

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA. BEJAIA



FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique
Spécialité « Electromécanique »

Thème

« Etude par simulation d'un onduleur cinq niveaux »

Présenté par

- MEHABA Syphax
- HADERBACHE Sabri

Devant le jury :

- Mr BOUDISSA. R
- Mr MADI. L

Encadré par :

- Mr ALOUI Loucif

PROMOTION : 2017/2018.

REMERCIEMENT

NOUS TENONS À EXPRIMER NOTRE GRATITUDE ET REMERCIEMENT À ALLAH QUI NOUS A DONNÉ LA FORCE ET LE POUVOIR POUR EFFECTUER CE MODESTE TRAVAIL.

NOUS TENONS TOUT D'ABORD À REMERCIER NOTRE ENCADREUR MONSIEUR **ALOUI LOUCIF**, POUR NOUS AVOIR PROPOSÉ CE SUJET, POUR SA CONTRIBUTION ESTIMABLE ET SON AIDE INDISPENSABLE QUI NOUS ONT ÉTÉ DONNÉ POUR ATTEINDRE LA RÉALISATION DE CE TRAVAIL AINSI QUE TOUTES CES REMARQUES CONSTRUCTIVES QUI NOUS ONT PERMIS D'APPROFONDIR NOS CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES.

NOUS REMERCIONS AMPLEMENT TOUS LES MEMBRES DE JURY QUI ONT ACCEPTÉ DE JUGER CE TRAVAIL ET D'Y APPORTER LEUR CAUTION.

NOS REMERCIEMENTS VONT EN PARTICULIERS À TOUS LES ENSEIGNANTS ET À TOUT CE QUI ONT CONTRIBUÉ DE LOIN OU DE PRÈS À LA RÉALISATION DE CE TRAVAIL (**MONSIEUR GHEDAMSI KACI ET BABOURI**).

ET À LA FIN DES CHALEUREUX REMERCIEMENTS POUR TOUS NOS COLLÈGUES QUI ONT PU NOUS APPORTER DE L'AIDE ET EN PARTICULIER (**MONSIEUR MAKKOUR ZIAD**).

DÉDICACE

*Avant tous, je remercie Allah le tout puissant de
M'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce
Modeste travail malgré tous les différentes difficultés
Rencontrées.*

*Je dédie également ce travail :
Pour mes très chers parents, que Allah les garde et
Les protège pour leur soutiens moral et financier, leur
Encouragement et leurs sacrifices qu'ils ont endurés.*

*Mon petit frère Wassim bien adoré qui a été toujours la
pour me Soutenir et me faire aller de l'avant.*

Tous les autres membres de ma famille.

*Et en fin je me tais sur mes amis qui m'ont vraiment appris
L'importance de l'amitié et sa vraie signification (David
Titeuf Jigou Alilou Marikan Zargo Bouzid Bousghir Ramos
Touhami abdellah topac Yassine Ravah Spertelo Anis
Yagnar Yanis Joe Hillal Sarah Saida Fariza Saliha, et si j'ai
oublié quequ'un qu'il me pardone ... la liste est longue.*

DÉDICACE

Avant tous, je remercie Allah le tout puissant de M'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce Modeste travail malgré tout les différentes difficultés Rencontrées.

Je dédie également ce travail :

Pour mes très chers parents, que Allah les garde et Les protège pour leur soutiens moral et financier, leur Encouragement et leurs sacrifices qu'ils ont endurés.

A tout membre de ma grande famille ;

Mes frères :Razik Fahim Lotfi Tahar et Faouzi(paix a son âme)

Ma sœur ;

Mes très chers neveux ;

Mes très chères nièces ;

Ma fiancée cylvia

Sans oublier mes chères amies :zargo marikan bousghir ramos bouzid touhami topac spertelo ami yahia naim nassim dazdaz ravah mayas saddek lamine yassine hemida ragnar yacine

Sans oublier mon binôme Wisskass

A tous les amis (es) d'études surtout ceux d'électrotechnique promotion 2015 ;

Table des matières

Table des matières

Introduction Générale.....	1
CHAPITRE I : Généralités sur les onduleurs	
Introduction.....	3
I.1 Définition de l'onduleur.....	3
I.2 Classification des onduleurs.....	3
I.2.1 Onduleurs autonomes.....	3
I.2.2 Onduleurs assistés.....	3
I.3 Onduleur monophasé.....	4
I.3.1 Les différents types d'onduleur monophasés.....	5
I.3.1.1 Onduleur demi-pont (onduleur avec diviseur capacitif).....	5
I.3.1.2 L'onduleur avec transformateur à point milieu (push-pull).....	5
I.3.1.3 Onduleur à pont complet.....	6
I.4 Onduleur triphasé.....	8
I.4.1 Principe de fonctionnement d'un onduleur triphasé.....	8
I.4.2 Modélisation de l'onduleur triphasé.....	10
I.5 Choix des semi-conducteurs.....	12
I.6 Analyse harmonique de la tension de sortie de l'onduleur.....	13
I.6.1 Origine des harmoniques.....	13
I.6.2 Déformation d'un signal sinusoïdal.....	13
I.6.3 Mode de représentation.....	13
I.6.4 Les harmoniques mesurés en pratique.....	13
I.7.1 Facteur de la n ^{ème} harmonique.....	13
I.7.2 Distorsion d'harmonique total.....	14
Conclusion.....	15
CHAPITRE II : Etude et Modélisation d'un onduleur cinq niveaux à structure NPC	
Introduction.....	16

Table des matières

II.1 Concept multi-niveaux.....	16
II.2 Intérêt des onduleurs multi-niveaux.....	17
II.3 Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux.....	18
II.3.1 Onduleur de tension clampé par le neutre (NPC).....	18
II.3.2 Onduleur de tension à cellules imbriquées.....	20
II.3.3 Onduleur de tension en cascade.....	21
II.4 Propriétés des principales structures.....	22
II.4.1 Classification des topologies selon leur alimentation.....	22
II.4.2 Nombres de composants nécessaires.....	22
II.5 Avantages des Onduleurs Multi-niveaux.....	24
II.5.1 Les Avantages technologiques.....	24
II.5.2 Les Avantages fonctionnelles pour le convertisseur.....	25
II.5.3 Les Avantages fonctionnelles pour les machines tournantes.....	25
II.6 Domaines d'applications des onduleurs multi-niveaux.....	25
II.7 Les onduleurs multi niveaux de type NPC.....	25
II.7.1 Onduleur à trois niveaux de type NPC.....	25
II.7.1.1 Structure.....	25
II.7.2 Onduleur à cinq niveaux de types NPC.....	28
II.7.2.1 Structure.....	28
II.7.2.2 Principe de fonctionnement.....	28
II.7.2.3 Modélisation de l'onduleur triphasé à cinq niveaux à structure NPC.....	34
II.7.2.4 Expressions des tensions V_{an}, V_{bn}, V_{cn} en fonction des V_{ao}, V_{bo}, V_{co}.....	35
II.8 Etat de l'art des stratégies de commande des onduleurs Multi-niveaux.....	36
II.8.1 Commande par paliers.....	36
II.8.2 Modulation Sinusoïdale (MS).....	36
II.8.2.1 MS classique mono-porteuse.....	36
II.8.2.2 Modulation sinusoïdale multi-porteuse.....	37

Table des matières

II.8.2.3 Modulation sinusoïdale multi-porteuse classique.....	37
II.8.2.4 Modulation sinusoïdale modifiée de premier type (MSM1).....	38
II.8.2.5 Modulation sinusoïdale modifiée de deuxième type (MSM2).....	39
Conclusion.....	42
CHAPITRE III : Simulation et interprétation des résultats	
Introduction.....	44
III.I Paramètres de simulation.....	44
III.2 Remarque concernant le modèle des semi-conducteurs.....	44
III.3 Différentes variantes de Simulation.....	44
III.4 Résultats concernant le THD du courant pour différents cas.....	45
III.4.1 Cas où la durée « a » égale à 0 (durées des étapes égales).....	46
III.4.2 Cas où la durée « a » égale à 22.5% (cas le plus favorable).....	52
III.4.3 Cas où la durée « a » égale à 30%.....	58
Conclusion.....	65
Conclusion Générale.....	66
Bibliographie.....	67

Table des notations et symboles

Table des notations et symboles

NPC : Neutral Point Clamped

THD : taux de distorsion

DSP : Digital Signal Processor

DRL : diode de roue libre

IGBT : Insulated Gate Bipolaire Transistor (transistor bipolaire à grille isolée).

MLI : modulation de largeur d'impulsions

GTO : GateTurn Off

Si : silicium

Ge : germanium

AsGa : arséniure de gallium

JFET : Junction Field Effect Transistor

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

DF : facteur de distorsion

MS : Modulation Sinusoïdale

PWM : Pulse Width Modulation

MSM1 : Modulation sinusoïdale modifiée de premier

MSM2 : Modulation sinusoïdale modifiée de deuxième type

SHO : Sub-Harmonic Optimal

Table des notations et symboles

MLIS : MLI sinusoïdale

SPWM : Sinus Pulse Width Modulation.

THMLI: Injection de troisième harmonique à MLI

THPWM : Injection de troisième harmonique à MLI (en anglais).

SHOPWM : Sub-Harmonic Optimal PWM

MLIV : MLI vectoriel

SVM : Space Vector Modulation.

HVDC : transport d'énergie en haute tension à courant continue.

K1 et K2 : interrupteurs

C1 et C2 : condensateurs

T1 et T2 : transistor

Ic1 et Ic2 : Le courant de charge qui traverse C1 et C2

K : interrupteur de commutation bidirectionnel

G : Gâchette

V_{an}, V_{bn}, V_{cn} : tensions simples

V_{pv} : Tension continu

S1, S2 et S3 : les états des interrupteurs des phases a, b et c respectivement

Y(t) : tension déformé

T : la période

P1, P2, P3 : les trois positions de l'interrupteur

s : le nombre des sources de tensions continues

n : le nombre de niveaux de tension obtenus,

K : le nombre de commutateurs principaux,

D_c : le nombre des diodes clampées,

Table des notations et symboles

C : le nombre de condensateurs d'équilibrage

O : point neutre

V_{ao} : La tension simple entre la borne (a) de la charge et le point neutre o

K_{a1}, K_{a2}, K_{a3} et K_{a4} : Les différents états des interrupteurs.

$K_{a1}, K_{a2}, K_{a3}, K_{a4}, K_{a5}$ et K_{a6} : Les différents états des interrupteurs

$V_{ref1}, V_{ref2}, V_{ref3}$: les trois signaux sinusoïdaux de référence

n_p : le nombre de triangulaires

A_r : Amplitude de référence

A_p : L'amplitude de la porteuse

f_r : La fréquence de référence

f_p : La fréquence de la porteuse

m_a : La modulation d'amplitude pour les onduleurs multi-niveaux

m_f : Le rapport de fréquence

$m_a \min$: La minimum valeur de modulation d'amplitude

R_s, R_r : Résistances statorique, rotorique

L_s, L_r : Inductances statorique, rotorique

M : La mutuelle

f : La fréquence de la tension délivrée par l'onduleur

E : Tension continue d'alimentation de l'onduleur

h : pas de simulation

I_a, I_b et I_c : Les courants de phase a,b,c

Liste des figures

Chapitre I : Généralité sur les onduleurs

Figure I.1 : Symbole d'onduleur.....	3
Figure I.2 : Onduleur demi-pont.	4
Figure I.3 : L'allure de tension et du courant de charge.	5
Figure I.4 : Onduleur avec transformateur à point milieu.	6
Figure I.5 : Onduleur à pont complet.	7
Figure I.6 : L'interrupteur K.	7
Figure I.7 : Structure d'un onduleur triphasé en pont.	9
Figure I.8 : Interrupteur de puissance avec IGBT et diode.	9
Figure I.9 : Exemple de période de commutation avec temps mort.	10
Figure I.10 : Circuit de fonctionnement de l'onduleur triphasé	11
Figure I.11 : Classification des composants de puissance en fonction de la fréquence de Découpage des composants.	12

Chapitre II : Etude et modélisation d'un onduleur cinq niveaux à NPC

Figure II.1 : Schéma d'un bras d'onduleur : a) 2 niveaux, b) 3 niveaux, c) N niveaux.....	17
Figure II.2 : Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux.	18
Figure II.3 : Onduleur NPC à trois niveaux (la phase a).....	18
Figure II.4 : Onduleur de tension clampé par le neutre à n-niveaux.	19
Figure II.5 : Topologie multi-niveau à cellules imbriquées (phase a)	20
Figure II.6 : Onduleur en cascade à 5 niveaux (phase a).....	21
Figure II.7 : Onduleur en cascade à 7 niveaux (phase a).	22
Figure II.8 : Structure d'un onduleur triphasé à trois niveaux de type NPC.	26
Figure II.9 : Forme d'onde de la tension de sortie d'un bras d'onduleur à trois Niveaux de type NPC.....	27
Figure II.10 : Bras d'un onduleur NPC à cinq niveaux.....	28
Figure II.11 : 1ère configuration du 1er bras d'onduleur à cinq niveaux NPC.....	29

Liste des figures

Figure II.12 : 2eme configuration du 1 ^{er} bras d'onduleur a cinq niveaux NPC.....	30
Figure II.13 : 3ème configuration du 1er bras d'onduleur à cinq niveaux NPC.....	31
Figure II.14 : 4ème configuration du 1er bras d'onduleur à cinq niveaux NPC.....	32
Figure II.15 : 5ème configuration du 1er bras d'un onduleur à cinq niveaux NPC.....	33
Figure II.16 : Forme d'onde de la tension de sortie d'un bras d'onduleur à cinq niveaux NPC.	34
Figure II.17 : Forme d'onde d'un multi-niveau (7 niveaux) générée par une commande par paliers et tensions aux bornes de trois cellules en série sur une phase.....	36
Figure II.18 : MLI Classique intersective.....	37
Figure II.19 : Principe de la MLI à doubles triangles.....	38
Figure II.20 : Modulation sinusoïdale modifié et les tension Vao, Vbo et Vco.....	39
Figure II.21 : Circuit analogique qui ajoute la séquence de zéro pour SFO-PWN.....	40
Figure II.22 : Forme d'ondes des multi porteuses est basé sur SFO-PWM.....	41
Figure II.23 : Trois techniques importantes pour la stratégie de commande.....	42

CHAPIRE III : Simulation et interprétation des résultats

Figure III.1 : Variation du THD du courant de la phase a en fonction de a.....	46
Figure III.2 : Tension simple Vao, Vbo, Vco sur les deux dernières périodes de simulation....	47
Figure III.3 : L'allure des courants de phase Ia ,Ib et Ic	48
Figure III.4 : L'allure des courants de phase Ia Ib et Ic et leurs zoom sur les deux dernières periodes de simulation	48
Figure III.5 : Tension de phase Van, Vbn, Vcn sur les deux dernières périodes de simulation..	49
Figure III.6 : Courant de phase Ian sur les deux dernières périodes de simulation.....	50
Figure III.7 : spectre d'harmoniques du Courant Ian (en barre)	50
Figure III.8 : Le spectre d'harmoniques du Courant Ian	51
Figure III.9 : Le zoom du spectre d'harmoniques du Courant Ian	51
Figure III.10 : Le spectre d'harmoniques de la tension Van	52
Figure III.11 : La vitesse du moteur (rd/s)	52

Liste des figures

Figure III.12 : Tension de phase V_{ao} , V_{bo} , V_{co} sur les deux dernières périodes de simulation.....	53
Figure III.13 : L'allure des courants de phase I_a , I_b et I_c	54
Figure III.14 : L'allure des courants de phase I_a , I_b et I_c et leurs zoom sur les deux dernières périodes de simulation.....	54
Figure III.15 : Tension de phase V_{an} , V_{bn} , V_{cn} sur les deux dernières périodes de simulation.....	55
Figure III.16 : Courant de phase I_{an} sur les deux dernières périodes de simulation	56
Figure III.17 : Spectre d'harmoniques du Courant I_{an} (en barre)	56
Figure III.18 : Le spectre d'harmoniques du Courant I_{an}	57
Figure III.19 : Le zoom du spectre d'harmoniques du Courant I_{an}	57
Figure III.20 : Le spectre d'harmoniques de la tension V_{an}	58
Figure III.21 : La vitesse du moteur (rd/s)	58
Figure III.22 : Tension de phase V_{ao} , V_{bo} , V_{co} sur les deux dernières périodes de simulation.....	59
Figure III.23 : L'allure des courants de phase I_a , I_b et I_c	60
Figure III.24 : L'allure des courants de phase I_a , I_b et I_c et leurs zoom sur les deux dernières périodes de simulation	60
Figure III.25 : Tension de phase V_{an} , V_{bn} , V_{cn} sur les deux dernières périodes de simulation	61
Figure III.26 : Courant de phase I_{an} sur les deux dernières périodes de simulation	62
Figure III.27 : Le spectre d'harmoniques du Courant I_{an} (en barre)	62
Figure III.28 : Le spectre d'harmoniques du Courant I_{an}	63
Figure III.29 : Le zoom du spectre d'harmoniques du Courant I_{an}	63
Figure III.30 : Le spectre d'harmoniques de la tension V_{an}	64
Figure III.31 : La vitesse du moteur (rd/s)	64

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Nombres de composants nécessaires pour la topologie à trois niveaux	23
Tableau II.2 : Nombres de composants nécessaires pour la topologie à cinq niveaux	23
Tableau II.3 : Nombre de composants nécessaires pour la topologie à n niveaux	24
Tableau II.4 : Table de commutation de l'onduleur NPC 3 niveaux	27
Tableau II.5 : Table de commutation de l'onduleur NPC 5 niveaux	33

CHAPITRE I : Généralités sur les onduleurs.

CHAPITRE II : Etude et modélisation d'un onduleur cinq niveaux à structure NPC.

Chapitre III : Simulation et Interprétation des résultats.

Introduction générale.

Conclusion générale.

Introduction Générale

L'évolution de l'industrie utilise progressivement, dans l'alimentation des moteurs asynchrones de forte puissance et des convertisseurs statiques. Généralement, ce type de moteur est alimenté par des onduleurs triphasés à deux niveaux (pour de faibles moyennes tensions et puissances). L'analyse des 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 provoquent des pertes dans la charge et dans le convertisseur, un vieillissement prématuré, etc.

Au niveau du circuit de commande, ces harmoniques injectent des bruits introduisant des non-linéarités qui provoquent une difficulté pour la stabilisation du système de réglage.

Pour augmenter 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. Afin de surpasser les inconvénients liés aux harmoniques de rangs inférieurs et d'augmenter la puissance, les structures de conversion multi-niveaux apportent des solutions par la mise en série des 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 cinq niveaux est réalisée dans ce mémoire.
- 2- Les onduleurs multi niveaux à cellules imbriquées, une structure qui nécessite des tensions continues séparées.
- 3- Les onduleurs multi niveaux en cascade.

Dans le cadre de notre modeste travail, nous nous sommes intéressés aux onduleurs de tension triphasés à cinq niveaux à structure NPC. L'objectif que nous nous fixons est d'établir une commande de l'onduleur qui permet de minimiser le taux de distorsion sans l'utilisation de la MLI.

