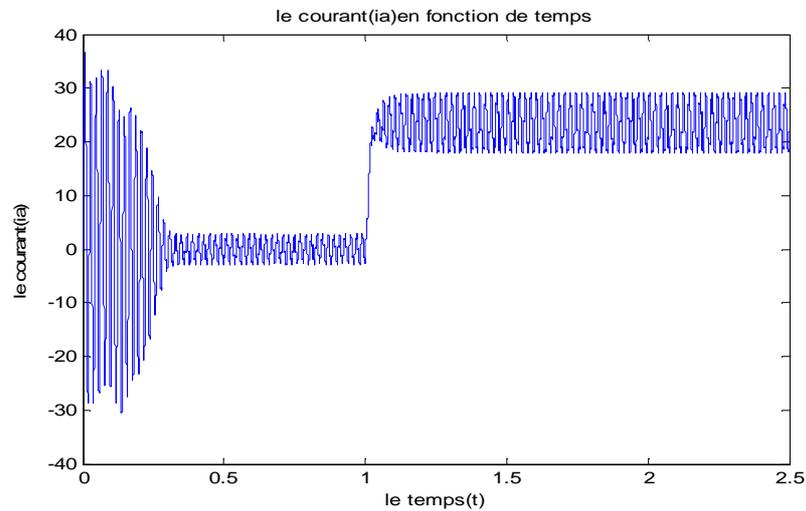
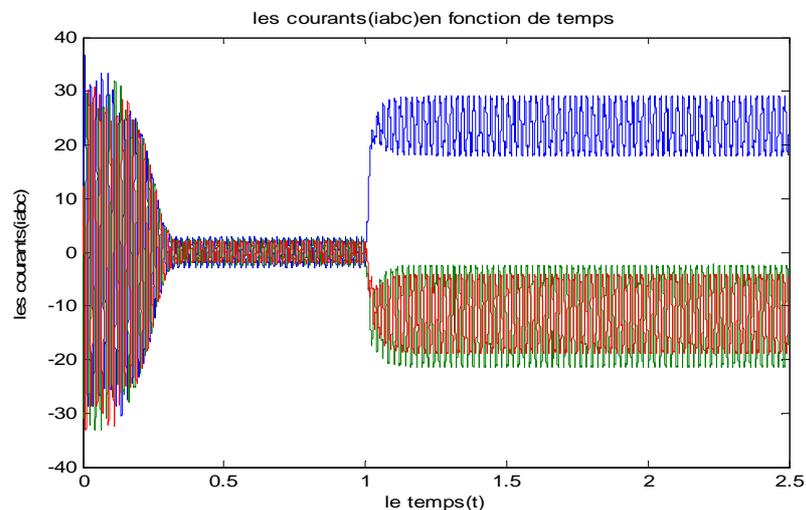
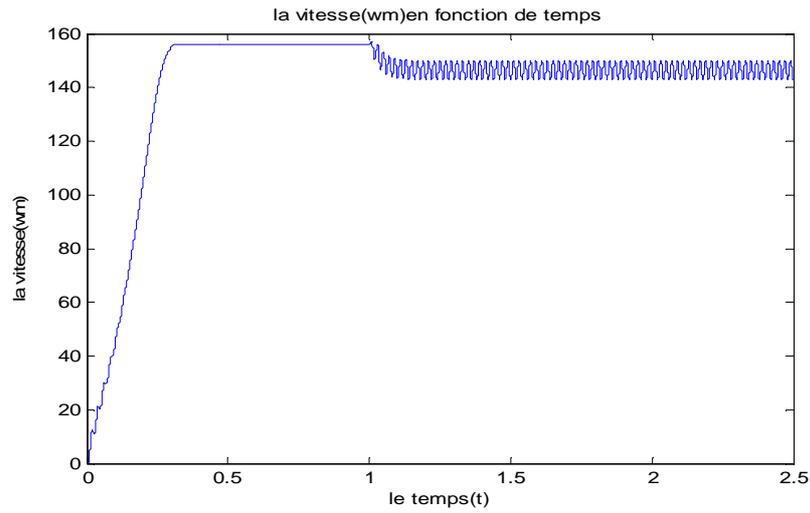


