

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

Université A/Mira - Bejaia

Faculté de Technologie

Département de Génie électrique



Mémoire De Fin D'étude

Master en électrotechnique

Option : *Commande des systèmes électriques*



Modélisation et commande d'un onduleur triphasé à structure multi-niveaux

Réalisé par :

Mr:LAKEHAL Bilel

Encadré par :

Mr : ALOUI Loucif

Remerciements

Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je remercie vivement mon promoteur, Monsieur L.ALLOUI, Docteur a l'université Abderrahmane Mira de Bejaia pour son suivi, son aide documentaire et son soutien matériel précieux.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à tous les membres de jury qui ont accepté de juger ce travail et d'y apporter leur caution chargé d'examiner la soutenance de mon projet de magister.

Je voudrai exprimer mon profond respect à tous les enseignants qui m'ont encadré durant mon étude.

Je ne saurai oublier de remercier toute personne qui, d'une manière ou d'une autre, m'a aidé dans l'élaboration de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents et ma grande-mère, que dieu les garde et les protège pour leurs soutien moral et financier, pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.

A ma sœur.

Ainsi qu'à tous mes amis.

Lakehal bilel

Chapitre I : Généralités sur les onduleurs

I.1 Introduction 3

I.2 Définition de l'onduleur 3

I.3 Principe de fonctionnement de l'onduleur..... 3

I.4 Principe de fonctionnement d'un onduleur monophasé 4

 I.4.1. Onduleur en demi-pont 4

 I.4.2. Onduleur monophasé en pont 4

I.5 Onduleur triphasé en pont..... 5

I.6 Classification des onduleurs 5

 I.6.1. Onduleur autonome..... 5

 I.6.2. Onduleur non autonome (assisté) 6

I.7 Choix des semi-conducteurs..... 6

I.8 Les applications des onduleurs 7

 I.8.1. Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone 7

 I.8.2. Alimentation de secours..... 8

 I.8.3. Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes..... 8

I.9 Analyse harmonique de la tension de sortie de l'onduleur..... 9

 I.9.1 Origine des harmoniques 9

 I.9.2. Déformation d'un signal sinusoïdal 9

 I.9.3. Mode de représentation ; le spectre en fréquence..... 9

 I.9.4. Les harmoniques mesurés en pratique 10

Paramètre de performance de l'onduleur..... 10

 I.10.1. Facteur de la ^{nième} harmonique 10

 I.10.2. Distorsion d'harmonique total 11

| | |
|-----------------------|----|
| I.11. Conclusion..... | 12 |
|-----------------------|----|

Chapitre II : Les onduleurs multi-niveaux

| | |
|--|----|
| II.1 Introduction..... | 13 |
| II.2 Naissance des onduleurs multi-niveaux | 14 |
| II.3 Intérêt des convertisseurs statiques multi-niveaux | 15 |
| II.4 Principe de l'ondeur multi-niveaux..... | 15 |
| II.5 Différentes topologie des onduleurs multi-niveaux | 16 |
| II.5.1. Onduleur de tension à diode de bouclage (NPC) | 16 |
| II.5.2. Onduleur de tension a condensateur Flottant | 18 |
| II.5.3. Onduleur de tension en cascade..... | 19 |
| II.6 Comparaison entre les trois principaux convertisseurs multi niveaux | 21 |
| II.7 Propriétés des principales structures | 22 |
| II.7.1. Classification des topologies selon leur alimentation..... | 22 |
| II.7.2. Nombres de composants nécessaires..... | 22 |
| II.8 Onduleur à cinq niveaux de type NPC | 22 |
| II.8.1. Structure de l'ondeur à cinq niveaux..... | 22 |
| II.8.2. Fonctionnement d'un ondeur a cinq niveaux | 24 |
| II.8.3. Différentes configurations d'un bras de l'ondeur NPC à cinq niveaux..... | 24 |
| II.9 Modulation à largeur d'impulsion MLI..... | 27 |
| II.10 Conclusion..... | 28 |

Chapitre III : Simulations et résultats

| | |
|---|----|
| III.1. Introduction | 30 |
| III.2. Modélisation de l'ondeur triphasé à cinq niveaux à structure NPC | 30 |
| III.3.xpression des tensions V_{an} , V_{bn} , V_{cn} en fonction des tensions V_{ao} , V_{bo} , V_{co} | 31 |
| III.4. Paramètres de simulation..... | 32 |
| III.5.Simulation sans MLI | 33 |

III.6. Avec MLI.....37

III.7. Conclusion41

Chapitre I : Généralités sur les onduleurs

| | |
|--|----|
| Figure I. 1: schéma bloc représentatif d'un onduleur..... | 3 |
| Figure I. 2: Onduleur en demi-pont..... | 4 |
| Figure I. 3: Onduleur monophasé en pont..... | 5 |
| Figure I. 4: Onduleur triphasé..... | 6 |
| Figure I. 5 : Classification des composants de puissance en fonction de la fréquence de découpage des composants [15]..... | 7 |
| Figure I. 6: Principe de réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone..... | 8 |
| Figure I. 7: Alimentation de secours..... | 8 |
| Figure I. 8: Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes..... | 9 |
| Figure I. 9: Spectre d'harmonique d'un signal électrique donné..... | 10 |

Chapitre II : Les onduleurs multi-niveaux

| | |
|---|----|
| Figure II.1 : Onduleur à niveaux multiples à deux (a), à trois (b) et à m niveaux (c)..... | 15 |
| Figure II.2 : Les différentes topologies des onduleurs multi niveaux..... | 16 |
| Figure II.3 : Topologies d'onduleurs NPC à trois (a) et à cinq niveaux (b)..... | 17 |
| Figure II.4 : Topologies d'onduleurs NPC à condensateur Flottant à trois (a) et à cinq niveaux (b)..... | 18 |
| Figure II.5 : Structure d'un onduleur multi-niveaux en cascade à cinq niveaux..... | 20 |
| Figure II.6 : Schéma d'un onduleur triphasé à cinq niveaux à structure NPC..... | 23 |
| Figure II.7 : Interrupteur bidirectionnel équivalent au paire transistor-diode..... | 24 |
| Figure II.8 : Différentes configurations du bras K d'onduleur a cinq niveaux..... | 27 |

Chapitre III : Simulation et résultats

| | |
|---|----|
| Figure III. 1: les signaux de commande de chaque interrupteur et la forme d'onde de la tension de sortie V_{ao} | 31 |
| Figure III. 2: Schéma bloc d'un onduleur triphasé associé a une charge RL..... | 32 |

| | |
|--|----|
| Figure III. 3: L'allure de V_{ao} | 33 |
| Figure III. 4: Tension de phase V_{an} de l'onduleur..... | 33 |
| Figure III. 5: Zoom de la tension de la phase V_{an} de l'onduleur..... | 33 |
| Figure III. 6: L'allure de courant I_a | 34 |
| Figure III. 7: Zoom du courant I_a | 34 |
| Figure III. 8: L'allure des courants I_{abc} | 34 |
| Figure III. 9: Spectre harmonique de la tension V_{an} | 35 |
| Figure III. 10: Zoom du spectre harmonique de la tension V_{an} (rangs 1 à 25). | 35 |
| Figure III. 11: Spectre harmonique du courant I_a | 35 |
| Figure III. 12 : Zoom du spectre harmonique du courant I_a | 35 |
| Figure III. 13 : Schéma bloc d'un onduleur triphasé MLI associé a une charge RL. | 37 |
| Figure III. 14: L'allure de V_{ao} | 37 |
| Figure III. 15: Tension de la phase V_{an} de l'onduleur..... | 38 |
| Figure III. 16: Zoom de la tension de la phase V_{an} de l'onduleur..... | 38 |
| Figure III. 17: L'allure du courant I_a | 38 |
| Figure III. 18: Zoom de l'allure du courant I_a | 39 |
| Figure III. 19: L'allure du courant I_{abc} | 39 |
| Figure III. 20: Spectre harmonique de V_{an} | 39 |
| Figure III. 21: Zoom du Spectre harmonique de V_{an} (rangs 2 à 27). | 40 |
| Figure III. 22: Spectre harmonique du courant I_a | 40 |
| Figure III. 23: Zoom du spectre harmonique du courant I_a | 40 |

TABLE DES NOTATIONS ET SYMBOLES

| | |
|---|---|
| NPC | Neutral-Point-Clamped. |
| MLI | Modulation à Largeur d'Impulsion. |
| THD | distorsion d'harmonique total. |
| MOSFET | Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect Transistor. |
| CEM | Compatibilité Electromagnétique. |
| DDT | direct Digital Technique. |
| DF | Distorsion Factor. |
| SPWM | Sinus Pulse Width Modulation. |
| IGBT | Insulated Gate Bipolaire Transistor. |
| DSP | Digital Signal Processor. |
| N | Le nombre de niveaux de tension obtenus à la sortie de l'onduleur. |
| S | Le nombre de sources à courant continu. |
| a,b,c | Indice correspondant aux trois phases. |
| K_{a1}, K_{a2} | Sont les commutateurs en haut de l'onduleur NPC à trois niveaux de tension. |
| K_{a1}, K_{a2} | Sont les commutateurs en bas de l'onduleur NPC à trois niveaux de tension. |
| K_{a1}, K_{a2}, K_{a3}, K_{a4} | Sont les commutateurs en haut de l'onduleur NPC à cinq niveaux de tension. |
| K_{a1}, K_{a2}, K_{a3}, K_{a4} | Sont les commutateurs en bas de l'onduleur NPC à cinq niveaux de tension. |
| K_s | Interrupteur bidirectionnel en courant. |
| I | Le courant d'enté. |

TABLE DES NOTATIONS ET SYMBOLES

| | |
|-----------------------------------|---|
| I_a, I_b, I_c | Les courants alternatifs de la charge. |
| I_{ks} | Le courant qui traverse l'interrupteur bidirectionnel K_s . |
| T_i | Semi-conducteur commandé (IGBT, GTO). |
| E | La tension du bus continu à l'entrée de l'onduleur. |
| V_a, V_b, V_c | Les tensions simples aux bornes de la charge. |
| T | La période de modulation. |
| M | Le point milieu. |
| $H_f (V)$ | Harmonique fondamental. |
| $h_n (V)$ | Harmonique de rang n . |

Introduction Générale

L'évolution de l'industrie utilise de plus en plus, dans l'alimentation des moteurs asynchrones de forte puissance, des convertisseurs statiques. Généralement, ce type de moteur est alimenté par des onduleurs triphasés à deux niveaux. L'analyse de courants et des tensions de phase des machines électriques alimentées par ces convertisseurs a montré plusieurs limitations [1],[2],[3]. Parmi ces dernières, l'apparition d'harmoniques prohibitifs qui occasionnant des pertes dans la charge et dans le convertisseur.

Au niveau du circuit de commande, ces harmoniques injectent des bruits introduisant des non-linéarités qui rendent plus difficile la stabilisation du système de réglage.

Les onduleurs les plus connus jusqu'ici sont les onduleurs à deux niveaux. Ces onduleurs à deux niveaux sont limités en tension (1.4KV) et en puissance (1MVA). Pour monter en puissance et en tension, on associe généralement plusieurs onduleurs en série ou en parallèle, d'où une complication dans la commande et une augmentation du coût du système.

Pour remédier à ces inconvénients, les structures de conversion multi-niveaux apportent des solutions par la mise en série de semi-conducteurs de puissance.

Il existe trois principales topologies des onduleurs multi niveaux :

1- Structure avec distribution du potentiel commun (Neutral Point Clamped : NPC). dont la solution à trois niveaux est réalisée dans ce mémoire.

2- Les onduleurs multi niveaux à cellules imbriquées, cette structure nécessite des tensions continues séparées.

3- Les onduleurs multi niveaux en cascade.

Les onduleurs multi niveaux symétriques sont une alternative au NPC. L'adoption de cette structure dans les installations industrielles a été motivée par des avantages tels que la réduction du taux de distorsion harmonique, l'amélioration du facteur de puissance, la minimisation des grandeurs de filtrage et avoir une tension presque sinusoïdale.

Dans le cadre de notre travail, nous nous sommes intéressés aux onduleurs de tension triphasés à cinq niveaux à structure NPC. Ce convertisseur permet d'obtenir une meilleure forme de la tension de sortie, tout en réduisant le taux de distorsion harmonique et les brusques variations de la tension lors des commutations [4],[5].

Nous avons organisé ce mémoire en trois chapitre :

Le premier chapitre présente une brève description des onduleurs et la principale contrainte à savoir l'apparition des harmoniques.

Introduction Générale

Le second chapitre concerne l'étude des topologies les plus importantes de la conversion multi niveaux.

Le troisième chapitre sera consacré à la simulation avec présentation des résultats, une comparaison sera fait pour les deux cas suivants : sans ML et avec MLI.

I.1. Introduction

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

Grâce aux progrès technologiques réalisés ces dernières années dans le domaine de l'électronique de puissance, les convertisseurs statiques comme les onduleurs voient progressivement leur champ d'applications s'élargir. Certaines de ces nouvelles applications, tel que le filtrage actif et la dépollution de réseaux électriques.

Dans ce chapitre on présente une brève description des onduleurs ; qui rendent l'énergie plus facile et plus accessible pour l'utilisation ainsi que les contraintes vu l'apparition des harmoniques. Nous verrons également quelques domaines d'applications des onduleurs.

I.2. Définition de l'onduleur

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

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

I.3. 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) [6].



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

I.4. Principe de fonctionnement d'un onduleur monophasé

I.4.1. Onduleur en demi-pont

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

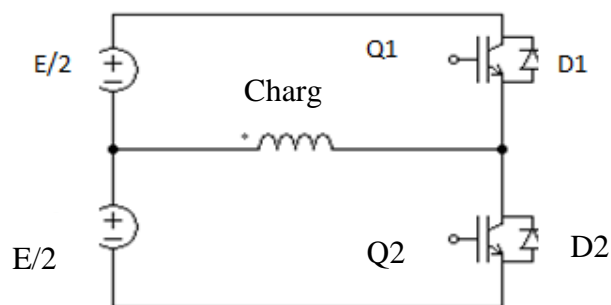


Figure I. 2: Onduleur en demi-pont.

I.4.2. Onduleur monophasé en pont

Pour éviter la nécessité d'une source à point milieu et doubler la tension de sortie, on utilise un onduleur en pont figure (I.3), dans ce cas. On commande sur une demi-période les transistors Q1, Q2 et les transistors Q3, Q4 sur le reste de la période.

