

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 de Cycle

En vue de l'obtention du diplôme de Master
En Électrotechnique
Option : *Réseaux électriques et Energies renouvelables*

Thème

Etude par simulation sous MATLAB et PSIM
d'un onduleur cinq niveaux à structure NPC

Présenté par :

Mr. Ben boudaoud kamel.

Mr. Belkacem abdelmalek.

Encadrés par :

Mr. Aloui loucif.

Année universitaire:2015/2016

Remerciement

Remerciement

Grace à Allah le tout puissant, Ce travail a pu être terminé.

Nous tenons vivement à exprimer nos profondes gratitudee à notre promoteur

Mr Loucif.ALOUI de nous avoir confié et diriger ce projet.

Nos remerciements s'étendent aussi aux membres du jury pour avoir accepté de nous consacrer une partie de leurs temps afin d'examiner et de juger notre travail.

Nous remercions aussi Mr K. GHEDAMSI qui nous a aidés dans notre travail.

Enfin, que tous les enseignants ayant participé à notre formation tout au long du cycle de nos études voient ici notre profonde reconnaissance. Et tout le groupe d'énergie renouvelable et réseau avec lequel on a partagé des très bons moments.

Dédicaces

Dédicace

Premièrement, 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 dédie ce modeste travail :

À ma mère que dieu la protège.

À mon père.

À mon grand père.

À ma grand-mère.

À mes chers deux frères et mes chères deux sœurs qui m'ont soutenus durant toutes les périodes de vie, que Dieu les protègent inchallah.

À mon binôme KAMEL.

À tous mes amis.

À tous mes enseignants et enseignantes depuis le primaire.

Mes amis de la promotion 2015/2016.

À toute la Famille BELKACEM particulièrement à mon quartier SIDI ABDELHAK

« EL KHEMISSE » VIVE EL MOB TOUJOUR FIERE ET FIDELLE.

BELKACEM Abdelmalek

Dédicaces

Dédicaces

Avec l'aide de dieu tout puissant est enfin achevé ce travail,

Lequel je dédie à toutes les personnes qui me sont chères :

*À la mémoire de mon cher père et mon frère Rafik, que Dieu les
gardes dans son vaste paradis .*

*Aux témoignages d'affection, d'amour et de Grande reconnaissances, aux
Êtres les plus Chers que j'ai dans ma vie ;*

*A ma mère qui m'a toujours soutenu durant toutes les périodes de vie, que Dieu
la protégé inchalah.*

A mon frère et mes sœurs.

A toute ma famille.

*Je remercie vivement Mon cousin Mourad pour ses encouragements, son aide, et
son soutien au moment difficile. Je le remercie surtout pour sa participation de ce
mémoire. je remercie aussi toute sa famille qui sont toujours a mes coté au
moment où j'ai besoin d'eux,*

Sans oublier mon binôme Malek qui m'a aidé à faire ce travail.

Et à mes chers amis : Ghilas, sofiane, fouzi, nourdine

Ben boudaoud/kamel.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIÈRES

Introduction générale.....	1
CHAPITRE I	
I. Introduction.....	2
I.1 LES SEMI-CONDUCTEURS DE PUISSANCE.....	3
I.2 Concept multi niveaux.....	4
I.3 Différents topologie des onduleurs multi niveaux.....	5
I.3.1 Onduleur de tension a diode de bouclage(NPC).....	6
I.3.2 Onduleur de tension a condensateur Flottant.....	7
I.3.3 Onduleur de tension en cascade.....	9
I.4 Onduleur à cinq niveaux de type NPC.....	10
I.4.1 Structure.....	10
I.4.2 Principe de fonctionnement.....	11
I.5 Onduleurs multi niveaux hybrides	15
I.6 Nouvelles topologies	16
I.6.1 Convertisseur H-NPC à cinq niveaux	16
I.6.2 Convertisseur actif NPC trois niveaux	17
I.6.3 Convertisseur multi niveaux modulaire MMC	18
I.6.4 Convertisseur en pont H asymétrique	19
I.7 Comparaison des topologies multi niveaux	20
I.8 Applications et domaines d'intérêt des convertisseurs multi niveaux	22
I.8.1 Les applications des convertisseurs multi niveaux en photovoltaïques domestiques	22
I.8.2 Application dans le domaine de l'alimentation des machines électriques.....	23
I.8.3 Application dans le domaine des réseaux électriques.....	23
I.8.4 Les réseaux de bord des bâtiments maritimes	23
I.8.5 Générateur à base d'une source d'énergie renouvelable.....	24
I.9 Conclusion	25

TABLE DES MATIERES

CHAPITRE II

II.1 Introduction.....	26
II.2 Modélisation de l'onduleur de tension à cinq niveaux à structure NPC.....	26
II.2.1 Structure de l'onduleur cinq niveaux NPC	26
II.2.2 Modélisation du fonctionnement d'un bras d'onduleur cinq niveaux NPC.....	28
II.2.3 Différentes configurations d'un bras d'onduleur cinq niveaux NPC.....	29
II.3 Modélisation en vue de la commande d'onduleur cinq niveaux NPC	34
II.3.1 Fonction de connexion des interrupteurs.....	34
II.3.2 commande complémentaire.....	34
II.3.3 Fonction de connexion du demi-bras.....	34
II.3.4 Modelisation aux valeurs instantanées.....	35
II.4 Conclusion	38

CHAPITRE III

III.1 Introduction.....	40
III.2 Stratégies de commande de l'onduleur de tension cinq niveaux à structure NPC.....	40
III.3 Application de l'onduleur cinq niveaux pour une charge R-L	41
III.3.1 Commande par gradin ou par paliers.....	41
III.3.2 modulation de largeur d'impulsion (MLI)	44
III.3.2.1 Commande PWM à quatre porteuses unipolaires type1(PD).....	45
III.3.2.2 Commande PWM à quatre porteuses unipolaires type2 (POD)	53
III.4 Conclusion	61
Conclusion générale	62

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Fig. I.1 Représentation de puissance des composants en fonction de fréquence de commutation.....	4
Fig. I.2. Schéma d'un bras d'onduleur :a) 2 niveaux ;b) 3 niveaux ;c) N niveaux.....	5
Fig. I.3. Topologies d'onduleurs NPC.....	6
Fig. I.4.Topologies d'onduleurs NPC à condensateur Flottant.....	8
Fig. I.5 Structure d'un onduleur multi niveaux en cascade à cinq niveaux.....	9
Fig. I.6 .Schéma d'un onduleur NPC à 5 niveaux.....	11
Fig. I.7. Forme d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé cinq niveaux de type NPC.....	14
Fig. I.8. Mise en série d'un NPC avec un pont en H.	16
Fig. I.9. Convertisseur en pont H à NPC en cascade.....	17
Fig. I.10. Bras d'un onduleur actif NPC à trois niveaux.	18
Fig. I.11 : a) Schéma du MMC, b) Schéma d'un sous-module.....	19
Fig. I.12 : Convertisseur multi niveaux dans les bâtiments maritimes.....	24
Fig. I.13 : Convertisseur multi niveaux inséré dans un générateur éolien.....	25

CHAPITRE II

Fig.II.1. Onduleur de tension triphasé à cinq niveaux à structure NPC.	27
Fig.II.2. interrupteur bidirectionnel équivalent à la paire transistor-diode.....	27
Fig.II.3. Structure d'un bras de l'onduleur à cinq niveaux à structure NPC.	28
Fig II.3.a. Configuration E1 du premier bras de l'onduleur à cinq niveaux NPC.	29
Fig II.3.b. Configuration E2 du premier bras de l'onduleur cinq niveaux NPC.....	30
Fig.II.3.c. Mise à zéro d'un bras de l'onduleur cinq niveaux NPC.	31
Fig II.3.d. Configuration E4 du premier bras de l'onduleur cinq niveaux NPC.....	32
Fig.II.3.e. Configuration E5 du premier bras d'onduleur cinq niveaux NPC.....	33

CHAPITRE III

Fig.III.1 Tension V_{aM}	41
Fig.III.2 Tension de phase V_{an}	41
Fig.III.3 Zoom de la tension de phase V_{an}	42
Fig.III.4 Analyse harmonique de la Tension V_{an}	42

LISTE DES FIGURES

Fig.III.5 L'allure de courant i_a	42
Fig.III.6 Zoom du courant i_a	43
Fig.III.7 L'allure des courants i_{abc}	43
Fig.III.8 Zoom des courants i_{abc}	43
Fig.III.9 Analyse harmonique du courant i_a	44
Fig.III.10 Tensions de référence et porteuses.....	45
Fig.III.11 La tension V_{an} pour ($r=0.8$ et $m=9$).....	46
Fig.III.12 Analyse harmonique de la tension V_{an} pour($r=0.8$ et $m=9$).	46
Fig.III.13 L'allure de courant i_a pour ($r=0.8$ et $m=9$).	47
Fig.III.14 Zoom du courant i_a pour ($r=0.8$ et $m=9$).....	47
Fig.III.15 Analyse harmonique du courant i_a pour($r=0.8$ et $m=9$).....	47
Fig.III.16 La tension V_{an} pour($r=0.8$ et $m=15$).....	48
Fig.III.17 Analyse harmonique de la tension V_{an} pour($r=0.8$ et $m=15$).	48
Fig.III.18 L'allure de courant i_a pour ($r=0.8$ et $m=15$).	48
Fig.III.19 Zoom du courant i_a pour ($r=0.8$ et $m=15$).....	49
Fig.III.20 Analyse harmonique du courant i_a pour($r=0.8$ et $m=15$).....	49
Fig.III.21 La tension V_{an} pour($r=0.3$ et $m=9$).....	49
Fig.III.22 Analyse harmonique de la tension V_{an} pour($r=0.3$ et $m=9$).	50
Fig.III.23 L'allure de courant i_a pour ($r=0.3$ et $m=9$).	50
Fig.III.24 Zoom du courant i_a pour ($r=0.3$ et $m=9$).....	50
Fig.III.25 Analyse harmonique du courant i_a pour($r=0.3$ et $m=9$).....	51
Fig.III.26 La tension V_{an} pour($r=0.5$ et $m=9$).....	51
Fig.III.27 Analyse harmonique de la tension V_{an} pour($r=0.5$ et $m=9$).	51
Fig.III.28 L'allure de courant i_a pour ($r=0.5$ et $m=9$).	52
Fig.III.29 Zoom du courant i_a pour ($r=0.5$ et $m=9$).....	52
Fig.III.30 Analyse harmonique du courant i_a pour ($r=0.5$ et $m=9$).....	52
Fig.III.31 Tensions de référence et porteuses.....	53
Fig.III.32 La tension V_{an} pour($r=0.8$ et $m=9$).....	54
Fig.III.33 Analyse harmonique de la tension V_{an} pour($r=0.8$ et $m=9$).	54
Fig.III.34 L'allure du courant i_a pour ($r=0.8$ et $m=9$).	54
Fig.III.35 Zoom du courant i_a pour ($r=0.8$ et $m=9$).....	55
Fig.III.36 Analyse harmonique du courant i_a pour ($r=0.8$ et $m=9$).....	55

LISTE DES FIGURES

Fig.III.37 La tension Van pour($r=0.8$ et $m=15$).....	55
Fig.III.38 Analyse harmonique de la tension Van pour ($r=0.8$ et $m=15$).	56
Fig.III.39 L'allure du courant la pour ($r=0.8$ et $m=15$).	56
Fig.III.40 Zoom du courant la pour($r=0.8$ et $m=15$).....	56
Fig.III.41 Analyse harmonique du courant la pour ($r=0.8$ et $m=15$).....	57
Fig.III.42 La tension Van pour($r=0.3$ et $m=9$).....	57
Fig.III.43 Analyse harmonique de la tension Van pour ($r=0.3$ et $m=9$).	57
Fig.III.44 L'allure du courant la pour ($r=0.3$ et $m=9$).	58
Fig.III.45 Zoom du courant la pour ($r=0.3$ et $m=9$).....	58
Fig.III.46 Analyse harmonique du courant la pour ($r=0.3$ et $m=9$).....	58
Fig.III.47 La tension Van pour($r=0.5$ et $m=9$).....	59
Fig.III.48 Analyse harmonique de la tension Van pour ($r=0.5$ et $m=9$).	59
Fig.III.49 L'allure de courant la pour ($r=0.5$ et $m=9$).	59
Fig.III.50 Zoom du courant la pour ($r=0.5$ et $m=9$).....	60
Fig.III.51 Analyse harmoniques du courant la pour ($r=0.5$ et $m=9$).	60

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

Tableau. I.1 etats possibles de l'onduleur cinq niveaux	13
Tableau. I.2. comparaison des convertisseur NPC, FC et CHB	21

CHAPITRE II

Tableau. II.1. Grandeurs electriques pour chacune des configurations d'un bras K de l'onduleur à cinq niveaux à structure NPC	33
---	----

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

Depuis de nombreuses années, l'évolution de l'électronique de puissance est très importante dans un monde où les aspects énergétiques sont devenus un enjeu essentiel. Les applications de celle-ci sont diverses et touchent un vaste domaine du génie électrique allant de quelques watts à plusieurs centaines de mégawatts. Les structures de conversion statique qui composent principalement les applications de l'électronique de puissance deviennent de plus en plus puissantes, la technologie a dû s'adapter à cette croissance de la puissance à convertir [1].

Cette croissance a été permise grâce à l'évolution des technologies des composants semi-conducteurs. L'évolution des calibres en tension et courant ainsi que l'amélioration des performances de ces composants a permis d'utiliser une électronique de puissance plus performante pour des applications de plus grande puissance [1].

L'apparition des convertisseurs multi niveaux est l'un des résultats de cette évolution, ils sont utilisés pour l'alimentation des machines à courants alternatif de fortes puissances [2]. Il existe plusieurs topologies de ces convertisseurs de puissance qui sont utilisés dans l'industrie. Dans le cas de notre travail, on va étudier l'onduleur à cinq niveaux à structure NPC qui est un convertisseur très intéressant pour l'alimentation des machines de forte puissance. Ce dernier permet d'augmenter la puissance délivrée à la charge, ainsi d'améliorer la forme de la tension de sortie pour qu'elle soit plus proche de la sinusoïde [3] [1] [4].

Le sujet du mémoire consiste à étudier un bras d'onduleur cinq niveaux de type NPC par la commande par pallier et la commande MLI.

Le premier chapitre présente l'état d'art des convertisseurs multi niveaux, leurs avantages et inconvénients, ainsi leurs différents domaines d'application et intérêts.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation de l'onduleur cinq niveaux à structure NPC.

Dans le troisième chapitre, nous allons étudier les deux types de commandes :

- La commande par pallier.
- La commande MLI.

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉS SUR LES ONDULEURS MULTI-NIVEAUX

CHAPITRE II

MODÉLISATION DE L'ONDULEUR CINQ NIVEAUX À STRUCTURE NPC

II.1 Introduction

L'onduleur est un convertisseur statique qui joue le rôle d'interface entre une source d'énergie électrique continue et une charge alimentée en alternatif. Les onduleurs de tension triphasés à cinq niveaux à structure NPC jouent un rôle incontournable dans des applications de forte puissance et haute tension.

Ce chapitre est consacré à la modélisation de l'onduleur de tension triphasé à cinq niveaux à structure NPC. La modélisation est l'une des étapes essentielles pour la conception d'une commande, elle consiste à trouver le modèle mathématique décrivant le fonctionnement du système à commander.

II.2 Modélisation de l'onduleur de tension à cinq niveaux à structure NPC

Pour la modélisation de l'onduleur, on considère un fonctionnement idéalisé :

- ✓ Interrupteurs parfaits : la commutation des interrupteurs est instantanée (temps de fermeture et ouverture) et sans pertes, et que la chute de tension dans les interrupteurs est considérée nulle en conduction.
- ✓ Une charge équilibrée : la charge alimentée est équilibrée dans le sens où elle ne génère pas une composante homopolaire.
- ✓ Sources parfaites : la tension aux bornes du dipôle continu est constante et ne varie pas avec la puissance échangée.

II.2.1 Structure de l'onduleur cinq niveaux NPC

L'onduleur triphasé à cinq niveaux à structure NPC (Neutral Point Clamping) étudié est constitué de trois bras et quatre sources de tension continue. Chaque bras comporte huit interrupteurs, six en série et les deux autres en parallèle, plus deux diodes. Chaque interrupteur est composé d'un transistor et une diode antiparallèle montée en tête bêche.

La Figure (II.1) montre le schéma électrique d'un onduleur triphasé à cinq niveaux à structure NPC.

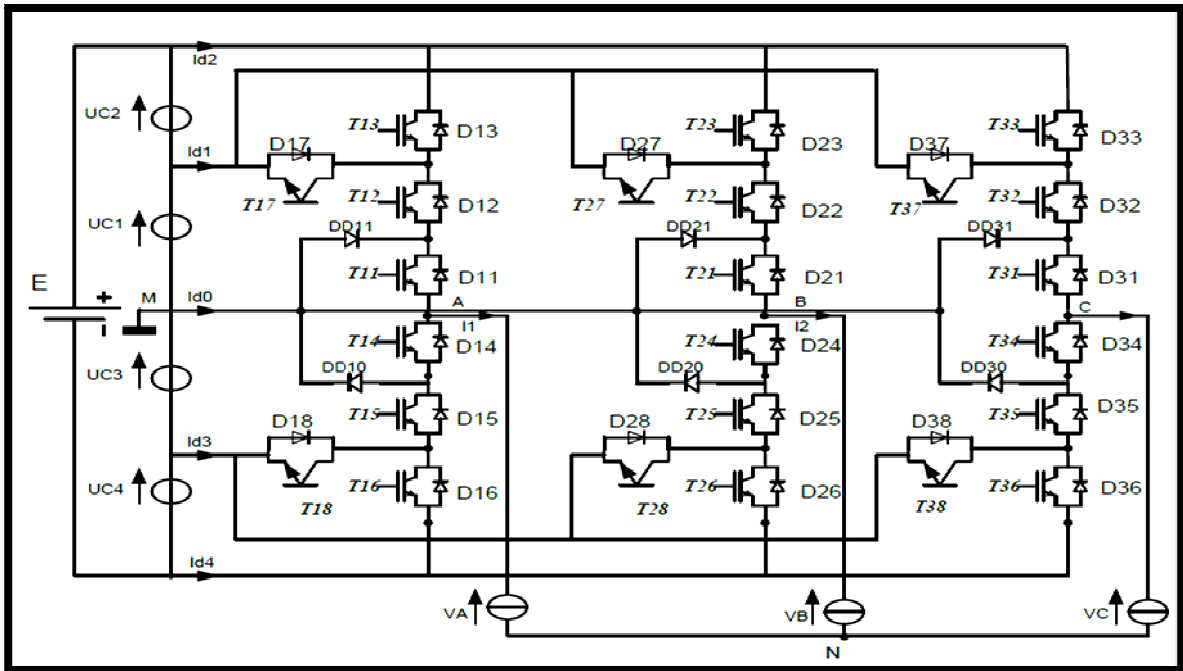


Fig.II.1. Onduleur de tension triphasé à cinq niveaux à structure NPC [32].

Pour simplifier la représentation de l'onduleur, nous représentons chaque paire transistor-diode par un seul interrupteur bidirectionnel B_{KS} supposé parfait.

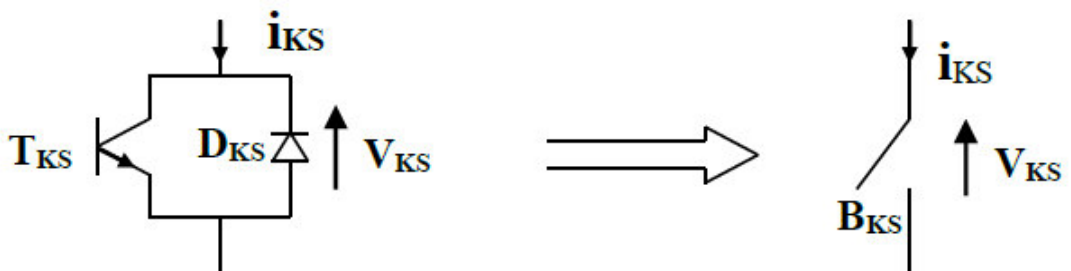


Fig.II.2. interrupteur bidirectionnel équivalent à la paire transistor-diode

Pour un fonctionnement commandable de ce convertisseur, nous adoptons la commande complémentaire suivante [28] [29] :

$$\left\{ \begin{array}{l} B_{K1} = \overline{B}_{K5} \\ B_{K2} = \overline{B}_{K4} \\ B_{K3} = \overline{B}_{K6} \\ B_{K7} = B_{K1}B_{K2}\overline{B}_{K3} \\ B_{K8} = B_{K4}B_{K5}\overline{B}_{K6} \end{array} \right. \quad (II.1)$$

II.2.2 Modélisation du fonctionnement d'un bras d'onduleur cinq niveaux NPC

La symétrie de la structure de l'onduleur triphasé cinq niveaux NPC permet sa modélisation par bras sans à priori sur la commande. Ensuite nous déduisons celui de l'onduleur complet Figure (II.3).

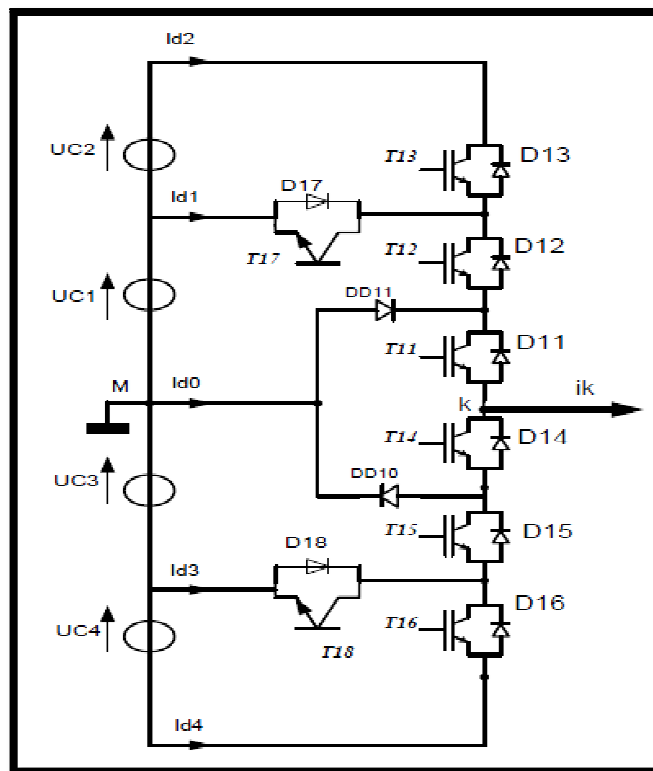


Fig. II.3. Structure d'un bras de l'onduleur à cinq niveaux à structure NPC.