Fig. (III.57) : Le courant de sortie d'un onduleur à cinq niveaux pour indice de modulation  $m=21$  :

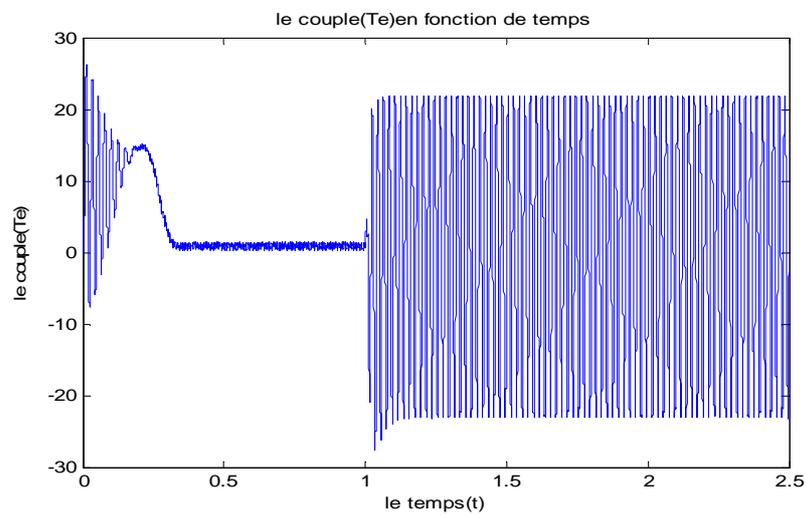


Fig(III.58) : les courants de sortie «  $i_a$  », «  $i_b$  » et «  $i_c$  » en fonction de temps

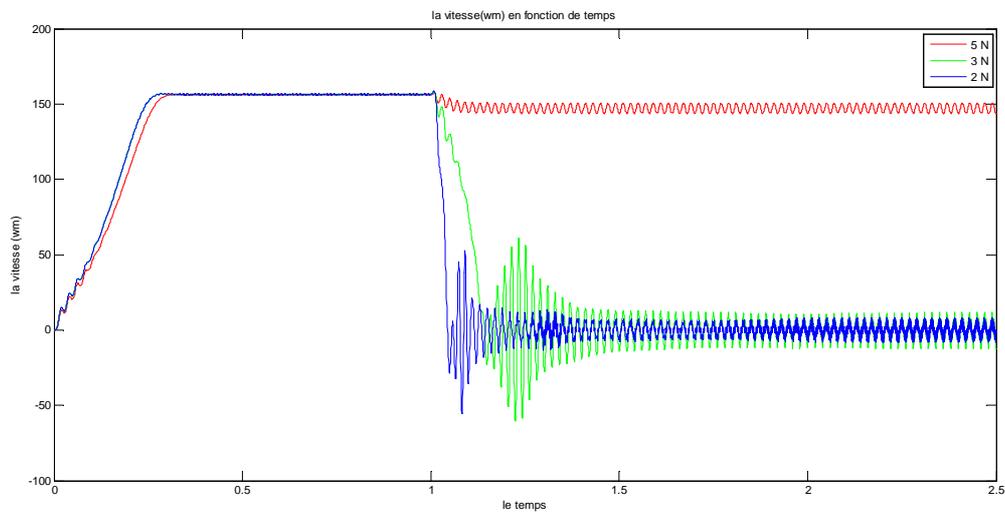
Les figures (III.59) et (III.60) donnent respectivement l'évolution de la vitesse de rotation de la machine ainsi que le couple. On remarque qu'à partir de l'application du défaut la vitesse enregistre une petite diminution pour osciller autour à la fin de la valeur 140 rd/s. Le couple quant à lui présente des oscillations ayant pour valeur maximale 20 N.m environ. La machine continue à fonctionner malgré le défaut.