En effet, de précédents travaux comme par exemple le travail qui a été fait par **Mr Ben boudaoud kamel et Mr. Belkacem abdelmalek intitulé « Etude par simulation sous MATLAB et PSIM d'un onduleur cinq niveaux à structure NPC »** et ainsi que la littérature scientifique montre que la MLI intersective (naturelle) n'apporte pas un gain très important pour un onduleur cinq niveaux, seule une MLI vectorielle pourrait apporter un changement significatif pour ce type d'onduleur, cependant cette dernière technique nécessite plus de calculs alors que le multi-niveaux présente sous sa forme en créneaux un spectre qui n'est pas très riche.

Le premier chapitre consiste à une brève description sur les onduleurs (constitution physique, élémentaire, fonctionnement ...) et l'analyse harmonique de la tension obtenue à la sortie de ces onduleurs et le paramètre des performances de ces onduleurs.

Introduction Générale

En second chapitre nous avons fait l'étude des topologies les plus importantes de la conversion multi niveaux, et aussi la configuration d'un bras pour ceux à structure NPC (trois, sept et cinq niveaux bien entendu) et la modélisation de ce dernier.

Vers la fin de notre mémoire nous avons fait la simulation d'un onduleur à cinq niveaux à structure NPC en essayant de minimiser au maximum le THD (taux de distorsion en jouant sur les périodes de la tension de sortie obtenu de cet onduleur pour en avoir un signal plus proche de la sinusoïde avec présentation des résultats.

Chapitre1 : Généralités sur les onduleurs

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.

Grace aux progrès technologique réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance, les convertisseurs statiques, les onduleurs voient progressivement leur champ d'application s'élargir. L'onduleur est utilisé pour produire des grandeurs de sorties (courants et tension) alternatives à partir d'une source continue, il peut être à fréquence fixe ou à fréquence variable.

I.1 Définition de l'onduleur [11]

L'onduleur est un convertisseur statique qui permet de fournir une tension alternative d'amplitudes et de fréquence réglable à partir d'une source de tension continue comme le montre la Figure(I.1). Son principe est basé sur l'électronique de commutation, on génère une onde de tension alternative à partir d'une tension continue.

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

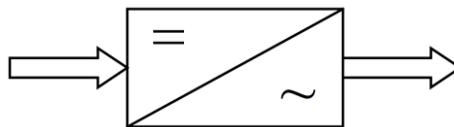


Figure I.1 : symbole d'onduleur

I.2 Classification des onduleurs [11]

Il existe plusieurs centaines de schémas d'onduleur, chacun correspondant à un type d'application déterminé ou permettant des performances recherchées.

Les onduleurs sont en générale classés selon les modes de commutation de leurs interrupteurs.

I.2.1 Onduleurs autonomes

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

I.2.2 Onduleurs assistés

Un onduleur assisté est un montage redresseur tout thyristor (**pont de Graetz**) qui fonctionne en commutation naturelle assistée par le réseau, auquel il est raccordé. Les thyristors sont commandés juste à la fermeture et la commutation est 'naturelle' contrairement

Chapitre1 : Généralités sur les onduleurs

a l'onduleur autonome. Tout redresseur renvoyant l'énergie de la charge au réseau est donc considéré comme onduleur.

I.3 Onduleur monophasé

I.3.1 Les différents types d'onduleur monophasés [6]

Il existe trois types d'onduleur :

- Onduleur demi-point (onduleur avec diviseur capacitif)
- Onduleur en pont complet
- Onduleur avec transformateur de sortie à point milieu (onduleur push-pull)

I.3.1.1 Onduleur demi-pont (onduleur avec diviseur capacitif) [7], [8]

L'onduleur en demi-point représenté sur la Figure (I.2) est composé de deux interrupteurs K1 et K2. On place à l'entrée une tension ($2E$) et un diviseur capacitif formé de deux condensateurs C1 et C2 de même capacité. On obtient deux tensions U_{c1} et U_{c2} carrément constantes et égales à E .

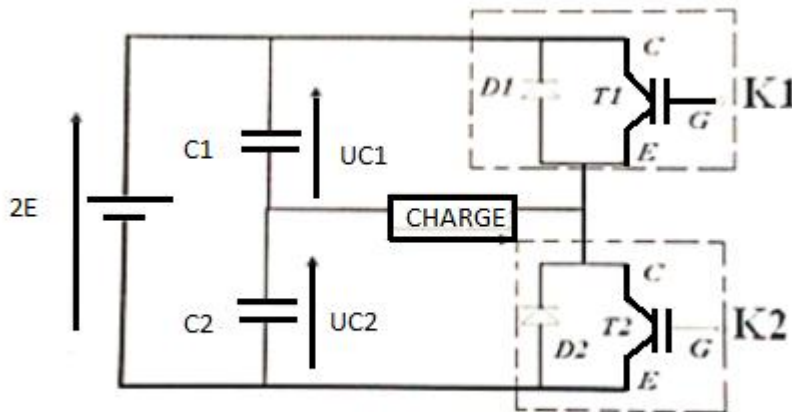


Figure1.2 : Onduleur demi-pont

Ces capacités ($C1$ et $C2$) sont traversées par le courant de charge. Lorsque T1 conduit, C1 se décharge et C2 se charge. Semblablement, lorsque T2 conduit, la capacité C1 se charge et C2 se décharge, chacune passant la moitié du courant d'utilisation. Ce passage d'un courant alternatif dans ces condensateurs entraîne une variation de la tension du charge autour de la valeur moyenne $E/2$, inversement proportionnelle à la valeur de ces capacités. La tension maximale sur les transistors est E . Lorsque K1 est fermé, $U_{c1}=E$, quand K2 est fermé, $U_{c2}=E$.

Le courant de charge (ou décharge) de C1 égale au courant de décharge (ou de charge) de C2, $I_{c1}=-I_{c2}$.

Chapitre1 : Généralités sur les onduleurs

Le courant dans l'inductance fermé est égal au double de celui de la source continue. D'où le qualificatif de « **doubleur de courant** » est souvent attribué à cet onduleur. La charge alimentée par l'onduleur est souvent de nature inductive, ce qui implique que l'allure du courant $i(t)$ est différente de celle de la tension $u(t)$.

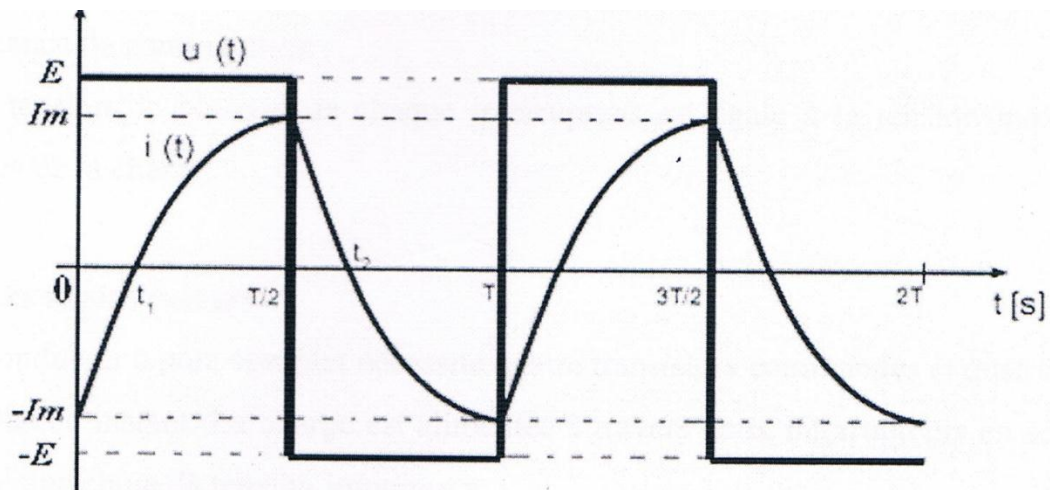


Figure I.3 : L'allure de tension et du courant de charge

K1 est fermé :

- $0 < t < t_1$: la diode D1 conduit et transistor T1 est bloqué.
- $t_1 < t < T/2$: le transistor T1 est conduit et la diode D1 bloquée.

K2 est fermé :

- $T/2 < t < t_2$: la diode D2 conduit et transistor T2 est bloqué.
- $t_2 < t < T$: le transistor est conduit et la diode D2 bloquée.

I.3.1.2 L'onduleur avec transformateur à point milieu (push-pull) [7]

Chaque demi-enroulement est sollicité alternativement par la tension E lorsque T1 (ou la diode D1) conduit. Le T2 voit une tension $2E$ à ses bornes, c'est le même cas pour T2 et D2, lorsque T2 (ou sa diode) conduit. Le T1 voit une tension $2E$ à ses bornes.

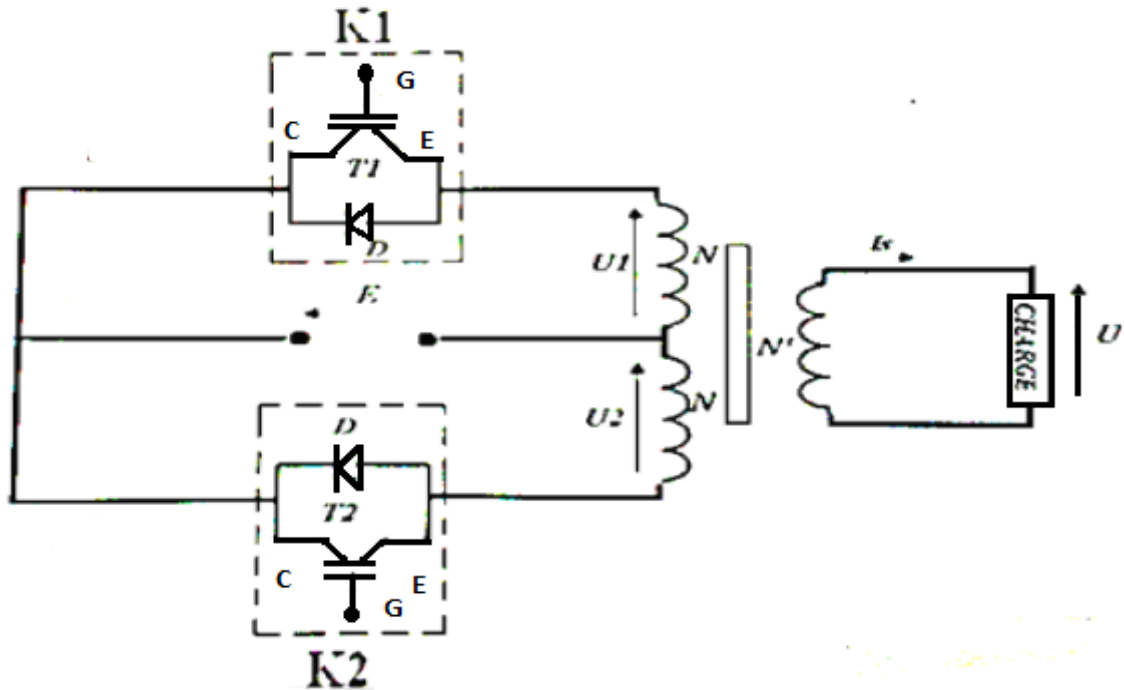


Figure I.4 : Onduleur avec transformateur à point milieu

Avec :

U : la tension de charge.

K1 est fermé : $U_1 = E$, donc $U = (N'/N) * E$.

K2 est fermé : $U_2 = -E$, donc $U = (N'/N) * E$.

- Cet onduleur est utilisé à cause du transformateur pour des équipements de petite puissance (quelque centaine de Watts max). Il est intéressant lorsqu'il faut adapter les niveaux de tension entre l'entrée et la sortie.

I.3.1.3 Onduleur a pont complet [9.10.7]

Le principe d'onduleur à pont complet est représenté dans la Figure (I.5). Celui-ci contient quatre interrupteurs : K1, K2, K3, K4, qui sont commandés deux à deux ; c'est-à-dire, lorsque K1 et K4 sont fermés, les interrupteurs K2 et K3 s'ouvrent et vice versa. Ces deux interrupteurs K1 et K4 peuvent être commandés, soit symétrique ou décalé, (même principe pour K2 et K3).

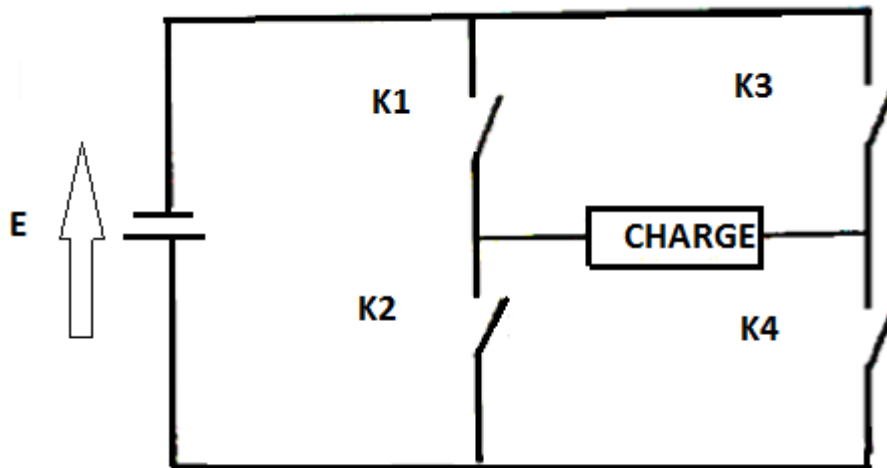


Figure I.5 : Onduleur à pont complet.

D'après le schéma précédent, chaque interrupteur de commutation K bidirectionnel est réalisé par un transistor IGBT en parallèle avec une DRL (diode de roue libre). Cet interrupteur est représenté dans la figure suivante

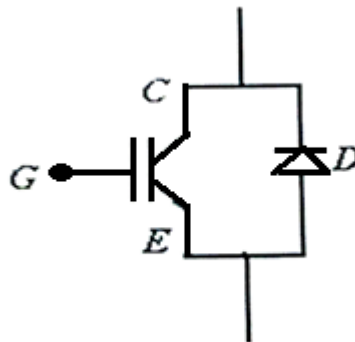


Figure I.6 : L'interrupteur K

Règle de conduction de L'interrupteur K :

- ✓ K est ouvert : le transistor bloqué et la diode D polarisé en inverse
- ✓ K est fermé : le transistor commandé :
 - Si $i > 0$: transistor conduit.
 - Si $i < 0$: la diode conduit.

La commutation (l'ouverture ou la fermeture) de cet interrupteur dépend de l'impulsion appliquée à la gâchette G de transistor IGBT.

- Cet onduleur peut travailler avec une commande symétrique, commande décalée ou commande à MLI.

Chapitre1 : Généralités sur les onduleurs

On cite quelques avantages et inconvénients d'un onduleur à pont complet :

➤ Les avantages

- la commande décalée permet de régler la puissance fournie sans augmenter la fréquence de commutation .
- La tension de blocage de chaque interrupteur est égale à tension maximal aux bornes de la charge.

➤ Les inconvénients

-cette onduleur nécessite quatre transistor commande les quatre diodes à chaque instant .la charge est alimentée à travers deux interrupteurs en série, ce qui crée une chute de tension importantes.

- Ce type d'onduleur est surtout utilisé en haute tension et dans les montages à commande en modulation de largeur d'impulsion

I.4 Onduleur triphasé [12]

- On peut réaliser l'onduleur triphasé en associant 3 onduleurs monophasés et en contrôlant la commutation de chaque pont pour produire 3 phases décalées de 120 degré.
- Ceci est la meilleure solution pour des charges déséquilibrées.
- Si la charge est équilibrée, on peut réduire le nombre d'interrupteurs de 12 (3 ponts monophasés X 4 interrupteurs) à 6 ce qui donne un pont triphasé alimenté d'une source de tension continue.

I.4.1 Principe de fonctionnement d'un onduleur triphasé

L'onduleur triphasé en pont est constitué d'une source de tension continue et de six interrupteurs montés en pont. La tension continue est généralement obtenue par un redresseur triphasé à diodes suivi d'un filtre.

Celui-ci est très utilisé en MLI pour l'alimentation des récepteurs triphasés équilibrés à tension et fréquence variables. Il peut être considéré comme étant superposition de trois onduleurs demi-pont monophasé (Figure I.7).

Chacune des trois tensions de sortie est formée d'une onde Bistable prenant les valeurs $-U$ et $+U$ mais décalées de $(2\pi/3)$ l'une par rapport à l'autre.

De plus si le récepteur est couplé en étoile sans neutre ou en triangle, les harmoniques multiples de trois éliminées. Ainsi, le système triphasé obtenu à la sortie de l'onduleur est un système équilibré en tension ne contenant que les harmoniques impairs différents de trois.

Chapitre 1 : Généralités sur les onduleurs

Pour obtenir une tension alternative à partir d'une tension continue, il faut découper la tension d'entrée et l'appliquer une fois dans un sens, l'autre fois dans l'autre à la charge. $2\pi/3$

L'onduleur de tension alimenté par une source de tension parfaite impose à sa sortie, grâce au jeu d'ouverture des interrupteurs, une tension alternative formée d'une succession de créneaux rectangulaires à deux niveaux, la période de fonctionnement est fixée par la commande des interrupteurs.

L'architecture de ce convertisseur se compose de plusieurs bras, connectés chacun à une phase du réseau et comportant deux interrupteurs de puissance, comme le montre la Figure (I.7) suivante :

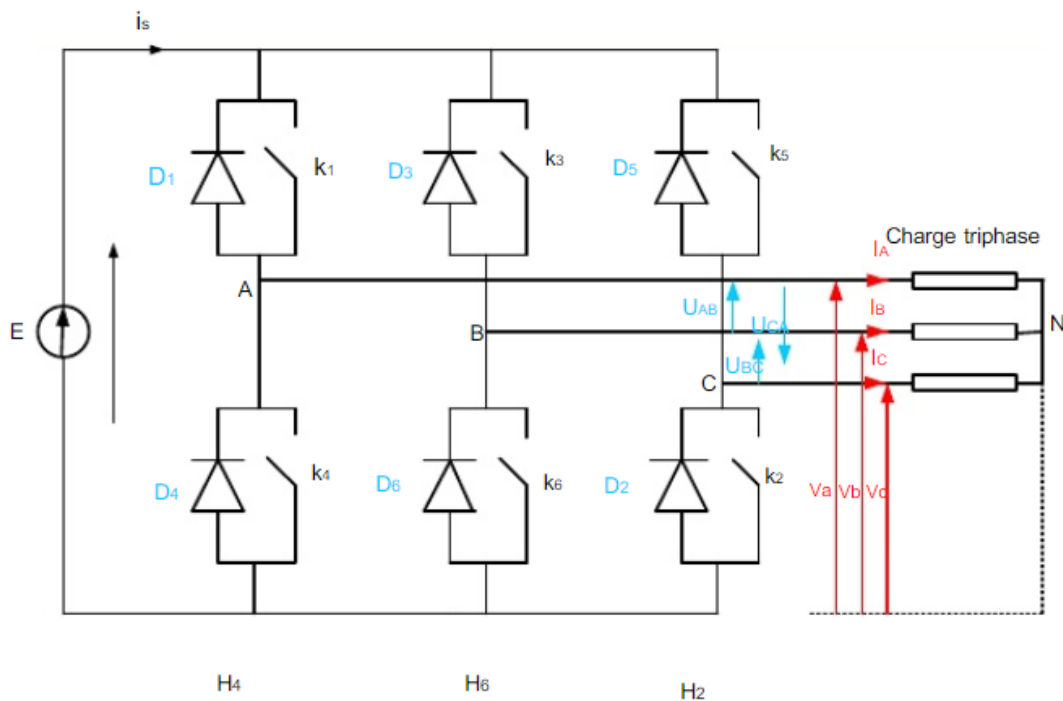


Figure I.7 : structure d'un onduleur triphasé en pont

Eléments de base de l'onduleur, les interrupteurs de puissance se composent, selon la puissance commutée, de GTO (Gate Turn Off), de MOS de puissance ou d'IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), en parallèle avec une diode Figure (I.8). La diode permet d'assurer la continuité du courant lors du changement de sens de celui-ci.