II.2.3 Différentes configurations d'un bras d'onduleur cinq niveaux NPC

Une analyse topologique d'un bras montre cinq configurations possibles. Ces dernières dépendent de la tension du bras **k** par rapport au point milieu **M** composé de cinq niveaux distincts. Le nombre de niveaux de tension de cet onduleur représente le nombre de potentiels différents du bus continu imposé à la tension de sortie. Les figures (a-e) présentent ces différentes configurations [20].

$$\text{On a: } U_{C1} = U_{C2} = U_{C3} = U_{C4} = E/4$$

➤ **Première configuration E1 [11100000]**

Cette configuration est représentée sur la Figure (II.3.a) Dans ce cas, les interrupteurs B_{11} , B_{12} et B_{13} sont commandés à l'état **1** et les autres interrupteurs restent à l'état **0**. La valeur de la tension V_{KM} est donnée par l'équation (II.2) :

$$V_{KM} = B_{13} \frac{E}{4} + B_{11} B_{12} \frac{E}{4} = \frac{E}{2} \tag{II.2}$$

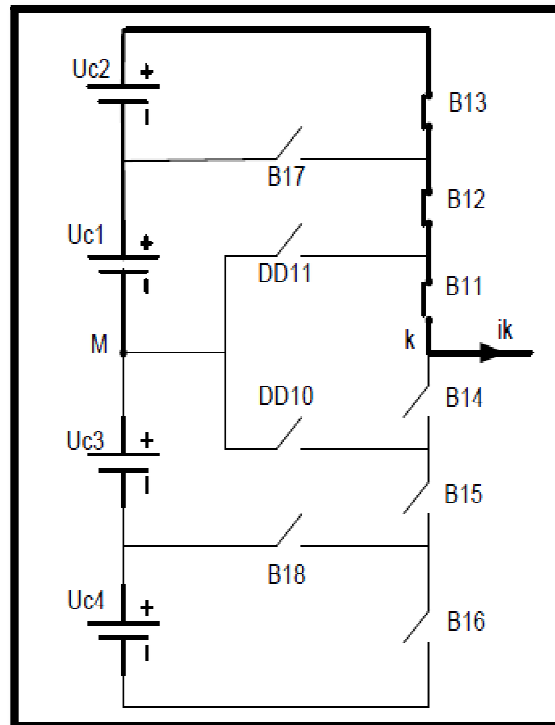


Fig II.3.a. Configuration E1 du premier bras de l'onduleur à cinq niveaux NPC.

➤ **Deuxième configuration E2 [01100010]**

En commandant les interrupteurs B_{11} , B_{12} et B_{17} à l'état **1** et les autres à l'état **0** Figure (II.3.b), l'équation (II.3) donne la valeur de la tension V_{KM} correspondant à cette configuration

$$V_{KM} = B_{11}B_{12}B_{17} \frac{E}{4} = \frac{E}{4} \quad (\text{II.3})$$

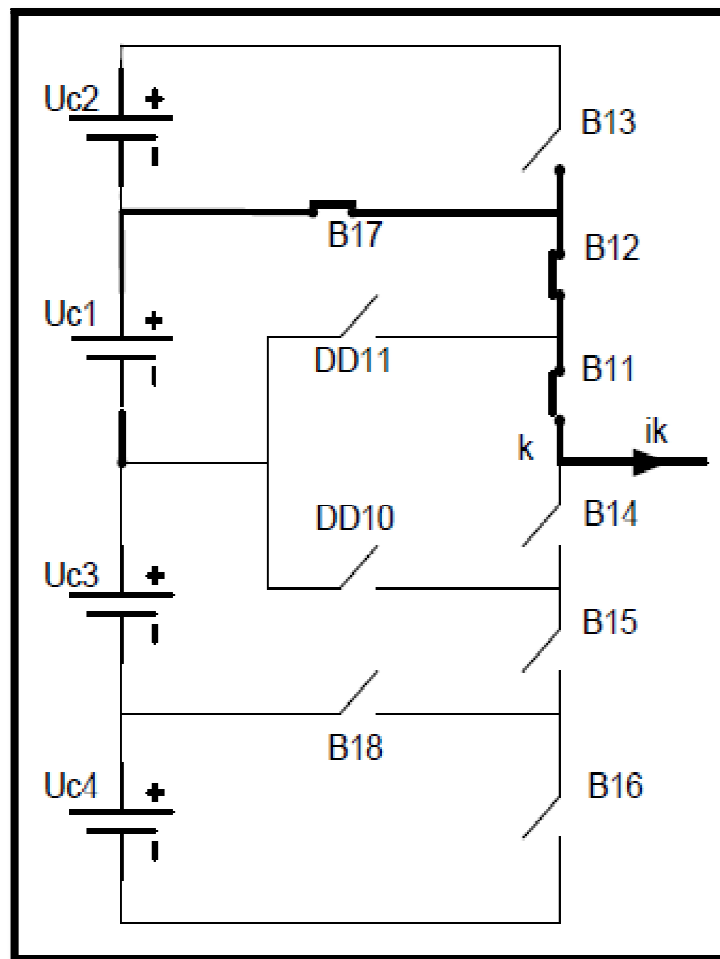


Fig II.3.b. Configuration E2 du premier bras de l'onduleur cinq niveaux NPC.

➤ **Troisième configuration E3 [00110000]**

La conduction des interrupteurs B_{11} et B_{14} permet la mise à zéro de la tension V_{KM} Figure (II.3.c). La valeur de la tension V_{KM} est donnée par l'équation (II.4) :

$$V_{KM} = B_{11} \frac{E}{4} - B_{14} \frac{E}{4} = 0 \quad (\text{II.4})$$

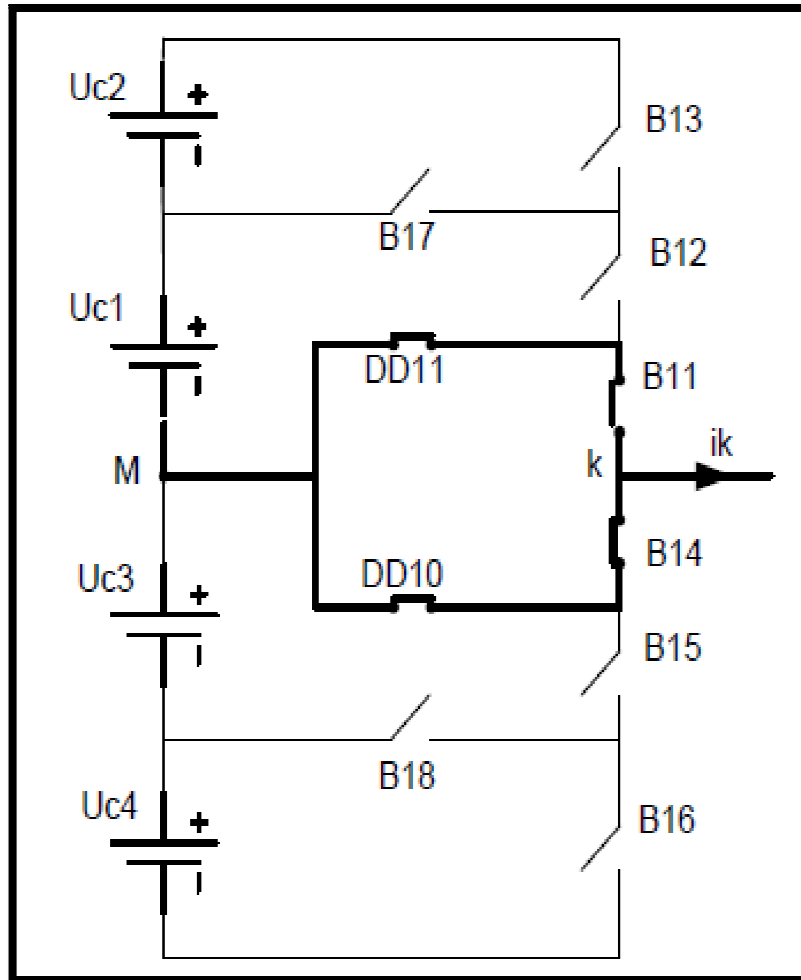


Fig. II.3.c. Mise à zéro d'un bras de l'onduleur cinq niveaux NPC.

➤ **Quatrième configuration E4 [00011001]**

Cette configuration fournit la partie négative, définie par l'état des interrupteurs B_{14} , B_{15} et B_{18} Figure (II.3.d). L'équation (II.5) donne la valeur de V_{KM} .

$$V_{KM} = B_{14}B_{15}B_{18}\left(\frac{-E}{4}\right) = \frac{-E}{4} \quad (\text{II.5})$$

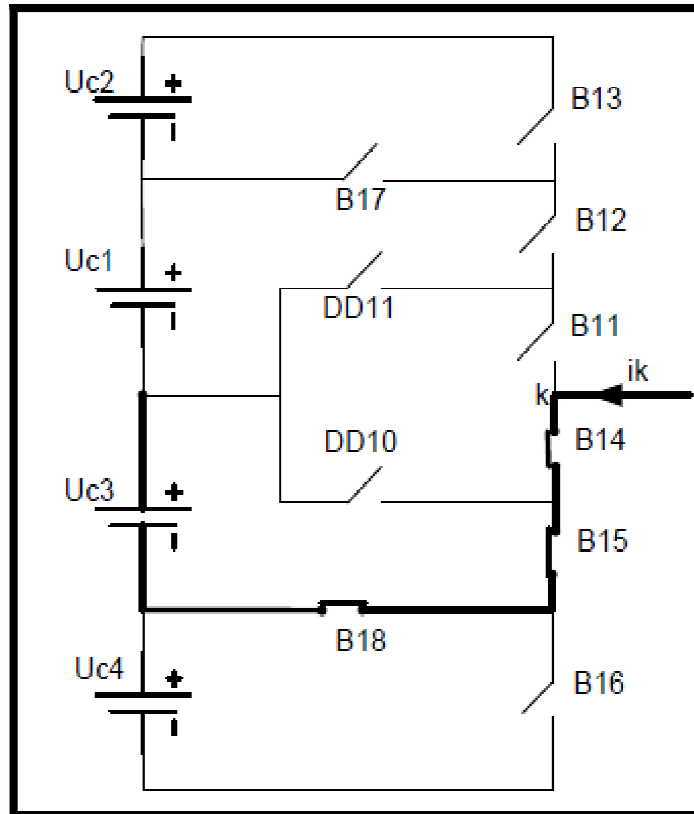


Fig II.3.d. Configuration E4 du premier bras de l'onduleur cinq niveaux NPC.

➤ **Cinquième configuration E5 [00011100]**

Le cinquième niveau d'un bras de l'onduleur à cinq niveaux est montré par la Figure (II.3.e). La valeur de la tension correspondante V_{KM} est donnée par l'équation (II.6) :

$$V_{KM} = -B_{16} \frac{E}{4} - B_{14}B_{15} \frac{E}{4} = \frac{-E}{2} \quad (\text{II.6})$$

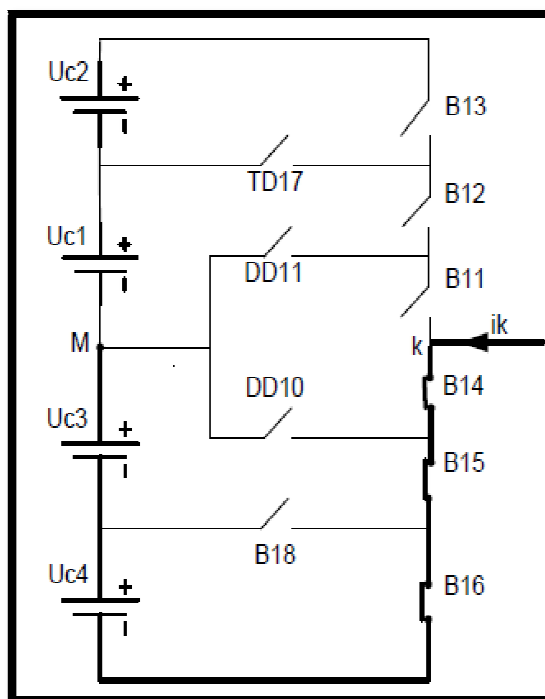


Fig. II.3.e. Configuration E_5 du premier bras d'onduleur cinq niveaux NPC.

Le tableau (II.1) donne les grandeurs électriques caractérisant chacune de ces configurations (Avec M origine des potentiels et ($K = A, B$ et C) le potentiel du noeud M du bras k).

Configuration	Grandeurs électriques
E_0	$i_k = 0$
E_1	$V_{KM} = U_{C1} + U_{C2} = 2U_C$
E_2	$V_{KM} = U_{C2} = U_C$
E_3	$V_{KM} = 0$
E_4	$V_{KM} = -U_{C3} = -U_C$
E_5	$V_{KM} = -U_{C3} - U_{C4} = -2U_C$

Tableau II.1. Grandeurs électriques pour chacune des configurations d'un bras K de l'onduleur à cinq niveaux à structure NPC.

II.3 Modélisation en vue de la commande d'onduleur cinq niveaux NPC

II.3.1 Fonction de connexion des interrupteurs

On associe une fonction F_{KS} à chaque interrupteur, qui décrit son état fermé ou ouvert, tel que , [28] :

$$F_{KS} = \begin{cases} 1 & \text{si l'interrupteur } B_{KS} \text{ est fermé} \\ 0 & \text{si l'interrupteur } B_{KS} \text{ est ouvert} \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

II.3.2 Commande complémentaire

En utilisant la commande complémentaire (II.1), les fonctions de connexion des interrupteurs du bras k sont liées par les relations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{K1} = 1 - F_{K5} \\ F_{K2} = 1 - F_{K4} \\ F_{K3} = 1 - F_{K6} \\ F_{K7} = F_{K1}F_{K2}\bar{F}_{K3} \\ F_{K8} = F_{K4}F_{K5}\bar{F}_{K6} \end{array} \right. \quad (\text{II.8})$$

II.3.3 Fonction de connexion du demi-bras

On définit pour l'onduleur à cinq niveaux une fonction logique de connexion du demi-bras notée F_{km}^b tel que , [3] :

K Indice du bras (K = 1, 2, 3).

$$m = \begin{cases} 0 & \text{Pour le demi bras du bas} \\ 1 & \text{Pour le demi bras du haut} \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

Les fonctions de connexion des trois demi-bras s'expriment comme suites :

$$\begin{cases} F_{11}^b = F_{11}F_{12}F_{13} \\ F_{10}^b = F_{14}F_{15}F_{16} \end{cases} \begin{cases} F_{21}^b = F_{21}F_{22}F_{23} \\ F_{20}^b = F_{24}F_{25}F_{26} \end{cases} \begin{cases} F_{31}^b = F_{31}F_{32}F_{33} \\ F_{30}^b = F_{34}F_{35}F_{36} \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

Les fonctions de connexion des interrupteurs parallèles du bras k sont liées par les équations suivantes :

$$\begin{cases} F_{K7}^b = F_{K1}F_{K2}(1 - F_{K3}) \\ F_{K8}^b = F_{K4}F_{K5}(1 - F_{K6}) \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

II.3.4 Modélisation aux valeurs instantanées

Cette modélisation sera effectuée en considérant l'association de l'onduleur de tension triphasé à cinq niveaux avec une charge triphasé couplée en étoile avec le neutre isolé.

Nous allons tout d'abord définir les notations et les hypothèses que nous avons utilisées :

- ✓ Les tensions d'entrée de l'onduleur sont supposées parfaites. Veux dire que ; quel que soit le courant i_k émis par cette alimentation, la tension à ses bornes reste constante ($U_{c1} = U_{c2} = U_{c3} = U_{c4}$)
- ✓ Le convertisseur est contrôlable c'est-à-dire que les transitions entre les différentes configurations dépendent que du contrôle externe B_{ki} .
- ✓ La chute de tension aux bornes des semi-conducteurs est négligeable devant $U_{cj}(j=1, 2, 3,4)$.
- ✓ La charge est triphasée équilibrée, couplée on étoile avec le neutre isolé. D'ou :

$$\begin{cases} i_A + i_B + i_C = 0 \\ V_A + V_B + V_C = 0 \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

Les potentiels des noeuds A, B et C de l'onduleur triphasé à cinq niveaux NPC par rapport au point milieu (M) s'expriment comme suit :

$$\begin{cases} V_{AM} = F_{11}F_{12}(1 - F_{13})U_{C1} + F_{11}F_{12}F_{13}(U_{C1} + U_{C2}) \\ \quad - F_{14}F_{15}(1 - F_{16})U_{C3} - F_{14}F_{15}F_{16}(U_{C3} + U_{C4}) \\ V_{BM} = F_{21}F_{22}(1 - F_{23})U_{C1} + F_{21}F_{22}F_{23}(U_{C1} + U_{C2}) \\ \quad - F_{24}F_{25}(1 - F_{26})U_{C3} - F_{24}F_{25}F_{26}(U_{C3} + U_{C4}) \\ V_{CM} = F_{31}F_{32}(1 - F_{33})U_{C1} + F_{31}F_{32}F_{33}(U_{C1} + U_{C2}) \\ \quad - F_{34}F_{35}(1 - F_{36})U_{C3} - F_{34}F_{35}F_{36}(U_{C3} + U_{C4}) \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

Pour les tensions simples on a :

$$\begin{cases} V_A = V_{AN} = V_{AM} - V_{NM} \\ V_B = V_{BN} = V_{BM} - V_{NM} \\ V_C = V_{CN} = V_{CM} - V_{NM} \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

Les équations des mailles du système source – onduleur – charge donnent :

$$V_{AM} + V_{BM} + V_{CM} = V_A + V_B + V_C + 3V_{NM} \quad (\text{II.15})$$

Avec V_{NM} la tension entre le point milieu de l'alimentation continue de l'onduleur M et le point neutre de la charge N , et dans le cas où le neutre de la charge est isolé permet d'exprimer :

$$V_{NM} = \frac{1}{3}(V_{AM} + V_{BM} + V_{CN}) \quad (\text{II.16})$$

À partir des équations (II.14) et (II.15) on a :

$$\begin{cases} V_A = V_{AM} - \frac{1}{3}(V_{AM} + V_{BM} + V_{CM}) = \frac{1}{3}(2V_{AM} - V_{BM} - V_{CM}) \\ V_B = V_{BM} - \frac{1}{3}(V_{AM} + V_{BM} + V_{CM}) = \frac{1}{3}(-V_{AM} + 2V_{BM} - V_{CM}) \\ V_C = V_{CM} - \frac{1}{3}(V_{AM} + V_{BM} + V_{CM}) = \frac{1}{3}(-V_{AM} - V_{BM} + 2V_{CM}) \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

En introduisant les fonctions de connexions des demi-bras et des interrupteurs en parallèles, on aura :

$$\begin{bmatrix} V_{AM} \\ V_{BM} \\ V_{CM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{17} + F_{11}^b \\ F_{27} + F_{21}^b \\ F_{37} + F_{31}^b \end{bmatrix} U_{C1} + \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} U_{C2} - \begin{bmatrix} F_{18} + F_{10}^b \\ F_{28} + F_{20}^b \\ F_{38} + F_{30}^b \end{bmatrix} U_{C3} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} U_{C4} \quad (\text{II.18})$$

D'après l'équation (II.18), on peut déduire que l'onduleur à cinq niveaux est une mise en série de quatre onduleurs à deux niveaux ou de deux onduleurs à trois niveaux.

Dans le cas où ($U_{C1} = U_{C2} = U_{C3} = U_{C4} = U_C$), la relation se réduit à :

$$\begin{bmatrix} V_{AM} \\ V_{BM} \\ V_{CM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{17} + 2F_{11}^b - F_{18} - 2F_{10}^b \\ F_{27} + 2F_{21}^b - F_{28} - 2F_{20}^b \\ F_{37} + 2F_{31}^b - F_{38} - 2F_{30}^b \end{bmatrix} U_C \quad (\text{II.19})$$

Les tensions composées s'expriment comme suit :

$$\begin{cases} V_{AB} = V_{AM} - V_{BM} \\ V_{BC} = V_{BM} - V_{CM} \\ V_{CA} = V_{CM} - V_{AM} \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

Donc, à partir des fonctions de connexions, ces tensions s'écrivent sous la forme :

$$\begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{17} + 2F_{11}^b - F_{18} - 2F_{10}^b \\ F_{27} + 2F_{21}^b - F_{28} - 2F_{20}^b \\ F_{37} + 2F_{31}^b - F_{38} - 2F_{30}^b \end{bmatrix} U_C \quad (\text{II.21})$$

Les tensions simples sont liées aux tensions composées par les relations :

$$\begin{cases} V_{AN} = V_A = \frac{1}{3}(U_{AB} - U_{CA}) \\ V_{BN} = V_B = \frac{1}{3}(U_{BC} - U_{AB}) \\ V_{CN} = V_C = \frac{1}{3}(U_{CA} - U_{BC}) \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

Et donc, en fonctions de connexions sous la forme :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{17} + 2F_{11}^b - F_{18} - 2F_{10}^b \\ F_{27} + 2F_{21}^b - F_{28} - 2F_{20}^b \\ F_{37} + 2F_{31}^b - F_{38} - 2F_{30}^b \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

Les courants d'entrée $i_{d1}, i_{d2}, i_{d3}, i_{d4}, i_{d0}$ de l'onduleur à cinq niveaux sont liés aux courants I_1, I_2, I_3 de la charge par les expressions qui suivent :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{d1} = F_{17}i_1 + F_{27}i_2 + F_{37}i_3 \\ i_{d2} = F_{11}i_1 + F_{21}i_2 + F_{31}i_3 \\ i_{d3} = F_{18}i_1 + F_{28}i_2 + F_{38}i_3 \\ i_{d4} = F_{10}i_1 + F_{20}i_2 + F_{30}i_3 \end{array} \right. \quad (\text{II.24})$$

$$i_{d0} = (i_1 + i_2 + i_3) - (i_{d1} + i_{d2} + i_{d3} + i_{d4}) \Leftrightarrow$$

$$i_{d0} = [(1 - (F_{17} + F_{18} + F_{11}^b + F_{10}^b)) \cdot i_1] + [(1 - (F_{27} + F_{28} + F_{21}^b + F_{20}^b)) \cdot i_2] + [(1 - (F_{37} + F_{38} + F_{31}^b + F_{30}^b)) \cdot i_3] \quad (\text{II.25})$$

Pour l'onduleur triphasé à cinq niveaux, le vecteur d'état est :

$$[U_{C1} U_{C2} U_{C3} U_{C4} i_1 i_2 i_3]^t \quad (\text{II.26})$$

Et ces entrées internes sont :

$$[V_A V_B V_C i_{d1} i_{d2} i_{d3} i_{d4} i_{d0}]^t \quad (\text{II.27})$$

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la modélisation d'un onduleur à cinq niveaux à structure NPC. Nous avons présenté un modèle pour l'onduleur ainsi que sa commande et les matrices de transferts en utilisant les fonctions de connexions.

Les résultats obtenus de cette analyse sont :

- ✓ L'onduleur à cinq niveaux est la mise en série de deux onduleurs à trois niveaux ou bien la mise en série de quatre onduleurs à deux niveaux.

- ✓ L'utilisation des fonctions de commutations, de connexion des interrupteurs et des demi-bras permet l'extrapolation des relations donnant les différentes tensions.

L'application de ces modèles élaborés sera faite dans le chapitre suivant qui sera consacré à l'élaboration des stratégies de commande, et la simulation simultanée sous MATLAB et PSIM.

CHAPITRE III

COMMANDE ET SIMULATION DE L'ONDULEUR CINQ NIVEAUX NPC

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'étude des différentes stratégies de commande d'un onduleur cinq niveaux à structure NPC, où l'objectif est de modéliser, concevoir la commande et trouver la stratégie qui donne les meilleures performances en termes de qualité d'énergie.

Dans le premier chapitre, nous avons fait un bref rappel sur les différentes structures d'onduleurs multi-niveaux. Ensuite, nous avons présenté leurs avantages et inconvénients ainsi que leurs domaines d'application.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté le modèle de fonctionnement de l'onduleur triphasé à cinq niveaux à structure NPC sans à priori sur la commande en utilisant les fonctions de connexion.