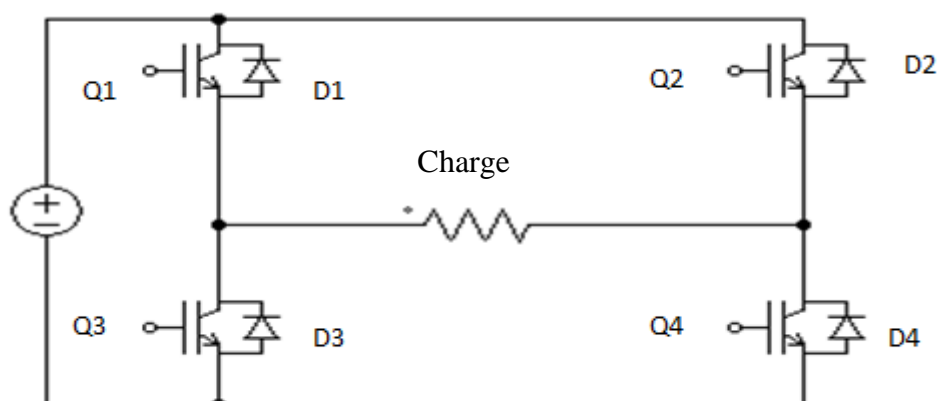


Figure I. 3: Onduleur monophasé en pont.

I.5. Onduleur triphasé en pont

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

L'onduleur triphasé doit évidemment, en régime nominal, délivrer un système de tension dont les composantes fondamentales forment un système équilibré [7].

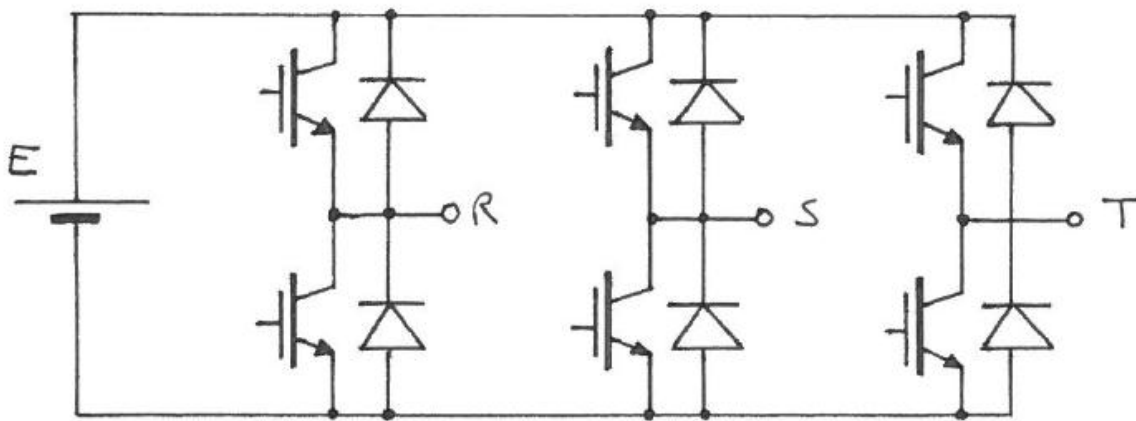


Figure I. 4: Onduleur triphasé.

I.6. Classification des onduleurs

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

I.6.1. Onduleur autonome

C'est un système qui nécessite des composants commandés à la fois à la fermeture et à l'ouverture, de fréquence variable, dont les instants de commutation sont imposés par la commande (un circuit analogique, une DSP ou un PIC). La charge est quelconque [8],[9].

I.6.2. Onduleur non autonome (assisté)

Dans ce cas, les composants utilisés peuvent être de simples thyristors commandés uniquement à la fermeture et la commutation est dite «naturelle » contrairement à l'onduleur autonome, c'est un redresseur fonctionnant en mode onduleur.

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 [8], [9].

I.7. Choix des semi-conducteurs

Les semi-conducteurs sont des matériaux solides utilisés pour la fabrication des composants électroniques. Le matériau semi-conducteur le plus utilisé est le silicium (Si). Autres matériaux semi-conducteurs: germanium (Ge), arséniure de gallium (AsGa), phosphore d'indium (InP)....

Ils sont caractérisés par leur résistivité qui peut varier de $10^{-4} \Omega.m$ à $10^2 \Omega.m$ en fonction de la température (ρ diminue lorsque T augmente – coefficient négatif -), ils se situent donc entre les conducteurs et les isolants.

Les semi-conducteurs ont été découverts au XIX^{ème} siècle mais leurs applications pratiques ont commencé en 1947 avec la découverte du transistor qui a remplacé les tubes à vide, encombrants, peu fiables et grands consommateurs d'énergie [13],[14].

Les composants à semi-conducteurs sont: diodes à jonction, transistors bipolaires, transistors à effet de champ (JFET et MOSFET), composants de puissance (thyristors, GTO, triacs, IGBT...), circuits intégrés.

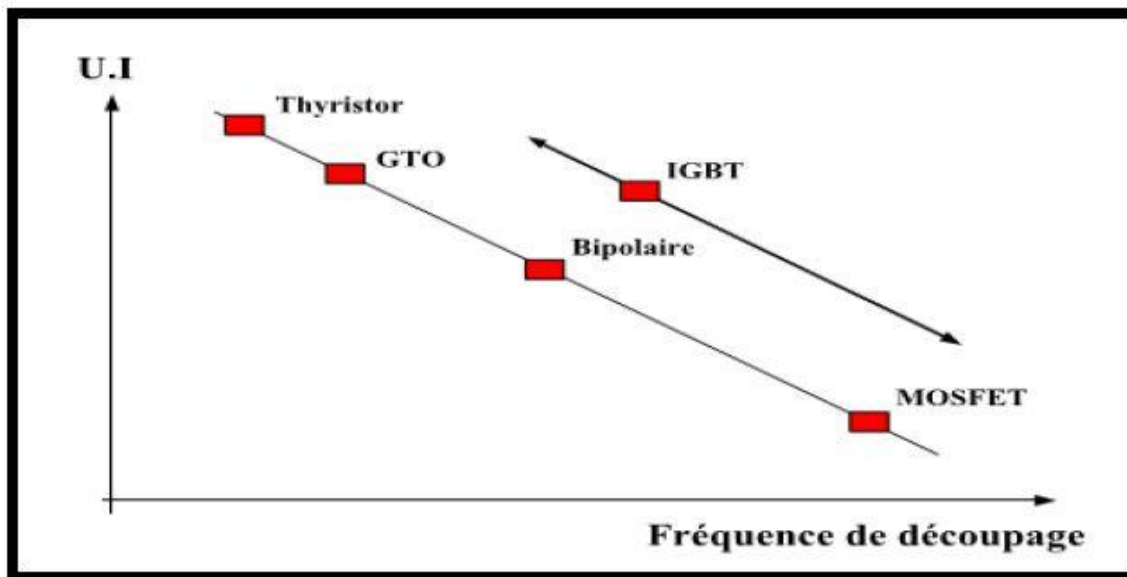


Figure I. 5 : Classification des composants de puissance en fonction de la fréquence de découpage des composants [15].

L'onduleur multi niveaux que nous avons utilisé, peut être réalisé par des semi-conducteurs commandable de type « transistors bipolaire, IGBT, etc. » [15].

I.8. Les applications des onduleurs

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

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

I.8.1. 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'onduleur à la fréquence désirée.

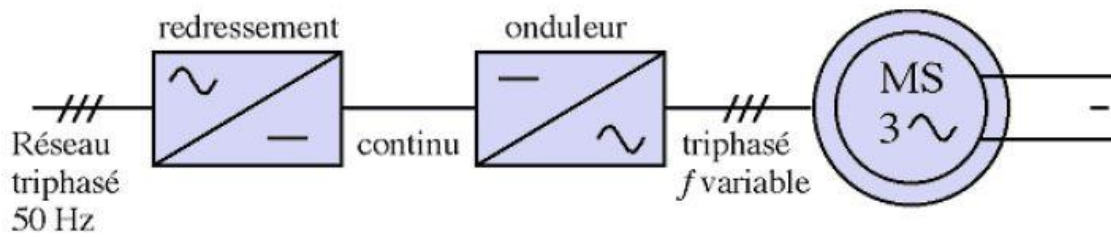


Figure I. 6: Principe de réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone.

I.8.2. Alimentation de secours

Lors d'une panne d'électricité, un onduleur assure la continuité de l'alimentation des machines à partir de batteries. En informatique professionnelle, un onduleur est indispensable pour éviter la perte d'informations en cas de panne du secteur [13].

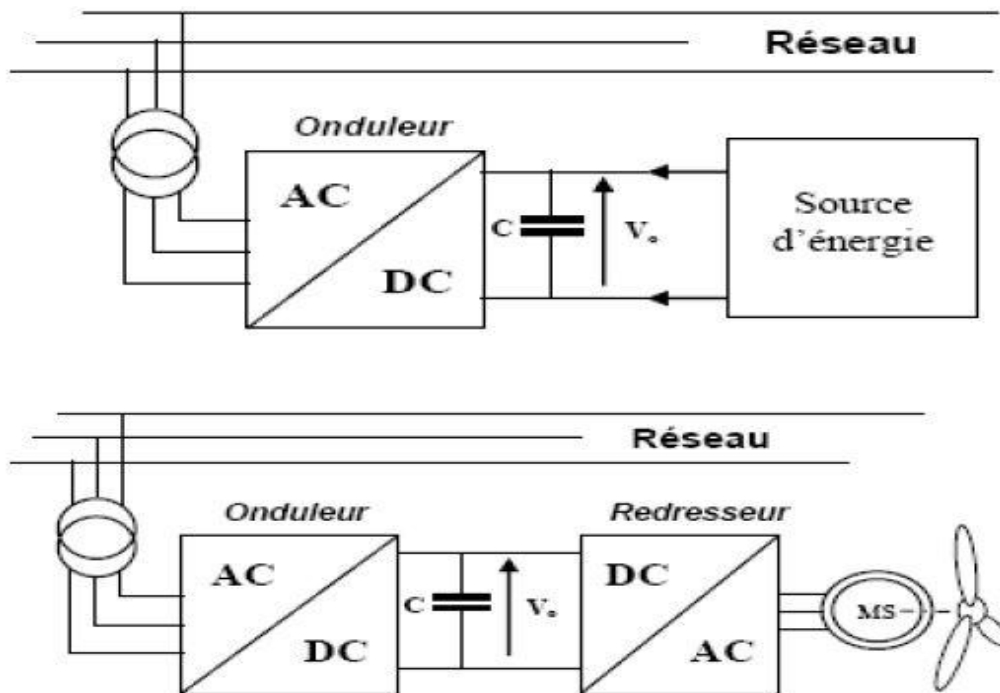


Figure I. 7: Alimentation de secours.

I.8.3. Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes

Le transfert de puissance électrique entre différents pays est rendu possible grâce à l'utilisation de redresseurs et d'onduleurs. En effet plusieurs connexions entre réseaux existent à travers le monde, par exemple, la France fournit de l'énergie électrique à la Grande-Bretagne, mais la fréquence du réseau anglais est 60 Hz. Il faut donc adapter la fréquence.

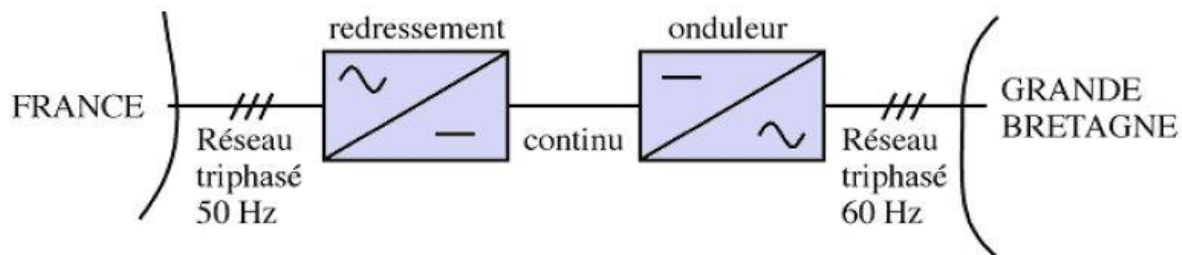


Figure I. 8 : Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes.

I.9. Analyse harmonique de la tension de sortie de l'onduleur

I.9.1 Origine des harmoniques

Les récepteurs non linéaires tels que fours à arc, éclairages, convertisseurs, redresseurs, absorbent des courants non sinusoïdaux qui traversent les impédances du réseau et provoquent ainsi une déformation de la sinusoïde de tension d'alimentation. La déformation de la forme d'onde est caractérisée par l'apparition de fréquences harmoniques de tension [14].

I.9.2. Déformation d'un signal sinusoïdal

Une tension déformée $Y(t)$ de période T ($T = 20$ ms à $f = 50$ Hz) peut donc s'écrire de la façon suivante :

$$y(x) = y(0) + \sum_{n=1}^{\infty} an\sqrt{2} * \sin(nw) + \sum_{n=1}^{\infty} bn\sqrt{2} * \cos(nw)$$

Un signal déformé est la résultante de la superposition des différents rangs d'harmoniques

I.9.3. Mode de représentation ; le spectre en fréquence

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

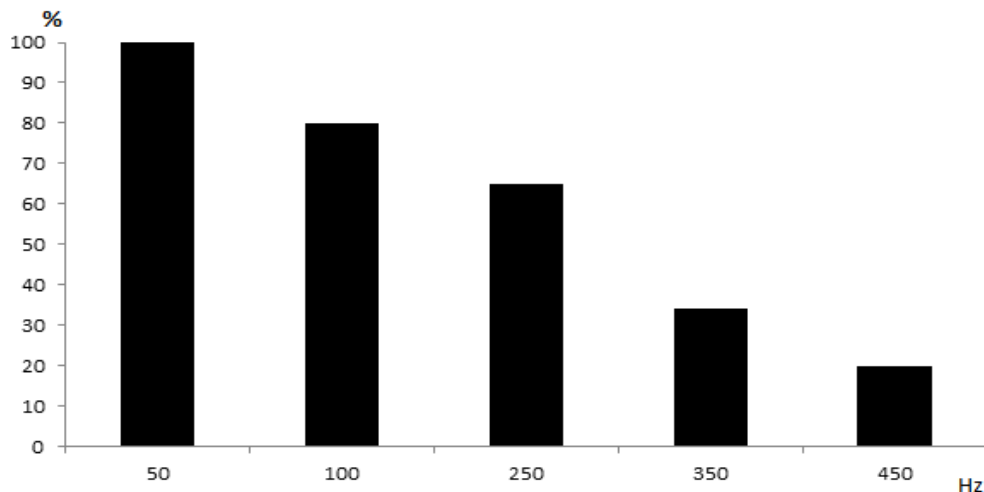


Figure I. 9: Spectre d'harmonique d'un signal électrique donné.

I.9.4. Les harmoniques mesurés en pratique

Les harmoniques les plus fréquemment rencontrés dans le cas des réseaux triphasés, sont les harmoniques de rangs impairs. Au-delà du rang 50, les courants harmoniques sont négligeables et leur mesure n'est plus significative.

Une bonne précision de mesure est obtenue en considérant les harmoniques jusqu'au rang 50. Et les harmoniques de rang 3, 5, 7, 9, 11 et 13 sont les plus surveillés.