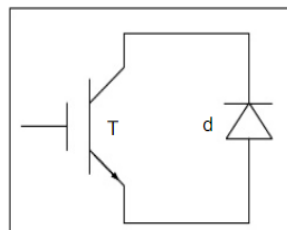


Figure I.8 : Interrupteur de puissance avec IGBT et diode

Chapitre1 : Généralités sur les onduleurs

- ❖ Les caractéristiques de l'onduleur sont principalement définies par ces composants de puissance. Ceux-ci déterminent la puissance, la tension et courant maximum commutés, la fréquence maximale de commutation et le temps mort. Ces deux dernières caractéristiques sont particulièrement importantes car elles vont beaucoup influencer la conception.
- ❖ La fréquence maximale de commutation est déterminée par les temps de commutation (ouverture et fermeture du composant) des interrupteurs et par le temps mort. Sur une période des commutations, un interrupteur commuté au maximum deux fois : à l'ouverture et à la fermeture, la Figure (I.9) qui représente le temps mort qui sert à prévenir les risques de court-circuit sur un bras; Ce temps introduit entre l'ouverture d'interrupteur et la fermeture de son complémentaire, dépend des temps de commutation.

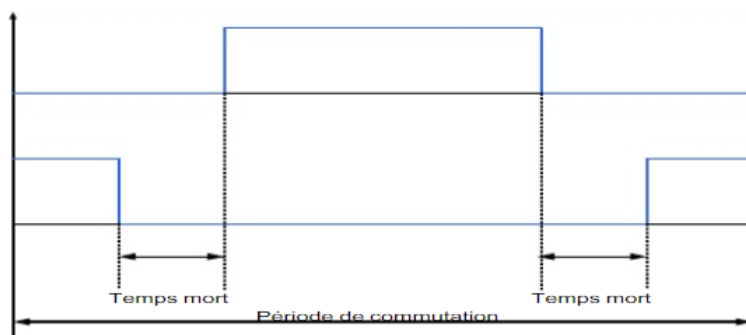


Figure I.9 : exemple de période de commutation avec temps mort

- ❖ Nous considérons une charge triphasée équilibrée, et pour simplifier l'étude nous supposons que le couplage en étoile (bien que le branchement d'une charge triangle soit envisageable).
- ❖ Pour cette structure, plusieurs types de commande sont possibles :
 - La commande 120°
 - La commande 180°
 - Les commandes à modulation de largeur d'impulsion (MLI).

I.4.2 Modélisation de l'onduleur triphasé

L'onduleur triphasé dit deux niveaux est illustré par son circuit de puissance de la Figure I.10 On doit distinguer d'une part les tensions de branche V_{AN} , V_{BN} , V_{CN} mesurées par rapport à la borne négative de la tension continue V_{pv} , d'autre part, il ya les tensions de phases V_{AN} , V_{BN} et V_{CN} mesurées par rapport à un point neutre flottant n représentant une charge équilibrée montée en étoile. Des tensions simples on peut tirer facilement les tensions composées V_{AN} , V_{BN} et V_{CN} . [18]

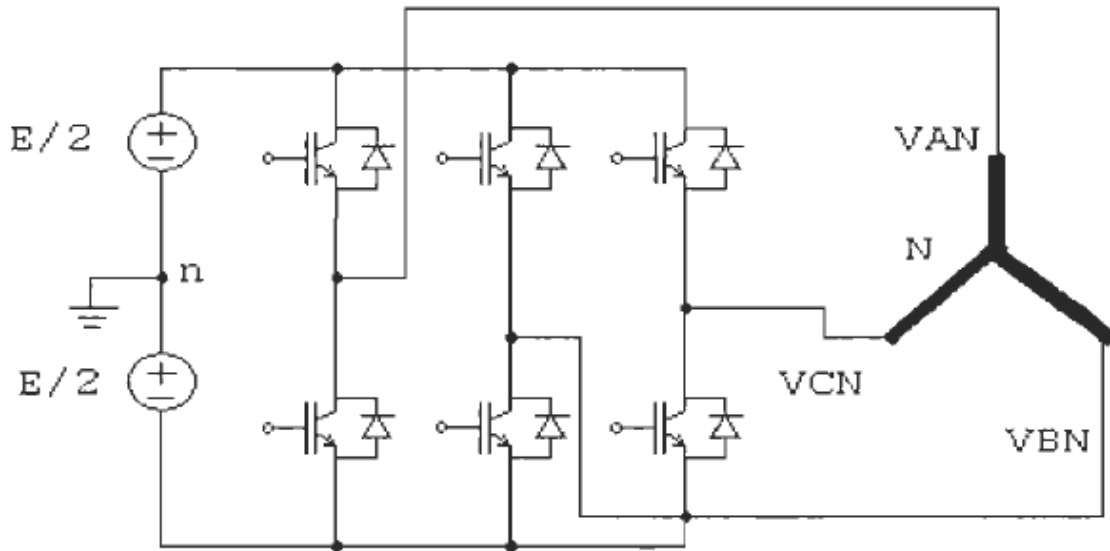


Figure I.10 : Circuit de fonctionnement de l'onduleur triphasé

Dans le circuit de puissance de l'onduleur triphasé de la Figure (I.10) il est à noter que les états des interrupteurs d'un même bras sont complémentaires.

En utilisant ces états des interrupteurs, nous pouvons obtenir les tensions de branche de sortie de l'onduleur mesurées par rapport à la borne négative de la tension du côté continu comme suit:

$$\begin{aligned}
 V_{AN} &= S_1 * V_{pv} \\
 V_{BN} &= S_2 * V_{pv} \dots\dots\dots (I.1) \\
 V_{CN} &= S_3 * V_{pv}
 \end{aligned}$$

Où S1, S2 et S3 désignent les états des interrupteurs des phases A, B et C respectivement. Les tensions composées sont [18]:

$$\begin{aligned}
 V_{AB} &= V_{AN} - V_{BN} = (S_1 - S_2) * V_{pv} \\
 V_{BC} &= V_{BN} - V_{CN} = (S_2 - S_3) * V_{pv} \dots\dots\dots (I.2) \\
 V_{CA} &= V_{CN} - V_{AN} = (S_3 - S_1) * V_{pv}
 \end{aligned}$$

Donc on peut écrire ces équations sous la forme matricielle suivante:

$$\begin{bmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (I.3)$$

Alors les tensions simples sont:

$$V_{AN} = \frac{2}{3} * V_{AN} - \frac{1}{3} (V_{BN} + V_{CN})$$

Chapitre1 : Généralités sur les onduleurs

$$V_{BN} = \frac{2}{3} * V_{BN} - \frac{1}{3} (V_{AN} + V_{CN}) \dots\dots\dots(I.4)$$

$$V_{CN} = \frac{2}{3} * V_{CN} - \frac{1}{3} (V_{AN} + V_{BN})$$

En fin ces équations des tensions simples peuvent s'écrire sous forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} = \frac{v_{pn}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S1 \\ S2 \\ S3 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(I.5)$$

I.5 Choix des semi-conducteurs [13], [14]

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), Phosphure 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 XIXème 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 [14], [15]. 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.

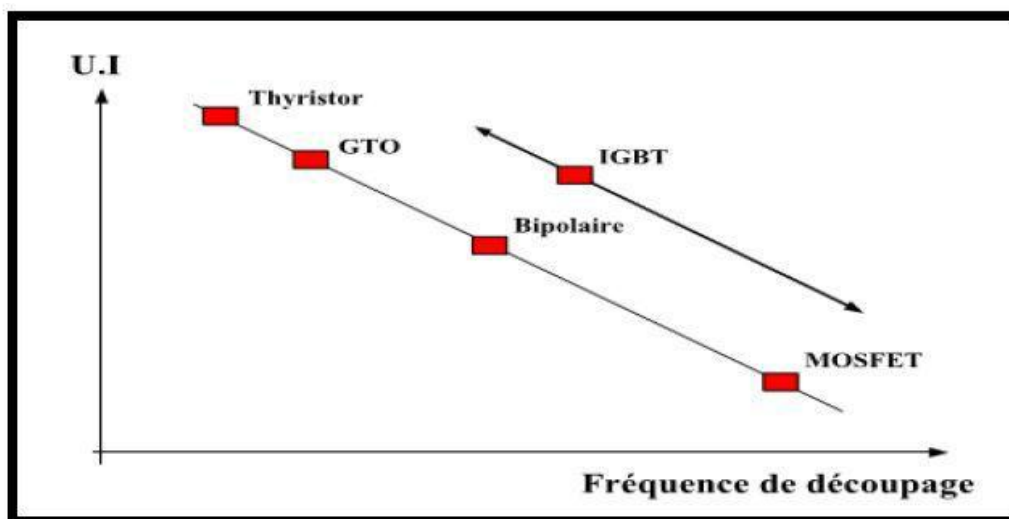


Figure I.11 : Classification des composants de puissance en fonction de la fréquence de Découpage des composants [15].

Chapitre1 : Généralités sur les onduleurs

I.6 Analyse harmonique de la tension de sortie de l'onduleur

I.6.1 Origine des harmoniques

Les récepteurs non linéaires tels que fours à arc, éclairages, convertisseurs, redresseurs, qui absorbent généralement des courants non sinusoïdaux qui traversent les impédances 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 [16].

I.6.2 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 :

$$y(x) = y(0) + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \frac{\sqrt{2}}{1} * \sin(n\omega) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \frac{\sqrt{2}}{1} * \cos(n\omega)$$

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

I.6.3 Mode de représentation

Le spectre est un histogramme fournissant l'amplitude de chaque harmonique (%) en fonction de son ordre.

I.6.4 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 leurs 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.7 Paramètre de performance de l'onduleur [17] [B]

La qualité de l'énergie fournit par un onduleur est évaluée suivant les paramètres de performance suivant :

I.7.1 Facteur de l'an^{ième} harmonique

C'est une procédure qui consiste à mesurer la contribution individuelle des harmoniques définit comme suit :

Chapitre1 : Généralités sur les onduleurs

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

I.7.2 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.

$$THD = \frac{\sqrt{V_{eff}^2 - V_{eff1}^2}}{V_{eff}}$$

On va aller couramment jusqu'au 40^{ème} ou 50^{ème} rang d'harmoniques. Cette grandeur envisage d'évaluer à l'aide d'un nombre unique la perturbation d'un courant ou d'une tension en un point d'un réseau, voir 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.

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

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

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

Un bon appareil d'analyse de réseaux mesure 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.

Conclusion

Dans ce chapitre, on a essayé d'exposer l'essentiel sur les onduleurs, que se soit le monophasé ou le triphasé, sa constitution physique élémentaire, son fonctionnement, et on a présenté parallèlement les différentes structures des onduleurs et leurs principales contraintes.

Vers la fin de ce chapitre on a pu aussi parlé sur l'analyse harmonique de la tension obtenue à la sortie de ces onduleurs et le paramètre des performances de ces derniers.

Le chapitre suivant, sera consacré à l'étude de l'onduleur multi-niveau en mettant l'accent sur l'onduleur cinq niveaux a structure NPC.

Introduction

Les onduleurs de tension constituent une fonction incontournable de l'électronique de puissance. Ils sont présents dans les domaines d'application les plus variés, dont le plus connu, sans doute, celui de la variation de vitesse des machines à courant alternatif. La forte évolution de cette fonction s'est appuyée, d'une part sur le développement des composants à semi-conducteur entièrement commandables, puissants, robuste et rapides et d'autre part, sur l'utilisation quasi généralisée des techniques dites de modulation de largeur d'impulsion [20], ainsi que le progrès réalisé dans le domaine de la micro-informatique.

Malgré leurs nombreux avantages, les onduleurs conventionnels (deux niveaux) présentent certains inconvénients tels que:

- * l'usage limité aux applications de faibles et de moyennes puissances seulement.

- * la détérioration prématurée des roulements causée par l'apparition des harmoniques de rangs inférieurs et des tensions homopolaires à l'arbre du moteur. 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 [21]:

- * il peut générer des tensions très proche de la sinusoïde avec une fréquence de commutation égale à celle de la fondamentale.

- * les performances spectrales des formes d'ondes des grandeurs de sortie d'un onduleur multi-niveau sont supérieures à celles d'un onduleur à deux niveaux.

- * les formes d'ondes des grandeurs de sortie d'un onduleur multi-niveau limitent naturellement les problèmes des surtensions.

- * il est bien adapté aux moteurs de moyennes et de grandes puissances. [22,23]

II.1 Concept multi-niveaux [24.25.26]

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 :

$$V_{vm} = \left(\frac{C_i}{N-1}\right) * E \dots \dots \dots (II.1)$$

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

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

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

Étude et modélisation de l'onduleur cinq niveaux à structure NPC

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

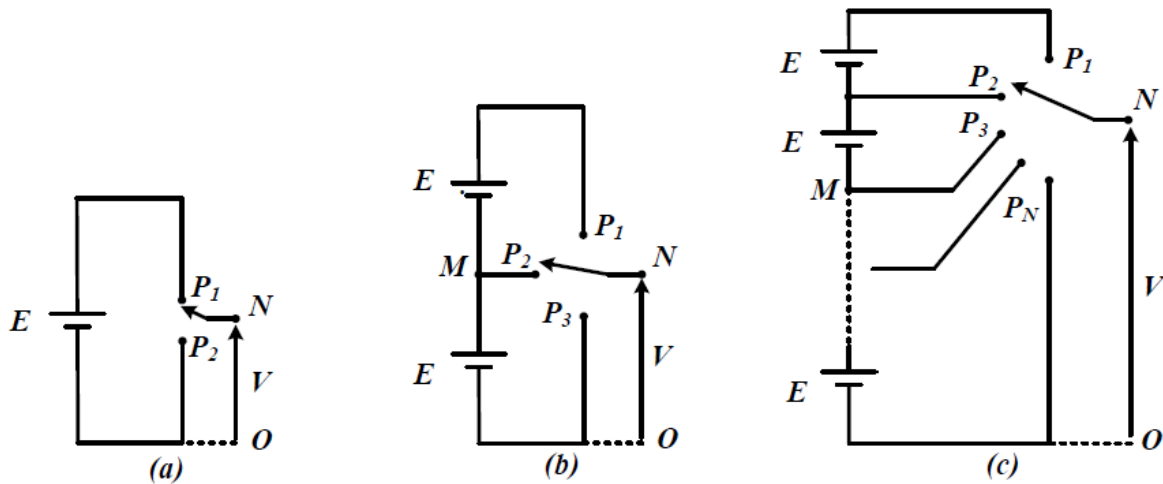


Figure II.1 : Schéma d'un bras d'onduleur :a) 2 niveaux ;b) 3 niveaux ;c) N niveaux.

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

II.2 Intérêt des onduleurs 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 de bus 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. Alors l'amplitude des raies harmoniques est par conséquent moins élevée. Dans le cas de modulation de largeur d'impulsion, le recours à un convertisseur multi-niveaux associé à une commande judicieuse des composants de puissance permet en outre de supprimer certaines familles de raies harmoniques [24].

En général, les onduleurs de tension multi-niveaux peuvent être vu comme des synthétiseurs de tension, dans lesquels la tension de sortie est synthétisée de plusieurs niveaux de tension discrets [25,26].

II.3 Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux [19, 27,28]

L'onduleur de tension multi-niveaux possède trois ou plusieurs niveaux. Le but de cette partie est de donner une vue générale des trois topologies de base des onduleurs multi-niveaux:

- * la topologie à diode de bouclage (NPC),
- * la topologie au condensateur flotteur (à cellules imbriquées),
- * la topologie en cascade.

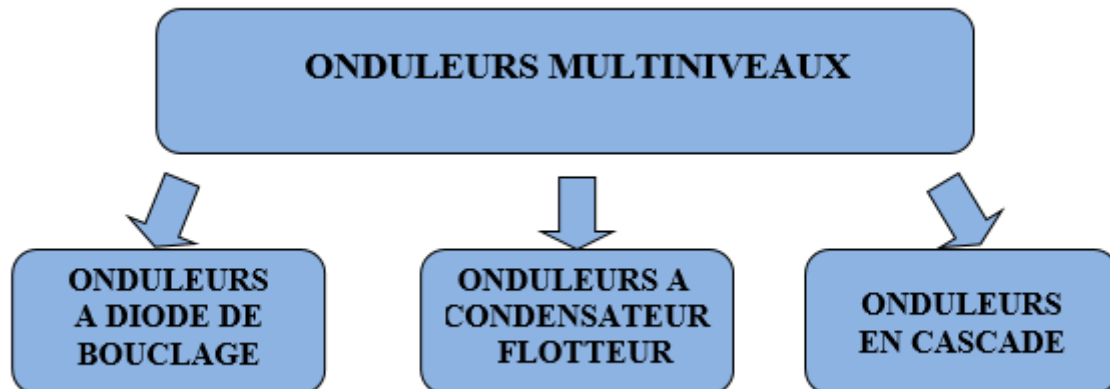


Figure II.2 : les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux

II.3.1 Onduleur de tension clampé par le neutre (NPC) [19, 27,28]

La première topologie la plus pratique d'onduleur de tension multi-niveau est le NPC (Neutral-Point-Clamped). Elle a été proposée, la première fois en 1980, par Nabae et Al.

L'onduleur NPC à trois niveaux est donné par la Figure II.3.