Dans le troisième chapitre, nous avons étudié la commande en modulation de largeur d'impulsion de l'onduleur cinq niveaux à structure NPC, et en particulier la commande MLI sinusoïdale et la commande par paliers.

La simulation a été faite, en utilisant les logiciels MATLAB et PSIM simultanément. 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. Dans ce cas le choix de la MLI est important.

En outre les avantages de ce type de convertisseur le rendent très utile, 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 des 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.

ANNEXE

1- Les paramètres de simulation

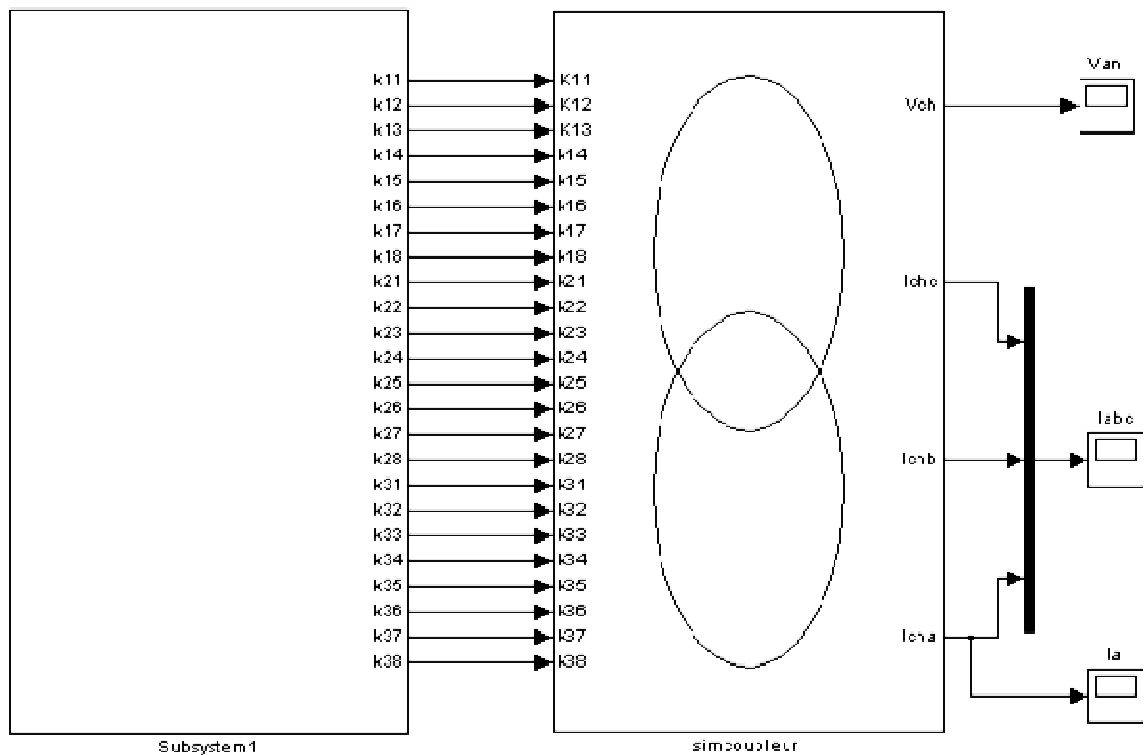
$f = 50$ HZ
 $E = 400$ V
 $T = 0.02$ S
 $T_m = 2.10^{-5}$ S

2- Les Paramètres de la charge statique RL

La résistance : $R = 1 \Omega$

L'inductance : $L = 0.1$ H

3- Schéma bloc de simulation sous MATLAB



BIBLIOGRAPHIES

- [1] **S. Kouro et al.**, «Recent advances and industrial applications of multilevel converters». IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, No. 8, Aout 2010 .
- [2] **A Nabae, I. Takahashi, H. Akagi** « A new Neutral Clamped PWM Inverter » IEEE trans. Ind.appli, 1980.
- [3] **Dj.LALILI**. «MLI Vectorielle et Commande Non Linéaire du Bus Continu des Onduleurs Multiniveaux». Application à la Conduite de la Machine Asynchrone.
- [4] **Kh IMARAZENE** . «Application des Réseaux de Neurones à la Commande par Elimination d'Harmoniques des Onduleurs Multiniveaux»,2005.
- [5] **A.M.Hava, S-K.Sul, R.J.Kerkman and T.A.Lipo**, «Dynamic Over modulation Characteristics of Triangle Intersection PWM Methods», IEEE Trans.on Industry Application, Vol.35, No.4, pp.896-907, July 1999.
- [6] **E.Acha, V.G.Agelidis, O.Anaya-Lara et T.J.E.Miller**, «Power Electronic Control in Electrical .Systems», Editions NEWNES, OXFORD, Grande-Bretagne, 2002.
- [7] **L.M.Tolbert**, «Multilevel Converters for Large Electric Drives», IEEE Trans.on ind Application, Vol,35, pp.36-44, janurary/February 1999.
- [8] **N.Celanovic**, «Space Vector Modulation and Control of Multilevel converters», Ph.D Thesis, Virginia Polytechnic Institute, 2000.
- [9] **B. K. Bose**, « Power Electronics And AC Drives », *Edition Practice Hall*, 1986.
- [10] **Y. Khadidja**, «Réduction des effets de tension homopolaire dans les associations onduleurs multiniveaux moteur à induction», Mémoire de Magister, Université de Batna, 2005.
- [11] **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.
- [12] **L. Augusto Serpa**, «Current control strategies for multilevel grid connected inverters», Thèse de Doctorat, Institut de Technologie Zurich, 2007.
- [13] **T. Cunnyngham**, «Cascade multilevel inverters for large hybride-Electric vehicule applications with varaint DC sources », Thèse de Master, Université de Tennessee, 2011.
-

- [14] **B. Ouahid**, «Contribution à l'analyse des onduleurs multiniveaux», Mémoire de Magister, Université de Batna, 2005.
- [15] **G. R. Walker**, «Modulation and control of multilevel converters», Thèse de Doctorat, Université de Queensland, 1999.
- [16] **K. Jeremy Mckenzie**, «Eliminating harmonics in a cascaded H-bridges multilevel inverter using resultant theory, symmetric polynomials, and power sums», Thèse de Master,
- [17] **H. Liu**, «Design and application of hybrid multilevel inverter for voltage boost», Thèse de Doctorat, Université de Tennessee, 2009.
- [18] **M.F.E. Gutiérrez**, « contribution à la définition de structures optimales d'onduleurs pour la commande des machines à courant alternatif »Thèse de doctorat, supelec, 2001.
- [19] **N.Lourci** : « Contribution à l'étude et la commande d'un onduleur à cinq niveaux à diodes flottantes. Application à la conduite d'une machine asynchrone triphasée ». Thèse de magister, ENP, Alger 2000.
- [20] **T. Brückner, S. Bernet**, «Loss Balancing in Three-Level Voltage Source Inverters Applying Active NPC Switches», IEEE Power Electronics Specialists Conference, vol.2, pp.1135-1140, 2001.
- [21] **R. Marquardt, A. Lesnicar**, «A New Modular Voltage Source Inverter Topology», Proceedings of EPE, CD-ROM, 2003.
- [22] **O. M. Mueller and J. N. Park**, «Quasi-linear IGBT Inverter Topologies,» in Proc. 9th APEC, Feb. 13–17, 1994, pp. 253–259.h Annu
- [23] **J. Dixon, A. A. Breton, F. E. Rios, J. Rodriguez, J. Pontt, and M. A. Perez**, «High-Power Machine Drive, Using Non Redundant 27-Level Inverters And Active Front end Rectifiers» IEEE Trans. Power Electron., vol. 22, no. 6, pp. 2527–2533, Nov. 2007.
- [24] **Y. Liu and F. L. Luo**, «Trinary Hybrid 81-Level Multilevel Inverter for Motor Drive With Zero Common-Mode Voltage» IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 55, no. 3, pp. 1014–1021, Mar. 2008.
- [25] **J.-S. Mariethoz**, «Etude Formelle pour la Synthèse de Convertisseurs Multiniveaux Asymétriques : Topologie, Modulation et Commande», Thèse de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2005.
- [26] **M. Calais, V. G. Agelidis, M. Meinhart**, «Multilevel Converters for single-phase grid connected photovoltaic systems : an overview», Elsevier Science Ltd, Vol. 66, No. 5, pp. 325-335, 1999.
-

- [27] **K. Himour** « optimisation des systèmes photovoltaïques par l’insertion des onduleurs multiniveaux », thèse doctorat, 2015.
- [28] **F.MERRAHI**, « Alimentation et Commande d’une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l’énergie éolienne)», MEMOIRE DE MAGISTER, 2007.
- [29] **F. BOUCHAFAA**, « Etude et Commande de différentes Cascades à Onduleur à Neuf Niveaux à Structure NPC. Application à la conduite d’une MSAP », Thèse doctorat, 2006.
- [30] **G.Seguir** , **F.Notelet** . « Electrotechnique industrielle », Edition TEC & DOC 1977.
- [31] **A.TALHA**, «Etude de différentes cascade de l’onduleur a sept niveaux à structure NPC. Application à la conduite d’une machine synchrone à aimant permanents », thèse doctorat 2004.
- [32] **J.SONG MANGUELLE**, «Convertisseurs multi-niveaux asymétriques alimentés par transformateurs multi-secondaires basse fréquence : réactions au réseau d’alimentation» Thèse n° 3033 (2004), École Polytechnique Fédérale de LAUSANNE, Suisse.
- [33] **A.Radan, A.H.Shahirinia** «Novel Carrier-Based PWM Methods for Multi-level Inverters» EPE Journal, ISSN 0939-8368 V01.18-N°2- April-May-June 2008 pages 16-21.
-

I. Introduction

La technologie de la conversion de l'énergie continu-alternatif en utilisant les convertisseurs statiques a pris une part importante dans l'industrie. Cela est dû essentiellement à deux raisons :

- La première est l'étendue du domaine de leurs applications : systèmes d'entraînements à vitesse variable, alimentation de sécurité...etc. [5]
- 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. Cela permet d'adapter pour chaque application la structure de l'onduleur et la stratégie de commande qui lui conviennent le mieux. [6]

Malgré leurs nombreux avantages, les onduleurs conventionnels ne peuvent être utilisés qu'aux applications de faibles et de moyennes puissances seulement, et aussi l'existence d'harmoniques prohibitifs pour le système, occasionnant des pertes dans la charge et le convertisseur (pertes joules et par courant de Foucault dans la charge, pertes joules dans le convertisseur). Et éventuellement si le convertisseur est connecté au réseau ces harmoniques entraînent des pertes joules et des pertes fer dans le transformateur s'il existe.

Pour surmonter ces problèmes, un nouveau type d'onduleur a été introduit, en l'occurrence, l'onduleur multi-niveaux. Ce type d'onduleur présente plusieurs avantages, parmi les plus importants on mentionne [7] :

- Il peut générer des tensions très proches de la sinusoïde avec moins d'harmoniques .
- Il est bien adapté aux moteurs de moyennes et de grandes puissances.

D'où l'intérêt d'étudier les différentes structures des onduleurs multi-niveaux, de leurs caractéristiques et des contraintes imposées aux composants qui les constituent.

Aperçu générale

Un convertisseur statique est dit «multi-niveaux» lorsqu'il génère une tension découpée de sortie composée d'au moins deux 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 tension continue 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 harmoniques est par conséquent d'autant moins élevée.

Le choix de la meilleure topologie d'onduleurs multi-niveaux, pour chaque application donnée, n'est pas souvent clair, ces dernières font sans cesse l'objet de nombreuses publications dont on citera l'une des plus récentes [8].

Parmi les topologies d'onduleurs multi-niveaux, on distingue l'onduleur multi-niveaux à potentiels distribués NPC (Neutral- Point - Clamped), l'onduleur multi-niveaux cascadié en ponts "H" et l'onduleur multi-niveaux à cellules imbriquées. En général pour les convertisseurs multi-niveaux, le nombre de niveaux N est donné par $N = P + 1$, avec P le nombre de paires d'interrupteurs complémentaires par phase. Le nombre de niveaux se calcule dans le cas d'onduleur NPC par $N = (m \div 2) + 1$, avec m le nombre d'interrupteurs par phase; et dans le cas d'onduleur à ponts en 'H' cascadiés par $N = 2NH + 1$, avec NH nombre de ponts par phase.

La même chose aussi pour l'onduleur NPC les condensateurs C_1 à C_{N-1} permettent de fractionner la tension d'entrée à $N-1$ fraction.

I.1 LES SEMI-CONDUCTEURS DE PUISSANCE

Les composants de puissance (interrupteurs) sont déterminés en fonction des niveaux de la puissance et la fréquence de commutation. En règle générale, plus les composants sont rapides (fréquence de commutation élevée), plus la puissance commutée est faible et inversement. Il est particulièrement vrai que les:

- Transistors **MOSFET** (transistor à effet champ), ces composants sont très rapides mais de puissances relativement faibles.
- Transistor bipolaire, moins rapide que les **MOSFET** mais d'avantage plus puissant (quelque **KHz** à une dizaine de **KW**).

- Transistors **IGBT**, sont des composants de gamme standard (jusqu'à **20 KHz** à des dizaines de **KW**)
- Les thyristors **GTO**, commutent très lentement les grandes puissances.
- Les Thyristors, sont commandés à l'ouverture mais la fermeture dépend du circuit extérieur. [9]

La puissance [**KW**] comme étant la fonction de fréquence [**KHz**] peut être schématisée comme suit :

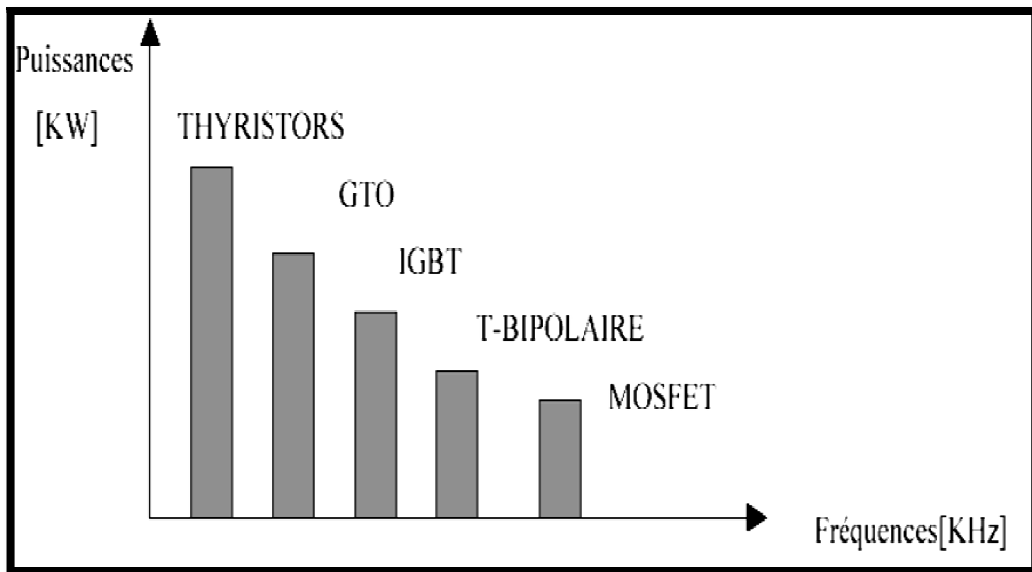


Fig. I.1. Représentation de puissance des composants en fonction de fréquence de commutation [9]

I.2 Concept multi-niveaux

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

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

$$V_{VM} = \frac{C_i}{N-1} \cdot E$$

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

L'onduleur de la Figure (1.1.a) délivre à sa sortie deux niveaux de tensions :

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

Les trois positions (P1, P2, P3) de l'interrupteur de la Fig. I.2.(b), permettent d'avoir respectivement trois niveaux de tension ($E, -E$ et 0). D'où l'appellation onduleur à N niveaux de la Fig. I.2.(c)

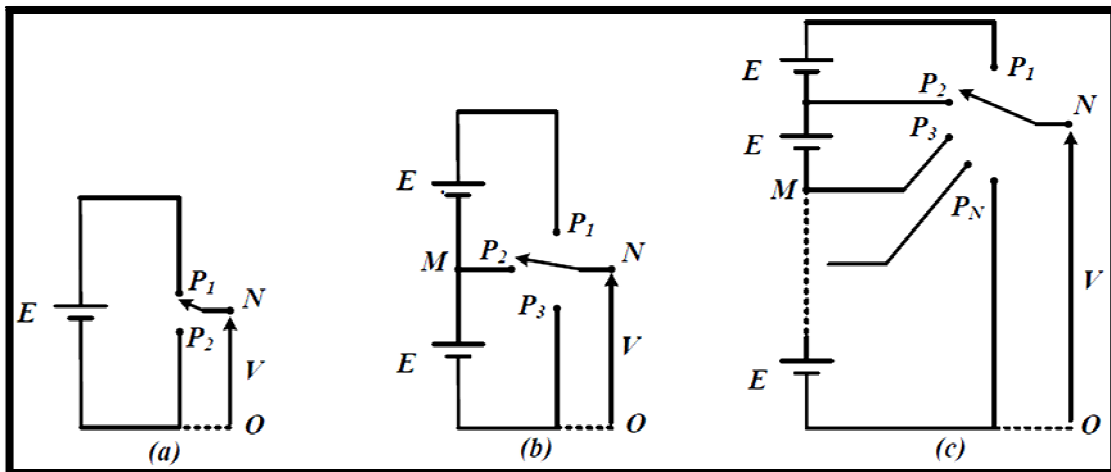


Fig. I.2. Schéma d'un bras d'onduleur :a) 2 niveaux ;b) 3 niveaux ;c) N niveaux [10].

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

I.3 Différents topologie des onduleurs multi-niveaux

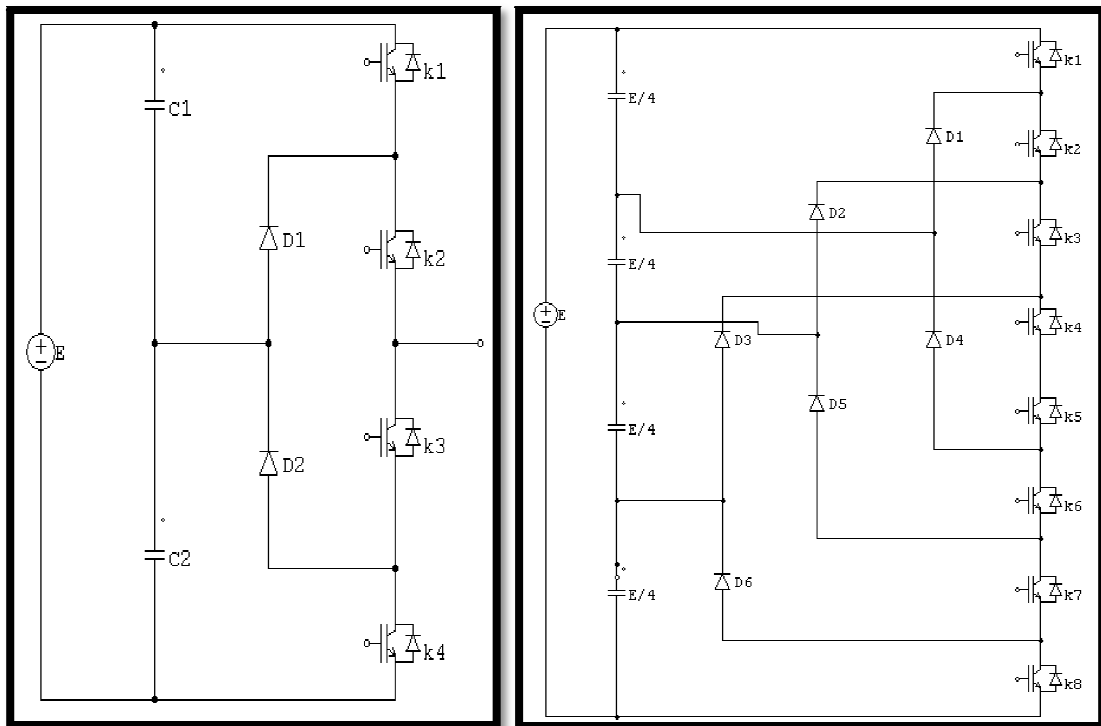
Par définition, l'onduleur de tension multi-niveaux possède trois ou plusieurs niveaux. L'objectif de cette partie est de donner un aperçue générale des trois topologies de base des onduleurs multi-niveaux, [10]:

- ✓ la topologie à diode de bouclage(NPC)
- ✓ la topologie à condensateur flottant
- ✓ la topologie en cascade
- ✓ Onduleurs multi-niveaux hybrides

I.3.1 Onduleur de tension a 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 [11]. L'onduleur NPC à trois et cinq niveau est illustré dans la Fig. I.3. [12]



a) -NPC trois niveaux,

b) -NPC cinq niveaux

Fig. I.3. Topologies d'onduleurs NPC

Pour la génération de trois niveaux de tension, la topologie NPC présente plusieurs Avantages par rapport à la topologie d'onduleur à deux niveaux. [13,10]

- 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.

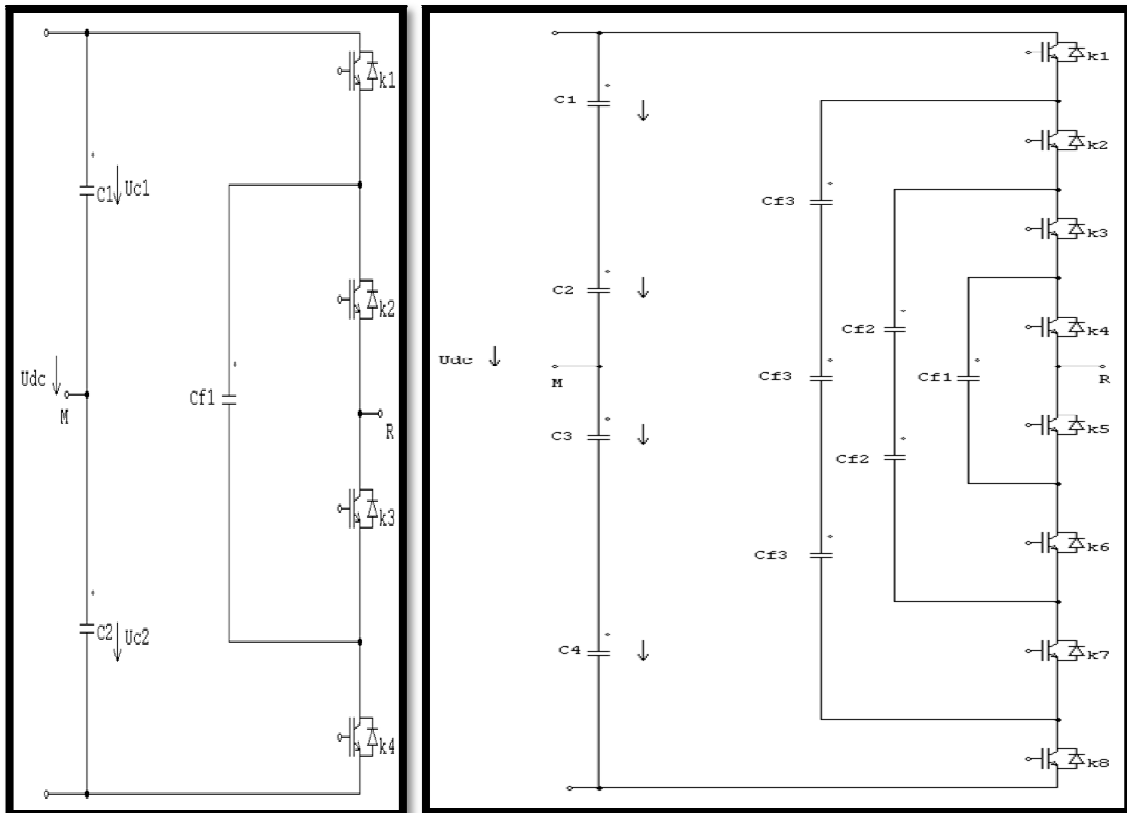
Par contre, cette topologie présente plusieurs difficultés techniques dans les cas de grande Puissance tel que :

- 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.
- Le maintien de l'équilibre de la charge des condensateurs demeure toujours une question ouverte pour les topologies des onduleurs NPC avec plus de trois niveaux. Bien que le l'onduleur NPC à trois niveaux fonctionne avec un facteur de puissance élevé, il est employé surtout dans les circuits de compensation .Cela est dû au problème d'équilibrage des capacités.