La compensation des harmoniques jusqu'au rang 13 est impérative, une bonne compensation prendra également en compte les harmoniques jusqu'au rang 25.

I.10. Paramètre de performance de l'onduleur

La qualité de l'énergie fournit par un onduleur est évaluée suivant les paramètres de performance suivant [15].

I.10.1. Facteur de la n^{ième} harmonique

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

$$HFN = \frac{VEFFn}{VEFF1}$$

I.10.2. Distorsion d'harmonique total

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

$$THD = \frac{\sqrt{h_2^2 + h_3^2}}{f_1}$$

On va couramment jusqu'au 40^{ème} ou 50^{ème} rang d'harmoniques. Cette grandeur permet d'évaluer à l'aide d'un nombre unique la perturbation d'un courant ou d'une tension en un point d'un réseau, voire de comparer deux réseaux sujets à des harmoniques de rangs différents.

Le THD représente sensiblement l'augmentation de l'effet Joule dans les lignes et les dispositifs.

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

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

$$THD = \frac{\sqrt{H_2^2 + H_3^2 + \dots}}{\sqrt{F_1 + H_2^2 + H_3^2 + \dots}}$$

Lorsque la distorsion est faible, les deux valeurs THD et DF sont équivalentes.

Si le DF dépasse les 15 %, il est possible de corriger la mesure pour obtenir le taux de distorsion harmonique total.

$$THD = \frac{DF}{\sqrt{1 + DF^2}}$$

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

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

I.11. Conclusion

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

Dans le chapitre qui on va essayer de mieux comprendre les onduleurs multi-niveaux qui sont considéré comme une solution à le handicap technologique des onduleurs.

II.1. Introduction

La technologie de conversion de l'énergie du continu vers l'alternatif en utilisant les convertisseurs statiques est une partie de l'électronique de puissance en pleine croissance. Cela tient essentiellement à deux raisons [16] :

- La première est l'étendue du domaine de leurs applications ;
- La seconde vient de l'amélioration des performances des semi-conducteurs de puissance et de l'apparition de nouveaux composants permettant l'implantation de nouvelles stratégies de commande plus performantes.

La demande en puissance des applications industrielles a augmenté considérablement ces dernières années, jusqu'à atteindre l'ordre de quelque mégawatts (de l'ordre de 10MW) pour les basses et moyennes tensions. L'utilisation de convertisseurs conventionnels à deux niveaux, à grandes fréquences de commutation, est limitée à ce niveau de puissance à cause des pertes non négligeables engendrées par la commutation des interrupteurs. En plus on se trouve obligé d'associer plusieurs interrupteurs en série et en parallèle afin de respecter les limites physiques des interrupteurs utilisés. Donc l'utilisation des convertisseurs multi niveaux dans les applications de moyenne et haute puissances est proposée comme une solution à l'handicap technologique des semi-conducteurs.

Le concept de convertisseurs multi niveaux a été mis en place depuis 1975. Le terme multi niveaux a commencé avec les convertisseurs à trois niveaux. Ultérieurement, plusieurs topologies de convertisseurs multi niveaux ont été développées.

L'onduleur multi niveaux présente plusieurs avantages, parmi lesquels on peut mentionner:

- La qualité d'onde : les convertisseurs multi niveaux peuvent non seulement générer les tensions de sortie avec une distorsion très faible, mais peut aussi réduire le dV/dt souligne, donc certains problèmes de compatibilité électromagnétique (CEM) peuvent être réduits.
- La tension de mode commun : les convertisseurs multi niveaux produisent une tension de mode commun plus réduite, donc une durée de vie des moteurs plus importante quand ils sont utilisés pour les entraînements électriques. En outre, la tension de mode commun peut être éliminée en utilisant des stratégies de modulation avancée.

- Courant d'entrée : les convertisseurs multi niveaux peuvent tirer un courant d'entrée avec une faible distorsion.

II.2. Naissance des onduleurs multi-niveaux

Lorsque les convertisseurs statiques permettent de commuter chaque entrée en sortie entre deux niveaux de tension ou de courant, on parle alors de convertisseur à deux niveaux, les critères de contrôle de transfert d'énergie en règle générale, dépendent de la nature des sources et des contraintes imposées par l'application.

De très nombreuse investigations ont été faites sur un convertisseur à deux niveaux, dont l'entrée est une source de tension continue et la sortie est une machine électrique a courant alternatif. L'analyse du courant et de la tension des machines électriques alimentées.

Les convertisseurs à deux niveaux ont montré plusieurs limitations, notamment des brusques changement de tension (dv/dt) [17],[18]. Mais aussi l'existence des harmoniques excessifs pour le système, occasionnant des pertes dans la charge et le convertisseur (surtout des pertes joules dans la charge et dans le convertisseur).

C'est pour pallier à ces inconvénients que certains chercheurs ont introduit des convertisseurs ayant trois niveaux ou plus, de tension et qui génèrent moins d'harmoniques [19].

D'un autre côté, la naissance des applications nécessitant une alimentation moyenne tension et facilement réglable a poussé la communauté d'électroniciens de puissance a chercher de nouvelle structures de convertisseurs , qui contournent la limitation en tension de blocage des principaux semi-conducteur de puissance. Ces nouvelles structures furent une extension des convertisseurs à trois niveaux existants. C'est ainsi qu'il a été possible d'obtenir plusieurs niveaux de tension a la sortie des convertisseurs, réduisant par la même occasion le (dv/dt) lors des commutations.

Un convertisseur multi niveaux peu commuter chaque entrée en sortie au moins entre trois niveaux de tension ou de courant .De manière générale plus le nombre de niveaux de la tension générée par le convertisseur est grand, plus faible sera son taux de distorsion harmonique.

II.3. Intérêt des convertisseurs statiques multi-niveaux

Un convertisseur statique est dit « multi niveaux » lorsqu'il génère une tension découpée de sortie composée d'au moins trois niveaux. Ce type de convertisseur présente essentiellement deux avantages. D'une part les structures multi niveaux permettent de limiter les contraintes en tension subies par les interrupteurs de puissance : chaque composant, lorsqu'il est à l'état bloqué, supporte une fraction d'autant plus faible de la pleine tension continu que le nombre de niveaux est élevé. D'autre part, la tension de sortie délivrée par les convertisseurs multi niveaux présente d'intéressantes qualités spectrales. Le fait de multiplier le nombre de niveaux intermédiaires permet de réduire l'amplitude de chaque front montant ou descendant de la tension de sortie. L'amplitude des raies harmoniques est, par conséquent, d'autant moins élevée [20] [21].

II.4. Principe de l'onduleur multi-niveaux

Ce paragraphe a pour but d'introduire le principe général du comportement Multi-niveaux. La figure 1 aide à comprendre comment travaillent les convertisseurs Multi-niveaux [22], [23]. Un convertisseur à deux niveaux est représenté à la figure (II.1.a), dans laquelle les commutateurs semi-conducteurs ont été remplacés par un interrupteur idéal. La tension de sortie ne peut prendre que deux valeurs: 0 ou V_{dc1} . Sur la figure (II.1.a), la tension de sortie de trois niveaux peut prendre trois valeurs: 0, V_{dc1} ou $V_{dc1} + V_{dc2}$. Dans la figure (II.1.c), c'est le cas général de m niveaux est présenté [24].

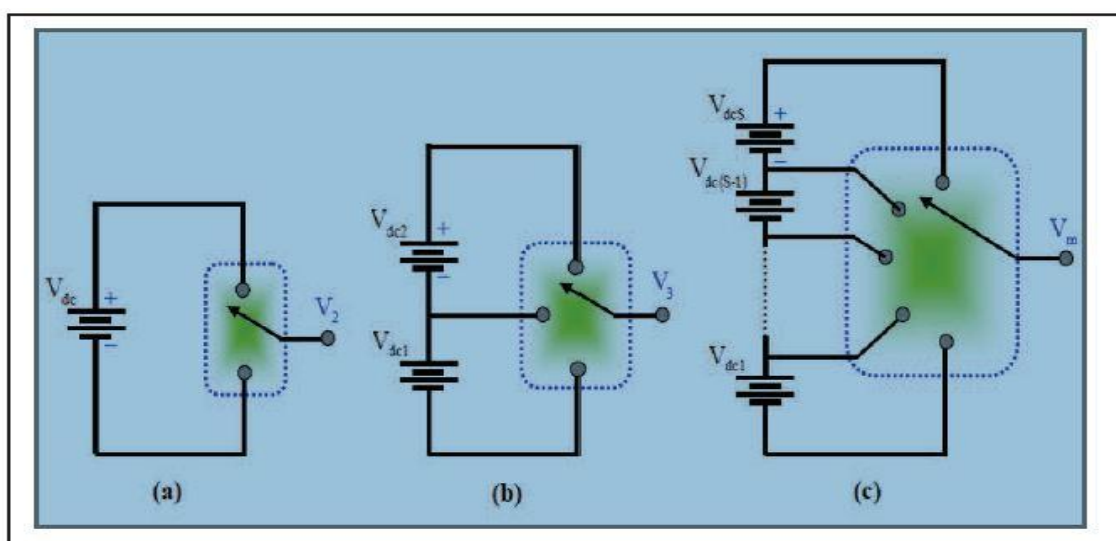


Figure II.1 : Onduleur à niveaux multiples à deux (a), à trois (b) et à m niveaux (c).

II.5. Différentes topologie des onduleurs multi-niveaux

Par définition, l'onduleur de tension multi-niveaux possède trois ou plusieurs niveaux. L'objectif de cette partie est de donner un aperçu général des trois topologies de base des onduleurs multi-niveaux[25], [26]:

- la topologie à diode de bouclage
- la topologie à condensateur flottant
- la topologie en cascade

La figure (II.2) suivante montre les différentes topologies de base des onduleurs multi-niveaux :

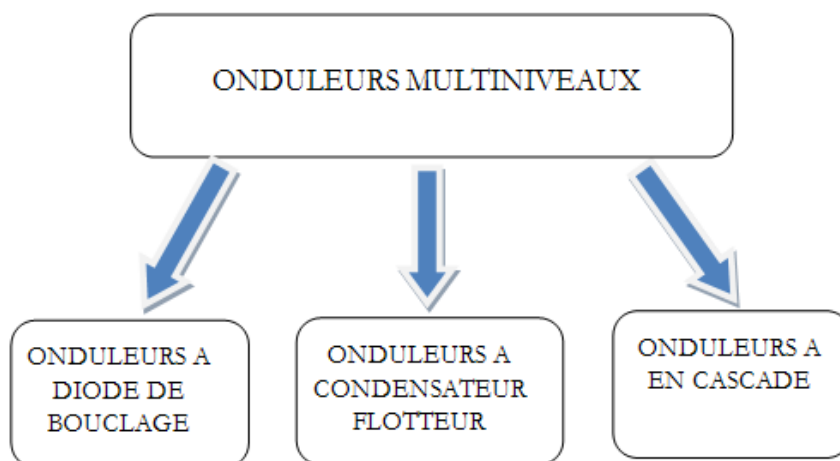


Figure II.2 : Les différentes topologies des onduleurs multi niveaux.

II.5.1. Onduleur de tension à diode de bouclage (NPC)

Cette structure d'onduleur multi-niveaux a été introduite par A. Nabae et H.Akagi en 1981.

L'objectif était de réduire l'amplitude des harmoniques injectés par l'onduleur dans la charge pour des applications de type alimentation de moteur [23]. L'onduleur NPC à trois et cinq niveau est illustré dans la figure (II.3).

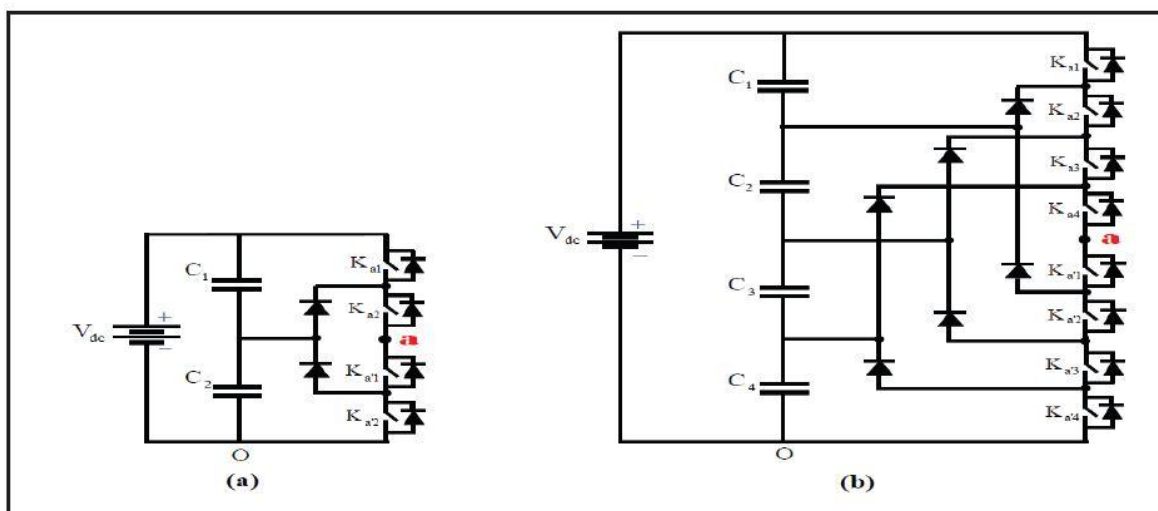


Figure II.3 : Topologies d'onduleurs NPC à trois (a) et à cinq niveaux (b).

La topologie NPC présente plusieurs avantages par rapport à la topologie d'onduleur à deux niveaux. [19], [25].

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

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

- Pour les topologies avec plus de trois niveaux, les diodes de bouclage peuvent augmenter les contraintes en tension jusqu'à une valeur égale à $E(N-1)/N$. Donc, les connexions des diodes en série pourraient être exigées et cela complique la conception et soulève des questions de fiabilité et du coût de réalisation.

- Cette topologie exige des diodes de bouclage à vitesse de commutation élevée qui doivent être capable de supporter le courant de la pleine charge.
- Différents calibres pour les appareils de commutation sont nécessaires en raison de leur conduction cyclique.

II.5.2. Onduleur de tension a condensateur Flottant

Dans la topologie multi-niveaux proposée par T. Meynard et H. Foch en 1992. La structure de ce convertisseur est similaire à celle de l'onduleur à diode de bouclage sauf qu'au lieu d'utiliser des diodes de blocage, l'onduleur utilise des condensateurs à leur place. D'où l'appellation « Onduleur à Condensateurs Flottants ». Cette structure est proposée pour résoudre d'une part le problème de balancement de tension, et d'autre part le nombre excessif des diodes.

Dans la topologie suivante, figure (II.4), on représente l'onduleur à condensateur flottant à trois et cinq niveau [27].