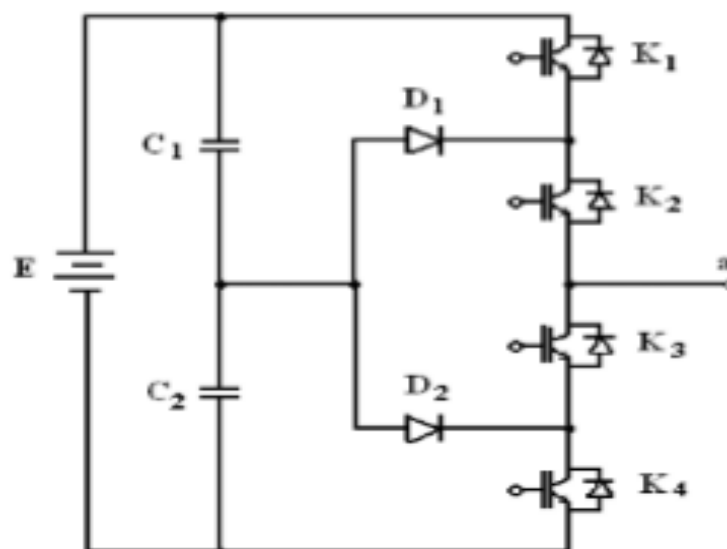


Figure. II.3 : Onduleur NPC à trois niveaux (la phase a)

- Pour le cas général, la Figure II.4 représente la structure d'un onduleur NPC à n-niveaux. [29]

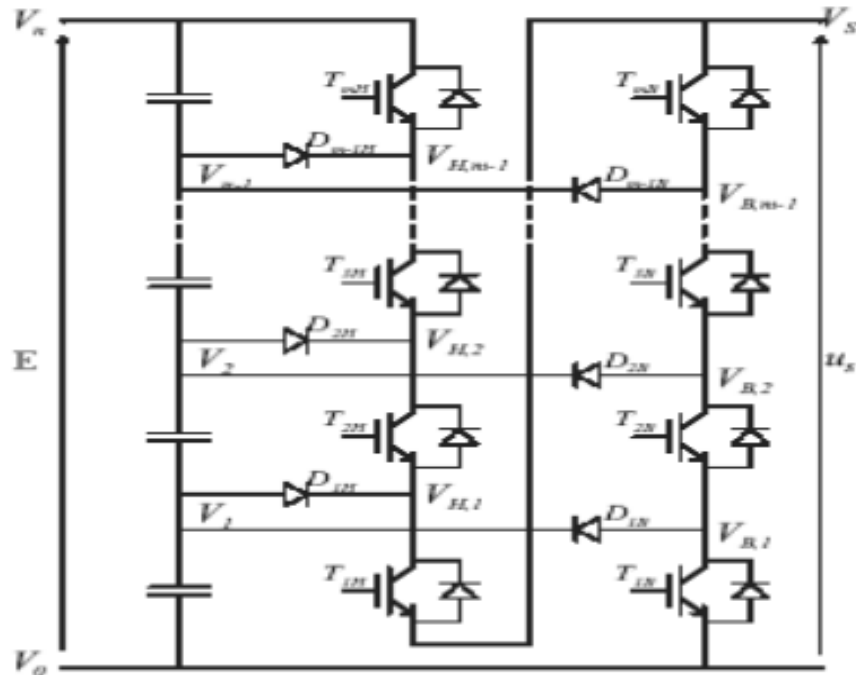


Figure. II.4 : Onduleur de tension clampé par le neutre à n-niveaux [29]

L'onduleur de tension à trois niveaux présente des avantages par rapport à la topologie d'onduleur classique (à deux niveaux). Ces avantages sont:

* Les composants de puissance à semi-conducteur bloquent une tension inverse égale seulement à la moitié de la tension de la source continue. [30]

* 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. Cependant, en utilisant cette topologie, l'expérience pratique a révélé plusieurs difficultés techniques qui compliquent ses applications dans le cas des grandes puissances. Ce sont :

- Pour les topologies avec plus de trois niveaux, les diodes de bouclage (clamping diodes) peuvent augmenter les contraintes en tension jusqu'à une valeur égale à $E(n-1)/n$, où n est le nombre de niveaux. 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.
- Le déséquilibre des tensions aux bornes des condensateurs lors de leur mise en série. [31]

II.3.2 Onduleur de tension à cellules imbriquées [28]

Dans un convertisseur à deux niveaux de tension, chaque phase est constituée d'une paire d'interrupteurs de puissance montée en parallèle aux bornes d'un condensateur. Ils sont souvent commandés de façon complémentaire, si bien que la tension de sortie de la branche est reliée soit à la borne positive, soit à la borne négative de ce condensateur.

Dans la topologie multi-niveau proposée en 1992 par T. Meynard et H. Foch [28], elle est également connue sous l'appellation « flying capacitors multi level inverter » dans la littérature anglo-saxonne.

Plusieurs cellules « condensateur et paire d'interrupteurs » sont imbriquées les unes dans les autres comme l'illustre la Figure II.5.

$$(V_{c2} = 2V_{c1}, V_{c3} = 3V_{c1}, V_{c4} = 4V_{c1}, \dots, V_{cn} = nV_{c1}).$$

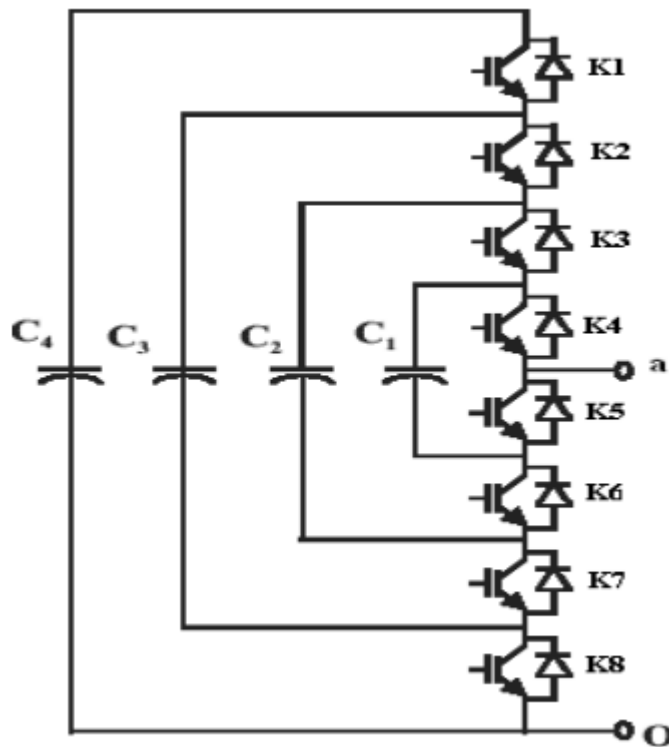


Figure II.5 : Topologie multi-niveau à cellules imbriquées (phase a)

Le principe de fonctionnement de cette topologie est quasiment identique à celui de la topologie NPC. Elle présente plusieurs avantages, notamment :

- * La tension de blocage des interrupteurs est partout la même.
- * Les condensateurs n'étant jamais mis en série entre niveaux différents, le problème de déséquilibre de leur tension n'existe plus. Actuellement il semble que cette topologie a

Étude et modélisation de l'onduleur cinq niveaux à structure NPC

quelques inconvénients. Néanmoins, quelques points faibles que doivent toujours être explorés :

- Le contrôleur de la charge du condensateur ajoute la complexité au contrôle du circuit entier.
- La topologie de l'onduleur multi-niveau à cellules imbriquées peut exiger plus de condensateurs que la topologie de l'onduleur NPC. De plus, il est évident que des courants de grandes valeurs efficaces circuleront à travers ces condensateurs.
- Il y a un potentiel de résonance parasite entre les condensateurs découplés. [27]

II.3.3 Onduleur de tension en cascade

Une des premières applications des connexions en série des topologies des convertisseurs monophasés en pont était pour la stabilisation de plasma en 1988 [26]. Cette approche modulaire a été étendue pour inclure aussi les systèmes triphasés.

Sans conteste, les complications et le coût des sources isolées pour chaque pont n'est pas un inconvénient sérieux parce qu'il est compensé par les avantages de la construction modulaire.

L'avantage principal de cette approche est que la topologie de ce type d'onduleur facilite la maintenance en plus elle permet de donner une façon très pratique pour augmenter le nombre de niveaux dans le système. La Figure II.6 représente un onduleur monophasé en cascade à cinq niveaux. [26].

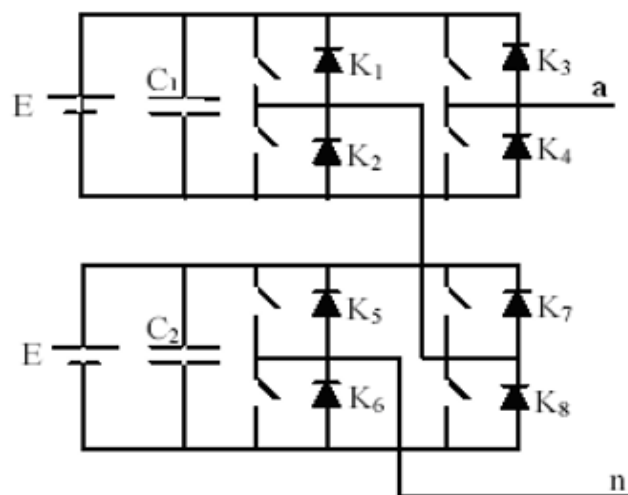


Figure II.6 : Onduleur en cascade à 5 niveaux (phase a)

Les sorties des onduleurs en pont sont connectées en série telle que l'onde de la tension synthétisée est la somme des tensions de sortie. Le nombre des niveaux de tension de sortie dans un onduleur en cascade est définie par :

$$n = 2s + 1$$

Où s 'est le nombre des sources de tensions continues. [41]

Étude et modélisation de l'onduleur cinq niveaux à structure NPC

L'avantage majeur de cette approche hybride est que le nombre de sortie peut être augmenté davantage sans aucun ajout de nouveaux composants. Il faut seulement des sources de tensions continues avec différents niveaux de tensions. Probablement, le plus avantageux utilise des sources de tensions avec deux niveaux de tensions (E et $2E$) comme le montre la Figure II.7.

Cet arrangement peut générer une tension à sept(07) niveaux ($0, +/- E, +/- 2E, +/- 3E$).
[22]

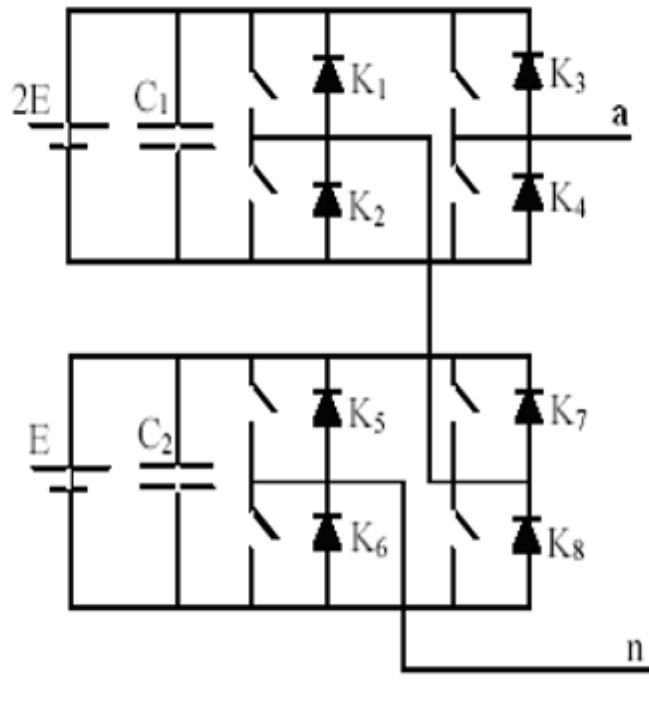


Figure II.7 : Onduleur en cascade à 7 niveaux (phase a)

II.4 Propriétés des principales structures [32.34]

II.4.1 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 de sortie maximale est plus grande que chacune des tensions d'alimentation elle est plus petite ou égale à la somme des tensions d'alimentation.

II.4.2 Nombres de composants nécessaires

A pas obligatoires dans la configuration à diode clampée et onduleur cascadié. Implicitement, l'onduleur cascadié exige le moindre nombre de composants.

Étude et modélisation de l'onduleur cinq niveaux à structure NPC

Un autre avantage d'onduleur cascadi est la flexibilit de disposition de circuit. La disposition du circuit de modulation est possible parce que chaque niveau a la mme structure, et il n'y a aucune diode clampes supplmentaires ou un condensateur d'quilibrage de tension. Le nombre de niveaux de tension de sortie peut tre facilement ajust en ajoutant ou en enlevant les cellules de pont complet.

Pour le cas le plus simple permettant d'obtenir trois niveaux par branche, nous obtenons l'aide des tableaux suivants, nous comparons le nombre de commutateurs principaux et de diodes principales, ncessaires pour raliser le nombre de niveaux de tension, est identique. Pour maintenir des diodes, ce n'est pas ncessaire dans la configuration à condensateur imbriqu et onduleur cascadi.

<i>topologie</i>	<i>n</i>	<i>s</i>	<i>K</i>	<i>D</i>	<i>D_c</i>	<i>C</i>
<i>NPC</i>	3	2	4	4	2	0
<i>cellules imbriquées</i>	3	2	4	4	0	1
<i>cascade</i>	3	1	4	4	0	0

Tableau II.1 : Nombres de composants ncessaires pour la topologie à trois niveaux

<i>topologie</i>	<i>n</i>	<i>s</i>	<i>K</i>	<i>D</i>	<i>D_c</i>	<i>C</i>
<i>NPC</i>	5	4	8	8	12	0
<i>cellules imbriquées</i>	5	4	8	8	0	6
<i>cascade</i>	5	2	8	8	0	0

Tableau II.2 : Nombres de composants ncessaires pour la topologie à cinq niveaux.

<i>topologie</i>	<i>n</i>	<i>s</i>	<i>K</i>	<i>D</i>	<i>D_c</i>	<i>C</i>
<i>NPC</i>	<i>n</i>	<i>(n-1)</i>	$2(n-1)$	$2(n-1)$	$(n-1).(n-2)$	0
<i>cellules imbriquées</i>	<i>n</i>	<i>(n-1)</i>	$2(n-1)$	$2(n-1)$	0	$(n-1).(n-2)/2$
<i>cascade</i>	<i>n</i>	$(n-1)/2$	$2(n-1)$	$2(n-1)$	0	0

Tableau II.3 : Nombres de composants nécessaires pour la topologie à n niveaux [34]

Avec :

- * *n* : le nombre de niveaux de tension obtenus,
- * *s* : le nombre de sources à courant continu,
- * *K* : le nombre de commutateurs principaux,
- * *D* : le nombre de diodes principales,
- * *D_c* : le nombre des diodes clampées,
- * *C* : le nombre de condensateurs d'équilibrage,

Du point de vue du nombre de composants, les onduleurs à cellules cascadées paraissent être la solution multi-niveau 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. [33,34]

II.5 Avantages des Onduleurs Multi-niveaux

Les onduleurs multi-niveaux offrent d'énormes avantages par rapport aux onduleurs 2-niveaux. Ces avantages sont visibles, d'une part d'un point de vue technologique et d'autre part d'un point de vue fonctionnel:

II.5.1 Les Avantages technologiques [21.22]

Dans les onduleurs multi-niveaux, la répartition de la tension est obtenue de manière naturelle en régime établi, ce qui permet de :

- ✓ Commuter chaque semi-conducteur indépendamment des autres. Ceci rend le convertisseur plus robuste et plus performant pendant les commutations. La tension commutée est d'amplitude réduite et la commutation est donc plus simple à gérer.

II.5.2 Les Avantages fonctionnelles pour le convertisseur [21.22]

- Possibilité d'accéder à des applications de plus forte puissance,
- Possèdent de meilleurs compromis entre performances statiques (tension de saturation) et performances dynamiques (temps de commutation, pertes par commutation, fréquence de découpage).

II.5.3 Les Avantages fonctionnelles pour les machines tournantes [21]

Le nombre de tension généré par un onduleur multi-niveaux plus élevé que celui d'onduleur 2-niveaux de tension, permet d'améliorer la qualité de sa forme d'onde, qui se traduira par une réduction de sa distorsion harmonique, Ceci peut entraîner des avantages considérables comme :

- la diminution des pertes fer,
- l'augmentation du temps de vie des isolants ou la diminution du rayonnement électromagnétique issu des bobinages de la machine.

II.6 Domaines d'applications des onduleurs multi-niveaux [35. 36]

Les convertisseurs multi-niveaux étaient destinés à la base à résoudre certains problèmes posés par l'utilisation des convertisseurs à deux niveaux de tension, monophasés ou triphasés. Ils sont donc utilisés afin de régler la fréquence et l'amplitude de la tension, mais aussi pour le transfert d'énergie entre une ou plusieurs sources d'alimentation à courant continu ou alternatif et une charge à courant alternatif monophasé ou triphasé. Cette utilisation ouvre plusieurs opportunités d'applications, dont quelques-unes sont :

- ✓ Application dans le domaine de la traction ferroviaire et urbaine
- ✓ Application dans l'alimentation des réseaux de bord et de propulsion des bâtiments maritimes
- ✓ Application dans le domaine des réseaux électriques
- ✓ Application dans le domaine de l'alimentation des machines électriques.

II.7 Les onduleurs multi niveaux de type NPC

II.7.1 Onduleur à trois niveaux de type NPC

II.7.1.1 Structure [37]

L'onduleur NPC est basé sur l'obtention d'une tension de sortie à trois niveaux par la superposition de deux interrupteurs élémentaires qui sont alimentés par une source de tension continue distincte.

La Figure II.8 représente la structure topologique d'un onduleur triphasé à trois niveaux.

Étude et modélisation de l'onduleur cinq niveaux à structure NPC

Elle est composée de trois bras monophasés [37]. A partir de la source principale de tension continu, et à l'aide d'un diviseur de tension capacitif formé par les condensateurs de filtrage C_1 et C_2 de même capacité, on obtient deux sources secondaires de tension continue délivrant chacune Une demie tension ($E/2$). Cette structure crée alors un point neutre (o) entre les deux condensateurs.

Ces capacités sont identiques de manières à éviter le déséquilibre de charge ($C_1=C_2$ c'est-à-dire $U_{C1}=U_{C2}$).

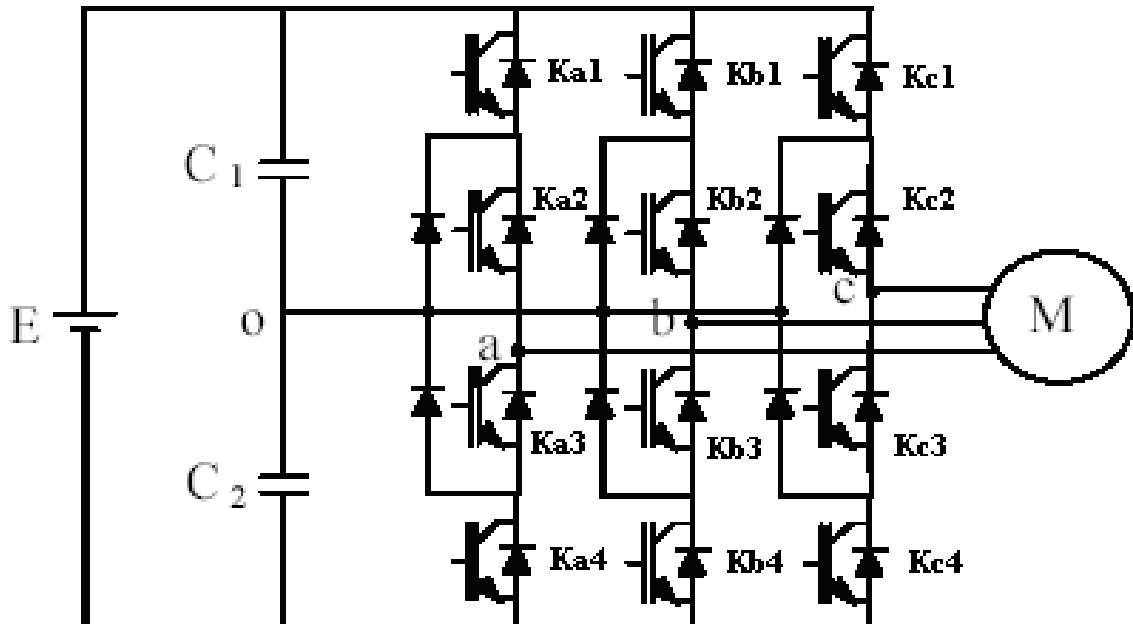


Figure II.8 : Structure d'un onduleur triphasé à trois niveaux de type NPC. [37].