I.3.2 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, Fig. I.4, on représente l'onduleur a condensateur flottant a trois et cinq niveau [14].



a) - à trois niveaux

b) - à cinq niveaux

Fig. I.4. Topologies d'onduleurs NPC à condensateur Flottant

Ce type de convertisseur présente plusieurs avantages : [15]

- 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.

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.

I.3.3 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, Fig. I.5 [16]

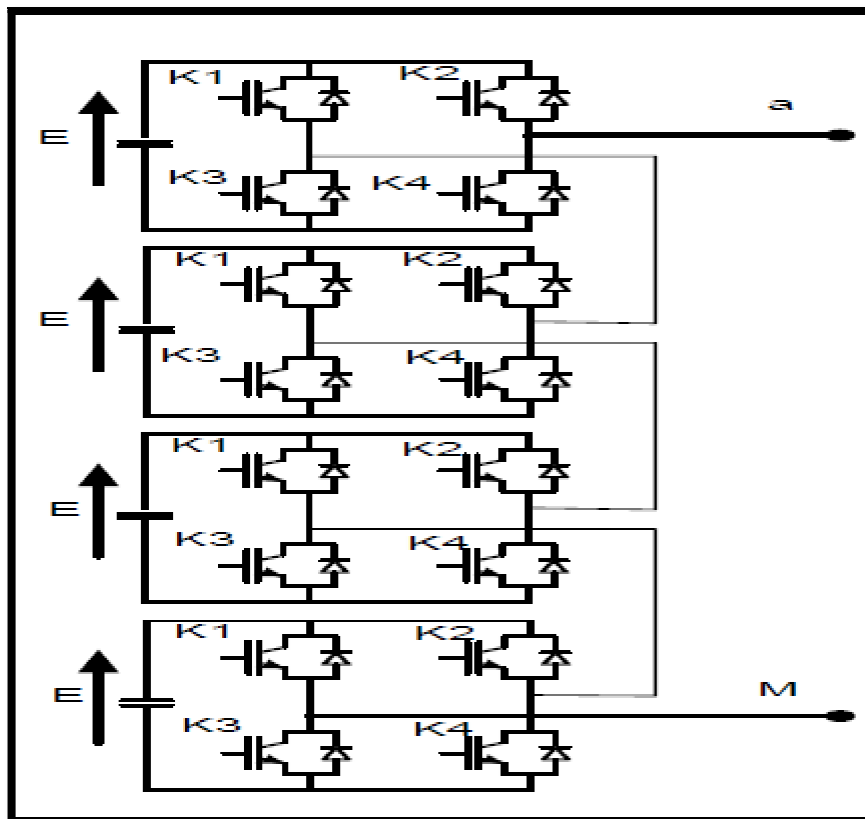


Fig. I.5 Structure d'un onduleur multi-niveaux en cascade à cinq niveaux

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. [16,17]

I.4 Onduleur à cinq niveaux de type NPC**I.4.1 Structure**

Chaque phase de l'onduleur triphasé NPC à cinq niveaux de tensions est composée de six interrupteurs en série de deux autres en parallèle commandés qui sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant (il s'agit d'associations classiques d'un transistor et d'une diode en antiparallèle) plus deux diodes.

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

La structure triphasée de l'onduleur NPC à cinq niveaux de tensions est présentée sur La Fig. I.6.

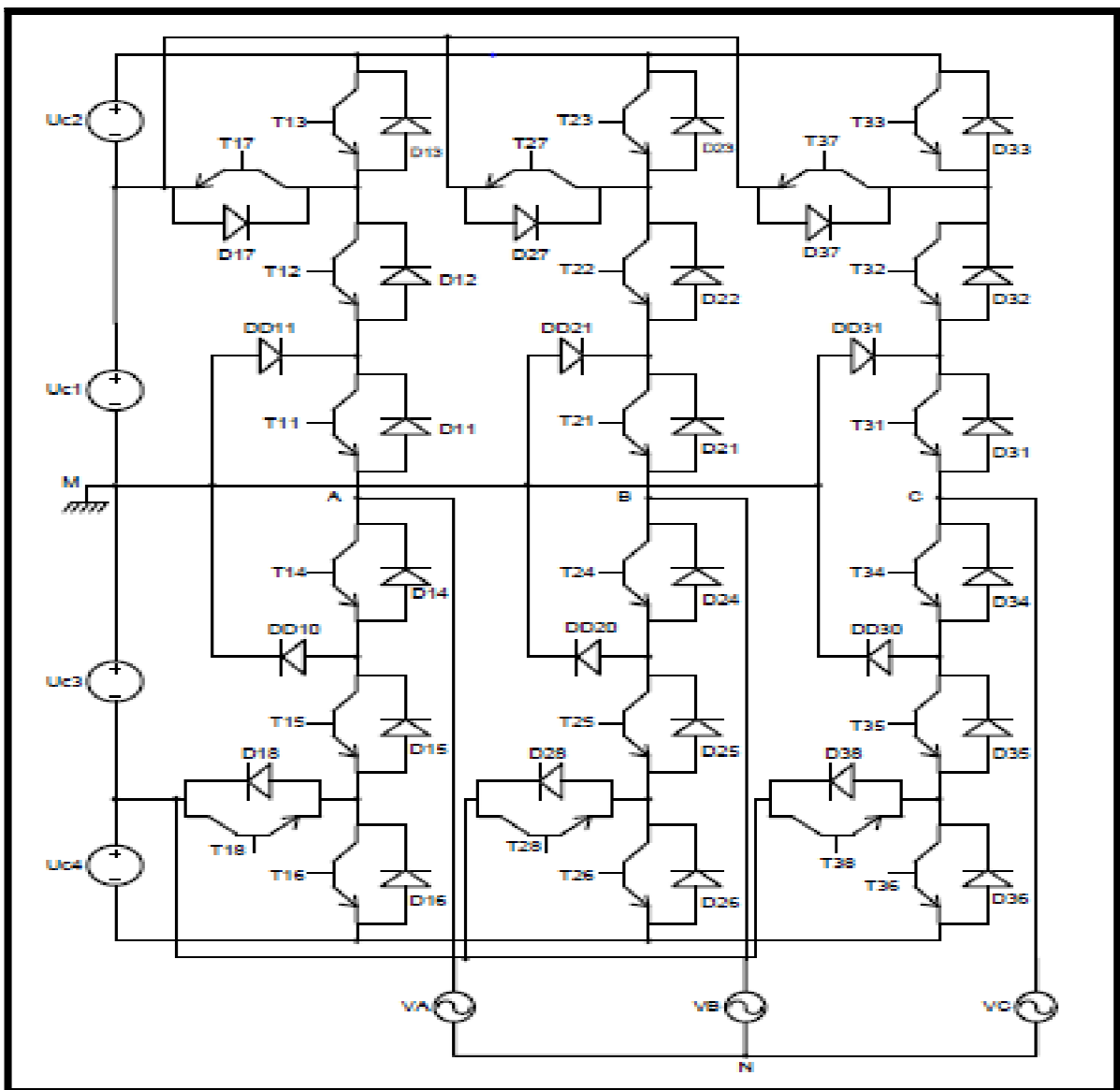


Fig. I.6 .Schéma d'un onduleur NPC à 5 niveaux

I.4.2 Principe de fonctionnement

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

- Séquence 1
 - K11, K14, sont passant et K12, K13, K15, K16, K17 et K18 sont bloqués:
 - ✓ la tension de sortie est : $V_{AM} = 0$
 - ✓ la tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{k12}=V_{k13}=V_{k15}=V_{k16}=V_{k17}=V_{k18}=+E/4.$$

- séquence 2

K11, K12, K17 sont passant et K13, K14, K15, K16 et K18 sont bloqués :

✓ la tension de sortie : $V_{AM} = +E/4$

✓ la tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{k13}=V_{k14}=V_{k15}=V_{k16} =K18= +E/4$$

- séquence 3

K11, K12, K13 sont passant et K14, K15, K16 ,K17 et K18 sont bloqués :

✓ La tension de sortie : $V_{AM} =+E/2$

✓ la tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{k14}=V_{k15}=V_{k16}=V_{k17}=V_{k18}= +E/4$$

- séquence 4

K14, K15, K18 sont passant et K11, K12, K13, K16 et K17 sont bloqués:

✓ La tension de sortie : $V_{AM} = -E/4$

✓ la tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{k11} = V_{k12}= V_{k13} = V_{k16}=V_{k17}= +E/4$$

- séquence 5

K14, K15, K16 sont passant et K11, K12, K13, K17 et K18 sont bloqués:

✓ La tension de sortie $V_{AM} = -E/2$

✓ la tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{k11}=V_{k12}=V_{k13}=V_{k17} = K18=+E/4$$

Les différentes séquences de fonctionnement et l'état des interrupteurs commandés sont regroupés dans le Tableau I.1.

	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9
K11	1	1	1	1	1	0	0	0	1
K12	0	1	1	1	0	0	0	0	0
K13	0	0	1	0	0	0	0	0	0
K14	1	0	0	0	1	1	1	1	1
K15	0	0	0	0	0	1	1	1	0
K16	0	0	0	0	0	0	1	0	0
K17	0	1	0	1	0	0	0	0	0
K18	0	0	0	0	0	1	0	1	0
V_{AM}	0	$\frac{E}{4}$	$\frac{E}{2}$	$\frac{E}{4}$	0	$-\frac{E}{4}$	$-\frac{E}{2}$	$-\frac{E}{4}$	0

Tableau I.1. Etats possibles de l'onduleur cinq niveaux

Les séquences de fonctionnement, la forme d'onde de la tension de sortie et les états des interrupteurs sont représentés sur la Fig. I.7.

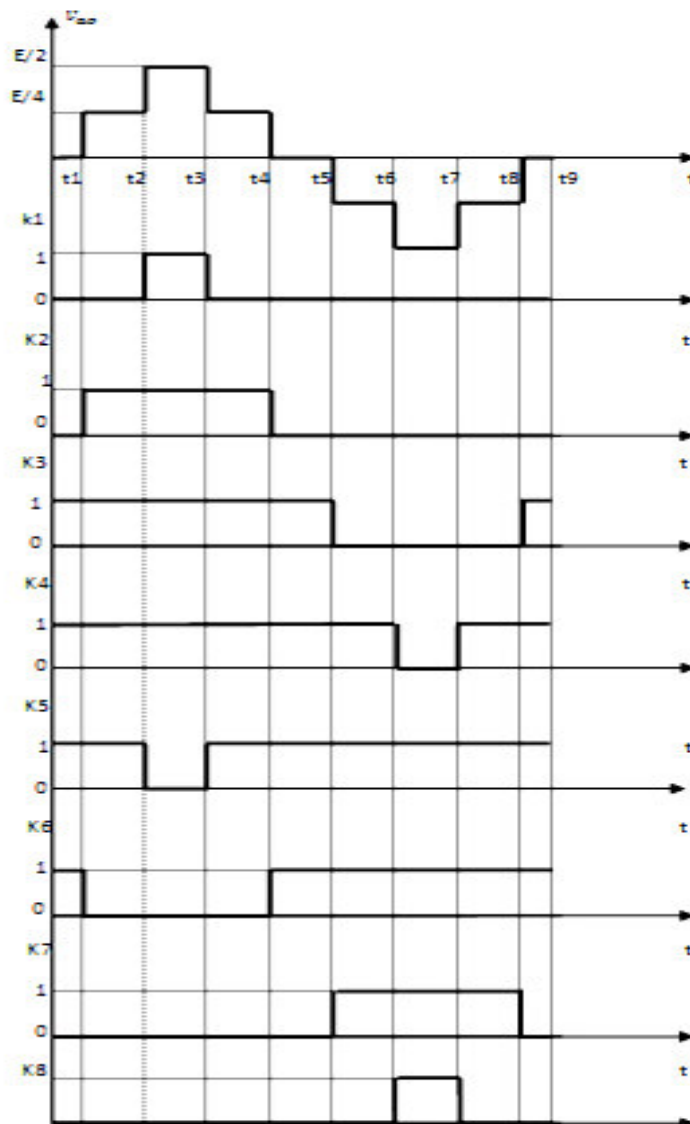


Fig. I.7. Forme d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé cinq niveaux de type NPC

Cette structure présente des avantages les plus importants [18] :

- Amélioration de la forme d'onde de la tension de sorties. ainsi, le contenu harmonique de la forme d'onde de sortie sera plus faible.
- Réduction de la contrainte de tension sur les interrupteurs (ceci est proportionnel aux nombre de niveaux) et donc adapté pour les applications haute tension.

Par contre l'inconvénient de cette structure est :

- Déséquilibre de la tension des condensateurs. Dans certaines conditions de fonctionnement, la tension du point milieu capacitif peut avoir des variations très importantes. Afin d'assurer le bon fonctionnement, il faut prévoir une stratégie de commande pour assurer la stabilité de cette tension. Ce problème devient plus complexe lorsque le nombre de niveaux est plus important.

I.5 Onduleurs multi-niveaux hybrides

Les topologies citées ci-dessus constituent les structures de bases de convertisseurs multi-niveaux, la mise en série ou en parallèle de ces onduleurs de base permet d'obtenir des topologies hybrides.

On prend à titre d'exemple une structure hybride qui est constituée de deux onduleurs monophasés qui sont mis en série sur la même phase l'un est un onduleur monophasé de type NPC et l'autre est un onduleur monophasé en pont H. seule la cellule NPC est alimentée, ce qui réduit considérablement le volume de l'alimentation. Comme il est possible de connecter en série deux structures à cellules imbriquées.

Les topologies hybrides permettent de générer un nombre plus élevé de niveaux, le convertisseur génère une tension avec moins d'harmoniques pour un même nombre de semi-conducteurs. Mais elles exigent des stratégies de commande un peu plus complexes et peuvent poser des problèmes au niveau des échanges énergétiques entre les convertisseurs [19].

La Fig. I.8. montre un onduleur monophasé à structure NPC mise en série avec un onduleur monophasé en pont H.

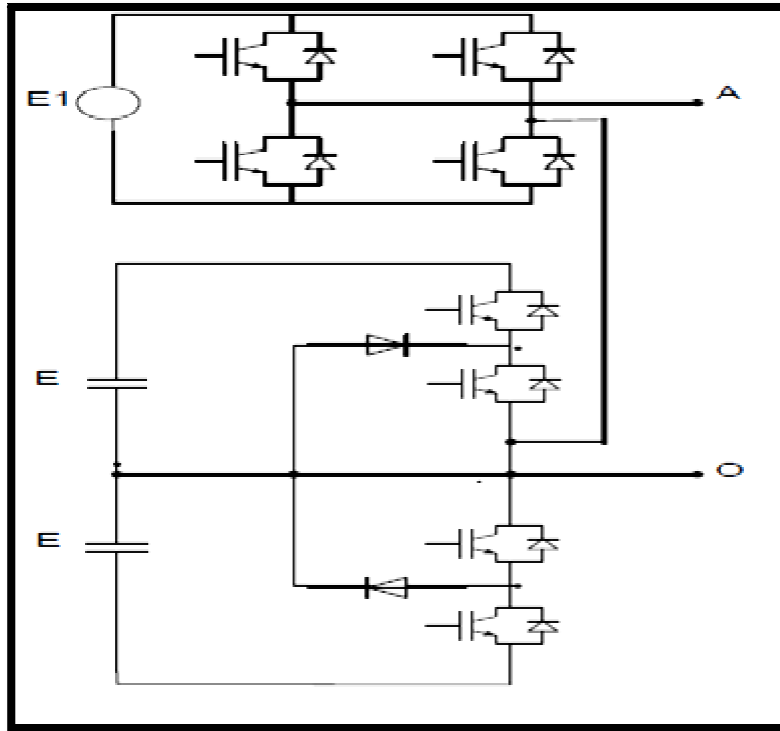


Fig. I.8. Mise en série d'un NPC avec un pont en H[20].

I.6 Nouvelles topologies

Depuis l'introduction de la première topologie multi-niveaux, presque quatre décennies déjà, environ une douzaine de variantes et de nouvelles topologies multi-niveaux ont été proposées dans la littérature. La majorité d'elles sont des variations des topologies multi-niveaux classiques citées plus haut, ou hybrides entre elles.

I.6.1 Convertisseur H-NPC à cinq niveaux

Ce convertisseur est la synthèse d'un raccordement des phases des convertisseurs NPC monophasés à trois niveaux classiques en pont H (Fig. I.9.) , formant ainsi un HNPC cinq niveaux (5L-HNPC), et a été proposé pour la première fois par. Cette topologie est commercialisée par ABB et TMEIC-GE [1].

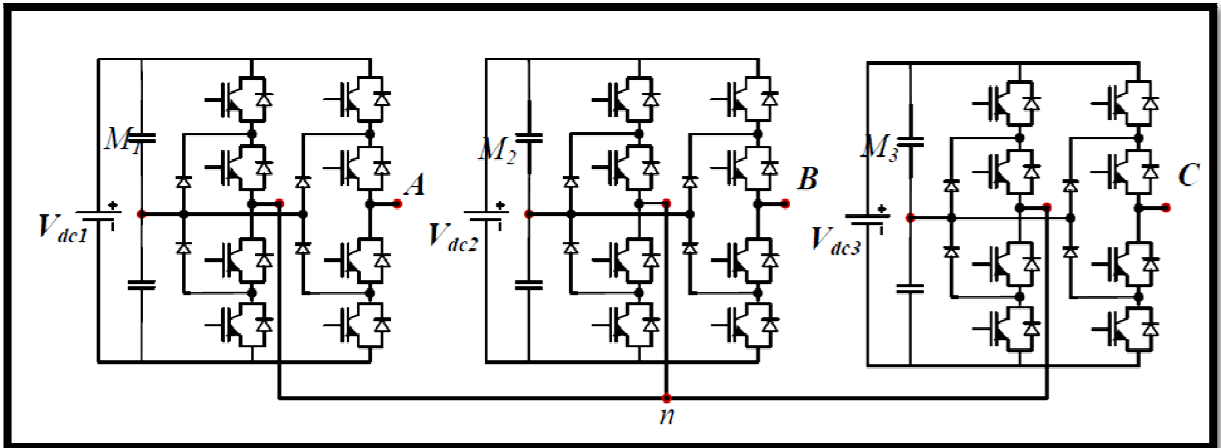


Fig. I.9. Convertisseur en pont H à NPC en cascade[20].

La combinaison des trois niveaux de chaque bras de convertisseur NPC ($V_{dc}/2$, 0, $-V_{dc}/2$) résulte cinq niveaux différents à la sortie (V_{dc} , $V_{dc}/2$, 0, $-V_{dc}/2$, $-V_{dc}$). Comme le traditionnel pont H, cette topologie exige une source isolée pour chaque pont H pour éviter les courts circuits des bus continus [1].

I.6.2 Convertisseur actif NPC trois niveaux

L'un des inconvénients de la topologie NPC trois niveaux est l'inégalité de la répartition des pertes entre les interrupteurs du haut et du bas de chaque bras du convertisseur. Ce problème peut être résolu en remplaçant les diodes de clampé par des interrupteurs pour avoir un moyen de contrôle du courant au neutre de la source, donc un contrôle de la distribution des pertes dans les interrupteurs du convertisseur. En d'autres termes, avec les diodes de clampé comme celles de l'NPC trois niveaux, le courant circule à travers la diode de clampé du haut ou du bas selon sa polarité, et cela quand le niveau zéro est généré. Par contre, avec les interrupteurs de clampé, le courant peut être forcé à passer à travers le chemin de clampé du haut ou du bas [20]. Figure I.10

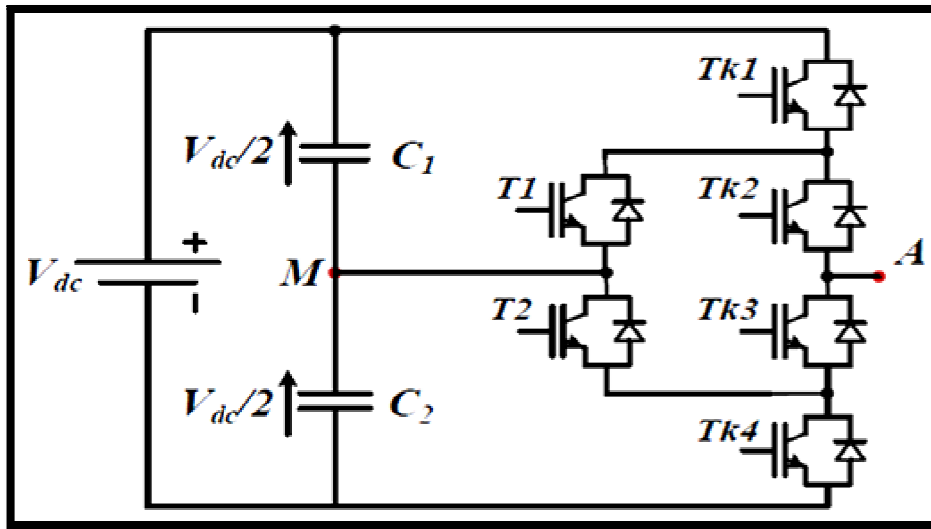


Fig. I.10. Bras d'un onduleur actif NPC à trois niveaux[20].

I.6.3 Convertisseur multi-niveaux modulaire MMC

Un autre convertisseur multi niveaux ayant trouvé des applications industrielles est le convertisseur multi-niveaux modulaire (Modular Multilevel Converter, connu sous MMC). Cette topologie ait été développée au début des années 2000 [21].

Fondamentalement, le MMC est composé de convertisseurs de tension monophasés à deux niveaux, connus sous le nom de demi pont (ou même un pont complet), connectés on série, comme est montré sur la figure (Fig. I.11(a)). Le bras de chaque phase est divisé en deux parties égales (le nombre de cellules doit être pair) pouvant ainsi, générer un nombre égal de niveaux positifs et négatifs du coté alternatif [1].