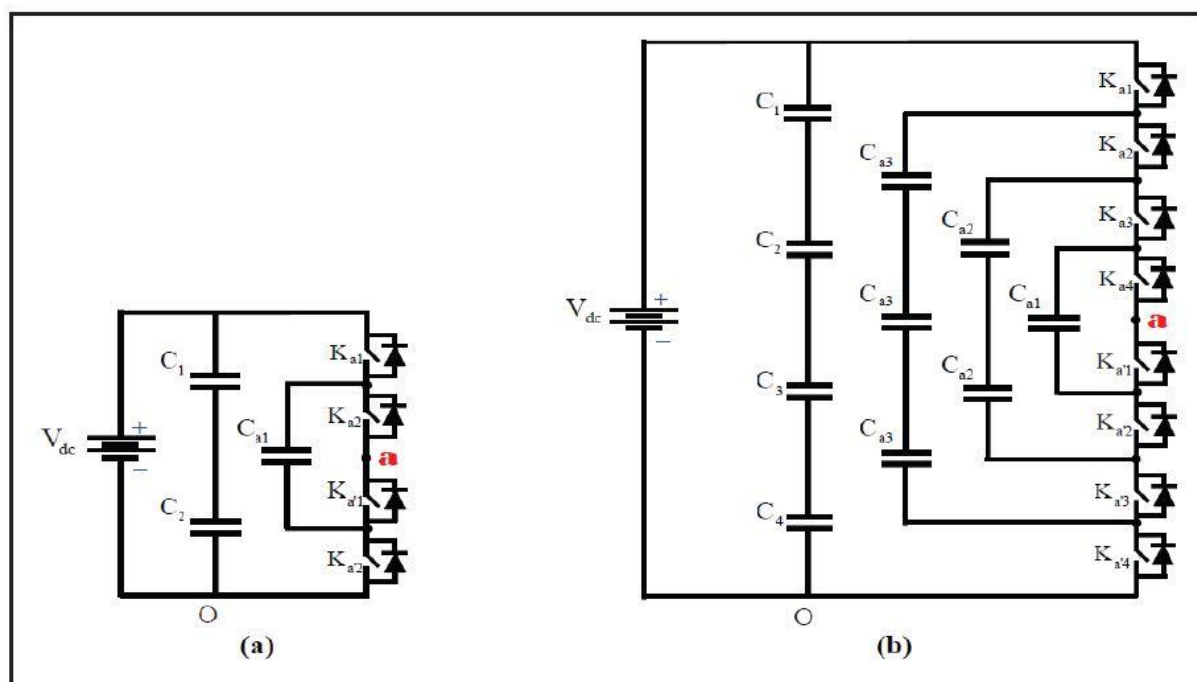


Figure II.4 : Topologies d'onduleurs NPC à condensateur Flottant à trois (a) et à cinq niveaux (b).

Ce type de convertisseur présente plusieurs avantages : [19]

- Le concept de condensateur Flottant peut être appliquée à un certain nombre de

convertisseurs de différents types, DC /AC ou AC/ DC

- La plupart des stratégies de modulation sont facilement appliquée à cette topologie
- Les tensions sur les condensateurs sont automatiquement équilibrées par cette stratégie de modulation conventionnelle. Si désiré, les tensions de condensateur peuvent être activement contrôlées par une modification appropriée des signaux de commande.
- La charge est par défaut partagé équitablement entre les commutateurs.
- La topologie est modulaire et ne dépend pas d'un transformateur.

Néanmoins, cette topologie présente quelque inconvénients, tel que:

- La topologie exige beaucoup de condensateurs à haute tension beaucoup plus nombreux que d'autres topologies. Ces condensateurs doivent conduire le courant de pleine charge pendant au moins une partie du cycle de commutation .Heureusement, si la fréquence de commutation est élevée, ces condensateurs peuvent généralement être relativement faibles en valeur de la capacité.
- La topologie n'est pas intrinsèquement tolérante aux pannes.

II.5.3. Onduleur de tension en cascade

Les onduleurs multi-niveaux en cascade est une structure relativement nouvelle. Un onduleur multi-niveaux en cascade est tout simplement une connexion en série de plusieurs Onduleurs monophasés.

Les onduleurs multi-niveaux en cascade on introduit l'idée d'utiliser des sources DC séparée pour produire une onde de tension AC. Chaque onduleur monophasé est connecté à sa propre source en courant continu. Les sorties de chaque onduleur monophasé, est une onde de tension alternative, Figure (II.5). [28].

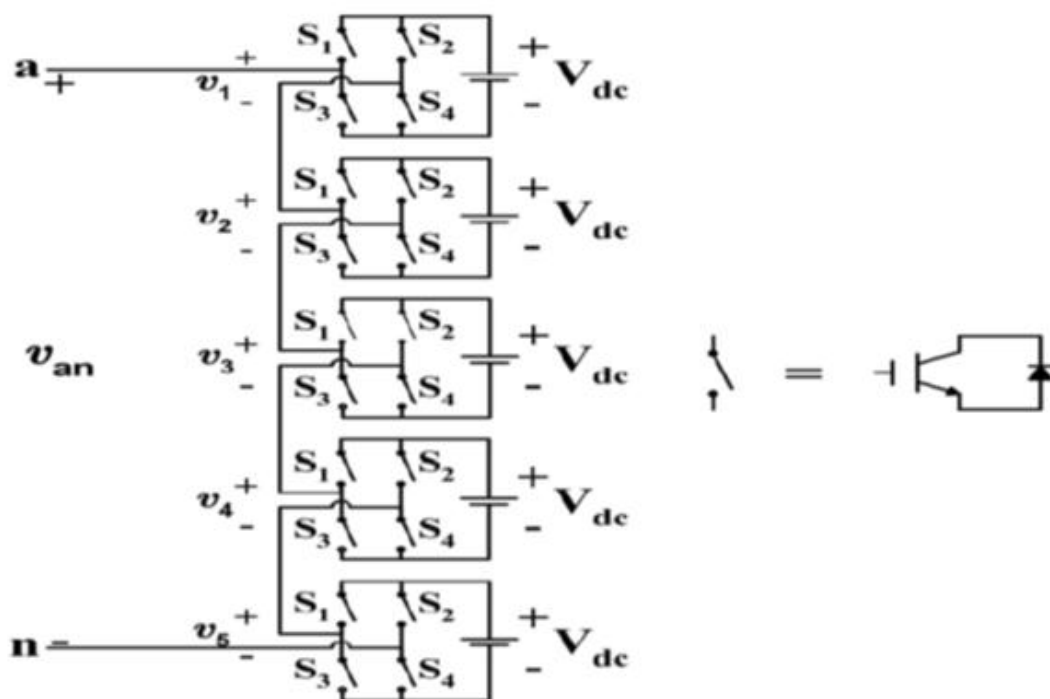


Figure II.5 : Structure d'un onduleur multi-niveaux en cascade à cinq niveaux.

Comme toutes structures, l'onduleur multi-niveaux en cascade possède des avantages et inconvénients dont on peut citer:

Avantage:

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

Inconvénients:

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

II.6. Comparaison entre les trois principaux convertisseurs multi niveaux

On peut trouver dans la littérature des descriptions intéressantes des trois topologies de base, avec leurs avantages et inconvénients, comme celle offerte par Lai et Peng dans ou par Shakwek et Lewis. Dans le tableau(II.1) montre, de manière résumée, les principales caractéristiques des trois topologies multi niveaux de base pour un convertisseur de m niveaux. La sélection de la topologie multi niveaux la plus adéquate pour chaque application n'est pas évidente, jusqu'à présent c'est un défi non résolu dans la littérature.

| Configuration | Les trois topologies de base des onduleurs multiniveaux | | |
|---------------------------------------|---|-------------------------|--------------|
| | Diodes de bouclage | Condensateurs Flotteurs | En cascade |
| Dispositifs principaux de commutation | $2(m-1)$ | $2(m-1)$ | $2(m-1)$ |
| Diode antiparallèle | $2(m-1)$ | $2(m-1)$ | $2(m-1)$ |
| Diode de bouclage | $(m-1)(m-2)$ | 0 | 0 |
| Condensateur de bus continu | $(m-1)$ | $(m-1)$ | $(m-1)/2$ |
| Condensateur d'équilibrage | 0 | $(m-1)(m-2)/2$ | 0 |
| Total | $m^2 + 2m - 3$ | $(m^2 + 8m - 8)/2$ | $(9/2)(m-1)$ |

Tableau II.1: Comparaison entre les trois topologies de base des convertisseurs multi-niveaux.

II.7. Propriétés des principales structures

II.7.1. Classification des topologies selon leur alimentation

Les topologies telles que les onduleurs NPC et les onduleurs à cellules imbriquées divisent leur tension d'alimentation, la tension de sortie est plus petite ou égale à la tension continue d'entrée. Elles sont capables de fonctionner à partir d'une alimentation continue unique.

Au contraire, les structures telles que les onduleurs en cascade élèvent leur tension d'alimentation, la tension maximale est plus grande que chacune des tensions d'alimentation ; elle est plus petite ou égale à la somme des tensions d'alimentation.

II.7.2. Nombres de composants nécessaires

Du point de vue du nombre de composants, les onduleurs à cellules cascadées paraissent être la solution multi niveaux la plus avantageuse, surtout lorsque le nombre de niveaux devient important. C'est effectivement le cas pour les applications monophasées telles que le filtrage actif ou la compensation statique, lorsque le convertisseur n'a pas besoin de fournir d'énergie au système. Pour les applications triphasées et pour un petit nombre de niveaux, les onduleurs NPC sont intéressants, car les condensateurs sont partagés par les différentes branches, ce qui permet un équilibrage de la puissance circulant entre les phases. Cet équilibrage permet une réduction notable de la taille des condensateurs intermédiaires, [29][30].

II.8. Onduleur à cinq niveaux de type NPC

II.8.1. Structure de l'onduleur à cinq niveaux

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.6) donne une représentation schématique d'un bras de cet onduleur, [31].

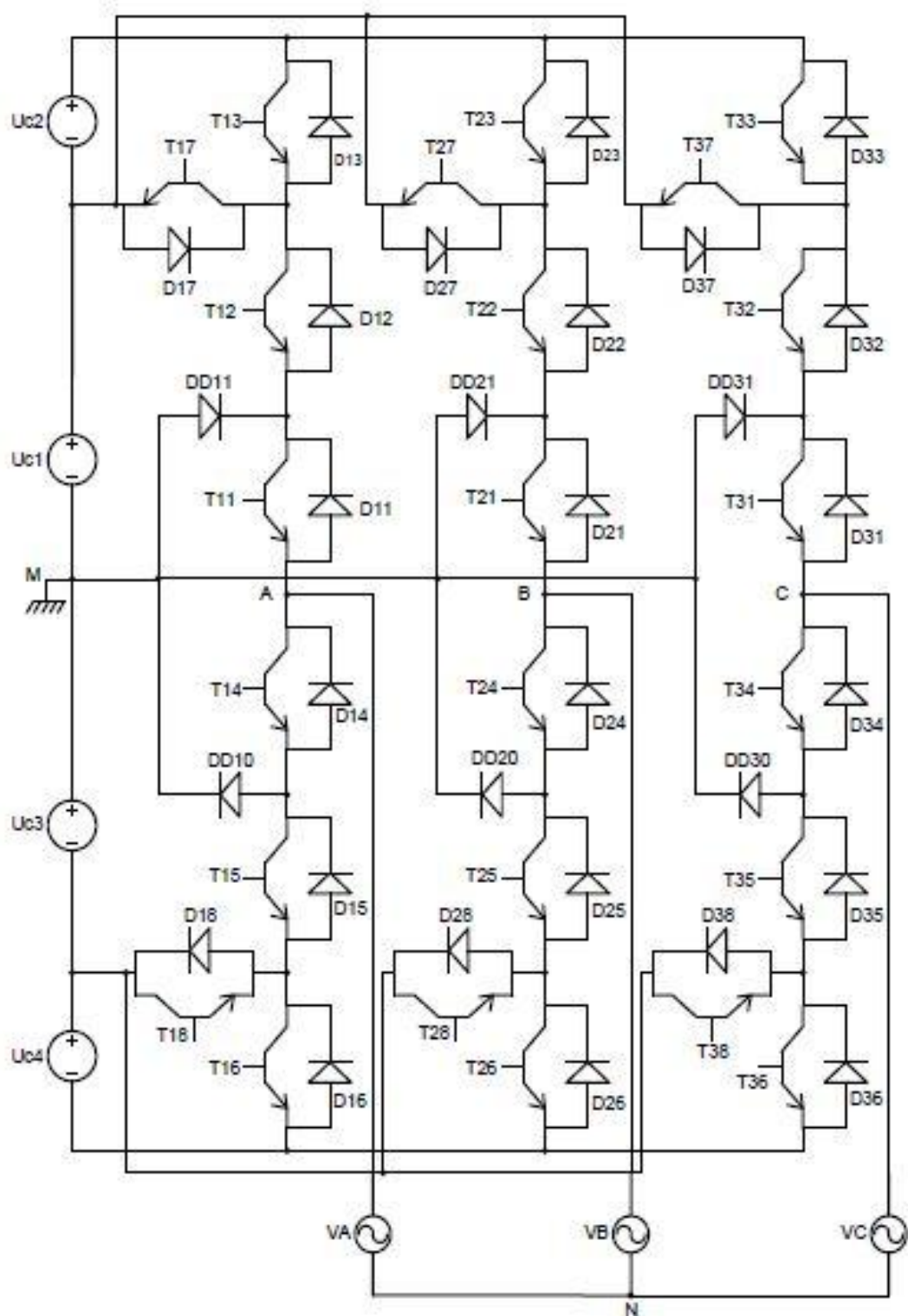


Figure II.6 : Schéma d'un onduleur triphasé à cinq niveaux à structure NPC.

II.8.2. Fonctionnement d'un onduleur a cinq niveaux

Afin d'élaborer les différentes configurations de l'onduleur a cinq niveaux, sans a priori sur la commande, on considère les hypothèses suivantes :

- Chaque paire transistor-diode est représenté par un seul interrupteur bidirectionnel supposé idéal figure(II.7).
- Vue la symétrie de l'onduleur triphasé a cinq niveaux, la modélisation de ce dernier se fera par un bras.
- Les tensions U_{c1} , U_{c2} , U_{c3} , U_{c4} sont des tensions continue supposée idéales (égales et constantes), $U_{c1}=U_{c2}=U_{c3}=U_{c4}=U_c$.