Chaque demi-bras de l'onduleur comporte de deux interrupteurs (K_{ij}) en série avec leur point commun relié par une diode de bouclage au point neutre des sources (o).pour assurer la réversibilité des courants dans la charge une diode doit monter en antiparallèle sur chaque interrupteur .

- Le Tableau II.4 représente la tension de sortie V_{ao} d'un onduleur NPC à 3 niveaux en fonction de l'état des interrupteurs. Outre les variations du potentiel du point milieu, la tension aux bornes des interrupteurs de puissance n'excède jamais la moitié du bus d'entrée.

<i>Etat des interrupteurs</i>				<i>Tension de sortie V_{ao}</i>
<i>K_{a1}</i>	<i>K_{a2}</i>	<i>K_{a3}</i>	<i>K_{a4}</i>	
1	1	0	0	$E/2$
0	1	1	0	0
0	0	1	1	$-E/2$

Tableau II.4 : Table de commutation de l'onduleur NPC 3 niveaux. [38,39].

- la Figure II.9 représente les signaux de commande de chaque interrupteur, ainsi que la forme d'onde de la tension de sortie V_{ao} .

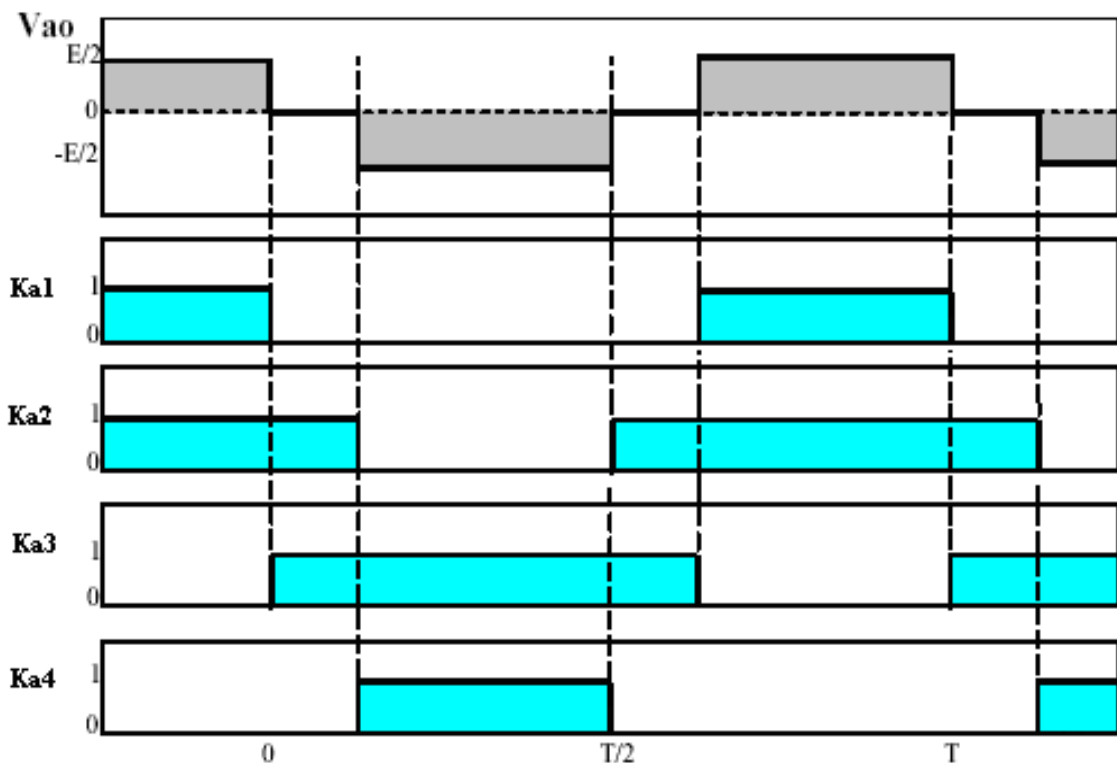


Figure II.9 : Forme d'onde de la tension de sortie d'un bras d'onduleur à trois Niveaux de type NPC. [38,39].

La structure de l'onduleur à trois niveaux limite à $E/2$ la tension imposée à chaque interrupteur lorsqu'il est bloqué, alors que dans la structure classique de l'onduleur, cette tension vaut la tension continue complète E . C'est cette caractéristique de l'onduleur à trois niveaux qui permet de monter en puissance, dans le cas des applications de forte puissance.

Donc, la tendance vers l'augmentation du nombre de niveaux est dictée par le besoin de tensions plus élevées pour les applications de forte puissance. Ainsi que, plus le nombre de

Étude et modélisation de l'onduleur cinq niveaux à structure NPC

niveaux augmente, la tension de sortie en forme d'escalier possède plusieurs paliers. Ceci permet de mieux approcher la sinusoïde.

II.7.2 Onduleur à cinq niveaux de types NPC [A]

II.7.2.1 Structure

La Figure II.10 représente la structure d'un bras d'onduleur de tension à cinq niveaux de type NPC. Elle est constituée de quatre sources secondaires de tension continue de valeur $E/4$, de huit interrupteurs à IGBT et de six diodes de bouclage.

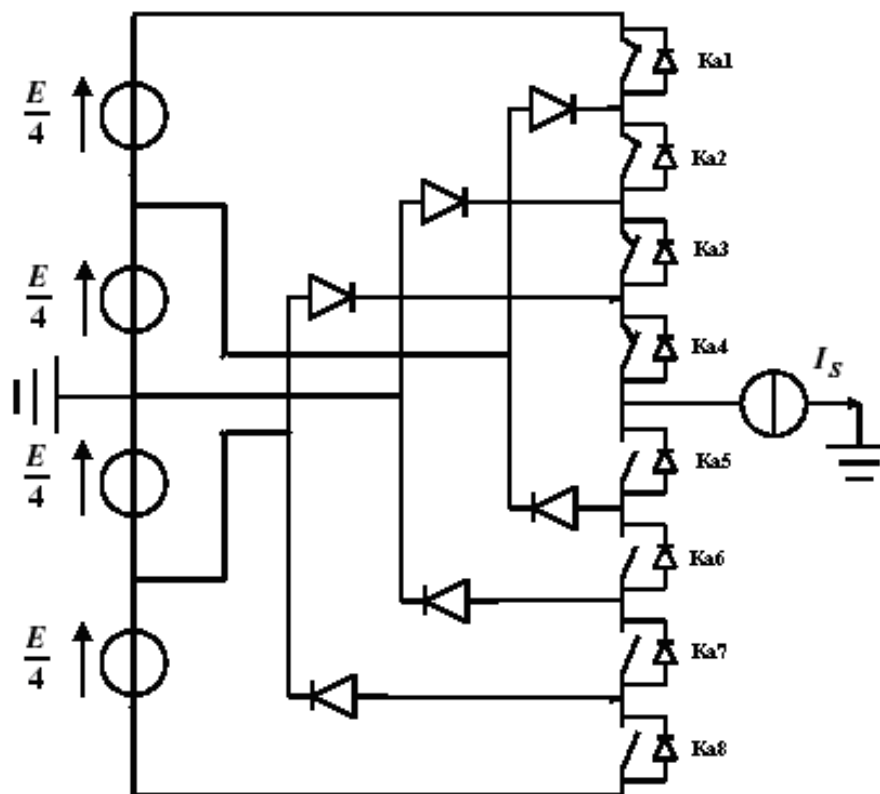


Figure II.10 : Bras d'un onduleur NPC à cinq niveaux

II.7.2.2 Principe de fonctionnement

Pour définir les séquences de fonctionnements de l'onduleur à cinq niveaux, définissant d'abord les différents états que peut prendre la tension simple (la tension entre le bras de l'onduleur et le point milieu fictif). Les états possibles d'un seul bras d'interrupteur est de $2^5=32$ états que l'on peut représenter par un quadruplet de 0 et 1.

Pour ce type d'onduleur, seules cinq configurations sont fonctionnelles. Elles sont décrites comme Suit :

- **Première configuration {11110000}**

Ka1, Ka2, Ka3 et Ka4 sont passants et *Ka5, Ka6, Ka7 et Ka8* sont bloqués (Figure (II-11)), on a la valeur de la tension simple de sortie est :

$$V_{ao} = +E/2 \dots \dots \dots (II.2)$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{Ka5} = V_{Ka6} = V_{Ka7} = V_{Ka8} = +E/4 \dots \dots \dots (II.3)$$

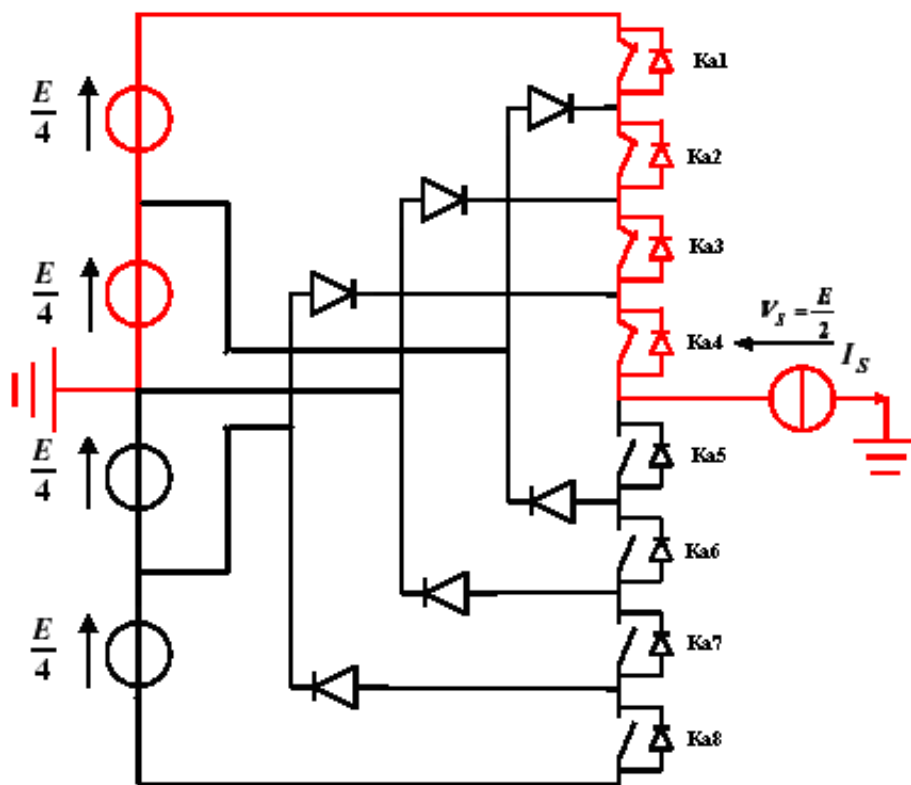


Figure II.11 : 1ère configuration du 1er bras

- **Deuxième configuration {01111000}**

K_{a2} , K_{a3} , K_{a4} , et K_{a5} sont passants et, K_{a6} , K_{a7} , K_{a8} et K_{a1} sont bloqués (Figure II.12), on a la tension de sortie est :

$$V_{ao} = +E/4 \dots \dots \dots (II.4)$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$VKa1 = VKa6 = VKa7 = VKa8 = +E/4 \dots \dots \dots (II.5)$$

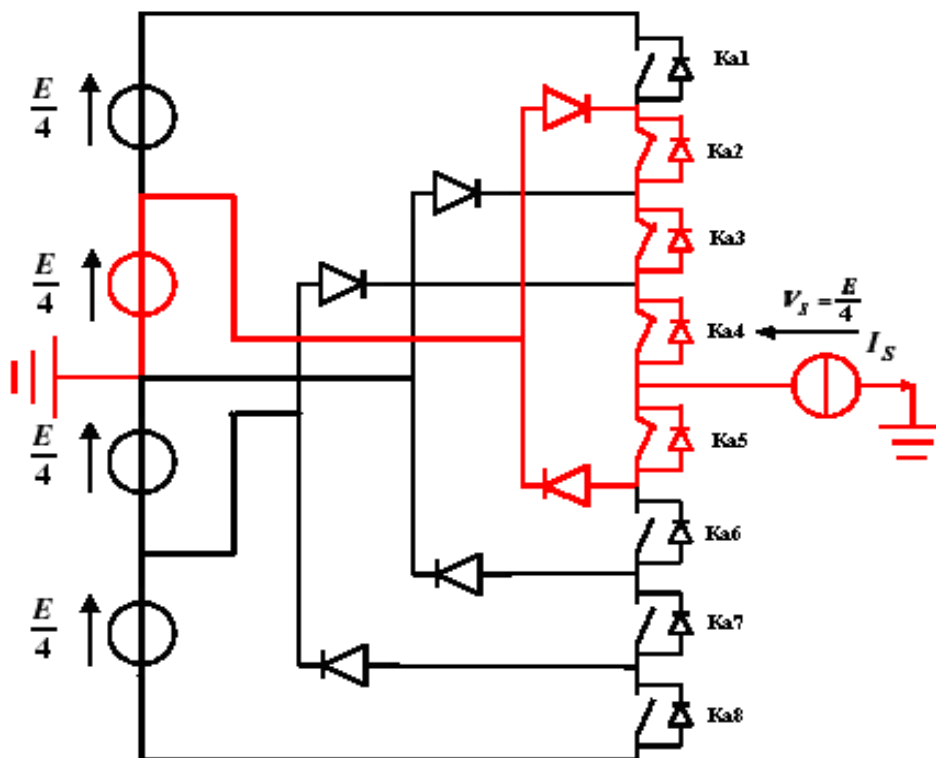


Figure II.12 : 2ème configuration du 1er bras

- **Troisième configuration {00111100}**

Ka3, Ka4, Ka5, et Ka6 sont passants et, *Ka7, Ka8, Ka1 et Ka2* sont bloqués (Figure II.13), on a la tension de sortie est :

$$Vao = 0 \dots \dots \dots (II.6)$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$VKa1 = VKa2 = VKa7 = VKa8 = +E/4 \dots \dots \dots (II.7)$$

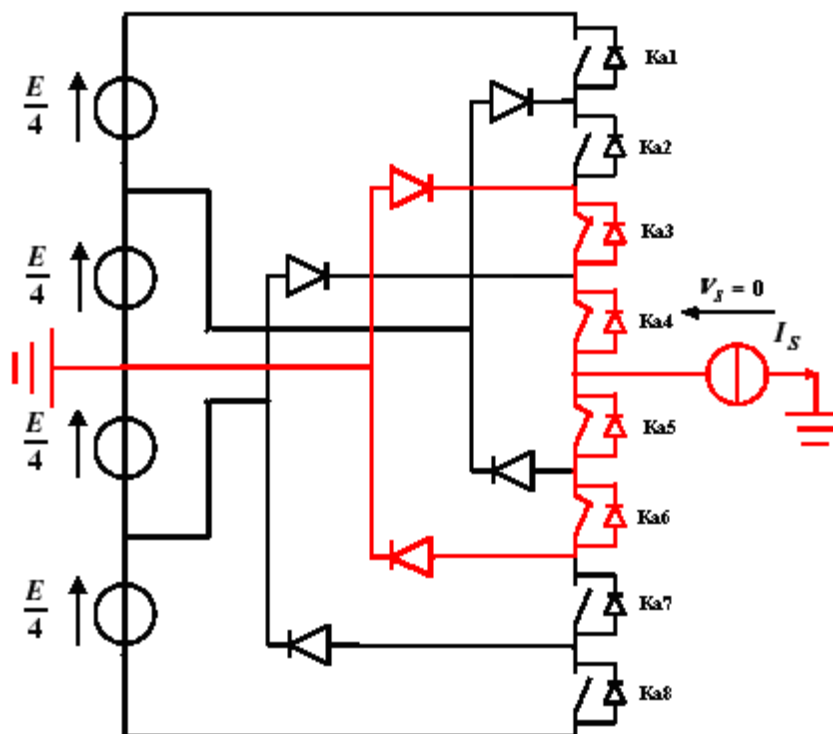


Figure II.13 : 3ème configuration du 1er bras

- **Quatrième configuration {00011110}**

Ka4, Ka5, Ka6, et Ka7 sont passants et *Ka8, Ka1, Ka2 et Ka3* sont bloqués (Figure II.14), on a la tension de sortie est :

$$V_{ao} = -E/4 \dots \dots \dots (II.8)$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est:

$$V_{Ka1} = V_{Ka2} = V_{Ka3} = V_{Ka8} = +E/4 \dots \dots \dots (II.9)$$

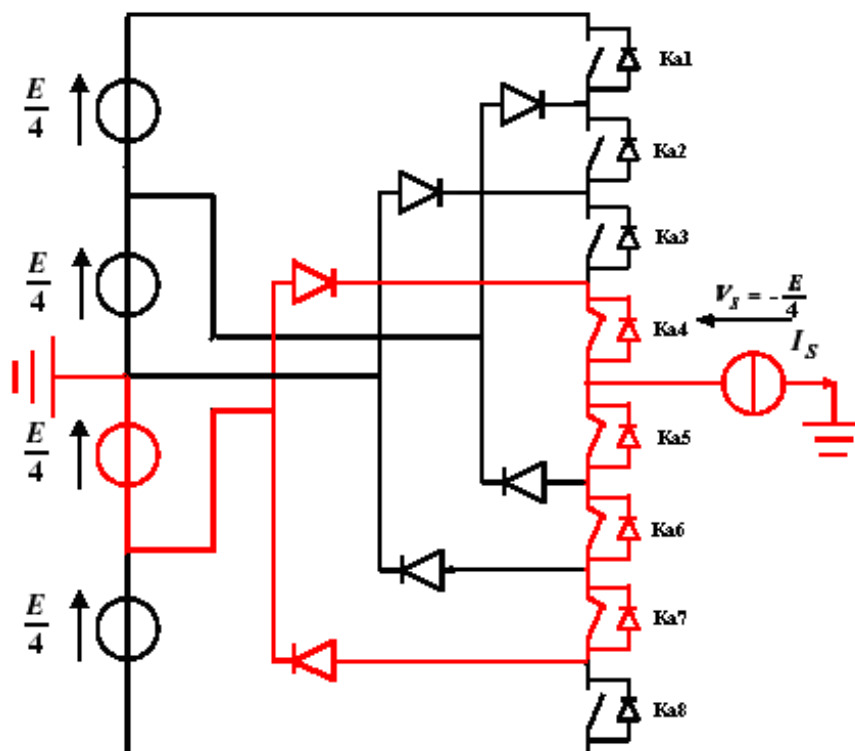


Figure II.14 : 4ème configuration du 1er bras

- Cinquième configuration {00001111}

$Ka5$, $Ka6$, $Ka7$, et $Ka8$ sont passants et, $Ka1$, $Ka2$, $Ka3$ et $Ka4$ sont bloqués (Figure II.15), on a la tension de sortie est :

$$V_{ao} = -E/2 \dots \dots \dots (II.10)$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{Ka1} = V_{Ka2} = V_{Ka3} = V_{Ka4} = +E/4 \dots \dots \dots (II.11)$$