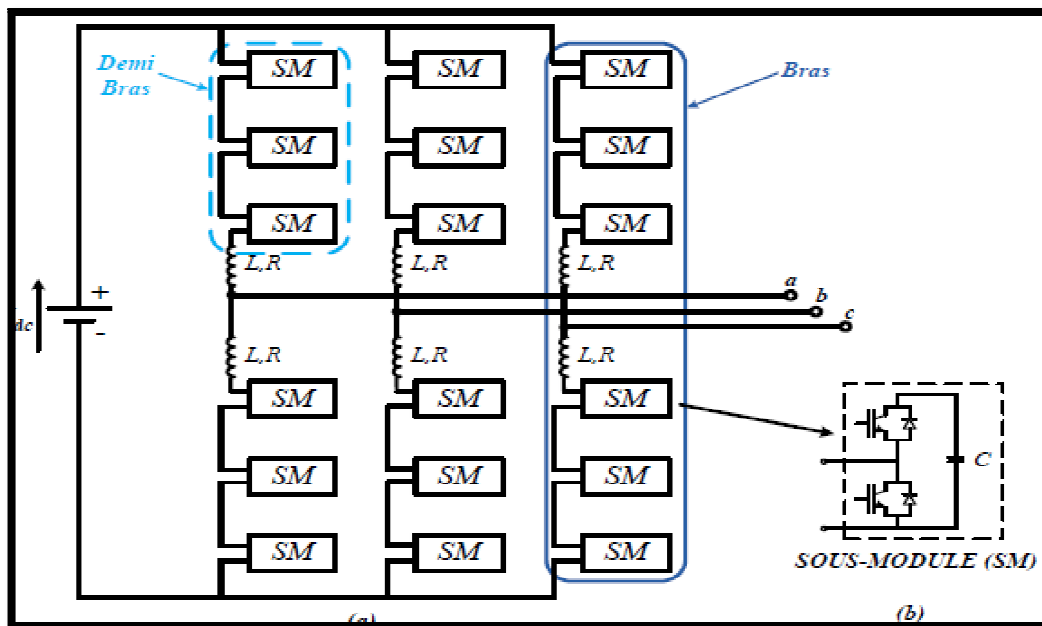


Fig. I.11 : a) Schéma du MMC, b) Schéma d'un sous-module[20].

Les deux interrupteurs de la cellule de puissance (Fig. I.11(b)) sont contrôlés par des signaux complémentaires et produisent deux états de commutation actifs, qui peuvent connecter ou non la capacité aux autres capacités du bras du convertisseur, générant ainsi, un signal multi-niveaux. Il y a un troisième état de commutation, où les deux interrupteurs sont à l'état ouvert (off), permettant au courant de circuler à travers les diodes (ou à travers les condensateurs, si cela est exigé par le signe du courant). Dans les applications pratiques, il y a un interrupteur additionnel pour une isolation complète des cellules. Le plus attrayant dans cette topologie est sa modularité [1].

I.6.4 Convertisseur en pont H asymétrique

Si la topologie du pont H cascadié, comme le montre la Fig. I.9, est alimentée avec des rapports de tension inégaux entre les cellules, une partie ou même tous les états de commutation redondants des niveaux de tension peuvent être éliminés, ce qui maximise le nombre de niveaux différents de tension générés par le convertisseur. Ce concept de ratios de sources continues asymétriques a été introduit pour des applications d'imagerie par résonance magnétique [22]. Plus tard, cette idée a été explorée pour les convertisseurs à moyenne tension avec deux ou plusieurs cellules en série avec des puissances de deux taux de déséquilibre de tension ($1:2:\dots:2^{n-1}$), qui sont capables de générer sept niveaux de tension

différents avec seulement deux cellules. Plus tard, des rapports de tension dans les puissances de trois ($1: 3: \dots: 3^{n-1}$) ont été introduits, [23], ce qui élimine tous les redondances et maximise le nombre de niveaux à la sortie. Ce convertisseur asymétrique est également connu comme "Convertisseur ternaire hybride multi-niveaux " [24].

I.7 Comparaison des topologies multi-niveaux

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.

Par contre, dans les structures en ponts cascades la tension de sortie maximale est plus grande que chacune des tensions d'alimentation. Contrairement aux autres topologies, les alimentations des cellules ne peuvent pas être obtenues à partir d'une alimentation continue unique sans mettre en place des convertisseurs additionnels. Dans la plupart des cas, il faut recourir à des transformateurs pour obtenir les alimentations nécessaires. Le couplage parallèle des transformateurs du «côté alimentation» et l'addition des tensions «côté charge» conduit à une élévation de la tension [25].

Bien que le choix de la topologie multi-niveaux soit directement lié à l'application et à la liste de caractéristiques, afin de réduire au maximum les pertes, le volume et les coûts, habituellement le nombre de composants joue le rôle le plus important [12]. Par conséquent, afin de fournir quelques recommandations pour sélectionner la topologie appropriée, le Tableau I.2.récapitule le nombre de semi-conducteurs et de composants passifs exigés par les topologies classiques.

Topologie	Niveau	N_c	N_D	N_f	N_{dc}	N_V
NPC	3	12	6	0	2	1
	5	24	36	0	4	1
	7	36	90	0	6	1
	N	$6(N-1)$	$3(N-1).(N-2)$	0	$N-1$	1
FC	3	12	0	3	2	1
	5	24	0	18	4	1
	7	36	0	45	6	1
	N	$6(N-1)$	0	$\frac{3}{2}(N-1).(N-2)$	$N-1$	1
CHB	3	12	0	0	3	3
	5	24	0	0	6	6
	7	36	0	0	9	9
	N	$6(N-1)$	0	0	$\frac{3}{2}(N-1)$	$\frac{3}{2}(N-1)$

Tableau I.2. Comparaison des convertisseurs NPC, FC et CHB en terme de nombre de composants nécessaires pour chaque convertisseur.

Avec :

- ✓ N_c : Nombre de commutateurs ;
- ✓ N_D : Nombre de diodes de clamp ;
- ✓ N_f : Nombre de capacités flottantes ;
- ✓ N_{dc} : Nombre de capacités du bus continu ;
- ✓ N_V : Nombre de sources continues ;

Pour une approche à trois niveaux, l'analyse prouve que les onduleurs clampés par le neutre (NPC), à capacité flottante (FC) et ponts H montés en cascade exigent le même nombre de commutateurs (12), toutefois ils diffèrent sur les éléments et le nombre de sources de tension continue requises. Pour des applications où seulement une source continue est disponible, les topologies de types NPC et FC sont avantageuses par rapport à celle des ponts H montés en cascade, qui exige la présence d'un transformateur spécial pour fournir les diverses sources continues indépendantes. Donc, quand les différentes sources sont disponibles la topologie de pont H montée en cascade pourrait être considérée une solution convenable puisqu'elle exige le moindre nombre de composants [26] [1]. Cette première comparaison basée sur le nombre de composants permet de tirer quelques conclusions et de séparer les champs d'applications de ces différents convertisseurs. Les onduleurs NPC sont intéressants pour les applications triphasées nécessitant peu de niveaux. L'énergie stockée à

l'étage intermédiaire peut être réduite. Les structures permettant une conversion directe, telles que NPC et cellules imbriquées, sont avantageuses pour les applications avec échange de puissance active, lorsqu'une isolation galvanique n'est pas nécessaire entre les sources échangeant de la puissance. Les onduleurs à cellules en cascade sont très avantageux pour les applications monophasées sans apport de puissance active. Ils conviennent même pour les très grandes tensions. Ce sont également des structures à privilégier pour les applications où il faut mettre en place une isolation galvanique à l'aide de transformateur moyenne ou haute fréquence.

I.8 Applications et domaines d'intérêt des convertisseurs multi-niveaux

A cause des problèmes rencontrés au fait et qui sont posés par l'utilisation des convertisseurs à deux niveaux de tension, monophasés ou triphasés, il y'avait apparition de nouvelles structures appelés convertisseurs multi-niveaux qui sont utilisés pour le réglage de la fréquence et de l'amplitude de la tension et aussi pour le transfert d'énergie entre une source d'alimentation à courant continu et une charge à courant alternatif monophasé ou triphasé. Cette utilisation ouvre plusieurs opportunités d'applications, dont quelques-unes sont cités dans cette partie.

I.8.1 Les applications des convertisseurs multi-niveaux en photovoltaïques domestiques

Les installations photovoltaïques domestiques raccordées au réseau électrique de distribution (application de quelque kilowatt) peuvent être pénalisées par les courants de fuites capacitifs inhérents à la structure des modules photovoltaïques. L'amplitude de ces courants peut être suffisamment élevée pour provoquer la déconnexion de l'onduleur du réseau électrique de distribution. De plus, la fatigue des capacités de filtrage de la source de tension continue, ainsi que les niveaux importants de la tension de blocage des interrupteurs peuvent être des facteurs limitant la robustesse du convertisseur DC/AC. Les onduleurs multi-niveaux permettent en partie de répondre à ces problématiques. Toutefois, leur mise en œuvre est difficile, ainsi que le nombre important de composants actifs et passif mis en jeu, sont des critères discriminants vis-à-vis de la robustesse du système de conversion [27].

I.8.2 Application dans le domaine de l'alimentation des machines électriques

Les machines électriques de moyenne et forte puissances nécessitent une alimentation à moyenne tension. Sachant que les semi-conducteurs ne supportent qu'une faible tension par rapport à celle exigée par la machine. Dans ce cas l'utilisation des convertisseurs multi-niveaux est mieux adaptée, car la qualité de la tension en termes d'harmonique est meilleure ainsi les effets néfastes sur la durée de vie de la machine et celle de réseau éventuelle est réduite [3] . En plus à partir de cellules de petite tension (comme des batteries, des piles à combustible ou des cellules photovoltaïques), il devient possible d'alimenter une machine à moyenne tension.

I.8.3 Application dans le domaine des réseaux électriques

Les convertisseurs multi-niveaux sont aussi adaptés pour l'amélioration de la qualité de la tension des réseaux électriques parce qu'ils peuvent fournir une moyenne ou une haute tension. Notamment sur les lignes de transmission de longue distance, il est souvent nécessaire de compenser la puissance réactive. Lorsqu'ils sont contrôlés de façon adéquate, ils offrent dans ce cas, la possibilité de régler l'amplitude de la tension et son déphasage, mais aussi l'impédance de la ligne de transmission. Ils peuvent donc jouer le rôle de compensateurs statiques.

I.8.4 Les réseaux de bord des bâtiments maritimes

Dans les bâtiments maritimes, il est possible d'exploiter les techniques de conversion multi niveaux pour assurer l'alimentation des navires (par exemple alimenter un réseau de bord).

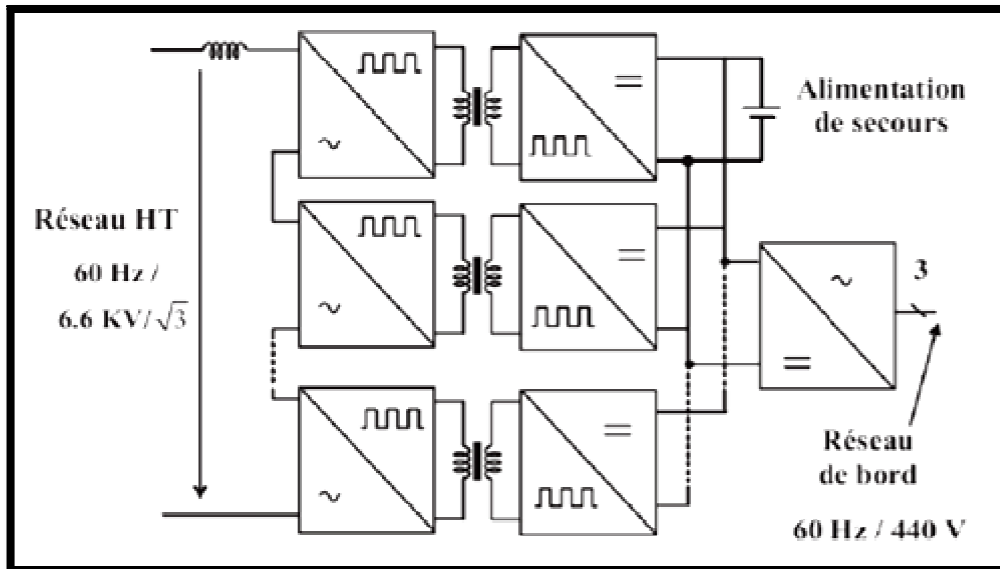


Fig. I.12 : Convertisseur multi-niveaux dans les bâtiments maritimes[20].

I.8.5 Générateur à base d'une source d'énergie éolienne

Vu que la place que prennent la production des énergies renouvelables, particulièrement les aérogénérateurs. L'association des convertisseurs multi-niveaux permet d'améliorer la forme d'onde en utilisant les différents niveaux de tension, injecté au point commun de connexion pour les aérogénérateurs à vitesse variable afin d'éviter la déconnexion de l'éolienne du réseau.

Ces convertisseurs contribuent à traiter les harmoniques, on associe ces dernier à des filtres (filtrage actif ou passif). La Fig. I.13 représente un aérogénérateur relié à un réseau à l'aide des convertisseurs multi-niveaux [29].

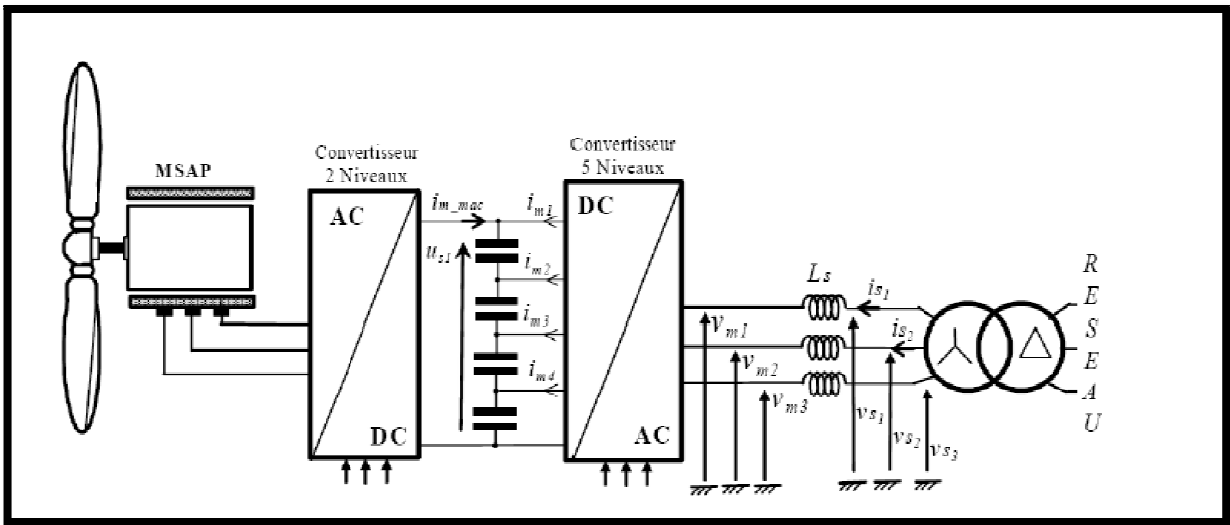


Fig. I.13 : Convertisseur multi-niveaux inséré dans un générateur éolien [20].

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principaux concepts de la conversion multi-niveaux d'énergie. Une étude brève sur la présentation des différentes topologies a été faite (homogènes, hybrides et d'autres nouvelles topologies), leurs principes de fonctionnement, ainsi que les avantages et inconvénients ont été exposés.

A la fin de ce chapitre, nous avons montré les différentes applications et domaines d'intérêts des convertisseurs multi-niveaux. Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation de l'onduleur.

III.1 Introduction

Pour améliorer la tension de sortie d'un onduleur, on peut agir sur sa structure ou sur la méthode de sa commande. Généralement on utilise des commandes par modulation de largeurs d'impulsions. On rencontre plusieurs stratégies de ce type de commande, telles que la modulation triangulo-sinusoïdale, la modulation par hystérésis, et la modulation vectorielle.

Dans ce chapitre, nous allons appliquer la commande par paliers et deux techniques de la modulation triangulo-sinusoïdale pour la commande de l'onduleur cinq niveaux à structure NPC.

III.2 Stratégies de commande de l'onduleur de tension cinq niveaux à structure NPC

Afin de générer une tension la plus sinusoïde possible, différentes stratégies de commande ont été proposées pour les onduleurs à deux et à trois niveaux.

Les récents progrès technologiques dans le domaine des dispositifs à semi-conducteurs ont élargi le domaine d'application des techniques de modulation de largeurs d'impulsions dans le contrôle de la tension de sortie des convertisseurs statiques.

Dans cette partie, nous élaborons la commande par paliers et deux stratégies de commande MLI de l'onduleur triphasé à cinq niveaux à structure NPC. Certaines stratégies que nous allons présenter sont des extensions de celles des onduleurs à deux et à trois niveaux.

Qui sont :

- Commande par gradins ou par paliers.
- Commande PWM à quatre porteuses unipolaires type1 (PD).
- Commande PWM à quatre porteuses unipolaires type2 (POD).

L'analyse de ces différentes stratégies sera basée sur la bande de réglage et le spectre harmonique des tensions et les courants de sortie.

III.3 Application de l'onduleur cinq niveaux pour une charge R-L

A l'aide des logiciels MATLAB / PSIM, On simule l'association de l'onduleur cinq niveaux commandé par la commande par paliers et la commande MLI à une charge R-L. Les paramètres de la charge sont indiqués dans l'annexe.

III.3.1 Commande par gradin ou par paliers

Le principe de cette stratégie consiste à enclencher et éteindre un niveau qu'une seule fois par demi-période, voir le tableau I.1 et la figure I.7.

Les résultats de simulation de la commande par paliers sont illustrés par les figures suivant :

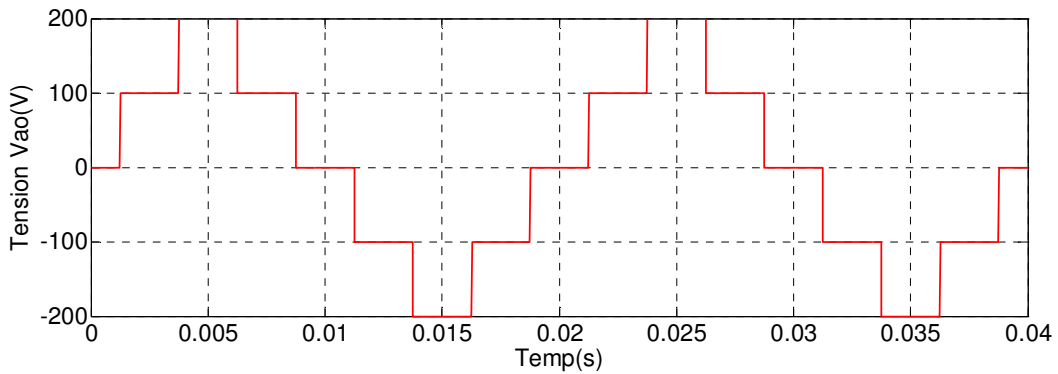


Fig III.1 Tension V_{aM} .

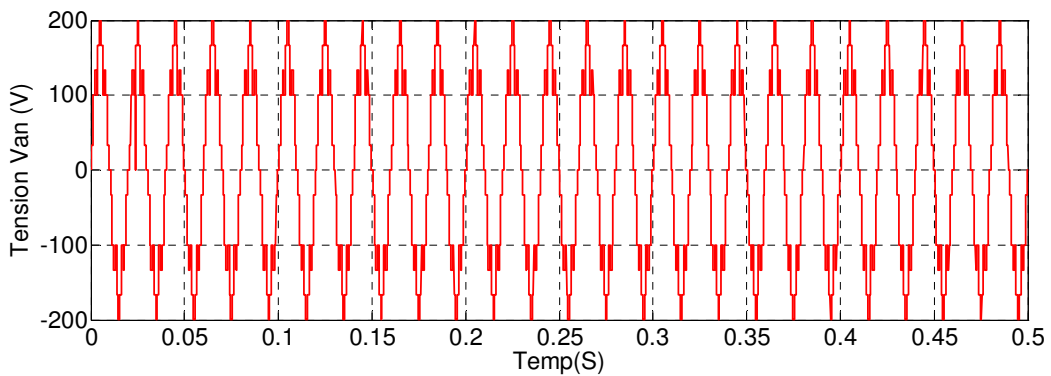


Fig III.2 Tension de phase V_{an} .

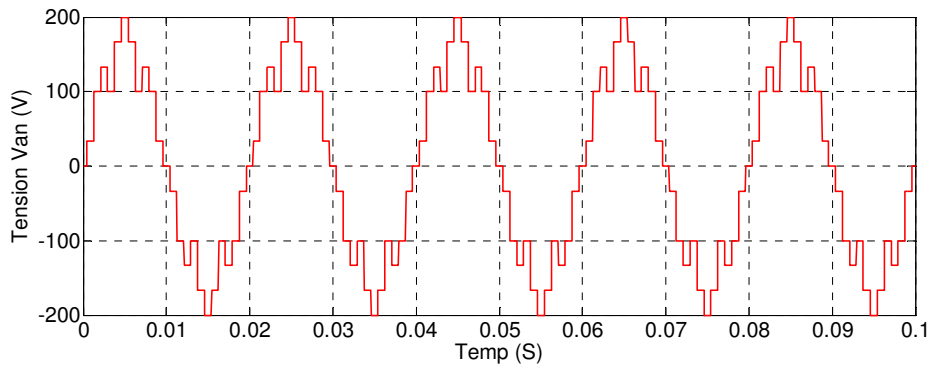


Fig III.3 Zoom de la tension de phase Van.

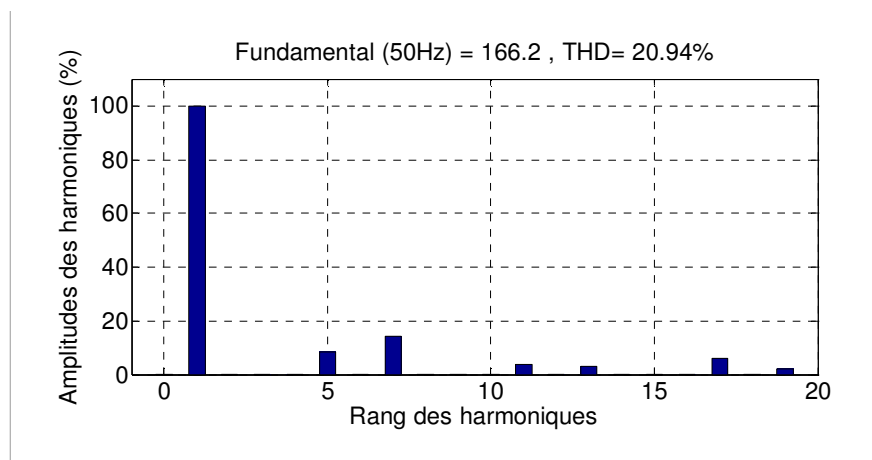


Fig III.4 Analyse harmonique de la Tension Van.

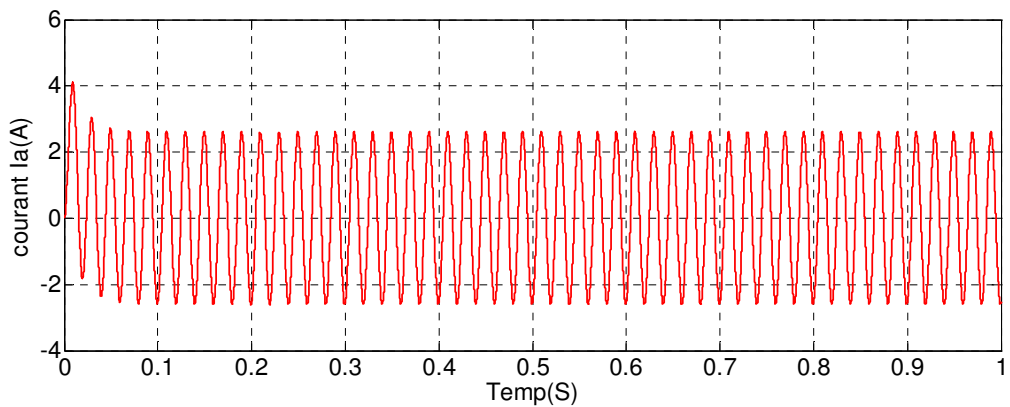


Fig III.5 L'allure de courant Ia.