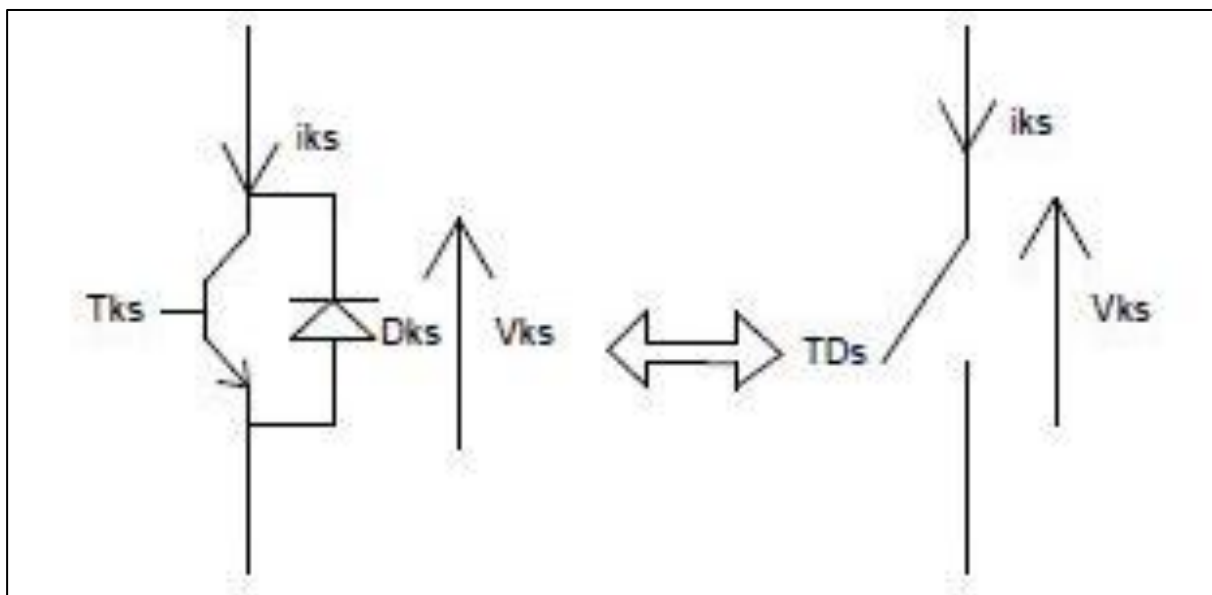


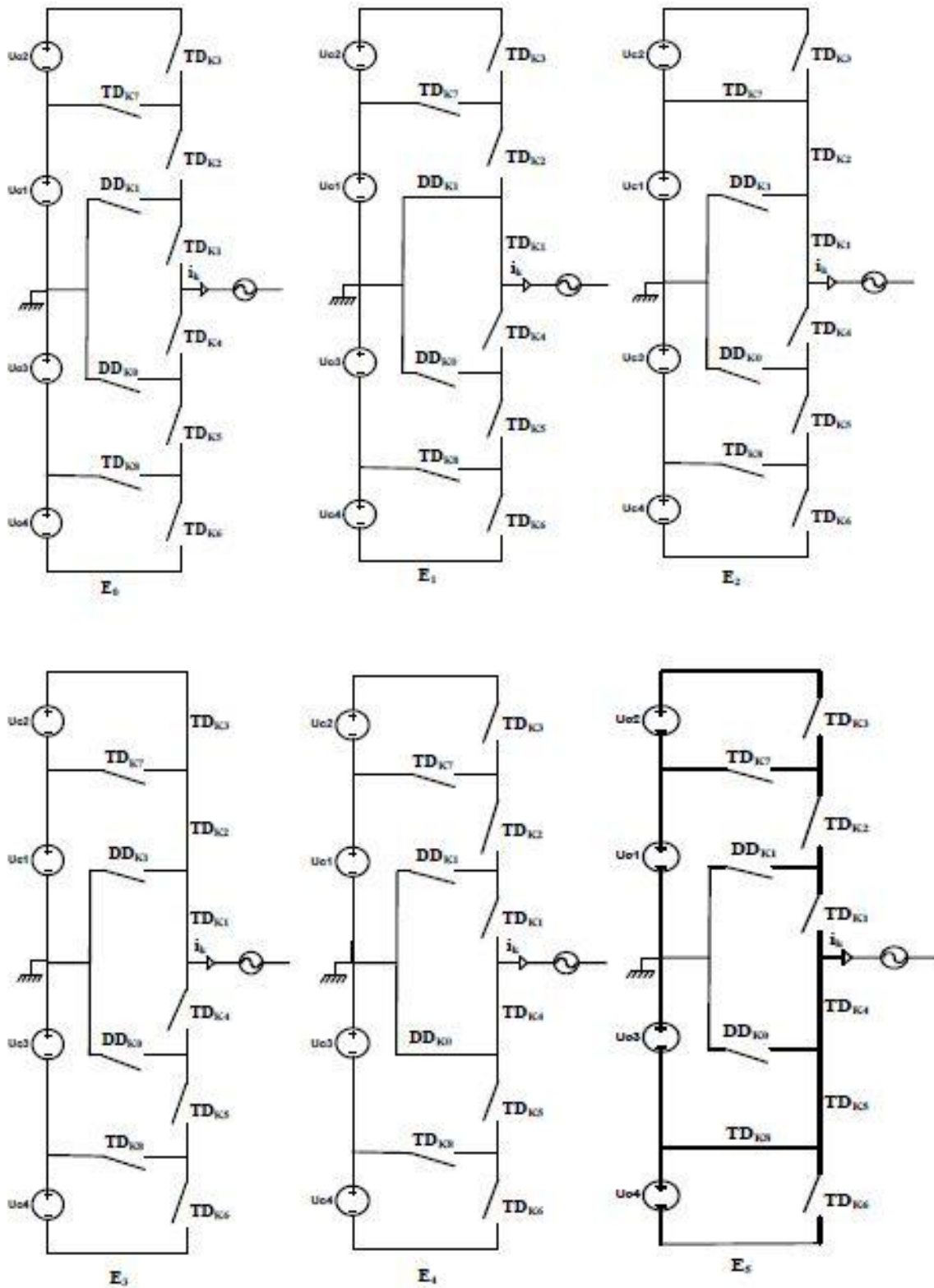
Figure II.7 : Interrupteur bidirectionnel équivalent au paire transistor-diode.

II.8.3. Différentes configurations d'un bras de l'onduleur NPC à cinq niveaux

L'analyse topologique d'un bras de l'onduleur triphasé a cinq niveaux a structure NPC montre qu'il existe sept configurations possibles figure(II.8).les grandeurs électriques caractérisant chacune de ces configurations sans représentées dans le tableau (II.2) (avec M origine des potentiels et V le potentiel du nœud k du bras K).

| configuration | Grandeurs électriques |
|----------------|------------------------------|
| E ₀ | $I_K=0$ |
| E ₁ | $V_K=0$ |
| E ₂ | $V_K=U_{c1}=U_C$ |
| E ₃ | $V_K=U_{c1}+U_{c2}=2U_C$ |
| E ₄ | $V_K=0$ |
| E ₅ | $V_K= -U_{c1}= -U_C$ |
| E ₆ | $V_K= -U_{c1} -U_{c2}=-2U_C$ |

Tableau II.2 : Grandeurs électriques correspondantes aux différentes configurations du K^{ième} bras de l'onduleur à cinq niveaux à structure NPC (illustré à la figure ci-dessous).



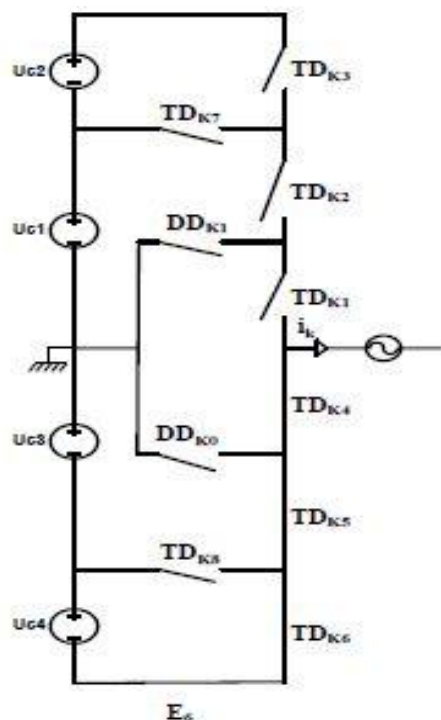


Figure II.8 : Différentes configurations du bras K d'onduleur a cinq niveaux.

II.9. Modulation à largeur d'impulsion MLI

La technique de modulation en largeur d'impulsion MLI (**M**odulation de **L**argeur d'**I**mpulsion ou PWM : **P**ulse **W**idth **M**odulation) est l'essor et le fruit du développement de l'électronique de puissance à la fin du siècle dernier. Elle est le cœur du contrôle des convertisseurs statiques. Le choix de la technique MLI pour contrôler l'onduleur de tension est d'avoir une réponse rapide et des performances élevées. Le choix de la technique dépend du type de la machine à commander, du type des semi-conducteurs, de la puissance mise en jeu et la simplicité ou la complexité d'algorithmes à implanter. La MLI est composée d'impulsions dont la largeur dépend des choix effectués pour la stratégie de modulation [14].

Pour le cas des onduleurs multi-niveaux, la qualité des signaux sont certes satisfaisantes, mais il serait intéressant, dans le cadre de ce travail, d'appliquer une MLI et d'estimer sa contribution à l'amélioration de la qualité. En outre, l'étude permettra de conclure sur l'utilité ou pas de la modulation.

Il existe plusieurs types de méthodes ou fonctions MLI. Une description non-exhaustive de l'ensemble de ces stratégies est résumée, ci-après, comme suit :

a. MLI intersective (Modulation par porteuse)

C'est une stratégie MLI triphasée, simple à réaliser en analogique initialement conçue en monophasé et son implantation numérique est plus compliquée du fait qu'un grand nombre d'échantillons de la modulante doit être sauvegardé dans une mémoire ROM pour pouvoir obtenir une bonne précision du signal modulé. Son principe est facile avec une simple comparaison, pour chaque bras, entre un signal de référence (la modulante) et un signal triangulaire « dent de scie » de fréquence plus élevée (la porteuse). La fréquence de la porteuse définit la fréquence de découpage, et les points d'intersection entre la modulante et la porteuse correspondent aux instants de commutation au moment desquels l'onduleur change d'état. Parmi les variantes de la modulation MLI intersective, la plus populaire étant la modulation sinusoïdale « Modulation sinus-triangle SPWM (Sinusoïdal PWM) ».

b. MLI Vectorielle (Modulation poste calculer)

La modulation vectorielle (Space Vector Modulation) est une technique numérique. Les ordres de commutations des interrupteurs sont déterminés par un algorithme et sont calculés analytiquement à travers des équations mathématiques avec un vecteur tension de contrôle qui est calculé globalement et approximé sur une période de modulation, par un vecteur tension moyen, puis les ordres de commandes adéquats sont appliqués aux interrupteurs.

Contrairement à d'autres méthodes, la MLI vectorielle ne s'appuie pas sur des calculs séparés des modulations pour chacun des bras de l'onduleur afin d'obtenir en valeur moyenne une tension de référence à partir des états de commutation de l'onduleur et en fin les vecteurs à appliquer et les temps d'application de ces vecteurs.

c. MLI pré-calculée (Modulation pré-calculée)

Le développement des technologies numériques permet le recours à des stratégies de modulation triphasées spécifiques, non déduites des techniques analogiques. Elle est appelée aussi la technique directe numérique (DDT- Direct Digital Technique) ou technique sans porteuse. Son principe est de générer des impulsions grâce à des séquences préalables calculées et stockées dans une mémoire [27].

II.10. Conclusion

La technique des onduleurs multi-niveaux représente un domaine de recherche important. Dans ce chapitre nous avons présenté la description des principales topologies de la conversion multi-niveaux avec leurs avantages et inconvénients. Ces topologies comprennent principalement la technique des onduleurs NPC à potentiels distribués, la

technique dite des cellules imbriquées, ainsi que la technique des convertisseurs cascades et aussi les différentes stratégies de modulation.

Les onduleurs NPC sont intéressants pour les applications triphasées nécessitant peu de niveaux. Les onduleurs multi-niveaux en cascade sont plus avantageux que ceux de NPC ou onduleurs à condensateur à flottant en point de vue de nombre de composants nécessaires à utiliser.

Le chapitre suivant sera consacré à la simulation de l'onduleur de tension triphasé à diode de Bouclage (NPC) de cinq niveaux.

III.1. Introduction

Les onduleurs de tension triphasé à cinq niveaux à structure NPC jouent un rôle incontournable dans des applications de forte puissances et haute tension.

Ce chapitre est consacré à la simulation sous MATLAB de cet onduleur à structure NPC à cinq niveaux. Associé à une charge RL, la simulation a été réalisée sans la commande MLI et avec une commande MLI.

III.2. Modélisation de l'onduleur triphasé à cinq niveaux à structure NPC

Les interrupteurs étant considérés comme parfait, le modèle de l'onduleur multi-niveau que nous avons choisi est à base d'équations mathématiques et logiques traduisant son fonctionnement selon les chronogrammes de conduction des interrupteurs. Il constitue donc l'image même de sa commande, c'est pour cela que nous nous contentons dans cette section du modèle de commande illustré par les signaux logiques de conduction des interrupteurs (tableau III.1. et figure III.1.).

Pour éviter la conduction simultanée des six interrupteurs d'un seul bras qui peut engendrer leur destruction par croissance du courant lors du court-circuit ou par une surtension dans le cas de l'ouverture de tous les interrupteurs, on définit une commande complémentaire des différents semi-conducteurs d'un bras, plusieurs commandes complémentaires sont possibles pour un onduleur à cinq niveaux, puisque l'onduleur triphasé à cinq niveaux est symétrique, donc l'étude se fera par bras et la commande la plus optimale est la suivante :

$$\begin{aligned}
 K_{a1} &= \overline{K_{a5}} \\
 K_{a2} &= \overline{K_{a4}} \\
 K_{a3} &= \overline{K_{a6}} \\
 K_{a7} &= \overline{K_{a1} K_{a2} K_{a3}} \\
 K_{a1} &= \overline{K_{a4} K_{a5} K_{a6}}
 \end{aligned}$$

Où K_{as} désigne la commande de base du transistor T_{ks} et k indique le numéro du bras (1,2 ou 3), K_{as} vaut 1 lorsque T_{ks} est fermée et elle vaut 0 dans le cas contraire.

$K_{as} = 1$ si T_{ks} est fermée.

Ou

$K_{as}=0$ si T_{ks} est ouvert.