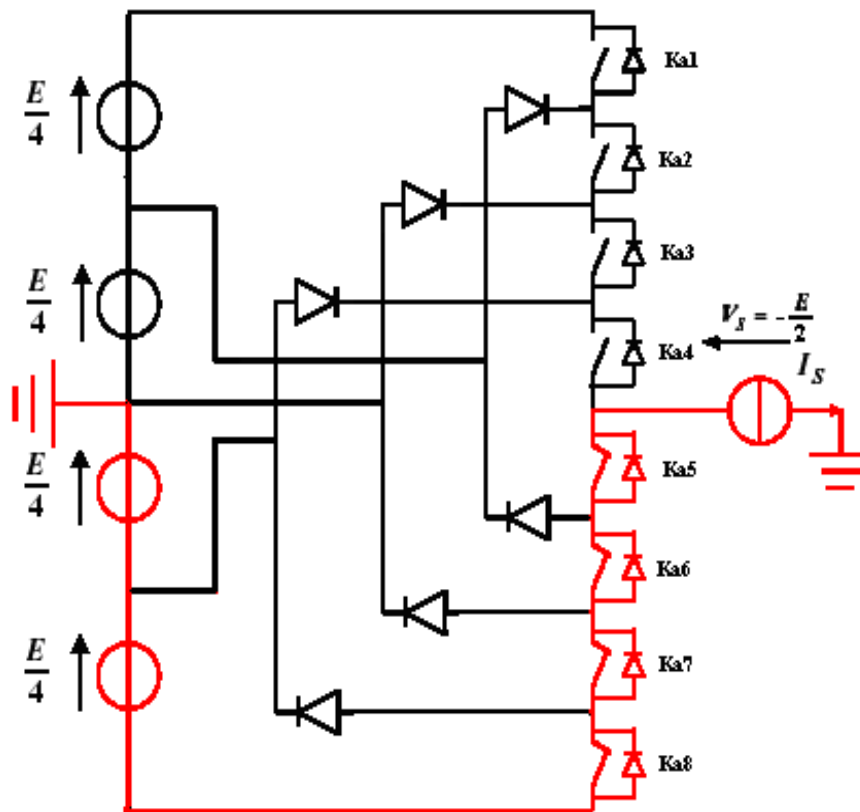


Figure II.15 : 5ème configuration du 1er bras

Voici le tableau suivant qui montre les différentes tension de sortie V_{ao} et l'états des interrupteurs d'un onduleur a cinq niveau :

<i>Etat des interrupteurs</i>								<i>Tension de sortie V_{ao}</i>
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 II.5 : Table de commutation de l'onduleur NPC 5 niveaux [A]

La Figure II.16 représente les signaux de commande de chaque interrupteur, ainsi que la forme d'onde de la tension de sortie V_{ao} .

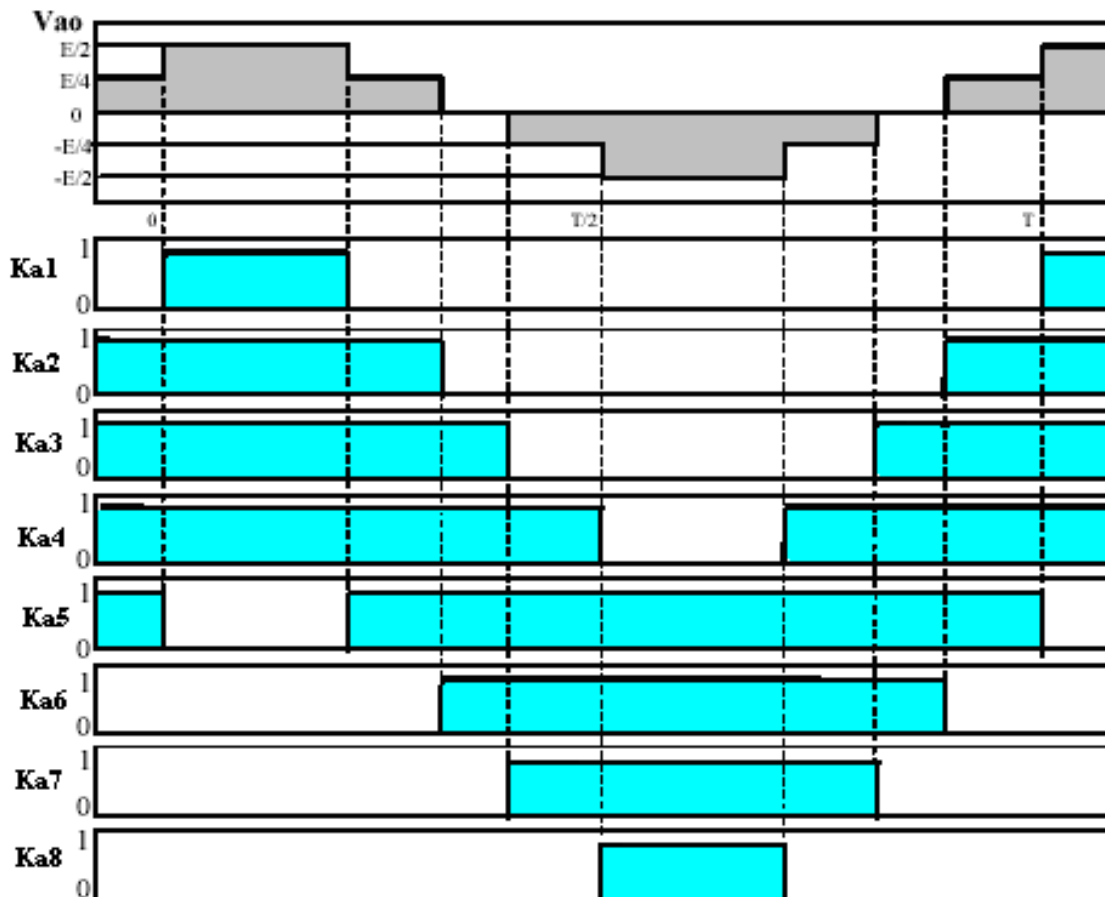


Figure II.16 : Forme d'onde de la tension de sortie d'un bras d'onduleur à cinq niveaux de type NPC [A]

II.7.2.3 Modélisation de l'onduleur triphasé à cinq niveaux à structure NPC [B]

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 II.5. et Figure II.16).

Étude et modélisation de l'onduleur cinq niveaux à structure NPC

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 :

$$K_{a1}=K_{a5}$$

$$K_{a2}=K_{a4}$$

$$K_{a3}=K_{a6}$$

$$K_{a7}=k_{a1}K_{a2}K_{a3}$$

$$K_{a1}=K_{a4}K_{a5}K_{a6}$$

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.

II.7.2.4 Expressions 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 :

$$V_{an}+V_{bn}+V_{cn} = 0 \dots\dots\dots (II.12)$$

En outre en appliquant la loi des mailles nous obtenons :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \dots\dots\dots (II.13)$$

(II.12) et (II.13) donnent :

$$V_{on} = -\frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \dots\dots\dots (II.14)$$

Finalement de (II.12) et (II.14) nous tirons :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (II.15)$$

II.8 Etat de l'art des stratégies de commande des onduleurs Multi-niveaux [C]

Les stratégies de commande des convertisseurs multi-niveaux sont adaptées de celles qui sont appliquées aux convertisseurs à deux niveaux. Dans cette section, nous présentons quelques unes d'entre elles.

II.8.1 Commande par paliers

La méthode de commande par paliers consiste à quantifier la grandeur de référence (L'image du fondamental), en un nombre déterminé de paliers, comme l'illustre la Figure II.17.

Cette méthode de commande offre deux degrés de liberté à l'utilisateur :

- Le convertisseur peut être à pas uniforme, dans ce cas les tensions $E_1, E_2, E_3 = E$. Les angles de commutations α_i sur une période ($\alpha_i, i = 1 \dots \alpha / 2$) peuvent donc être choisis de façon à atteindre certaines performances.

- Le pas de la tension et les angles de commutation peuvent être choisis afin de pouvoir obtenir la minimisation du taux de distorsion harmonique, la suppression de certaines harmoniques à basses fréquences entre autres.

Cette commande est facile à implémenter et pour passer d'un niveau de tension à l'autre les angles de commutation peuvent être déterminés à l'avance.

Dans cette technique de commande, on constate que les différentes cellules n'ont pas une même durée de conduction. Il en résulte donc un déséquilibre dans la répartition des pertes par commutation et par conduction. Par une rotation adéquate des commutations, ces pertes peuvent être équilibrées entre les différentes cellules, sans modification de l'onde de tension générée à la sortie du convertisseur, [40].

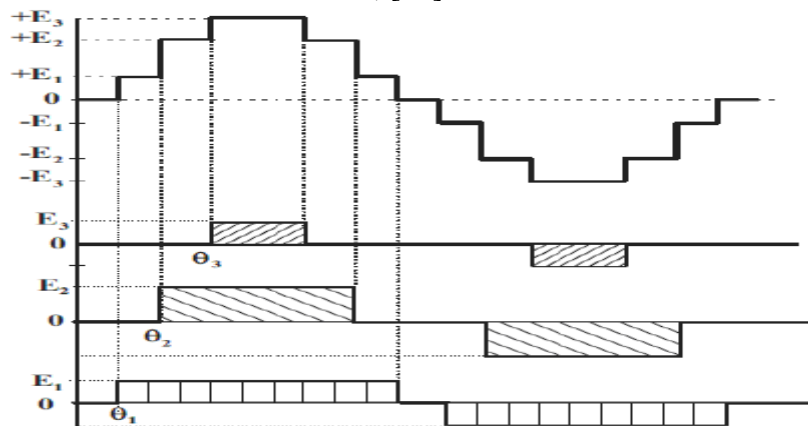


Figure II.17 : Forme d'onde multi-niveau (7 niveaux) générée par une commande par paliers et tensions aux bornes de trois cellules en série sur une phase.

II.8.2 Modulation Sinusoïdale (MS)

II.8.2.1 MS classique mono-porteuse

La technique de modulation de largeur d'impulsions (MLI ; en anglais : Pulse Width Modulation, soit PWM), est la plus utilisée pour la commande des onduleurs classiques (deux niveaux). C'est aussi la stratégie de modulation la plus utilisée dans les onduleurs multi-niveaux dite à modulation sinusoïdale.

Elle consiste à comparer d'une onde de référence ou modulante, généralement sinusoïdale (le signal à synthétiser) à une porteuse généralement triangulaire Figure (II-18), [40].

Le signal de sortie change d'état à chaque intersection de la modulante et de la porteuse.

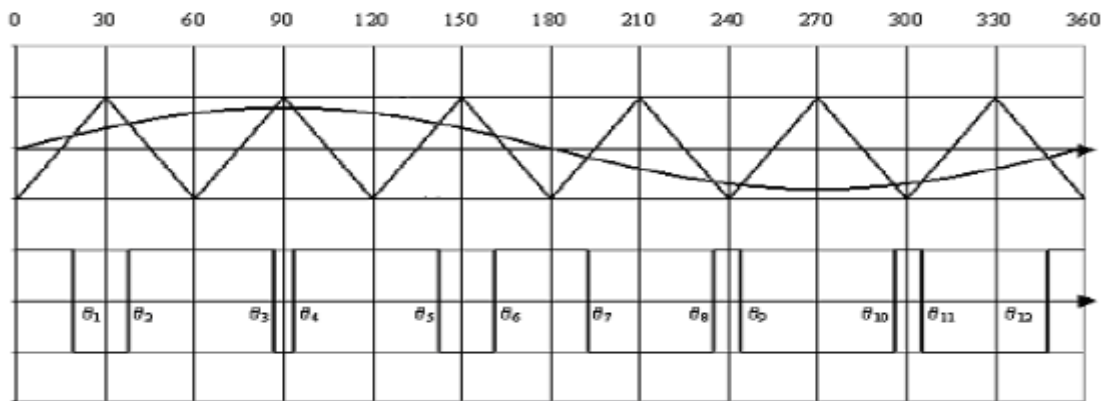


Figure II.18 : MLI Classique intersective.

II.8.2.2 Modulation sinusoïdale multi-porteuse

Dans les onduleurs multi-niveaux, nous observons souvent les modulations sinusoïdales multi-porteuses.

On peut diviser la modulation sinusoïdale multi-porteuse en trois catégories :

- 1) Classique;
- 2) Commande modifiée de premier type ;
- 3) Commande modifiée de second type ;

En général, pour la commande d'un onduleur à k niveaux, nécessite $k-1$ ondes Porteuses.

II.8.2.3 Modulation sinusoïdale multi-porteuse classique

Dans cette technique de modulation nous utilisons les différentes porteuses afin de pouvoir construire toutes les commandes nécessaires à tous les interrupteurs. Dans cette technique, la référence est comparée en permanence avec chacun des signaux triangulaires. Si la référence est supérieure à un signal triangulaire, le signal de sortie vaut 1, donc l'interrupteur correspond à cette modulation est actif, si la référence est inférieure à un signal triangulaire, le signal de sortie change donc d'état.

A titre d'exemple, pour un onduleur à trois niveaux, les deux signaux triangulaires ont même fréquence et même amplitude, c'est la modulation sinusoïdale à double triangle. La Figure II.19 ci-dessous montre une modulation sinusoïdale avec deux signaux triangulaires.

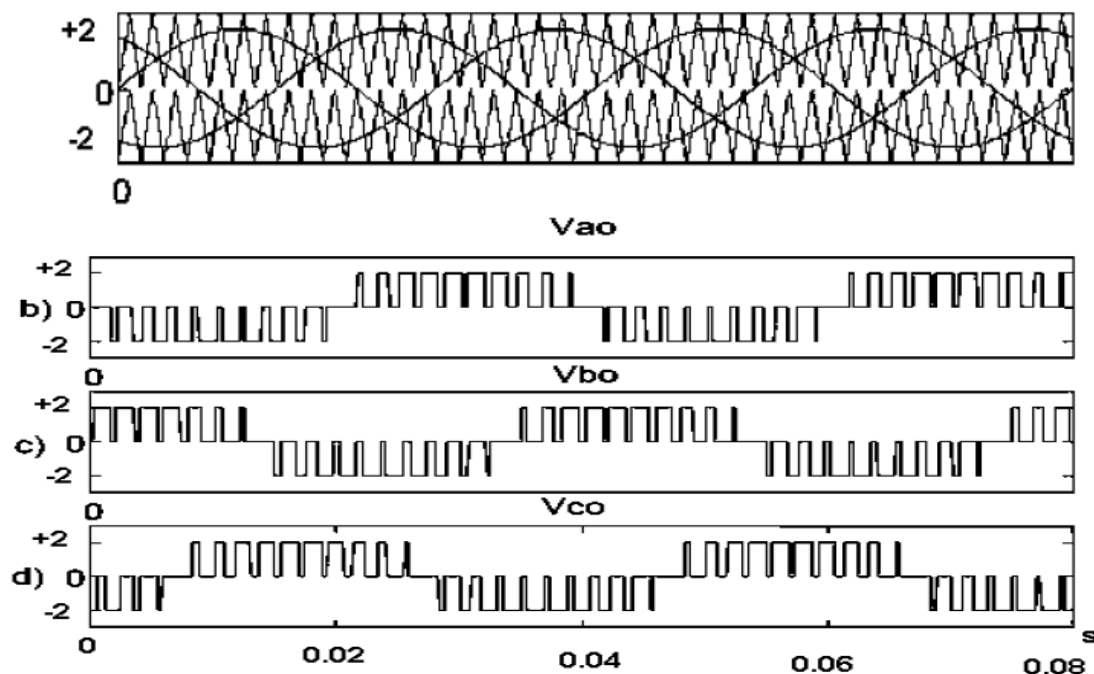


Figure II.19 : Principe de la MLI à doubles triangles.

II.8.2.4 Modulation sinusoïdale modifiée de premier type (MSM1)

Ce genre de modulation permet de diminuer la valeur de la tension homopolaire générée par les techniques de modulation MLI, [40]. On y utilise trois signaux sinusoïdaux de référence V_{ref1} , V_{ref2} et V_{ref3} décalés de 120° , et une seule onde porteuse. Les résultats de la comparaison donnent trois nouveaux signaux respectivement $V1$, $V2$ et $V3$, Figure II.20. On combine ces signaux entre eux pour donner les signaux :

$$V_{AO} = \frac{(V1 - V2)}{2}$$

$$V_{BO} = \frac{(V2 - V3)}{2} \dots\dots\dots(II.16)$$

$$V_{CO} = \frac{(V3 - V1)}{2}$$

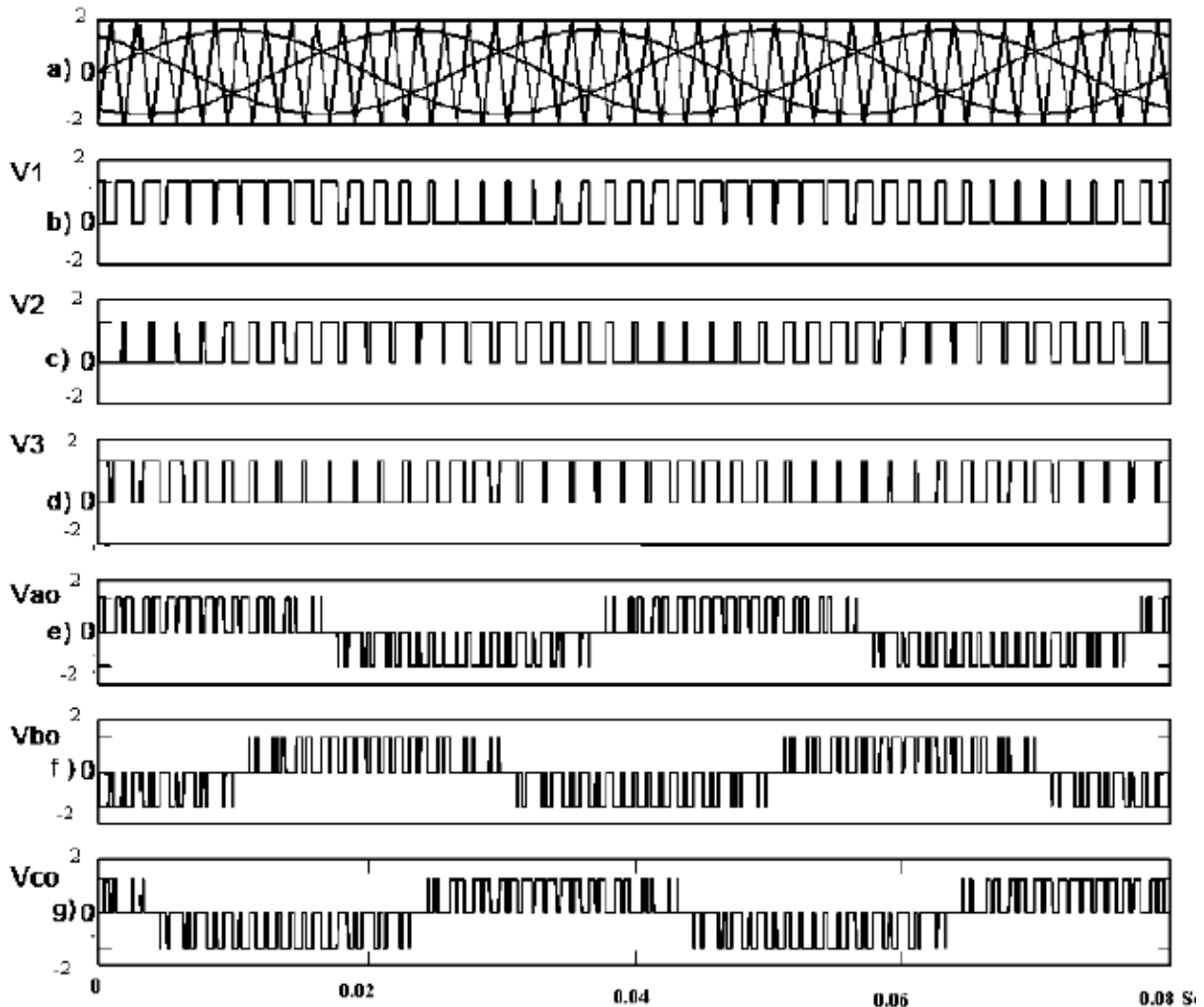


Figure II.20 : Modulation sinusoïdale modifiée.