Fig(III.59) : la vitesse « wm » en fonction de temps



fig(III.60) : le couple « Te » en fonction de temps



fig(III.61) : la vitesse « wn » des onduleurs deux, trois et cinq niveaux en fonction de temps

**III.5. Conclusion**

D'après les résultats de simulation, nous avons constaté qu'à chaque fois qu'on augmente le niveau de l'onduleur les résultats s'améliorent, le THD diminue et le courant et la tension de sortie tendent de plus en plus à une sinusoïde.

Donc, il faut souligner l'avantage des onduleurs multi-niveaux qui fait apparaitre aussi dans le fait qu'une augmentation du niveau requiert la diminution de taux d'harmoniques.

Le résultat intéressant qui ressort de cette analyse est le fait que la montée en niveaux nous assure la continuité de service.

## Conclusion générale

L'utilisation des convertisseurs statiques dans l'industrie est devenue un champ extrêmement vaste. Les onduleurs de tension sont largement utilisés pour la commande des moteurs asynchrones.

Nous avons commencé par la présentation de quelques généralités sur les onduleurs multi-niveaux.

Le développement rapide des convertisseurs statique et grâce au progrès récent effectué au niveau de la technologie de composants de puissances à semi-conducteurs, la structure de l'onduleur de tension à cinq niveaux est plus adaptée par rapport à la structure de l'onduleur à trois niveaux et à deux niveaux.

L'allure du courant à la sortie de l'onduleur à trois niveaux et à deux niveaux de type NPC contrôlé par la commande MLI n'est pas parfaitement sinusoïdale, elle est très riche en harmoniques.

Le taux d'harmonique décroît quand l'indice de modulation augmente, et avec l'ordre du niveau de tension de l'onduleur.

L'allure du courant de l'onduleur à cinq niveaux contrôlé par la MLI contient moins d'harmoniques.

Finalement les résultats obtenus montrent l'intérêt de l'augmentation des niveaux de tension de l'onduleur. Ces nouvelles structures d'onduleurs multi niveaux, permettent d'avoir des tensions de sortie plus élevées avec un meilleur taux d'harmoniques en comparaison aux onduleurs classiques à deux ou à trois niveaux.

### Les paramètres de simulation :

➤ **Un onduleur à deux niveaux :**

Fréquence : 50 Hz.

Pulsation :  $w=2*\pi*f$ .

Amplitude de la porteuse :  $V_{pmax}=12$ .

Amplitude des tensions de référence :  $V_{refmax}=10$ .

Indice de modulation :  $m=9, m=15$  et  $m=21$ .

Indice de réglage :  $r=0.86$ .

Tension d'entrée de l'onduleur :  $V_{eo}=220*\sqrt{2}$ .

➤ **Pour l'onduleur à trois niveaux :**

Fréquence : 50 Hz.

Pulsation :  $w=2*\pi*f$ .

Amplitude de la porteuse :  $V_{pmax}=12$ .

Amplitude des tensions de référence :  $V_{refmax}=10$ .

Indice de modulation :  $m=9, m=15$  et  $m=21$ .

Indice de réglage :  $r=0.86$ .

Tension d'entrée de l'onduleur :  $V_{eo}=220*\sqrt{2}$ .

$\gamma_0=0$ ;

$\gamma_1=\pi$ .

➤ **Et pour l'onduleur à cinq niveaux :**

Fréquence : 50 Hz.

Pulsation :  $w=2*\pi*f$ .

Amplitude de la porteuse :  $V_{pmax}=12$ .

Amplitude des tensions de référence :  $V_{refmax}=10$ .

Indice de modulation :  $m=9, m=15$  et  $m=21$ .

Indice de réglage :  $r=0.86$ .

Tension d'entrée de l'onduleur :  $V_{eo}=220*\sqrt{2}$ .

$\gamma_0=0$ ;

$\gamma_1=\pi/2$ ;

$\gamma_2=\pi$ ;

$\gamma_3=3*\pi/2$ .