Les cinq niveaux de tension délivrés par l'onduleur ainsi que les états des interrupteurs correspondants sont indiqués au tableau suivant :

| Etat des interrupteurs | | | | | | | | Tension De sortie V_{ao} |
|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------------------------|
| K_{a1} | K_{a2} | K_{a3} | K_{a4} | K_{a5} | K_{a6} | K_{a7} | K_{a8} | |
| 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 III.1 : Table de commutation de l'onduleur NPC à 5 niveaux

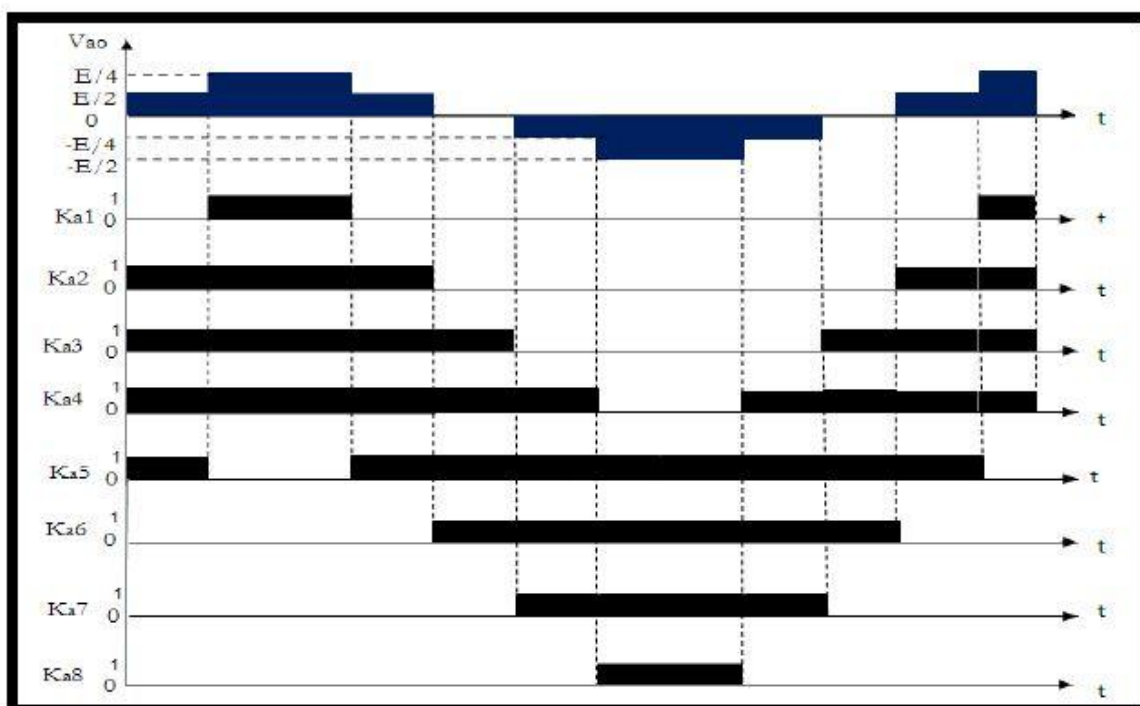


Figure III. 1: les signaux de commande de chaque interrupteur et la forme d'onde de la tension de sortie V_{ao}

III.3.xpression des tensions V_{an} , V_{bn} , V_{cn} en fonction des tensions V_{ao} , V_{bo} , V_{co}

Sachant que la charge triphasée est reliée en étoile équilibrée avec neutre non relié nous aurons :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0$$

III.1

En outre en appliquant la loi des mailles nous obtenons :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \quad III.2$$

III.1 et III.2 donnent :

$$V_{on} = -\frac{1}{3} (V_{an} + V_{bn} + V_{cn}) \quad III.3$$

Finalement de III.2 et III.3 nous tirons :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{bmatrix} \quad III.4$$

III.4. Paramètres de simulation

Afin de monter les performances de ce convertisseur, deux (02) simulations sont réalisées : sans MLI, puis avec une commande MLI à une seule porteuses. Dans la littérature on trouve que la modulation se fait par quatre porteuses, cependant nous avons observé que la différence est minime, nous nous sommes alors contenté de présenter la simulation avec une seule porteuse.

L'environnement de simulation utilisé est Simulink/Matlab, Les interrupteurs seront considérés comme étant parfait, les modèles de simulations seront donc réduits à de pures expressions logiques et mathématiques.

La charge de l'onduleur est de type RL, $R=1\Omega$, $L=0,1H$. La fréquence de modulation (pour les deux cas de MLI) est de 2 KHZ, (40 fois 50HZ). La simulation est à pas fixe égale à $2.10^{-5}s$, largement inférieur à la plus faible constante de temps du système qu'est la période de modulation .

Afin de juger la qualité des signaux, des analyses de fourier sont réalisés par un programme écrit sous MATLAB qu'on exécute à la fin de chaque simulation, il constitue la traduction exacte de la définition des coefficients de la série de fourier.

III.5.Simulation sans MLI

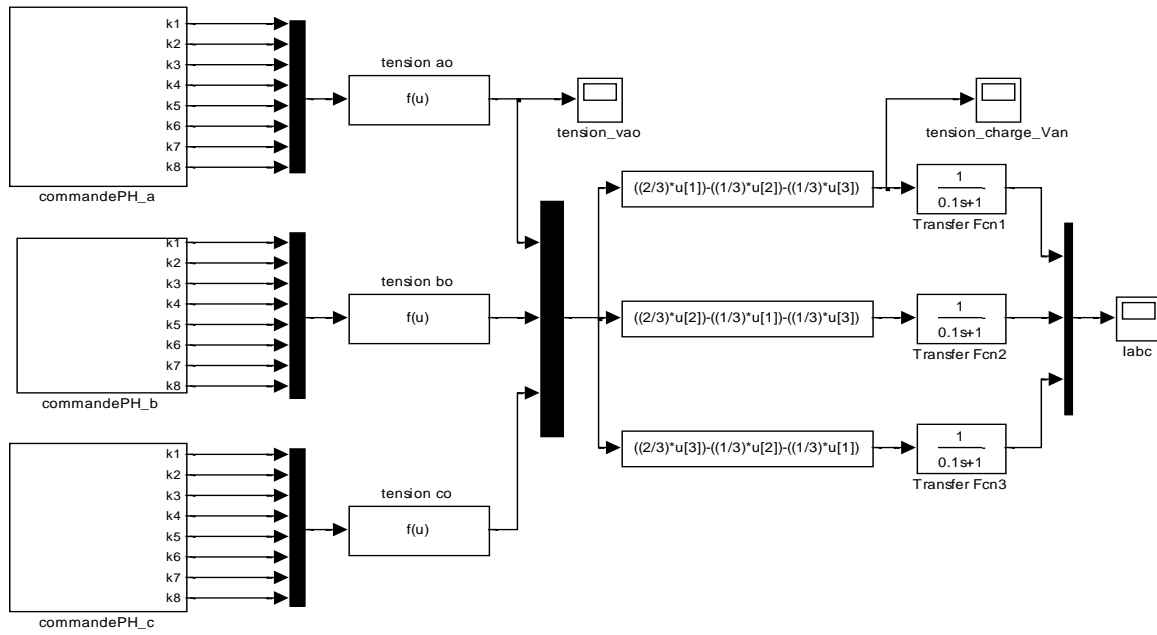


Figure III. 2: Schéma bloc d'un onduleur triphasé associé a une charge RL.

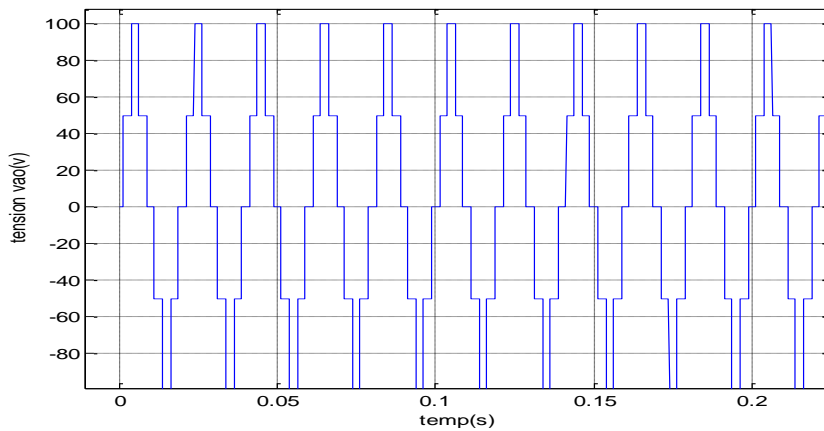


Figure III. 3: L'allure de Vao.

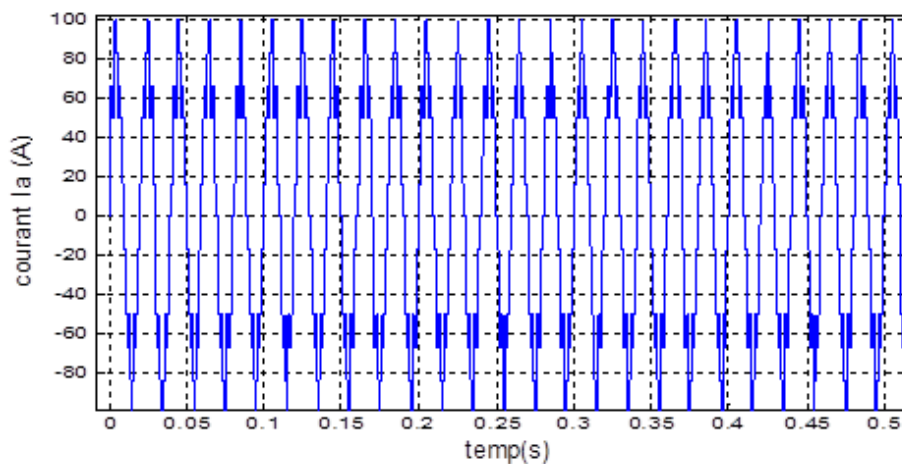


Figure III. 4: Tension de phase V_{an} de l'onduleur.

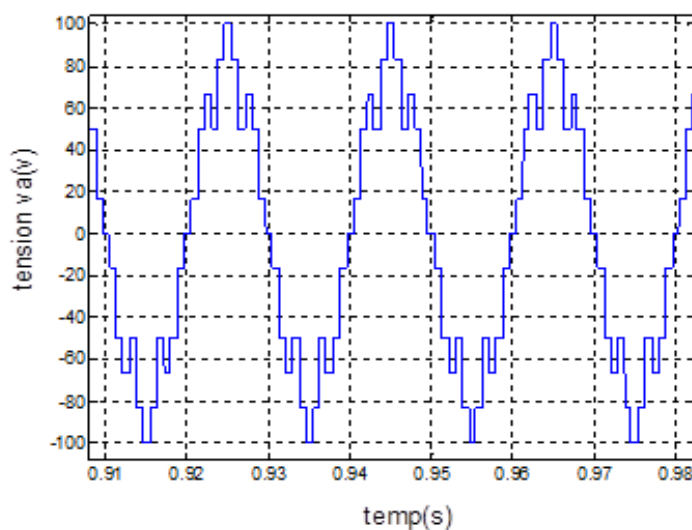


Figure III. 5: Zoom de la tension de la phase V_{an} de l'onduleur.

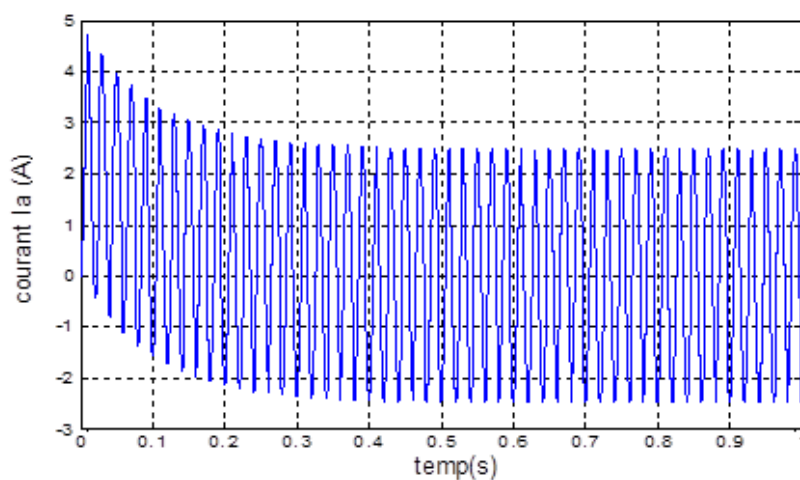


Figure III. 6: L'allure de courant I_a .

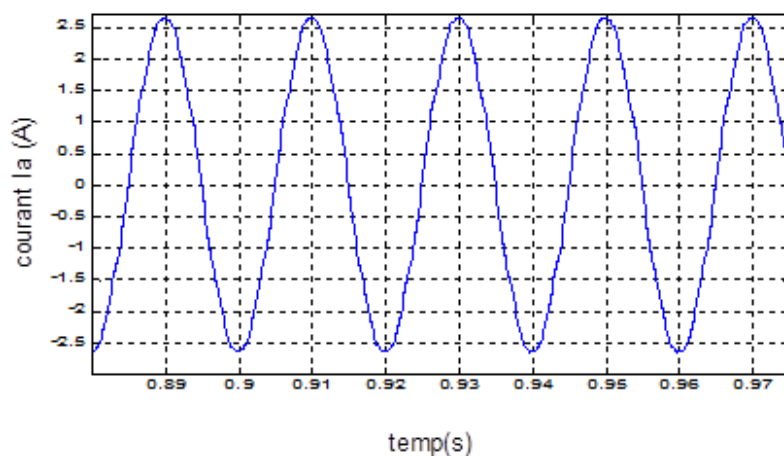


Figure III. 7: Zoom du courant Ia.

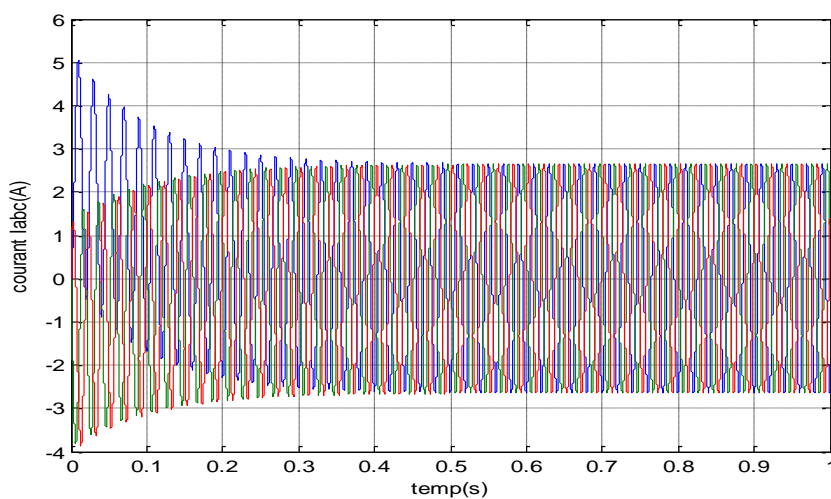


Figure III. 8: L'allure des courants Iabc.