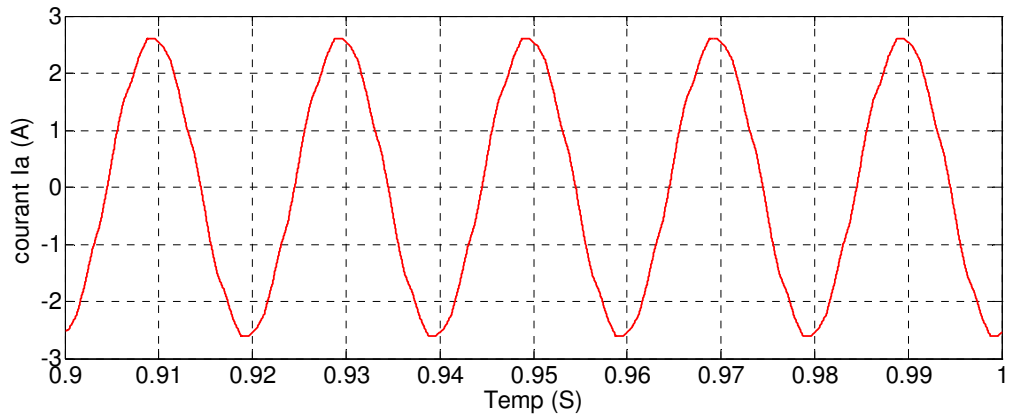


Fig III.6 Zoom du courant Ia.

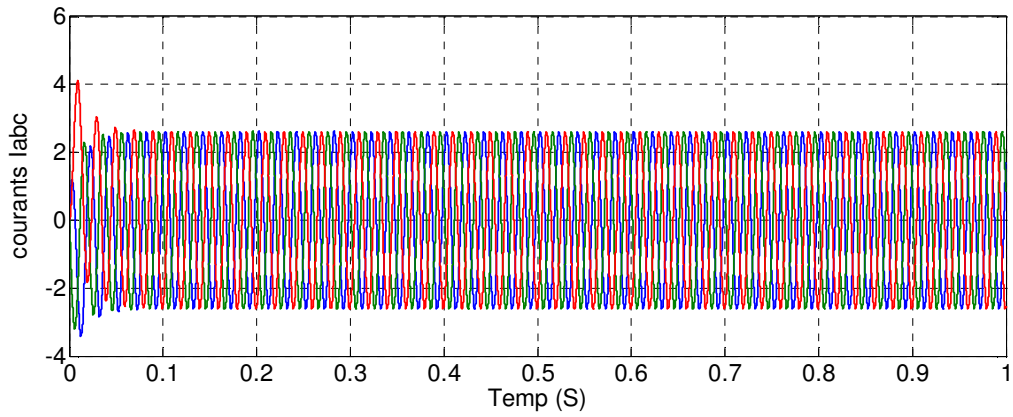


Fig III.7 L'allure des courants Iabc.

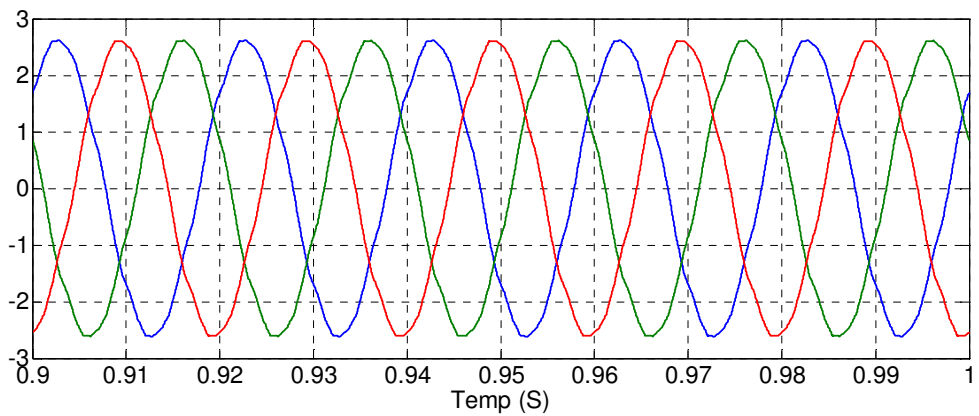


Fig III.8 Zoom des courants Iabc.

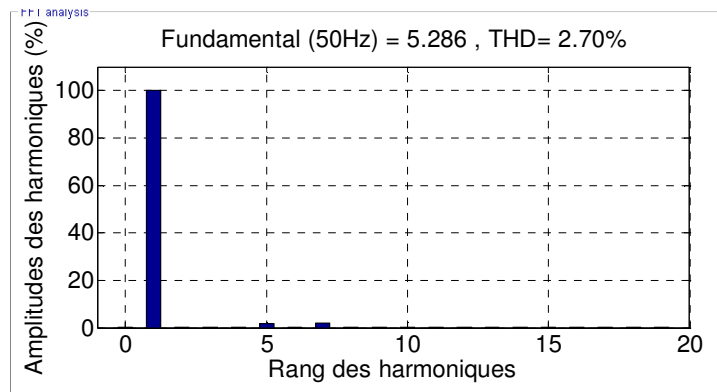


Fig III.9 Analyse harmonique du courant Ia.

Interprétation des résultats

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 nuls pour le courant.

La qualité des signaux est 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.

III.3.2 Modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Pour générer les impulsions de commande MLI d'un convertisseur à N-niveaux de tensions, N-1 porteuses triangulaires sont nécessaires. Ces porteuses ont la même fréquence f_p et la même amplitude U_{pm} . Les porteuses peuvent être horizontalement ou verticalement décalées. Si elles le sont horizontalement, le déphasage entre deux signaux consécutifs est donné par $\frac{2\pi}{N-1}$. Et si elles sont décalées verticalement, les signaux triangulaires peuvent être en phase ou non et occupent une bande continue avec le même décalage vertical. Ils sont ensuite comparés au signal de référence d'amplitude V_m et de fréquence f . Chaque comparaison donne 1 si une porteuse est supérieure ou égale à la référence, et 0 dans le cas contraire. A la sortie du modulateur, la somme des résultats issus des comparaisons est ensuite décodée, et donne la valeur correspondant à chaque niveau de tension [32].

Les caractéristiques de la modulation sont :

- L'indice de modulation " m " défini comme étant le rapport de la fréquence f_p de la porteuse à la fréquence f de la tension de référence $m = \frac{f_p}{f}$
- Le taux de modulation ou coefficient de réglage de tension " r " comme étant le rapport de l'amplitude référence V_m de et de la tension U_{pm} de la porteuse.

$$r = \frac{V_m}{U_{pm}}$$

- Les tensions de référence de l'onduleur triphasé à cinq niveaux qui permettent d'obtenir un système de tension triphasé équilibré sont données par l'équation (III.1) [28], [31]

$$\begin{cases} V_{ref1} = V_m \sin(\omega t) \\ V_{ref2} = V_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_{ref3} = V_m \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (III.1)$$

Les méthodes de modulation de largeur d'impulsion sont classées selon la disposition des porteuses triangulaires et les plus utilisées sont : [33].

III.3.2.1 Commande PWM à quatre porteuses unipolaires type1(PD)

Les porteuses triangulaires disposées en phase «Phase Disposition» (PD), Figure III.10 Cette méthode est applicable aussi bien à la structure NPC qu'à la topologie en cascade en pont H. Pour les valeurs de coefficient de réglage proches de un, la méthode PD présente le plus faible taux de distorsion harmonique (THD) comparée aux autres méthodes MLI [33].

Les différents signaux de la stratégie triangulo-sinusoidale à quatre porteuses unipolaire type 1 pour ($m=9, r=0.8$) sont montrés dans la Figure (III.10).

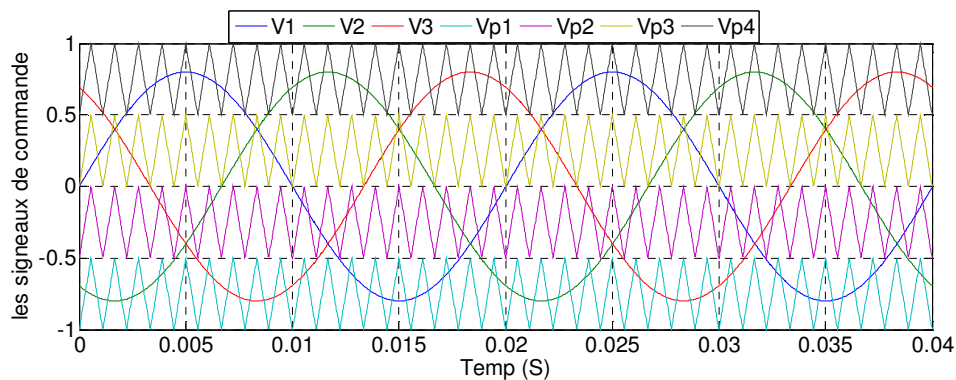


Fig III.10 Tensions de référence et porteuses.

Les figures suivantes représentent la tension de la sortie Van et le courant de sortie Ia et leurs spectre d'harmonique pour différentes valeurs de l'indice de modulation (m) et le taux de modulation (r) :

Pour une valeur fixe du taux de modulation ($r=0.8$) nous allons varier l'indice de modulation ($m=9$) et les résultats seront représentés par les figures suivantes:

- Pour $m=9$

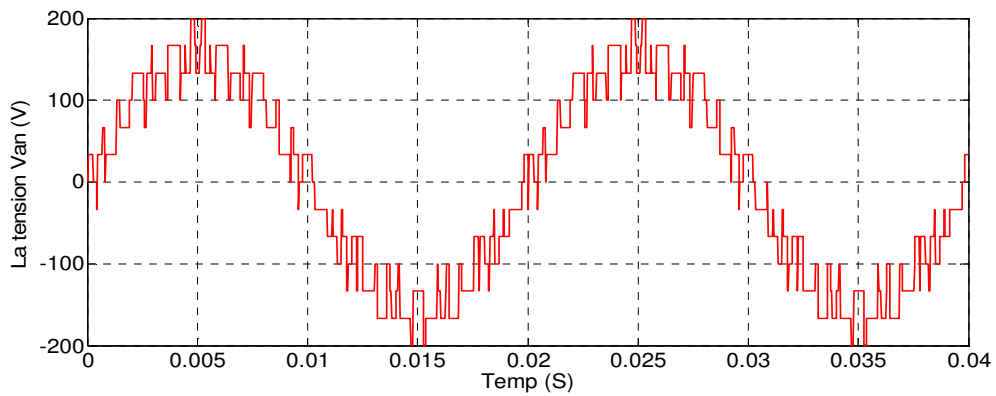


Fig III.11 La tension Van pour ($r=0.8$ et $m=9$).

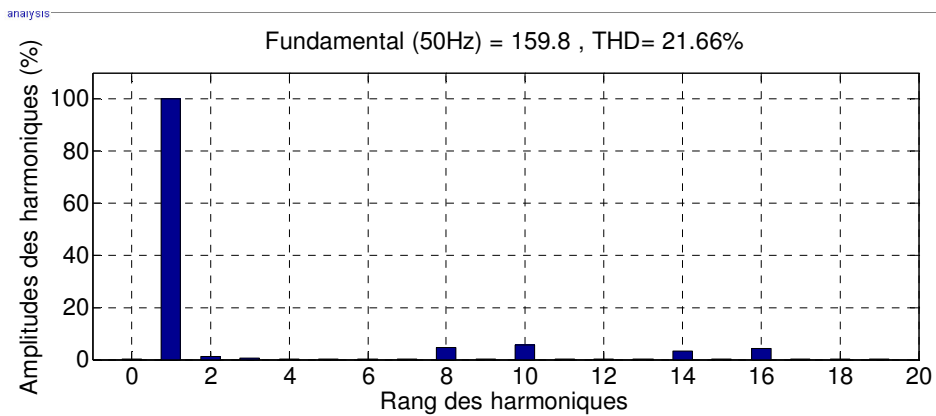


Fig III.12 Analyse harmonique de la tension Van pour ($r=0.8$ et $m=9$).

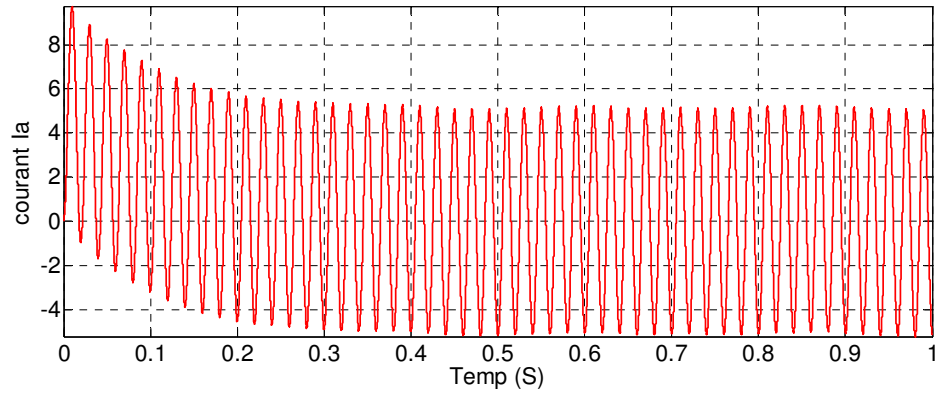


Fig III.13 L'allure de courant Ia pour (r=0.8 et m=9).

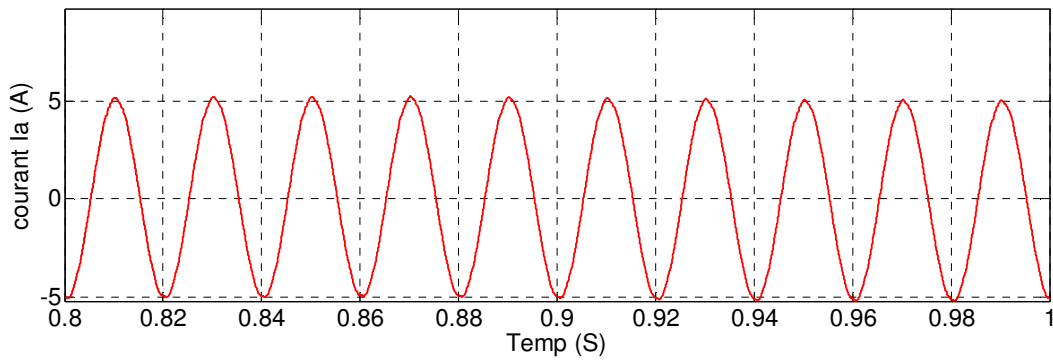


Fig III.14 Zoom du courant Ia pour (r=0.8 et m=9).

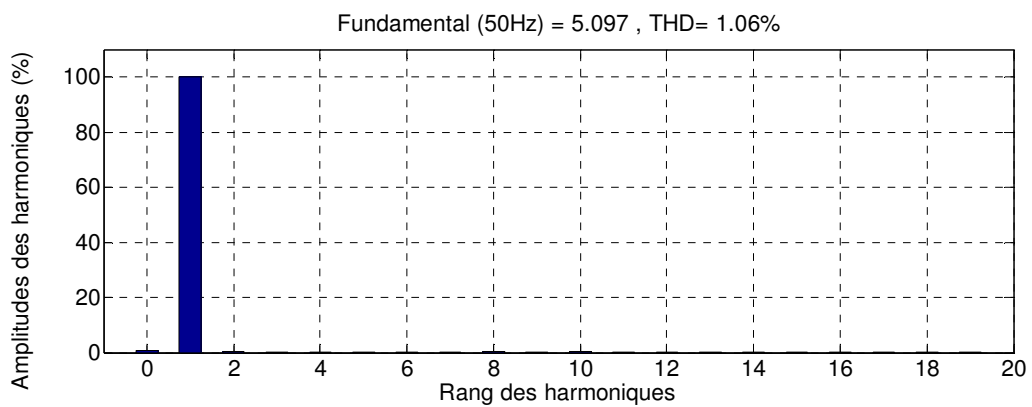


Fig III.15 Analyse harmonique du courant Ia pour(r=0.8 et m=9).

- Pour $m=15$

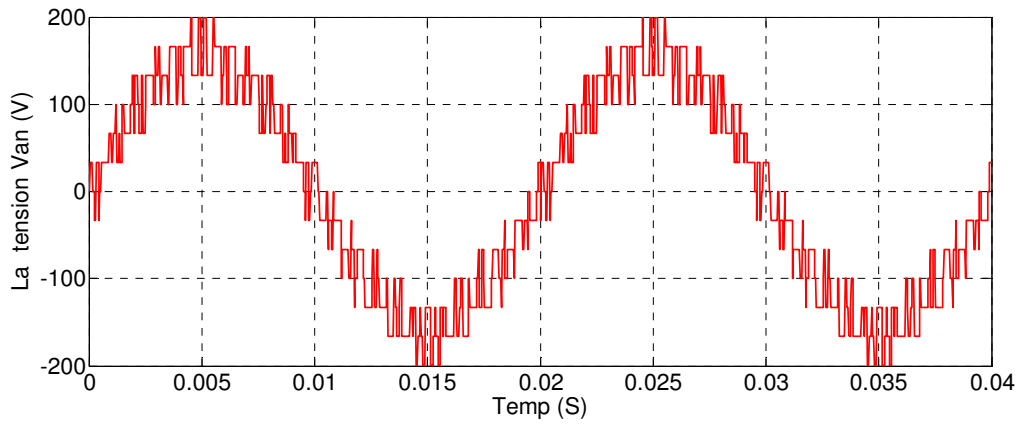


Fig III.16 La tension Van pour($r=0.8$ et $m=15$).

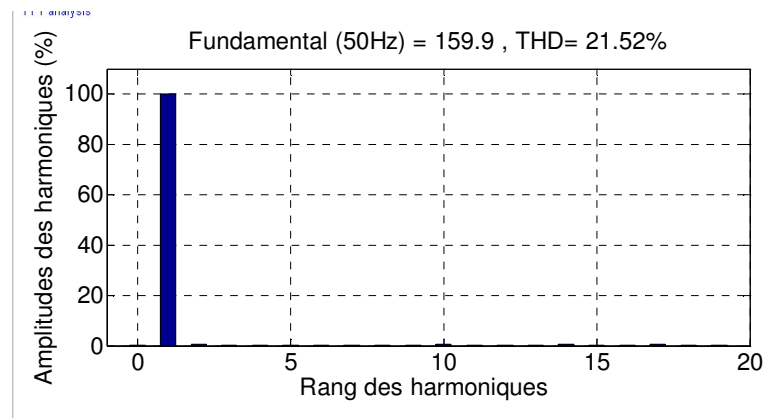


Fig III.17 Analyse harmonique de la tension Van pour($r=0.8$ et $m=15$).

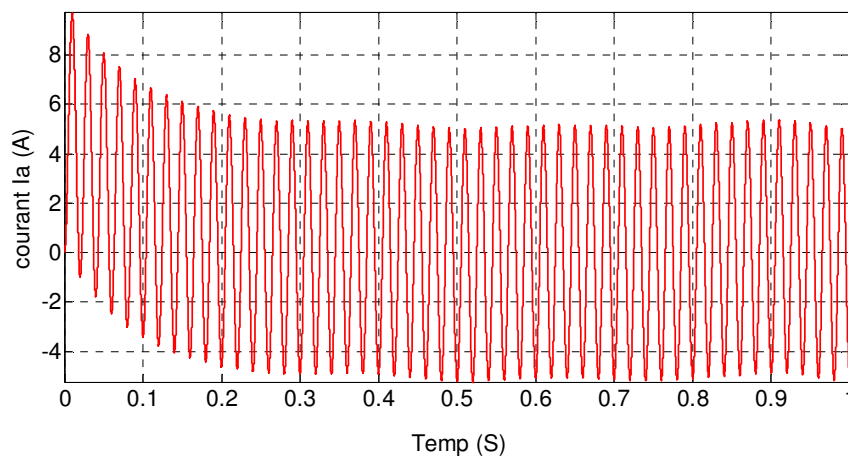


Fig III.18 L'allure de courant Ia pour ($r=0.8$ et $m=15$).

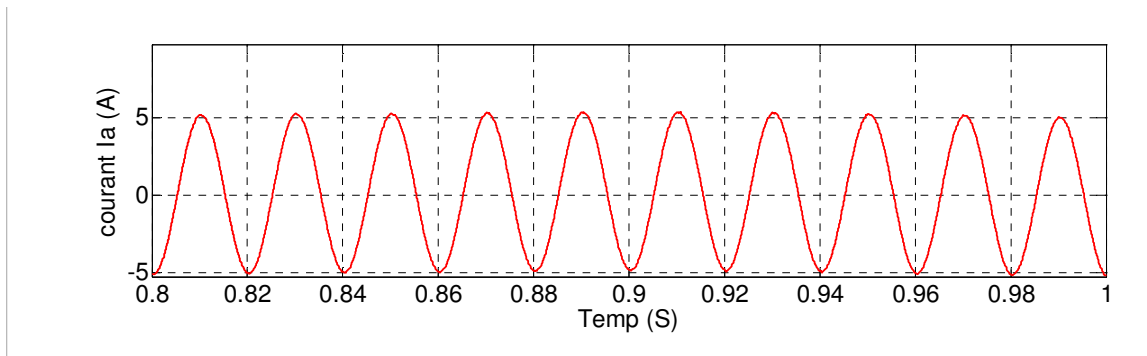


Fig III.19 Zoom du courant I_a pour ($r=0.8$ et $m=15$).

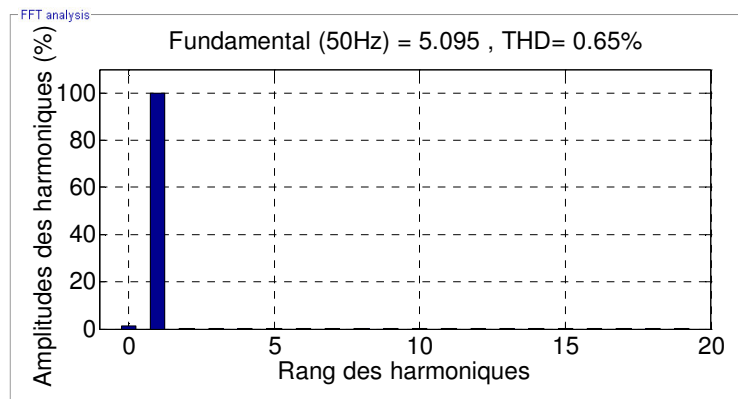


Fig III.20 Analyse harmonique du courant I_a pour($r=0.8$ et $m=15$).