Afin de généraliser cette technique aux onduleurs de niveaux supérieurs à trois, on doit déterminer le nombre de triangulaire requises pour les niveaux impairs. Cette relation est définie par la relation suivante :

$$np = \frac{k-1}{2} \dots\dots\dots(\text{II.17})$$

- np est le nombre de triangulaires
- k est le nombre de niveau.

II.8.2.5 Modulation sinusoïdale modifiée de deuxième type (MSM2)

Cette technique de modulation développée pour la première fois par Menzies est aussi appelée MLI optimale (Sub-Harmonic Optimal "SHO-PWM") Figure II.21. Dans cette technique, nous comparons le signal de référence avec les multi-porteuses (multi-triangulaire) selon la figure II.22. Cette méthode prend instantanément la moyenne du maximum et du minimum des trois tensions de référence (Va, Vb, Vc) et soustrait cette valeur de chacune des tensions de référence, c'est-à-dire :

$$V_{offset} = \frac{MAX(V_a, V_b, V_c) + MIN(V_a, V_b, V_c)}{2} \dots\dots\dots (II.18)$$

$$V_{aSHO} = V_a - V_{offset}$$

$$V_{bSHO} = V_b - V_{offset} \dots\dots\dots (II.19)$$

$$V_{cSHO} = V_c - V_{offset}$$

Le schéma équivalent analogique pour la commande est illustré à la figure (II-21).

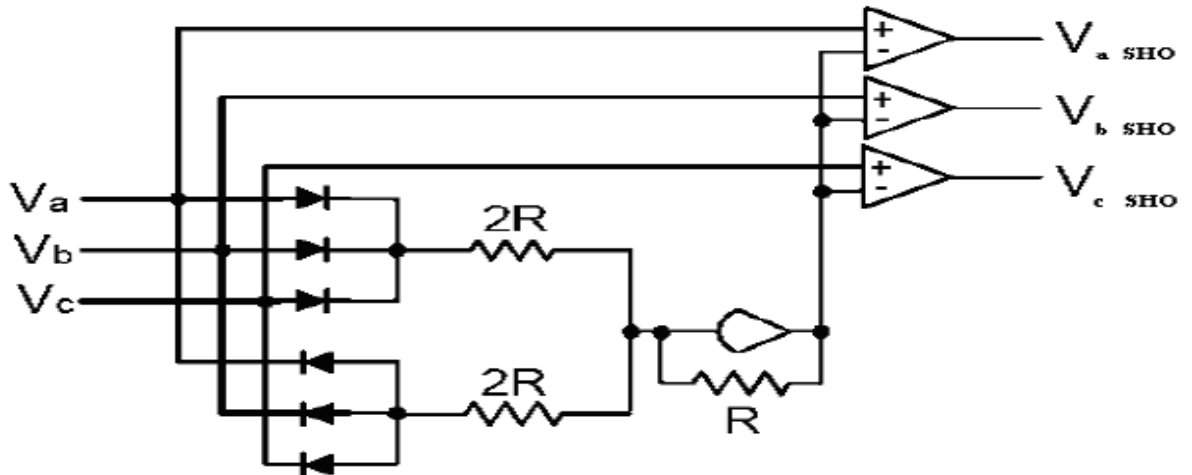


Figure II.21 : Circuit analogique qui ajoute la séquence de zéro pour SFO-PWM.

Afin de pouvoir appliquer cette méthode aux onduleurs classiques, il faut connaître :

- 1) La modulation d'amplitude :

$$m_a = \frac{A_r}{A_p} \dots\dots\dots (II.20)$$

- 2) Le rapport de fréquence :

$$m_f = \frac{f_p}{f_r} \dots\dots\dots (II.21)$$

- A_r : L'amplitude de référence.
- A_p : L'amplitude de porteuse.
- f_r : La fréquence de référence.
- f_p : La fréquence de porteuse.

✓ Pour utiliser le MSM2 à un onduleur multi-niveau, il faut connaître trois paramètres importants :

- 1) Le nombre de niveau est k.
- 2) La modulation d'amplitude pour les onduleurs multi-niveaux qui peut être calculé:

$$m_a = \frac{A_r}{(K-1)A_p} \dots\dots\dots (II.22)$$

- Dans la méthode SHO, la minimum et la maximum valeur de modulation peut être calculé comme :

$$ma_{min} = \frac{K-3}{K-1.4} \dots\dots\dots (II.23)$$

$$ma_{min} = 1.15$$

3) Le rapport de fréquence :

$$mf = \frac{fp}{fr} \dots\dots\dots (II.24)$$

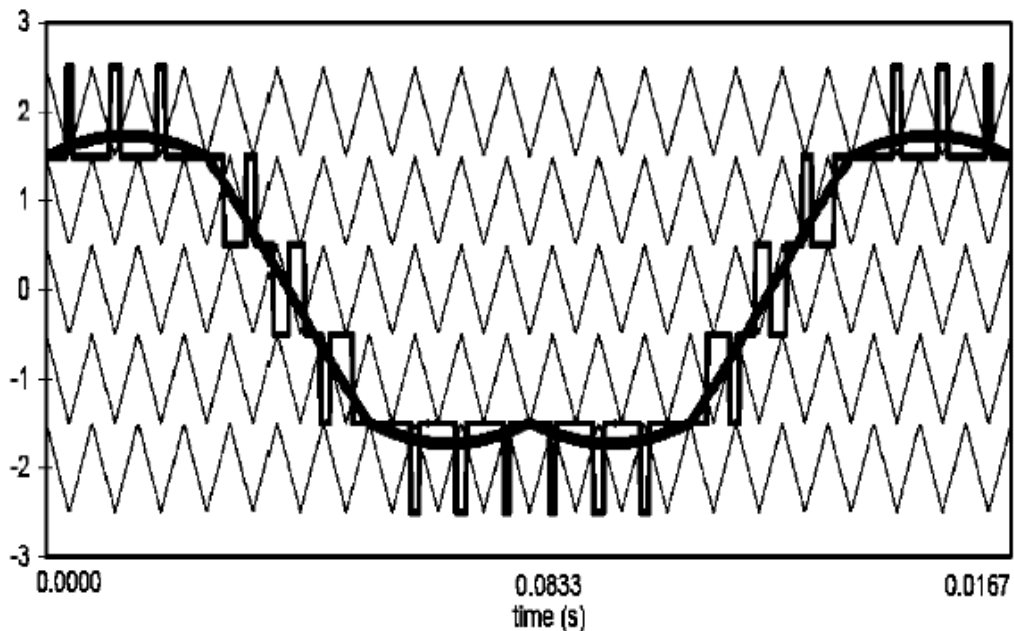


Figure II.22 : Forme d'ondes des multi porteuses est basé sur SFO-PWM ($k=6$, $mf=21$, $ma=0.8$).

La technique SHO peut augmenter le taux de modulation de 15 % pour attendre l'over-modulation (saturation).

Pour résumer les stratégies de commande les plus courantes, Figure II.23 illustre trois grandes techniques de la méthode de porteuse utilisées dans un onduleur classique et qui peut être également appliquée à un onduleur multi-niveau :

- MLI sinusoïdale (MLIS ou en anglais SPWM);
- Injection de troisième harmonique à MLI (THMLI ou en anglais THPWM ou encore SHOPWM);
- MLI vectoriel (MLIV);
- MLIS est une méthode très populaire dans les applications industrielles, [40].

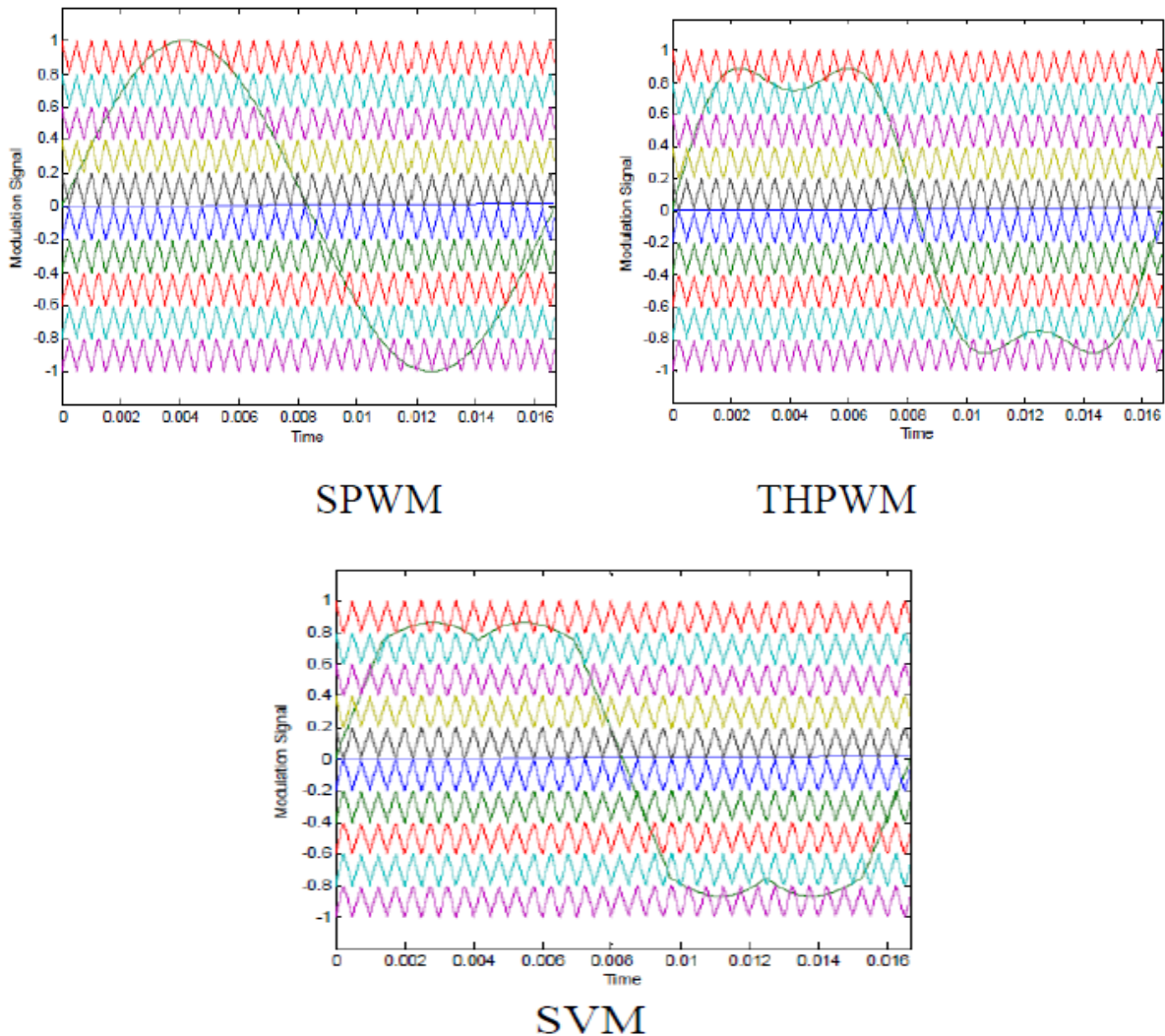


Figure II.23 : Les trois techniques importantes pour la stratégie de commande.

Conclusion

La méthode des onduleurs multi-niveaux représente un domaine de recherche très important. C'est une Recherche liée aussi à des applications toujours plus performantes et de grandes puissances. Dans ce chapitre on a présenté la description des principales topologies de la conversion multi-niveaux avec leurs avantages et inconvénients et leurs domaines d'applications. 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.

Les onduleurs NPC sont intéressants pour les applications triphasées nécessitant peu de niveaux. Les deux structures d'onduleurs NPC et à cellule imbriquée sont avantageuses pour les applications avec échange de puissance active. L'ondeur en cascade est avantageux pour les applications monophasées. Il convient même pour les très grandes tensions.

Étude et modélisation de l'onduleur cinq niveaux à structure NPC

En outre, nous avons présenté la commande d'un onduleur cinq niveaux NPC, et les tensions simples délivrées. Un modèle mathématique est établi, étant implémenté sur MATLAB, nous allons le simuler et présenter les résultats dans le chapitre suivant.

Introduction

Dans ce chapitre nous nous intéressons aux performances liées à la qualité des signaux (courant et tension) délivrés par le convertisseur cinq niveaux. Pour cela nous allons recourir à une simulation sous Matlab/Simulink.

III.I Paramètres de simulation

Nous utilisons l'algorithme à pas fixe, « ode5 » de Simulink, avec un pas de simulation $h=0.5 \cdot 10^{-5}$ s, assez faible par rapport à la plus petite constante de temps du système modélisé. Cependant, l'utilisation d'un pas variable donne exactement les mêmes résultats.

La fréquence de la tension délivrée par l'onduleur a été fixée à 50HZ. La tension continue d'alimentation de l'onduleur est égale à 200V.

- Paramètres du moteur asynchrone :

Nous avons utilisé un modèle du moteur asynchrone présent dans la bibliothèque de Simulink

$$R_s = 0,029 \Omega.$$

$$L_s = \left(\frac{0,226}{377} \right) \text{ H.}$$

$$R_r = 0,022 \Omega.$$

$$L_r = \left(\frac{0,226}{377} \right) \text{ H.}$$

$$M = \left(\frac{3,04}{377} \right) \text{ H.}$$

$$f = 50 \text{ HZ.}$$

III.2 Remarque concernant le modèle des semi-conducteurs

Nous avons considéré les semi-conducteurs parfaits. Pour cela, nous avons introduit un modèle mathématique du convertisseur cinq niveaux pour simuler les tensions des trois phases, puis ces tensions pilotent des blocs « générateurs contrôlés » présents dans la bibliothèque Simulink.

III.3 Différentes variantes de Simulation

Sachant que la seule variante que nous avons rencontré dans la simulation est celle où les durées de chaque niveaux sont toutes égales, et dans le but de se rapprocher le plus à la sinusoïde, nous nous sommes proposé d'explorer une étude très simple et intuitive, en rendant ces durées variables. Pour cela, nous avons utilisé le tâtonnement. En effet, bien qu'il est théoriquement possible d'utiliser la définition de la transformée de Fourier, sa mise en application reste extrêmement complexe vu le nombre important de paramètres et contrairement au cas de la modulation pré-calculée où il s'agit d'équation (dans ce cas aussi la

Simulation et interprétation des résultats

résolution des équations est très complexe), dans notre cas il s'agit de minimiser le THD (taux de distorsion harmonique).

Pour cela, nous avons divisé les étapes de conduction par étapes, il en résulte 9 étapes, lorsqu'elles sont de durées égales, elles se divisent comme suit (T représente la période, E la tension continue d'alimentation de l'onduleur) :

- Etape : $t=0$ à $t=T/6$: $V=0V$
- Etape2 : $t=T/6$ à $t=3T/6$: $V=E/4$
- Etape3 : $t=3T/6$ à $t=5T/6$: $V=E/2$
- Etape4 : $t=5T/6$ à $t=7T/6$: $V=E/4$
- Etape5 : $t=7T/6$ à $t=9T/6$: $V=0$
- Etape6 : $t=9T/6$ à $t=T$: $V=-E/4$
- Etape7 : $t=T$ à $t=3T/6$: $V=-E/2$
- Etape8 : $t=3T/6$ à $t=5T/6$: $V=-E/4$
- Etape9 : $t=5T/6$ à $t=T$: $V=0$

Nous avons rajouté aux étapes 3 et 7 une durée égale à $2a$, cette même durée est soustraite aux étapes 2, 4, 6 et 8.

Durée étapes 3 et 7 = $T/6 + 2a$ (Étapes de niveau de tension = $E/2$).

Durée étapes 2, 4, 6 et 8 = $T/6 + 2a$ (Étapes de niveau de tension = $E/4$).

Nous avons exploré plusieurs cas en commençant par $a=5\%$ ($0.05.T/6$), nous allons exposer tous les THD obtenus pour chacun des cas simulés, cependant nous allons nous contenter de trois cas seulement pour représenter les signaux électriques.

III.4 Résultats concernant le THD du courant de la première phase pour différents cas

- $a=0$: THD=2,73% (durées égales)
- $a=5\%$; THD=2.25%
- $a=5\%$; THD=.2%
- $a=9\%$: THD=0.92%
- $a=20\%$: THD=0,87%
- $a=22\%$: THD=0,85%
- $a=22.5\%$: THD=0.83%
- $a=23\%$: THD= 0,84%
- $a=25\%$: THD=0,87%
- $a=30\%$: THD=,08%
- $a=40\%$: THD=.56%

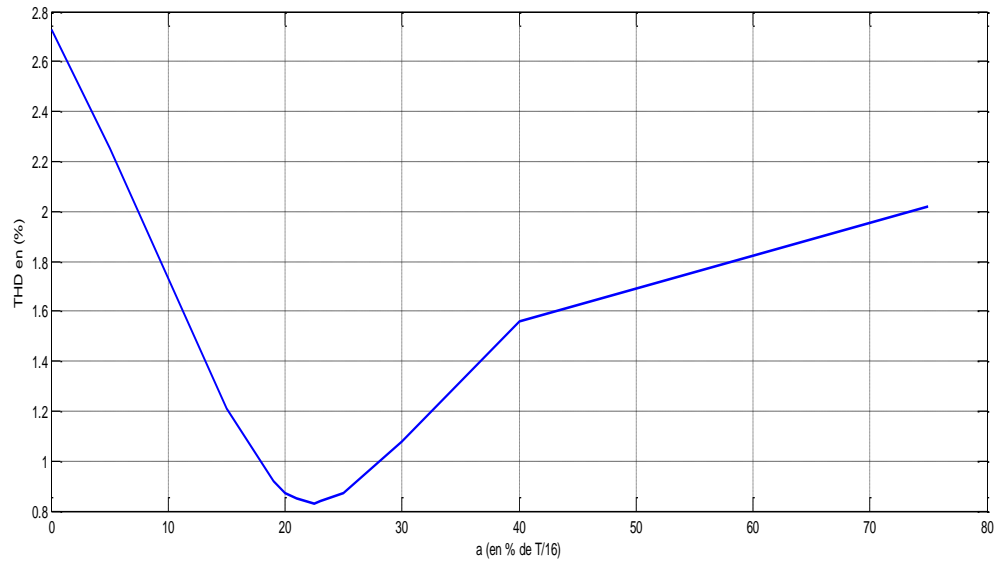


Figure III.1 : Variation du THD du courant de la phase a en fonction de la valeur de la durée ajoutée « a », et son zoom

- Nous remarquons que cette allure présente un minimum pour $a=22,5\%$, c'est le cas le plus favorable. En effet, cette valeur permet de diviser le THD par 3, ce qui est très significatif.