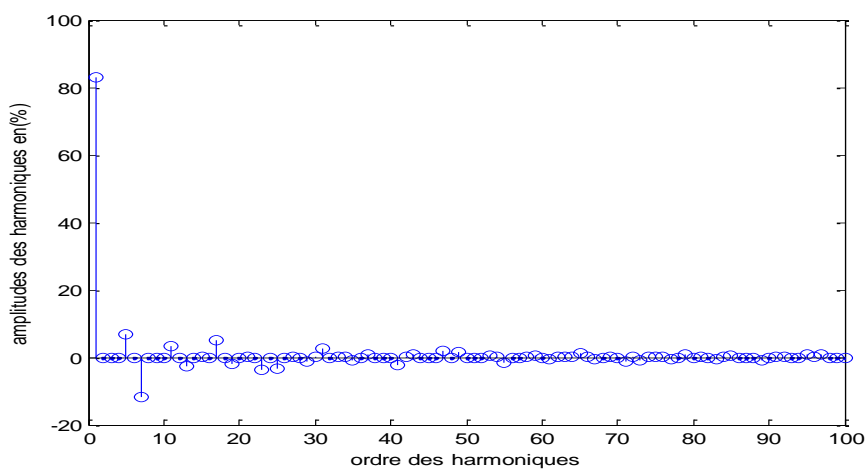


Figure III. 9: Spectre harmonique de la tension Van.

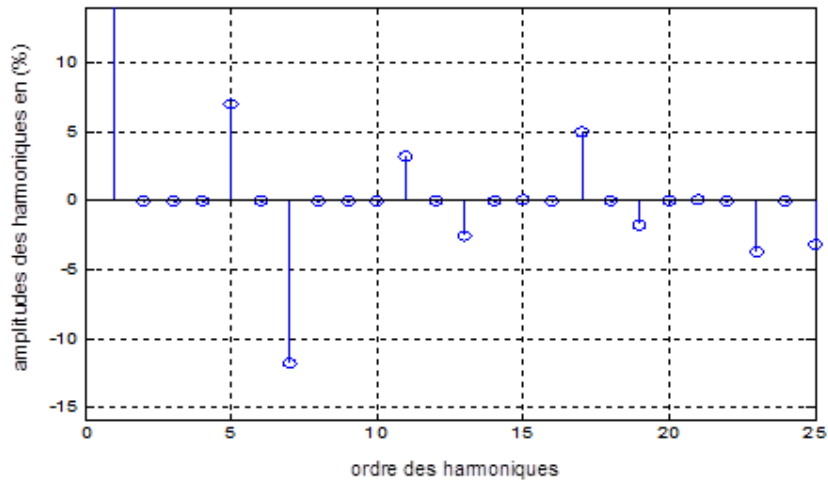


Figure III. 10: Zoom du spectre harmonique de la tension V_{an} (rangs 1 à 25).

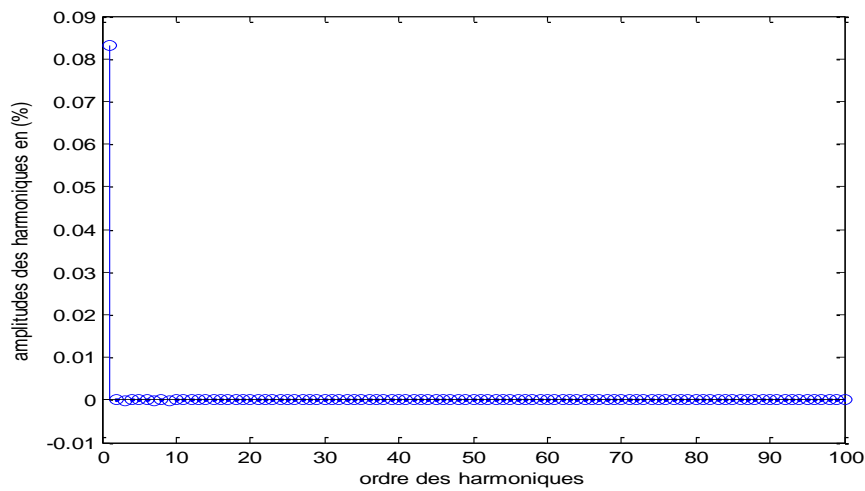


Figure III. 11: Spectre harmonique du courant I_a .

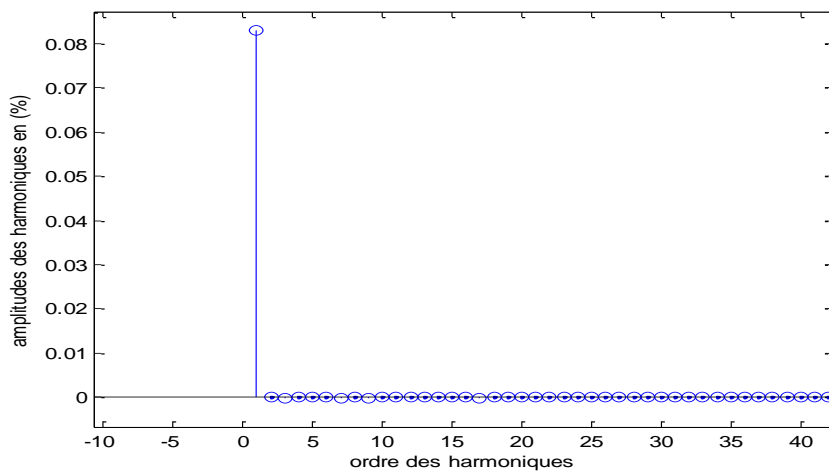


Figure III. 12: Zoom du spectre harmonique du courant I_a .

Nous remarquons la présence des harmoniques de rangs : 5,7,11,13,17,19,..., cependant leurs amplitudes sont relativement peu élevées. D'ailleurs nous constatons effectivement que leurs valeurs sont quasi nulles pour le courant.

La qualité des signaux est très satisfaisante même sans modulation, comme premier résultat nous pouvons dire que pour les applications ne nécessitant pas une qualité excellente, ce type de convertisseur peut se passer de la modulation qui nécessite plus de calculs, et engendre plus de pertes par commutation.

Dans la section suivante nous présenterons les résultats avec modulation, nous jugerons ainsi sur son utilité en analysant les éventuelles améliorations.

III.6. Avec MLI

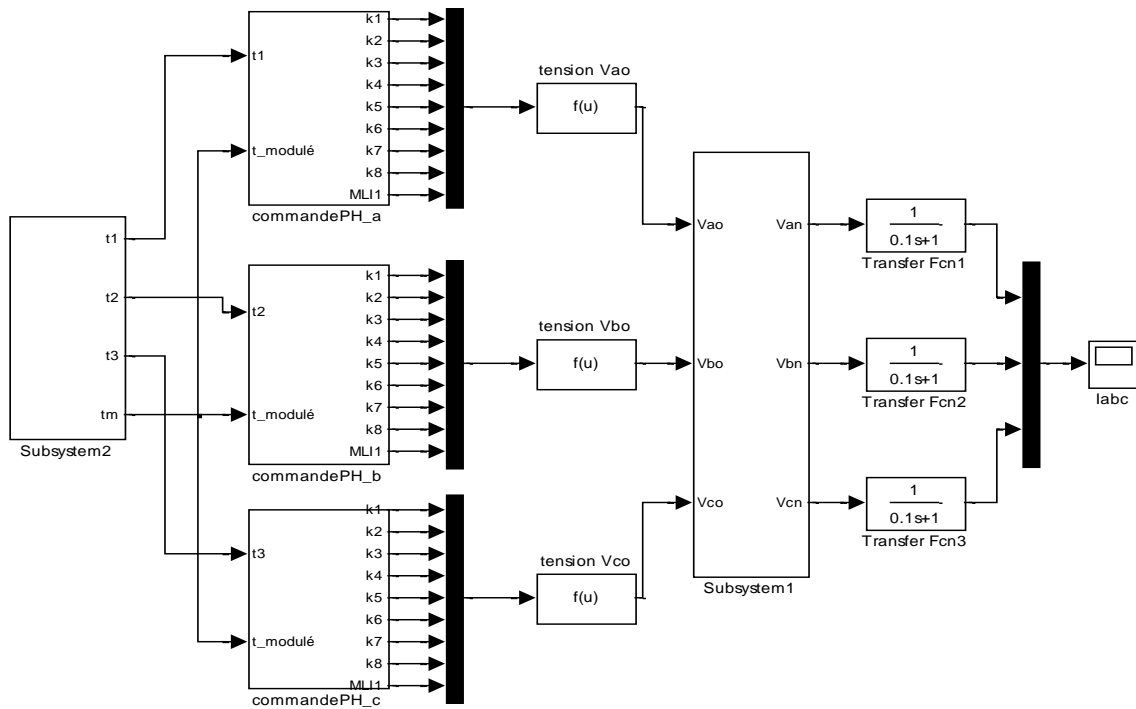


Figure III. 13: Schéma bloc d'un onduleur triphasé MLI associé à une charge RL.

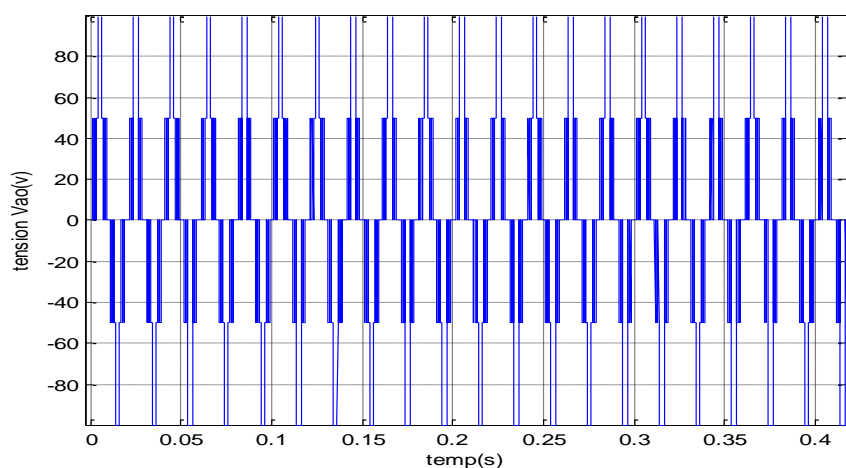


Figure III. 14: L'allure de V_{ao} .

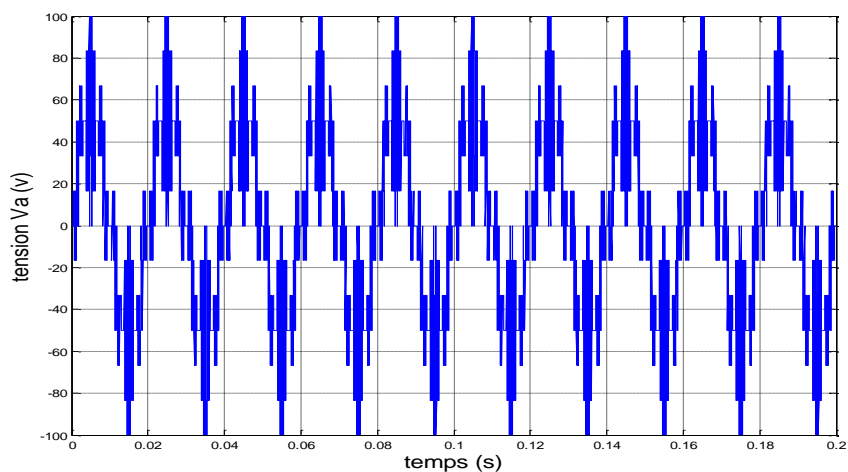


Figure III. 15: Tension de la phase V_a de l'onduleur.

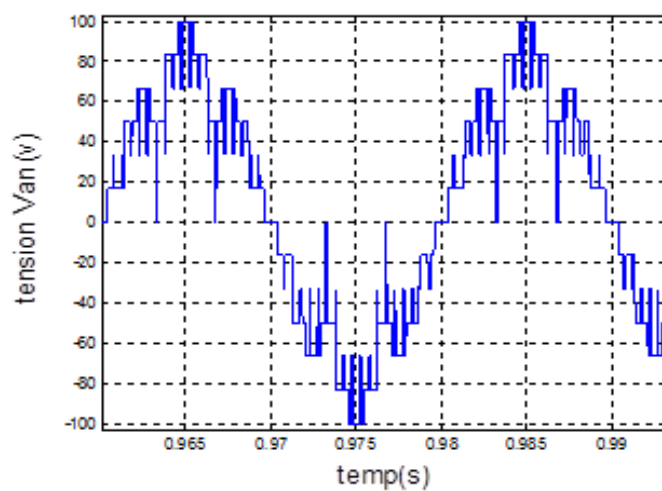


Figure III. 16: Zoom de la tension de la phase V_{an} de l'onduleur.

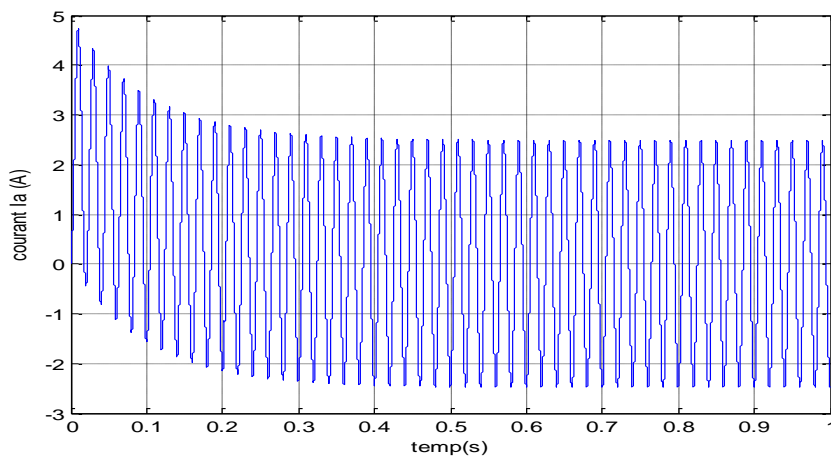


Figure III. 17: L'allure du courant I_a .

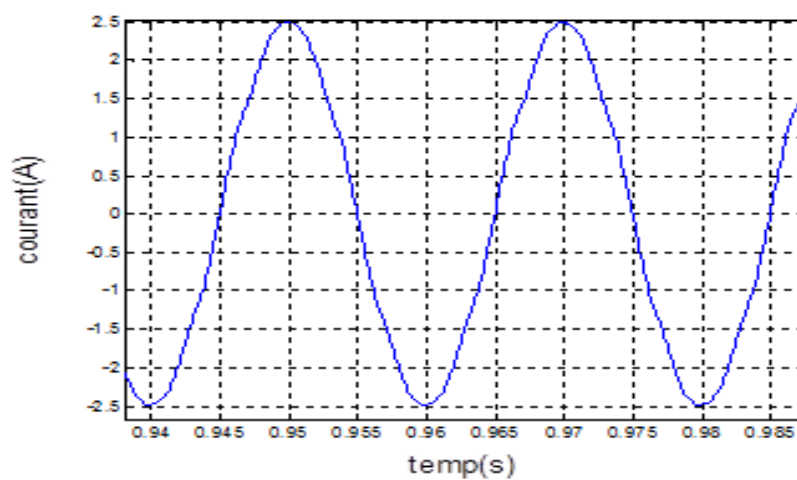


Figure III. 18: Zoom de l'allure du courant I_a .