Puis on varie la valeur du taux de modulation (r) et on fixe le l'indice de modulation ($m = 9$) et on obtient les graphes suivants :

- Pour $r = 0.3$

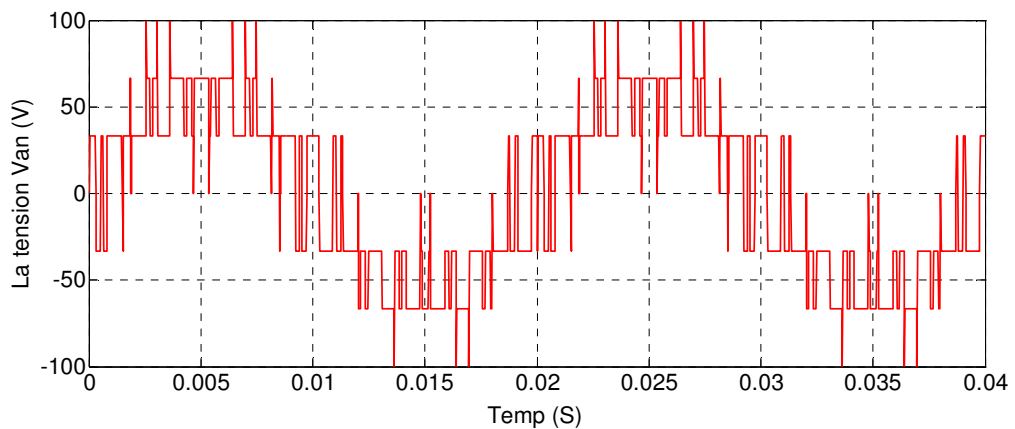


Fig III.21 La tension V_{an} pour($r=0.3$ et $m=9$).

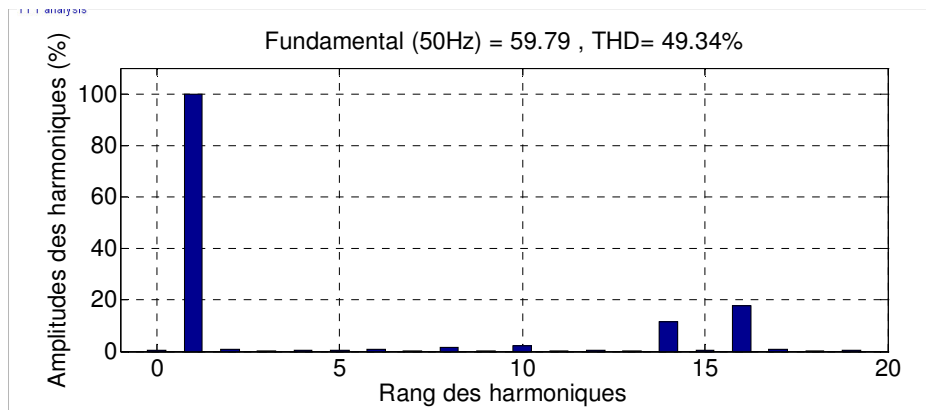


Fig III.22 Analyse harmonique de la tension Van pour(r=0.3 et m=9).

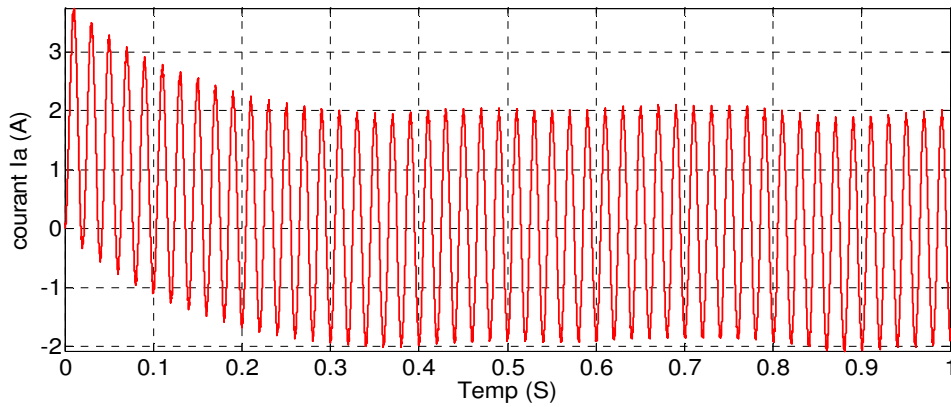


Fig III.23 L'allure de courant Ia pour (r=0.3 et m=9).

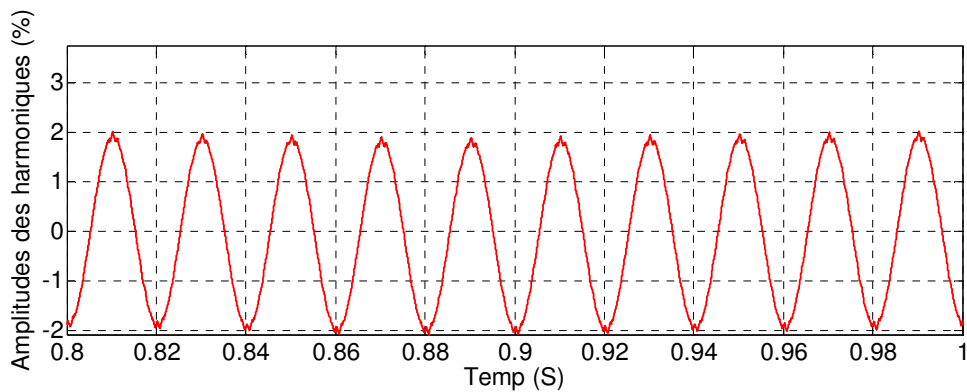


Fig III.24 Zoom du courant Ia pour (r=0.3 et m=9).

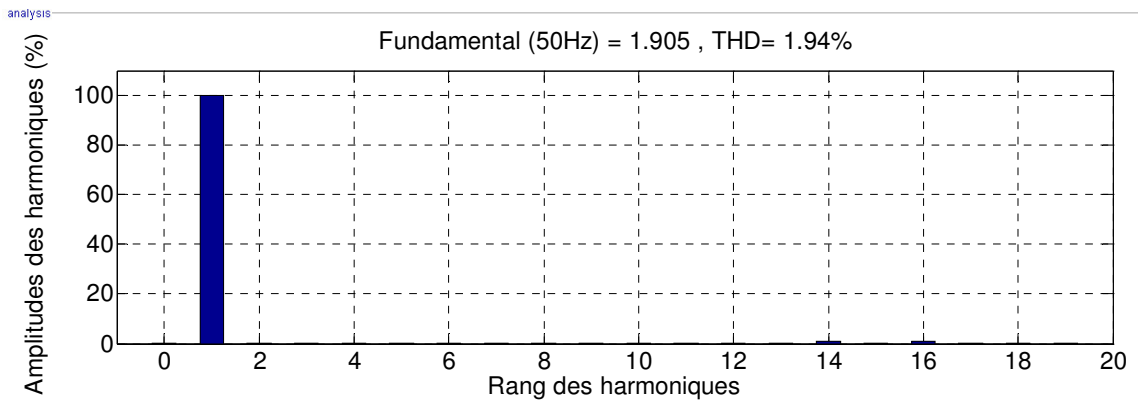


Fig III.25 Analyse harmonique du courant I_a pour($r=0.3$ et $m=9$).

- pour $r=0.5$

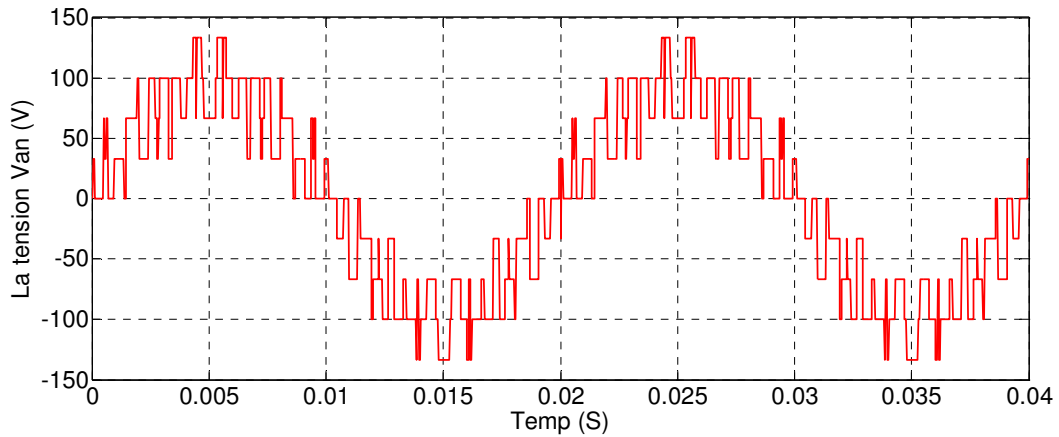


Fig III.26 La tension Van pour($r=0.5$ et $m=9$).

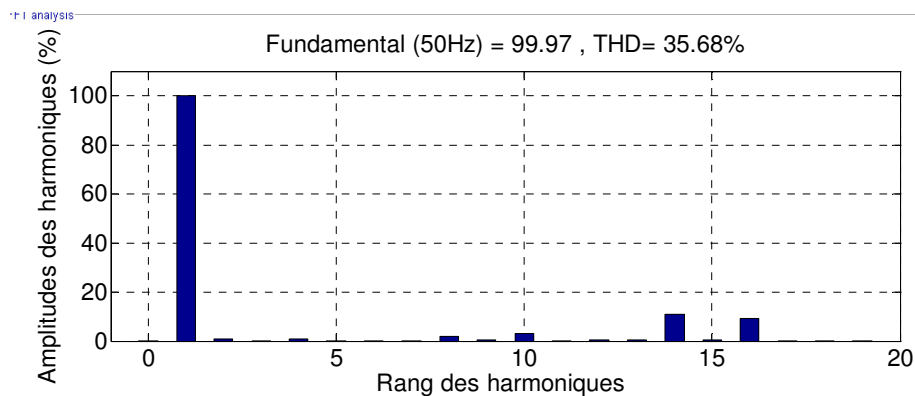


Fig III.27 Analyse harmonique de la tension Van pour($r=0.5$ et $m=9$).

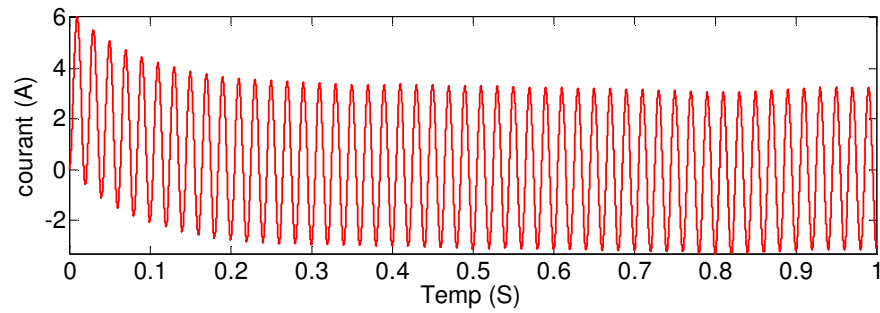


Fig III.28 L'allure de courant Ia pour (r=0.5 et m=9).

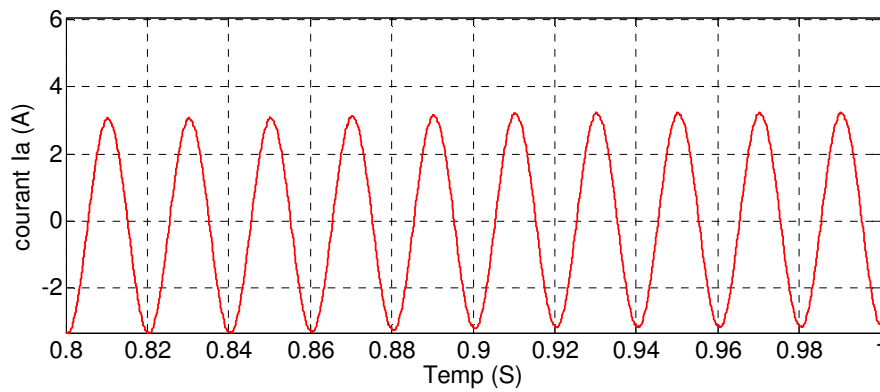


Fig III.29 Zoom du courant Ia pour (r=0.5 et m=9).

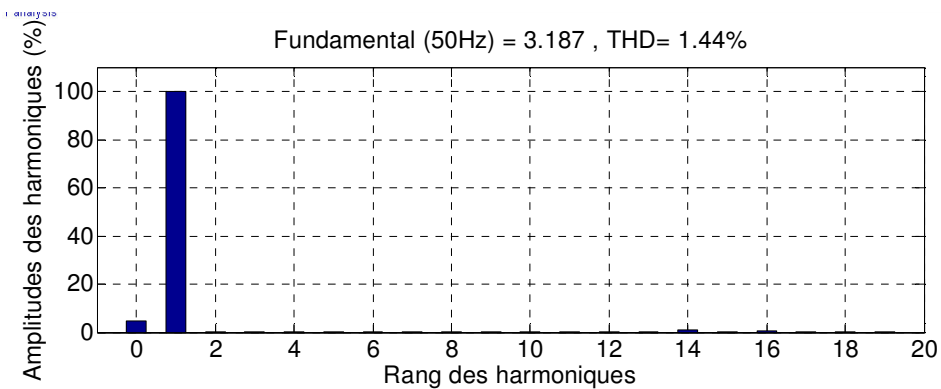


Fig III.30 Analyse harmonique du courant Ia pour (r=0.5 et m=9).

Interprétations des résultats

- ✓ Cette stratégie permet un réglage linéaire de l'amplitude du fondamental de $r=0.3$ à $r=1$, et décroissance de taux d'harmonique de distorsion.
- ✓ L'analyse spectrale d'harmonique de la tension simple de la phase A de l'onduleur triphasé à cinq niveaux montre seulement la présence des harmoniques paires.

- ✓ L'analyse spectrale d'harmonique du courant de l'onduleur triphasé à cinq niveaux nous donne des résultats des harmoniques presque nulles.
- ✓ L'augmentation de l'indice de modulation m permet de pousser les harmoniques vers les fréquences élevées et donc facilement filtrées

III.3.2.2 Commande PWM à quatre porteuses unipolaires type2 (POD)

Les porteuses triangulaires sont disposées en opposition de phase, alors la méthode est connue sous le nom «Phase Opposition Disposition» (POD), figure III.31. Cette méthode est plus performante que la méthode PD du point de vue harmonique pour les faibles valeurs de l'indice de modulation. Un autre avantage est que pour la fréquence porteuse et ses multiples il n'y a pas d'harmoniques et la dispersion des harmoniques se produit autour d'eux [33].

Les différents signaux de la stratégie triangulo-sinusoidale à quatre porteuses unipolaire type 2 pour ($m=9$, $r=0.8$) sont montrés dans la Figure (III.31).

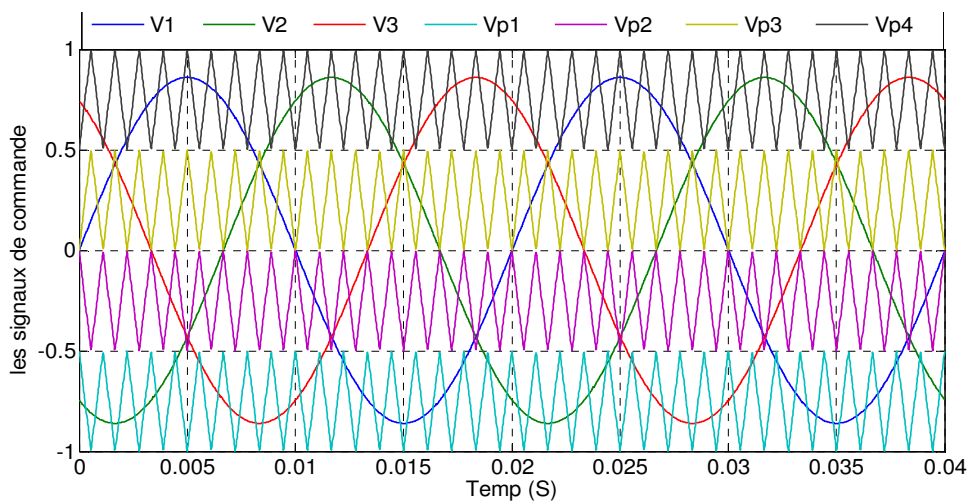


Fig III.31 Tensions de référence et porteuses.

Les figures suivant représentent la tension de la sortie V_{an} et le courant de sortie I_a et leurs analyse harmonique pour les différentes valeurs de m et r :

On varie m et on fixe ($r = 0.8$) :

- pour $m=9$

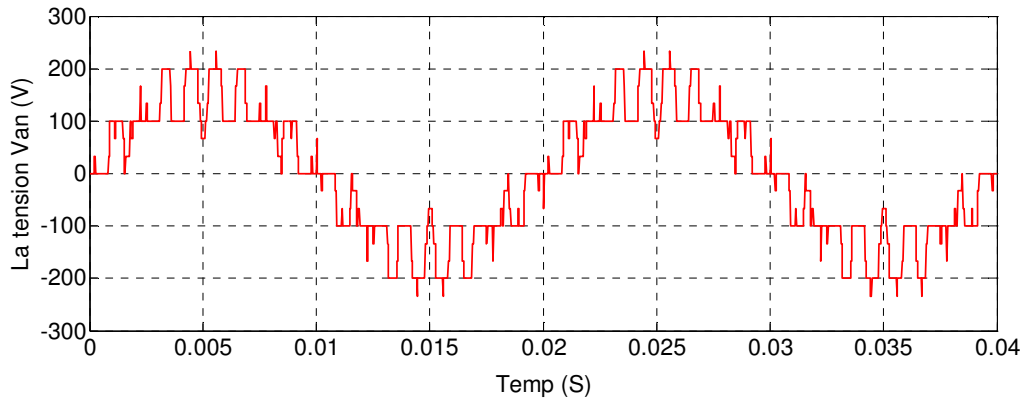


Fig III.32 La tension Van pour($r=0.8$ et $m=9$).

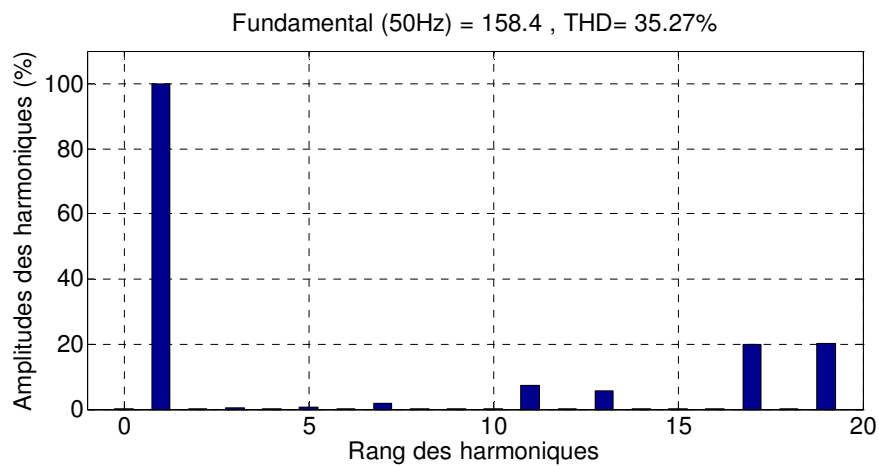


Fig III.33 Analyse harmonique de la tension Van pour($r=0.8$ et $m=9$).

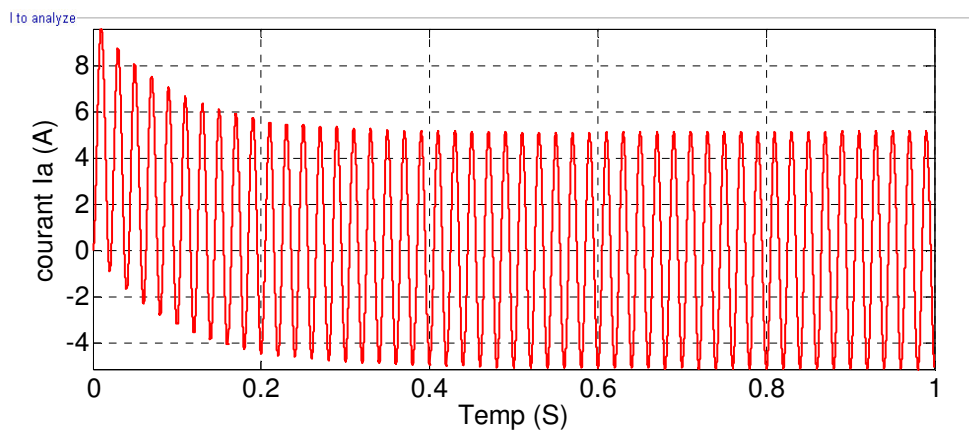


Fig III.34 L'allure du courant I_a pour ($r=0.8$ et $m=9$).

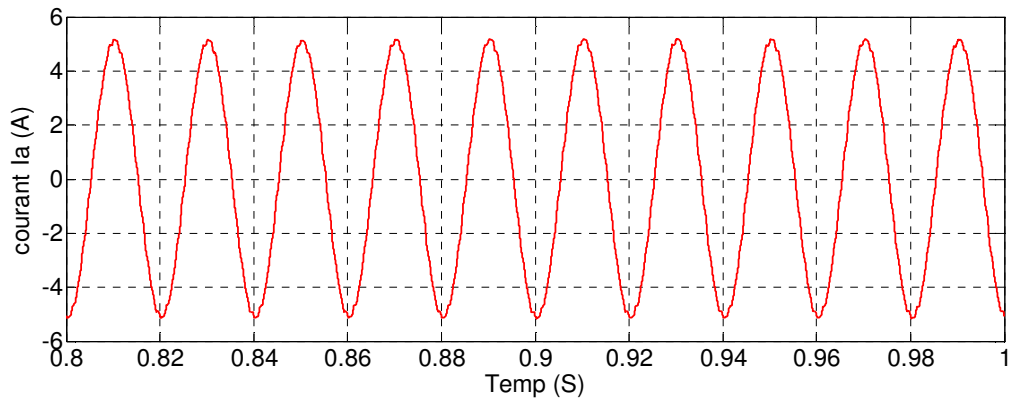


Fig III.35 Zoom du courant Ia pour (r=0.8 et m=9).

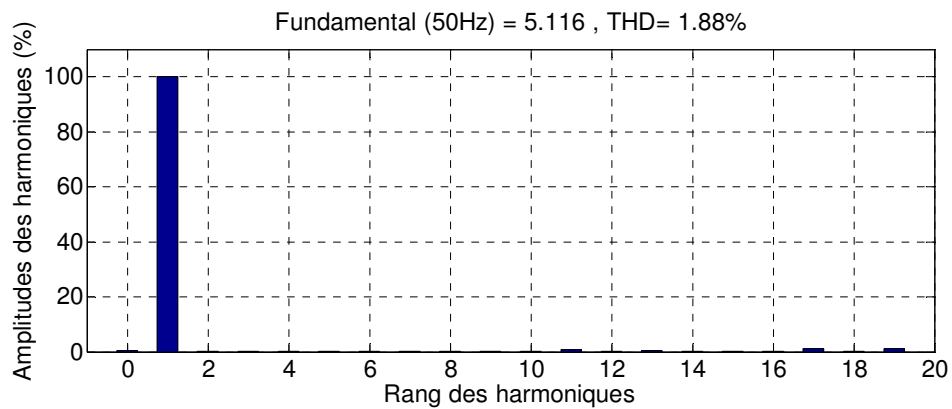


Fig III.36 Analyse harmonique du courant Ia pour (r=0.8 et m=9).