## Annexes

---

### Les paramètres de la machine asynchrone :

Tension nominale : 460V

Puissance apparente : 3730 VA

LA Fréquence : 60 Hz

La vitesse nominale : 1750 tr/min

Resistance de stator : 1.115  $\Omega$

Inductance de stator : 0.005974 H

Resistance de rotor : 1.083  $\Omega$

Inductance de rotor : 0.005974 H

Inductance mutuel : 0.2037 H

Moment Inertie : 0.02  $Kg.m^2$

Nombre de pole : 2

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] B.K.Bose, " Power Electronic and As Drives ", Edition practice Hall,1986.
- [2] S. Guy, B. Robert, La brique Francis, Les convertisseurs de l'électronique de puissance la conversion alternatif (volume 4). Edition tec&doc, 1995.
- [3] T. Wildi : *Electrotechnique*, 3<sup>ème</sup> édition, éditions de Boeck, 1999.
- [4] D. Benanter, " Modification et command d'un onduleur triphasé pilote par MLI à structure Multi niveaux", Thèse de Doctorat, Université ,2012
- [5] Mr. YAHIAOUI Omar et Mr. LABZA Tahar: " Etude et simulation d'association onduleur de tension-moteur asynchrone et réglage par mode glissant ", Mémoire d'ingénieur d'état, Université de M'sila, 2007.
- [6] A. Shuster, "A matrix converter without reactive clamp elements for an induction motor drive system," in Proc. IEEE PESC'98, 1998, pp. 714-720.
- [7] P. W. Wheeler and D. A. Grant, "A low loss matrix converter for AC variable speed drive," Proc. EPE'93, vol. 5, pp. 27-32, 1993.
- [8] J. Oyama, X. Xia, T. Higuchi, and E. Yamada, "Displacement angle control of matrix converter," in Proc. IEEE PESC'97, 1997, pp. 1033-1039.
- [9] R.Thibault, " Contrôle de l'énergie injectée dans un réseau électrique par un convertisseur triphasé utilisant un régulateur basé sur un modèle interne sinusoïdal", Mémoire d'ingénieur d'état, université de Québec(Montréal). septembre 2006.
- [10] L. M. Tolbert, F. Z. Peng, and T. G. Habetler, "A multilevel converter-based universal power conditioner," in Proc. 1999 IEEE Power Electronics Specialists Conf.,pp. 393-399.
- [11] J. Shen and N. Butterworth, "Analysis and design of a three-level PWM converter system for railway-traction applications," Proc. Inst. Elect. Eng., vol. 144, pp. 357-371, Sept. 1997.
- [12] *Onduleur de tension: mise en œuvre et Structures-principes-applications*. Techniques d'ingénieur, Traité de génie électrique D.3176-3177.
- [13] *Onduleurs et harmoniques*, Cahiers techniques Merlin Gerin N°159.
- [14] H. Ben Zemamouche, "Application de la MLI Vectorielle aux Onduleurs Multi niveaux à base de GTO et d'IGBT", Mémoire de Magister ; université de Annaba ;2010.

## BIBLIOGRAPHIE

- [15] J.P.Hantier, J.P.caron, « convertisseur statique, méthodologie causale de modélisation et de commande », Editions Techniques, 1999.
- [16] M. S. Kelai, « Amélioration de la Qualité d’Energie Délivrée Par Un Onduleur Multi niveaux Alimentant Une Machine Asynchrone A Cage » Thèse De Doctorat, Université d’Alger, 2007.
- [17] O. Bouakaz, “Contribution à l’Analyse des Onduleurs Multi niveaux Fonctionnement Symétrique et asymétrique ”, Mémoire d’ingénieur d’état, université de Batna, 2005.
- [18] A. M. Lienhardt, « Etude de la Commande et de L’Observation d’une Nouvelle Structure de Conversion D’Energie de Type SMC (Convertisseurs Multicellulaire Superposé) », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2006.
- [19] A. Tiguercha ; « Etude et Réalisation d’un Onduleur Monophasé », Mémoire d’ingénieur d’état, université de Tizi-Ouzou, 2006.