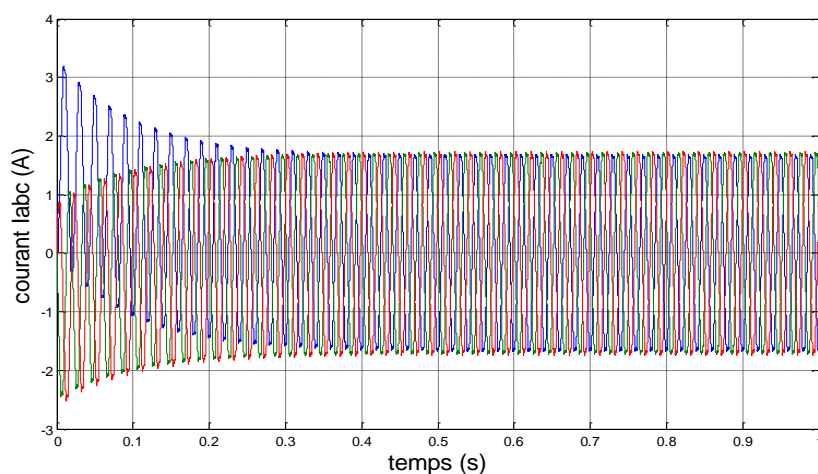


Figure III. 19: L'allure du courant I_{abc} .

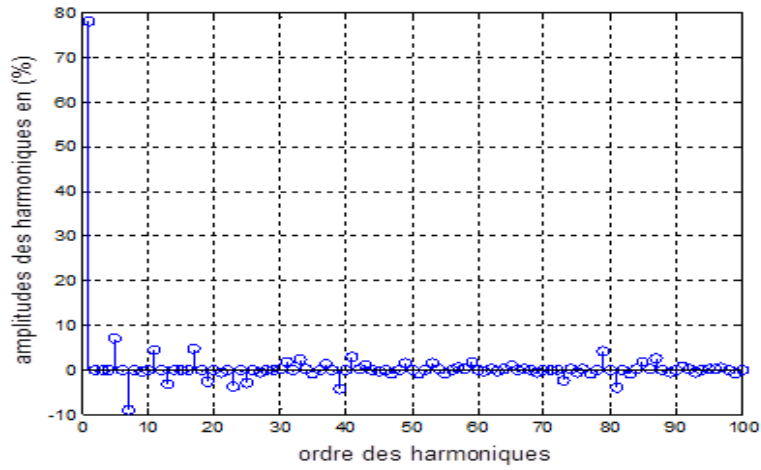


Figure III. 20: Spectre harmonique de Van.

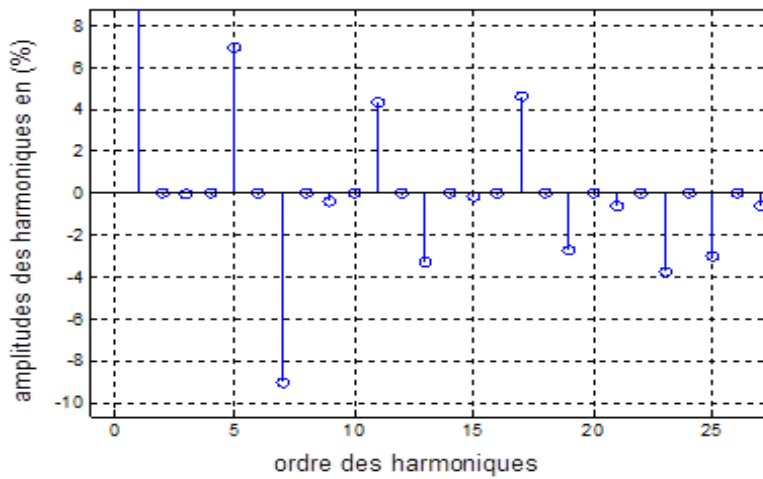


Figure III. 21: Zoom du Spectre harmonique de Van (rangs 2 à 27).

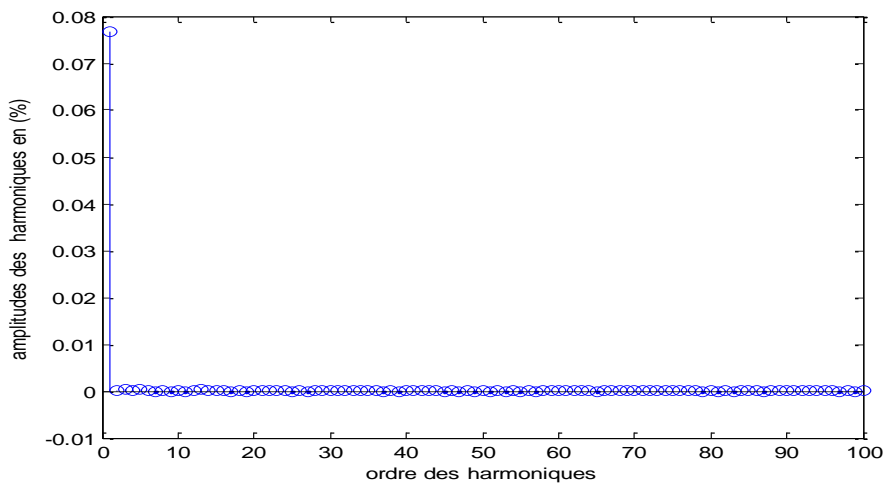


Figure III. 22: Spectre harmonique du courant Ia.

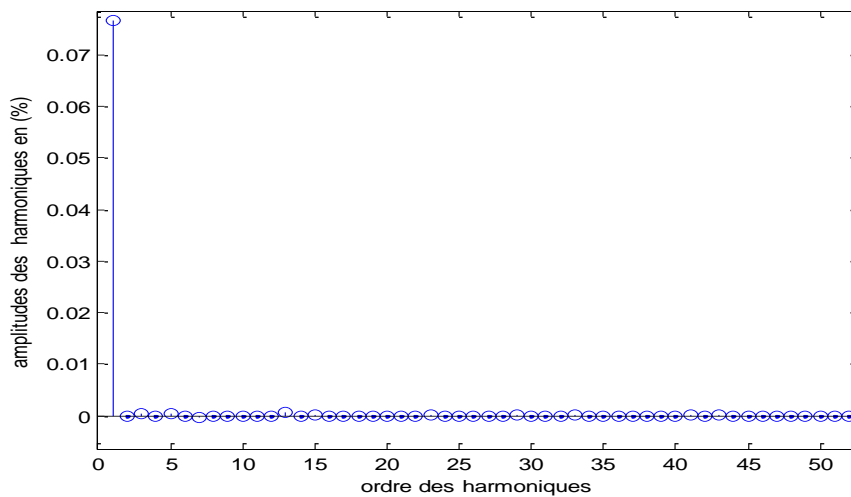


Figure III. 23: Zoom du spectre harmonique du courant Ia.

Nous remarquons (hormis le rangs 5 qui reste inchangé), une légère baisse des harmoniques de tensions de rangs inférieurs, aux alentours de la fréquence de modulation (rang 40), ils réapparaissent avec une plus forte amplitude, cependant ces harmoniques ne sont pas nuisibles du fait qu'ils sont de rangs assez élevés et qu'ils n'apparaissent pas dans le spectre du courant (impédance harmonique 40 fois plus élevée pour l'harmonique 40).

Le mode de modulation (utilisation d'une seule porteuse) pourrait être remis en cause, cependant un modèle avec quatre porteuses a été testé et a donné quasiment le même résultat.

La modulation précalculée quant à elle permet d'annuler certains harmoniques de rangs faible mais elle est tributaire de l'indice de modulation (gain en tension). Le calcul des angles de commutation doivent donc se faire continuellement et allourdirait le temps de calcul. En plus ces angles doivent être calculé pour chaque période de la tension de sortie, ce qui n'est pas adapté pour les types de commande avancés (commande vectorielle, ou DTC).

Ces conclusions nous amène à dire que la MLI n'est justifiée que pour des applications nécessitant des performances élevées.

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation d'un onduleur à cinq (05) niveaux alimentant une charge RL sans et avec MLI. Nous avons constaté que l'onduleur mult niveau est satisfaisant même sans MLI. Cela était prévisible du fait du découpage de la tension de sortie en 5 niveaux distincts.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce modeste travail que nous avons présenté se veut comme une étude simple par simulation d'un onduleur à cinq niveaux. Après avoir passé en revue de manière abrégée les différentes connaissances théoriques liées à ce type de convertisseur, et dans le but de faire une étude comparative, nous avons élaboré deux modèles de simulations :

- 1- Onduleur multiniveaux sans MLI
- 2- Onduleur multiniveaux avec MLI

Les résultats nous ont montré que l'onduleur à cinq niveaux procure une qualité de signaux électriques satisfaisante même sans modulation. L'application de la MLI au convertisseur améliore la qualité mais avec un degré faible. Du coup l'utilisation de la MLI pour cet onduleur ne peut être justifiée que pour les applications nécessitant de très hautes performances.

En outre les avantages de ce type de convertisseur le rendent très utiles, notamment dans les domaines nécessitant de fortes puissances (moteurs de fortes puissances, transport d'énergie en haute tension à courant continu HVDC).

Comme perspectives nous pouvons envisager d'associer ce type de convertisseurs à charges pratiques telles que les moteurs, la production d'énergie électrique renouvelable, et le transport d'énergie en haute tension à courant continu.

Nous pouvons aussi envisager la réalisation pratique d'un tel type d'onduleur

- [1] **E.M. Berkouk**, “Contribution à la Conduite des Machines Monophasées et Triphasées Alimentées par des Convertisseurs Directs et Indirects, Applications aux Gradateurs et Onduleurs Multi-niveaux”, Thèse de Doctorat, CNAM 1995.
- [2] **G. Segquier, F. Labrique**, “Les convertisseurs de l’électronique de puissance” Edition Lavoisier. Tec & Doc, 1998, Tome1 et Tome 4.
- [3] **C. Newton, M. Sumner and T. Alexander**, “The investigation and development of a Multi-level voltage source inverter”, IEE Transaction on Power Electronics and Variable Speed Drives Conference, Publication N°. 429, 23-25 Septembre 1996.
- [4] **N.Kimura, T. Morizane, K.Taniguchi, T.Oono**, “Multi-modulation signal PWM control for multi-level converter”, The 11th International Power Electronics and Motion control conference, EPE-PEMC 2004, Riga, Latvia, 2-4 September 2004.
- [5] **T.Ishida, K. Matususe**, “Fundamental Characteristic of Five-Level Double Converters with Adjustable DC voltages for Induction Motor Drives”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.49, N°4, August 2002.
- [6] **M. Pinard**, “ convertisseurs et électronique de puissance et puissance de commande, description ”, mise en œuvre Dunode, Paris, ISBN 978-10-049674-7, p116.
- [7] **F. Labrique, G. Séguier, R. Bausière**, “Les convertisseurs de l’électronique de puissance” Volume 4 : La conversion continu alternatif. Editions LAVOISIER.
- [8] **S. Guy, B. Robert, L. Francis**, Les convertisseurs de l’électronique de puissance la Conversion alternatif (volume 4). Edition tec-doc, 1995
- [9] **T. Wildi** : Electrotechnique, 3eme édition, éditions de Boeck université (1999).
- [10] **L. Augusto Serpa**, “Current control strategies for multilevel grid connected inverters”, Thèse de Doctorat, Institut de Technologie Zurich, 2007.
- [11] **B. Ouahid**, “Contribution à l'analyse des onduleurs multi-niveaux”, Mémoire de Magister, Université de Batna, 2005.
- [12] **G. R.Walker**, “Modulation and control of multilevel converters”, Thèse de Doctorat, Université de Queensland, 1999.
- [13] Onduleurs et harmoniques, Cahiers techniques Merlin Gerin N°159.
- [14] **S. Electric**, “Guide de conception des réseaux électriques industriels”
- [15] **A. Benaboud**, “Convertisseur de fréquence indirect à rapport de tension fixe : Interface entre turbo-alternateurs à haut vitesse et réseau électrique”, Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2007.

- [16] **E. Florin** “Mogo production décentralisée dans les réseaux de distribution. Etude pluridisciplinaire de la modélisation pour le contrôle des sources”. Docteur Ecole Nationale Supérieure d’Arts et Métiers Centre de Lille 2005.
- [17] **J.M.Erdman,R.J.Kerkman,D.W.Schelgel,G.L.Skibinski**, “Effect of PWM inventrs on AC motor bearing currents and shaft voltages” , IEEE trans .Ind .Appl. Vol 32,No.2,pp.250- 256,Mars./Apr.1996.
- [18] **S. Bell, J.Sung**, “Will your motor insulation survive a new adjustable speed drives” IEEE trans. Ind. Appl.vol33,No.5,pp.1307-1311,Sept./oct.1997.
- [19] **A.Nabea, Takahashi, H. Akagi**, “A new Neutral Clamped PWM Inventer” IEEE-Ind.Appl.Soc.Conf.pp.761-766, 1980.
- [20] **P. BARTHOLOMEUS, Ph. LE MOIGNE**, “A simple method for the valuation of the harmonics generated by multilevel converters”.ELECTRIMACS’96’Saint Nazaire, 17-18-19 Sept 1996.
- [21] **P. BARTHOLOMEUS**, “Contribution à l’étude des redresseurs à facteur de puissance quasi unitaire fonctionnant en mode multi-niveaux. Application au chargeur de batterie”, Rapport de thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 1996.
- [22] **J-P. Louis**, “Modélisation des machines électriques en vue de leur commande”
- [23] **L. BAGHLI**, “Modélisation et commande de la machine asynchrone”, 2005.
- [24] **B. KHALIFA**, “Réalisation d’un banc d’essai pour la Commande et l’Observation des Convertisseur Multicellulaires Série”, Approche Hybride. Grade de docteur Université de cergy-pontoise 2009.
- [25] **N. Celanovic**, “Space Vector Modulation and Control of Multilevel Converter”, Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering and Computer Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, September 2000.
- [27] **S. Khomfoi, Leon M. Tolbert**, “Multilevel Power Converters”, the University of Tennessee USA, Department of Electrical and Computer Engineering, August 2007.
- [28] **G Beinhod, R Jakob, M Nahrstaed**, “A New Range of Medium Voltage Multilevel Inverter Drives With Floating Capacitor Technology”, In Conf Rec EPE, Graz, Austria, 2001.
- [29] **J-S. MARIETHOZ**, “Etude Formelle pour la Synthèse de convertisseurs Multiniveaux Asymétriques: Topologies, Modulation et Commande”, Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, 2005.

Références bibliographiques

[30] **B. OUAHID**, “Contribution à l’Analyse des Onduleurs Multi-niveaux Fonctionnement Symétrique et asymétrique”, Mémoire d’ingénieur d’état, Département d’électrotechnique, université de Batna, 2005.

[31] **Z. Ait wali**, “Application des FPGA à la commande d’un moteur asynchrone”, Mémoire de magister UMMTO Tizi-Ouzou.