- pour **m=15**

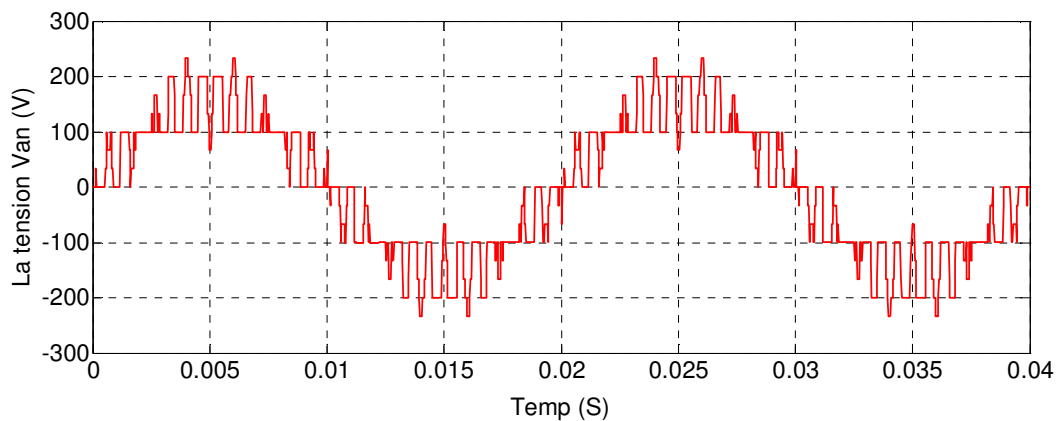


Fig III.37 La tension Van pour(r=0.8 et m=15).

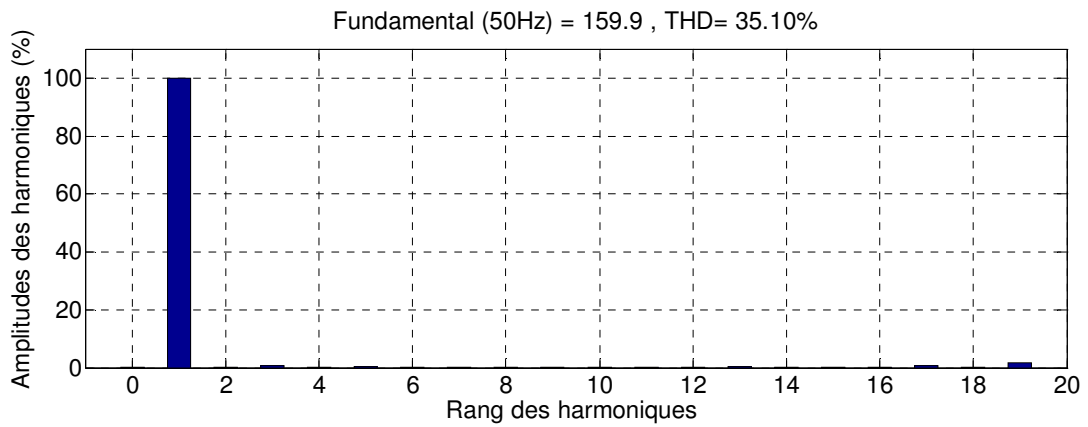


Fig III.38 Analyse harmonique de la tension V_{an} pour ($r=0.8$ et $m=15$).

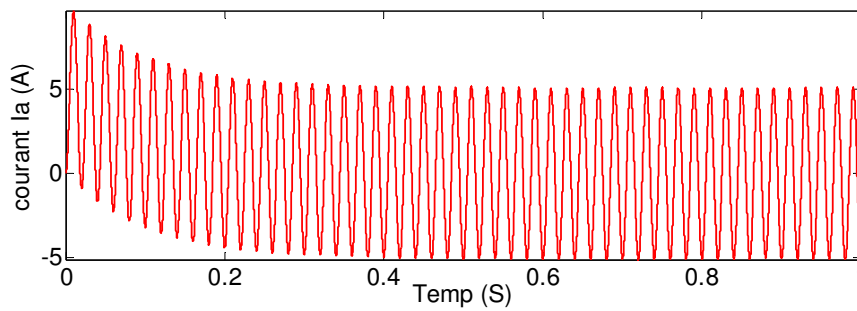


Fig III.39 L'allure du courant I_a pour ($r=0.8$ et $m=15$).

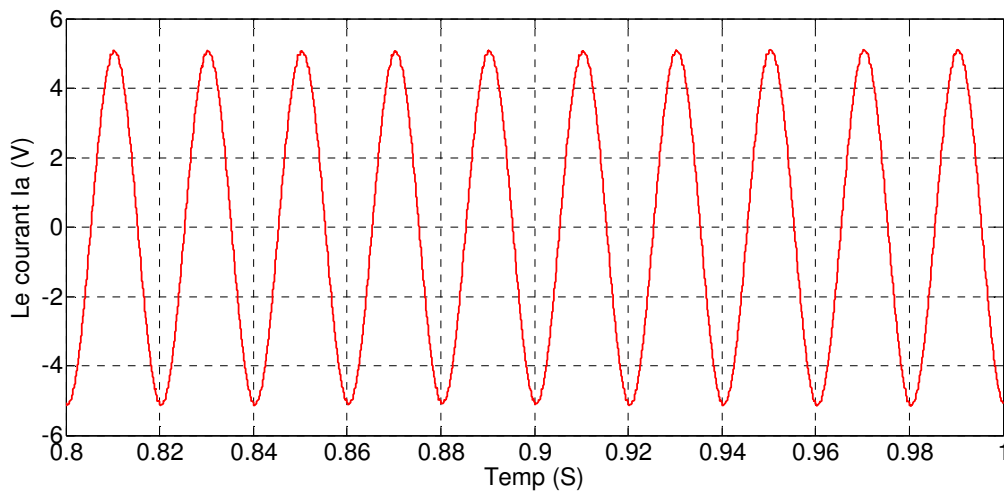


Fig III.40 Zoom du courant I_a pour ($r=0.8$ et $m=15$).

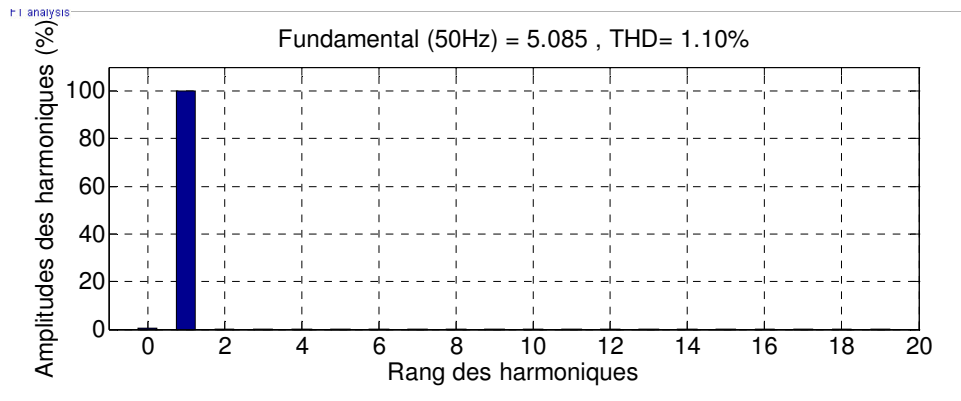


Fig III.41 Analyse harmonique du courant Ia pour (r=0.8 et m=15).

Et là, on varie le taux de modulation (r) et on fixe l'indice de modulation à (m =9) :

- pour **r=0.3**

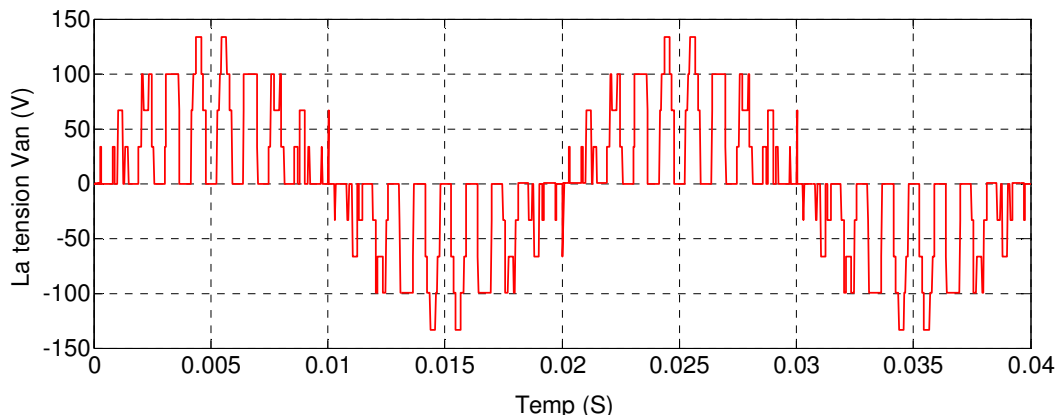


Fig III.42 La tension Van pour(r=0.3 et m=9).

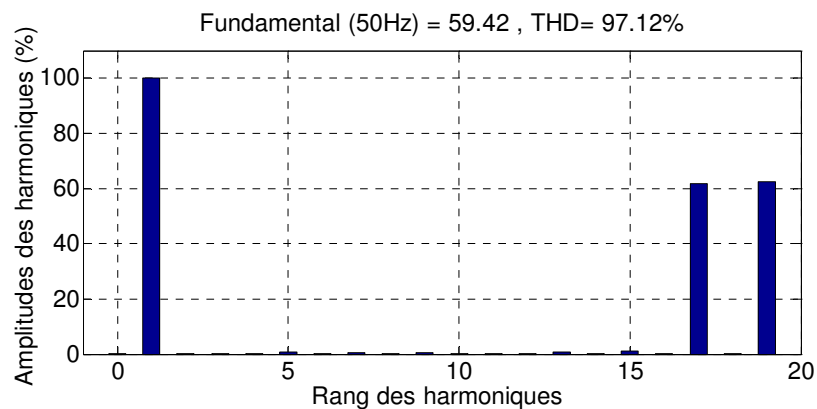


Fig III.43 Analyse harmonique de la tension Van pour (r=0.3 et m=9).

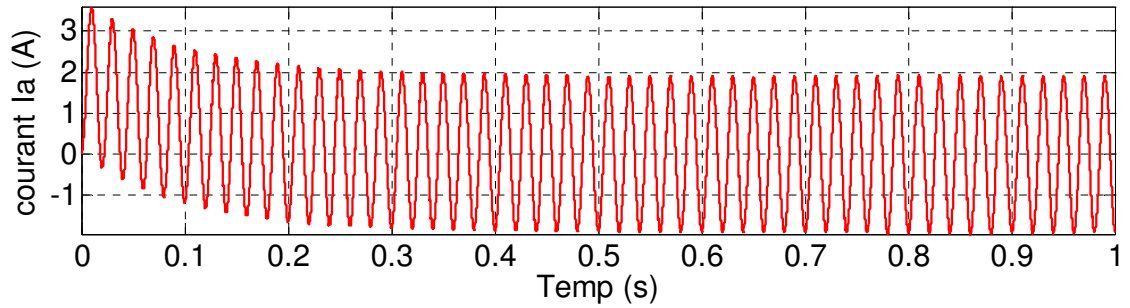


Fig III.44 L'allure du courant I_a pour ($r=0.3$ et $m=9$).

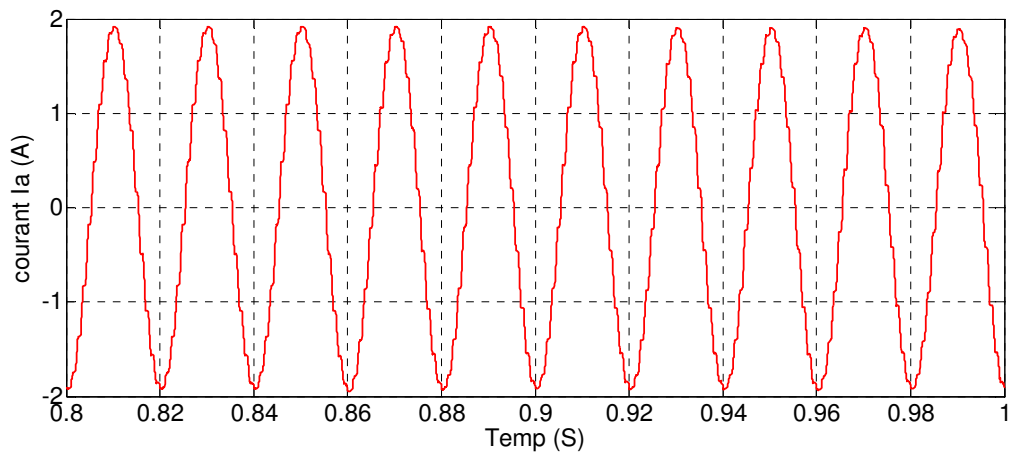


Fig III.45 Zoom du courant I_a pour ($r=0.3$ et $m=9$).

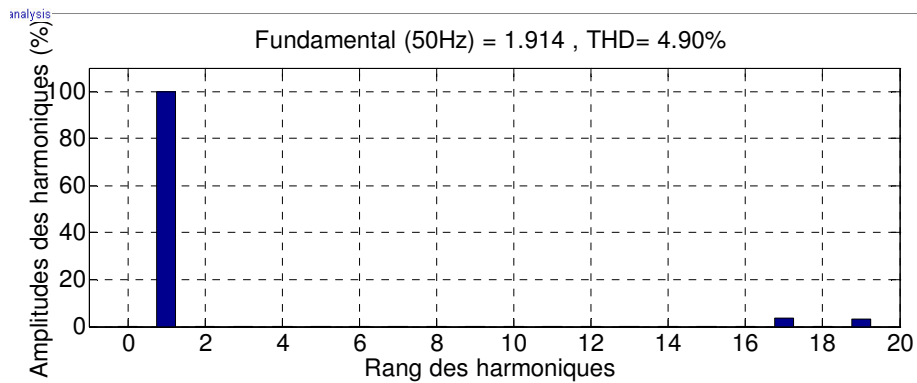


Fig III.46 Analyse harmonique du courant I_a pour ($r=0.3$ et $m=9$).

- pour $r=0.5$

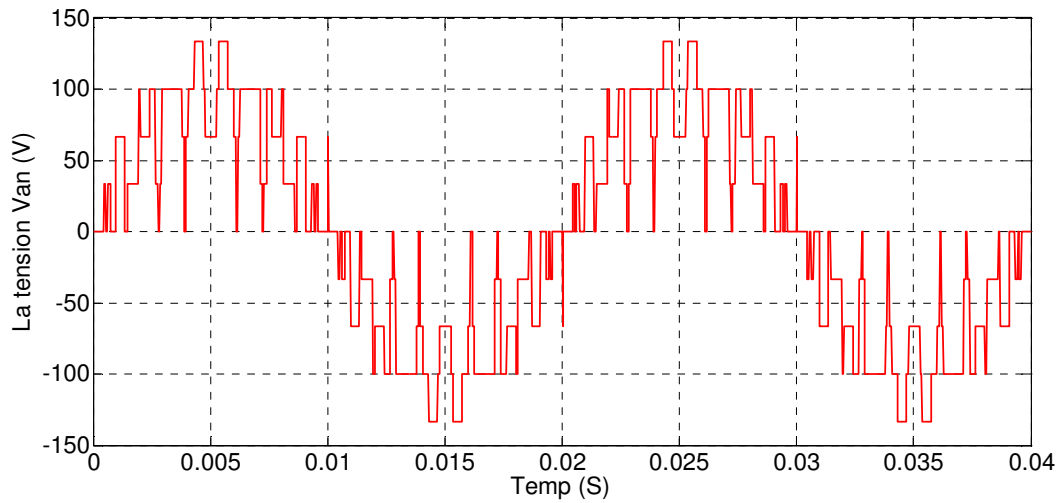


Fig III.47 La tension Van pour($r=0.5$ et $m=9$).

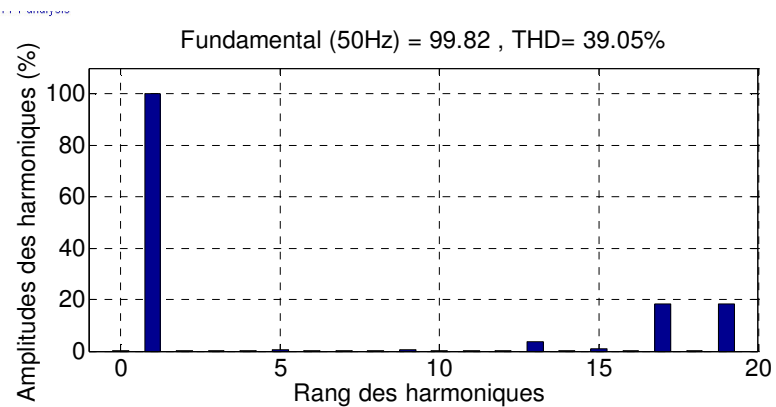


Fig III.48 Analyse harmonique de la tension Van pour ($r=0.5$ et $m=9$).

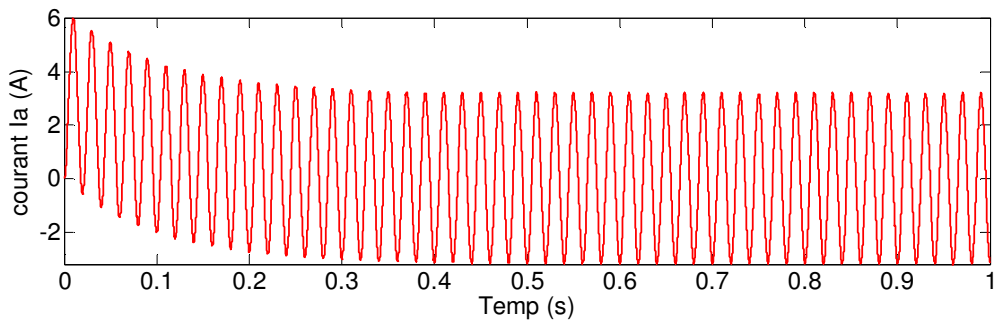


Fig III.49 L'allure de courant Ia pour ($r=0.5$ et $m=9$).

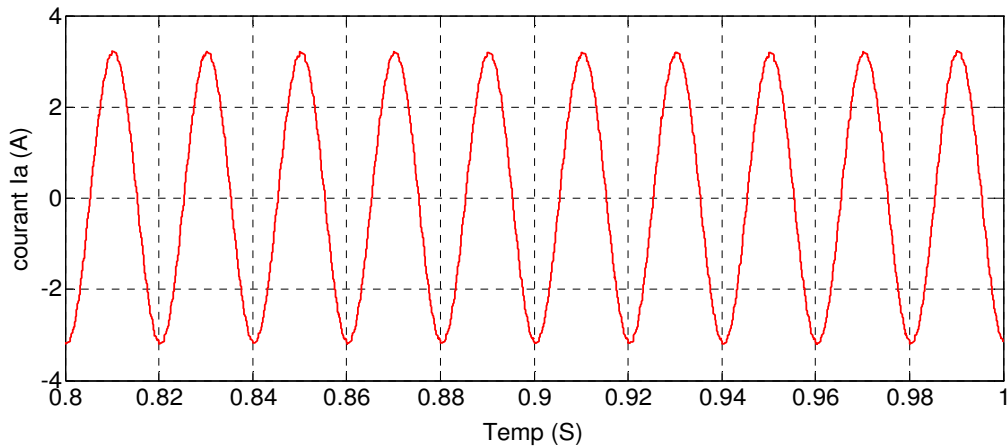


Fig III.50 Zoom du courant I_a pour ($r=0.5$ et $m=9$).

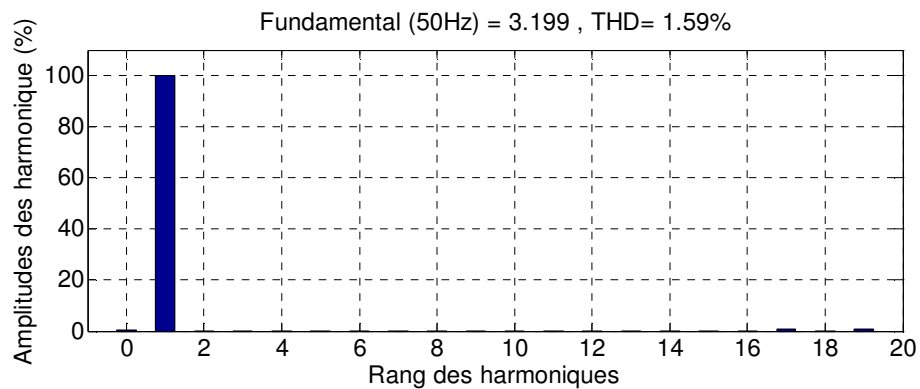


Fig III.51 Analyse harmoniques du courant I_a pour ($r=0.5$ et $m=9$).

Interprétation des résultats

- ✓ Cette stratégie permet un réglage linéaire de l'amplitude du fondamental de $r=0.3$ à $r=1$, et décroissance de taux d'harmonique de distorsion.
- ✓ L'analyse spectrale d'harmonique de la tension simple de la phase A de l'onduleur triphasé à cinq niveaux montre seulement la présence des harmoniques impaires.
- ✓ L'analyse spectrale d'harmonique du courant de l'onduleur triphasé à cinq niveaux nous donne des résultats des harmoniques presque nulles.
- ✓ L'augmentation de l'indice de modulation m permet de pousser les harmoniques vers les fréquences élevées et donc facilement filtrés.

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons obtenu, les résultats de simulation du modèle de simulation implémenté sous MATLAB/SIMULINK, ce qui nous a permis de porter un jugement sur les signaux électriques.

Le travail effectué dans ce chapitre, nous a montré que l'onduleur cinq niveaux est assez propre même sans application de MLI. Cependant, s'il s'avère que l'application nécessite un perfectionnement de la qualité d'énergie, il est plus adapté d'utiliser la technique de modulation en phase. Néanmoins, pour de faibles valeurs de l'indice de modulation (m) la méthode de modulation en opposition de phase est plus efficace que la modulation en phase.

NOMENCLATURE

V_{Nm} : Tension de sortie de l'onduleur par rapport au neutre de la source (V).

E : Tension continue à l'entrée du convertisseur (V).

V_{AM} : Tension entre le point a et le point M (V).

V_{an} : Tension entre le point a et le neutre (V).

N : Nombre de niveaux.

V_{KM} : Tension simple du bras k (V).

F_{km}^b : Fonction de connexion du demi-bras.

F_{KS} : Fonctions de connexion des interrupteurs.

V_{AM}, V_{BM}, V_{CM} : Tensions des trois bras de l'onduleur par rapport au point milieu de la source.

m : Indice de modulation.

r : Coefficient de réglage.

f_p : Fréquence de la porteuse (Hz).

f : Fréquence de la tension de référence (Hz).

$V_{ref1}, V_{ref2}, V_{ref3}$: Tensions de références.

THD : Taux de distorsion harmonique.

ABBREVIATIONS

NPC: Neutral Point Clamped.

ANPC: Active Neutral Point Clamped.

PWM: Pulse Withe modulation.

MMC: Modular Multilevel Converter.

IGBT: Insulated Gate Bipolaire Transistor.

MOSFET: Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor.

PSIM: Simulateur des circuits électroniques.