III.4.1 Cas où la durée « a » égale à 0 (durées des étapes égales)

Simulation et interprétation des résultats

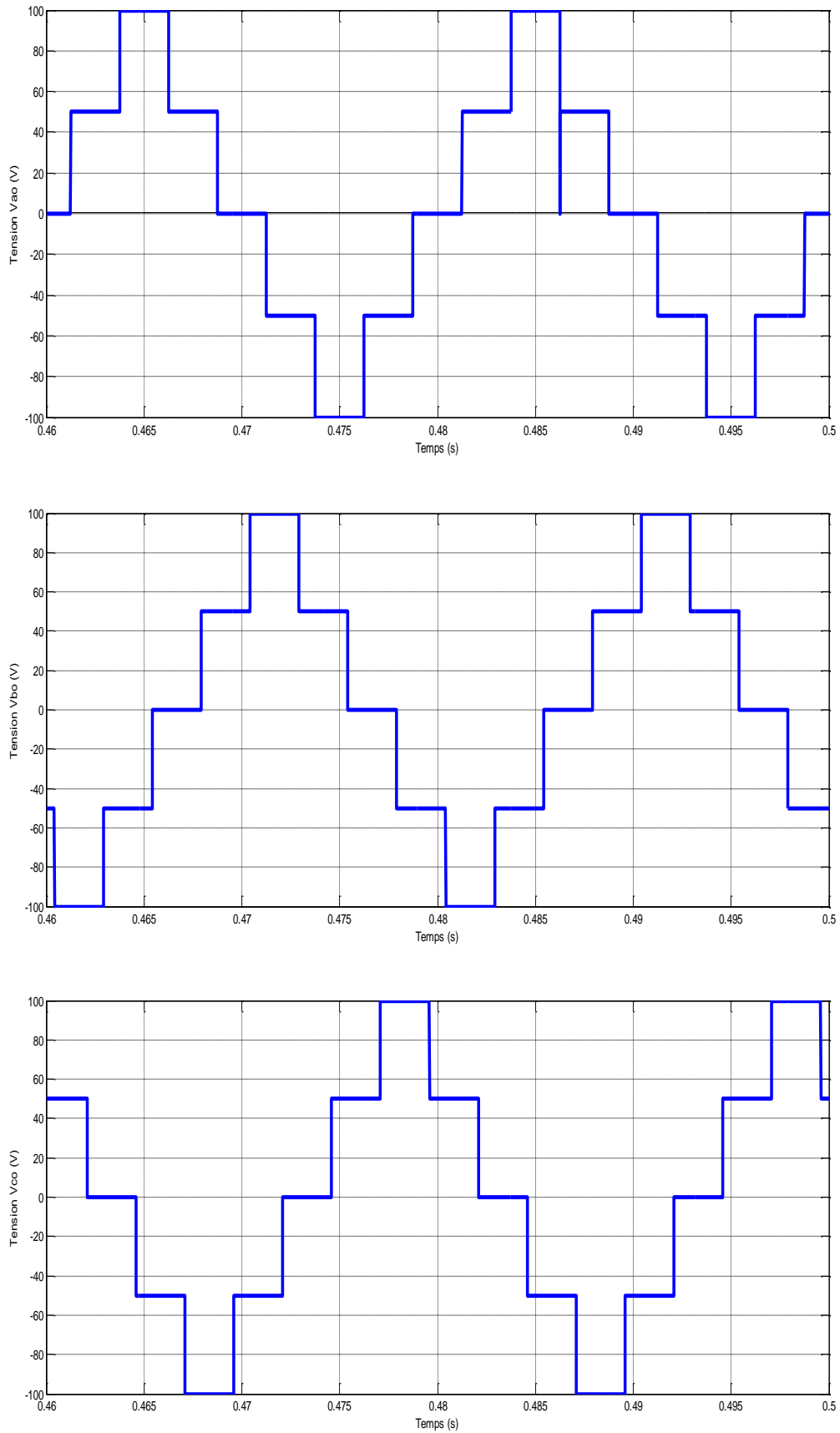


Figure III.2 : Tension simple Vao, Vbo, Vco sur les deux dernières périodes de simulation.

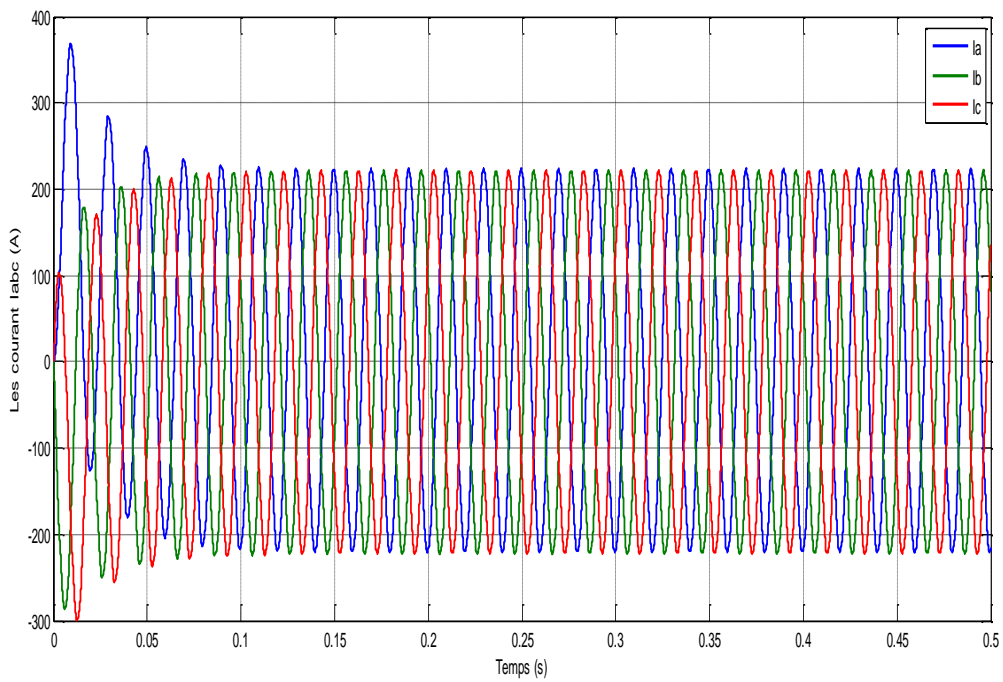


Figure III.3 : L'allure des courants de phase I_a , I_b et I_c

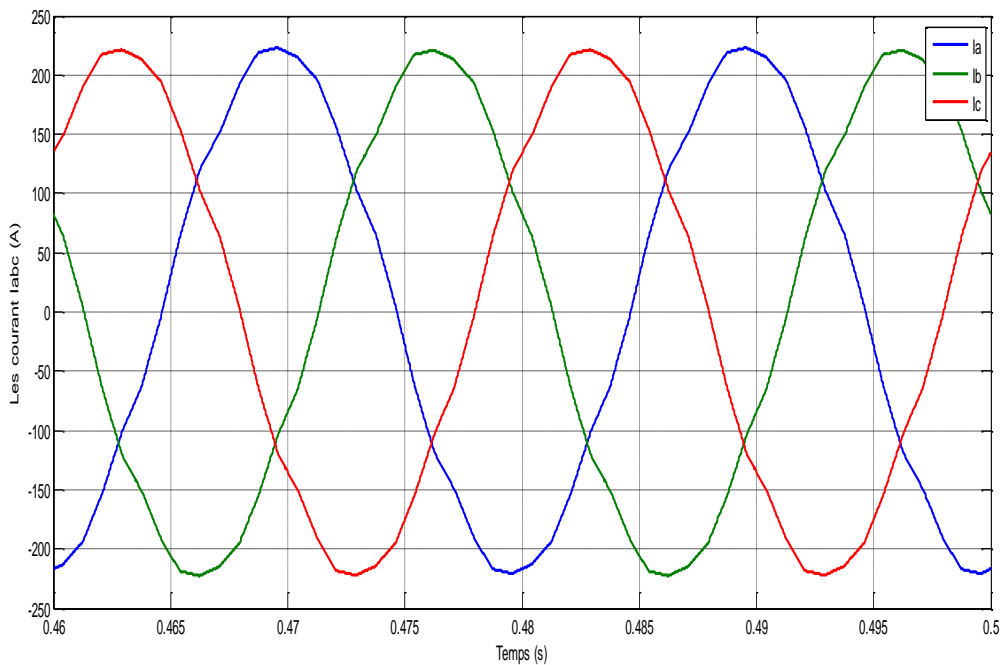


Figure III.4 : L'allure des courants de phase I_a , I_b et I_c et leurs zoom sur les deux dernières périodes de simulation.

Simulation et interprétation des résultats

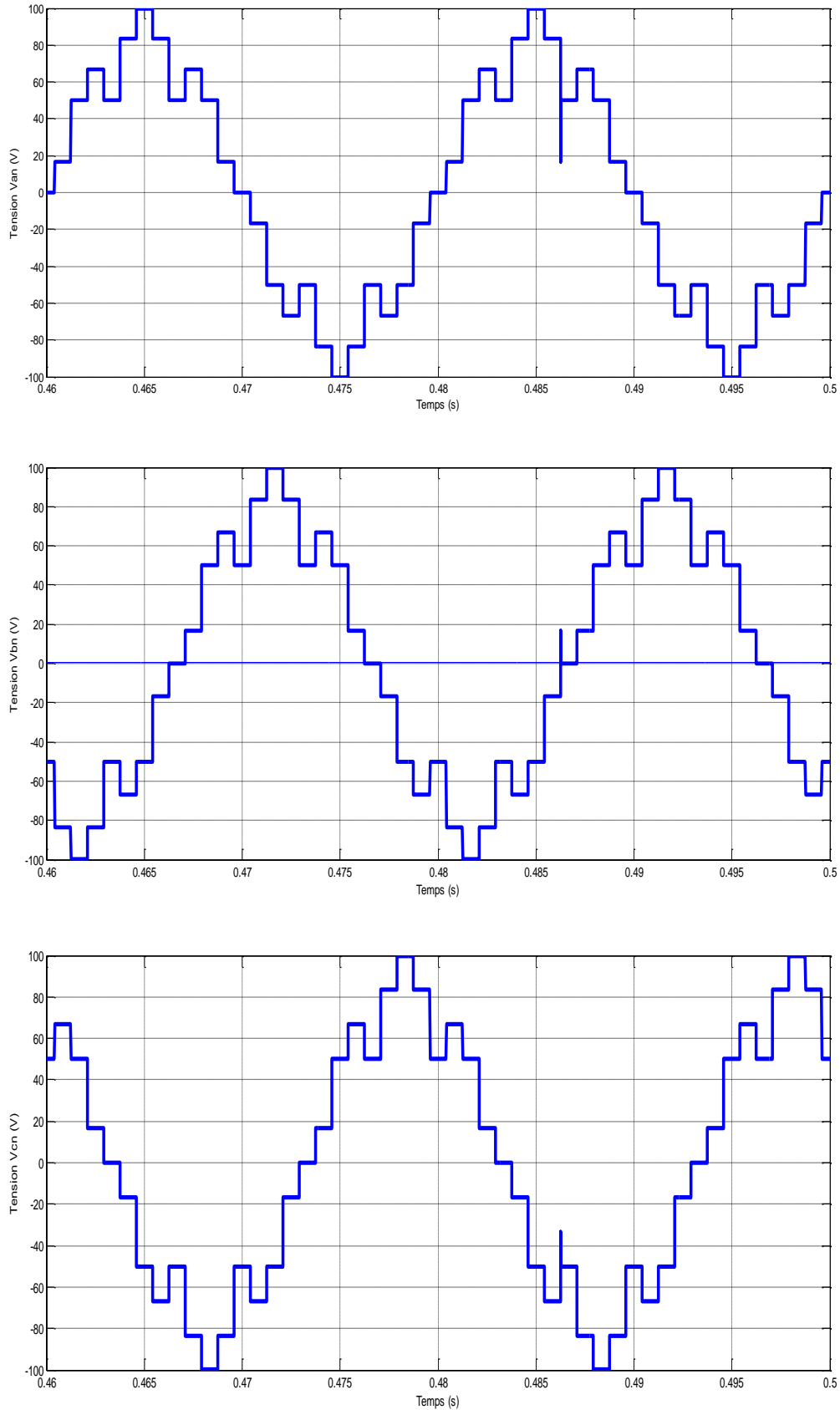


Figure III.5 : Tension de phase Van, Vbn, Vcn sur les deux dernières périodes de simulation.

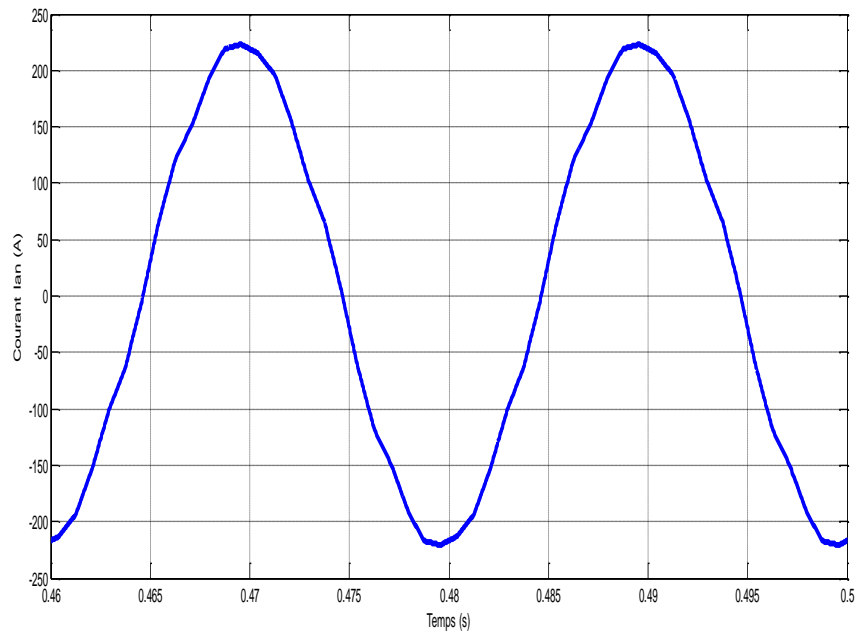


Figure III.6 : Courant de phase I_{an} sur les deux dernières périodes de simulation.

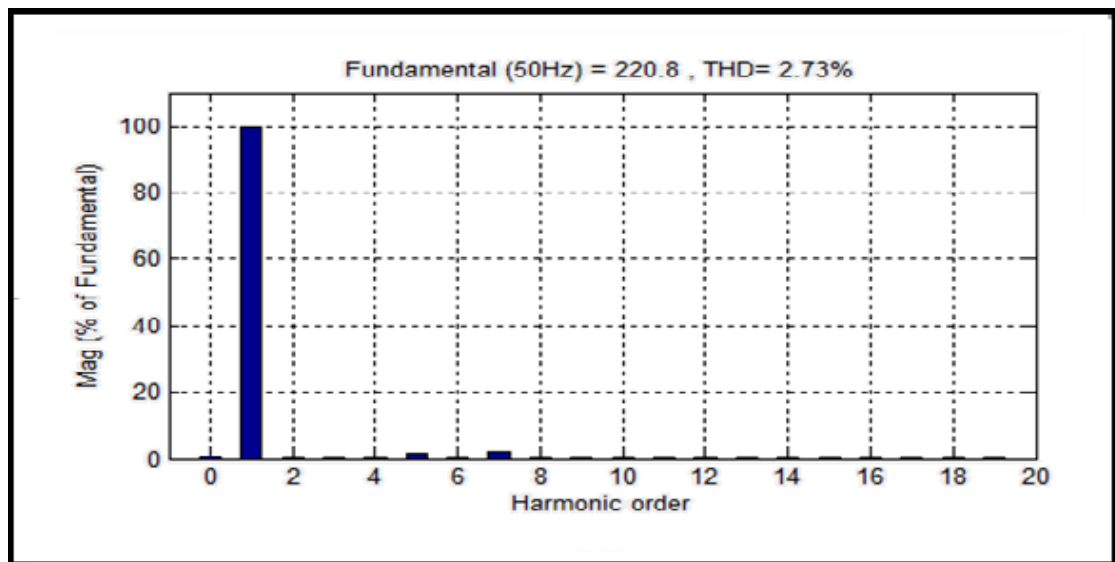


Figure III.7: Le spectre d'harmoniques du Courant I_{an} (en barre)

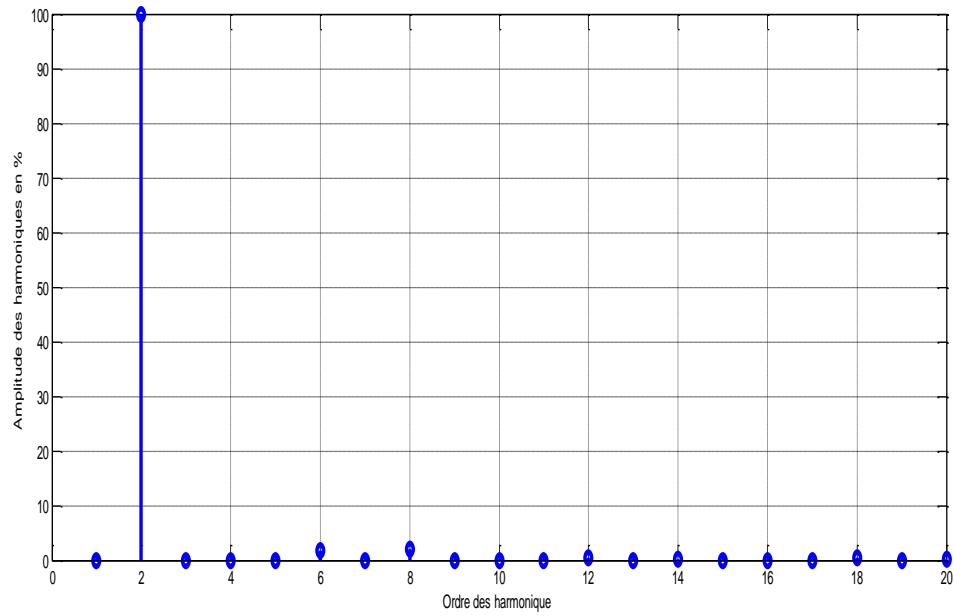


Figure III.8 : Le spectre d'harmoniques du Courant Ian

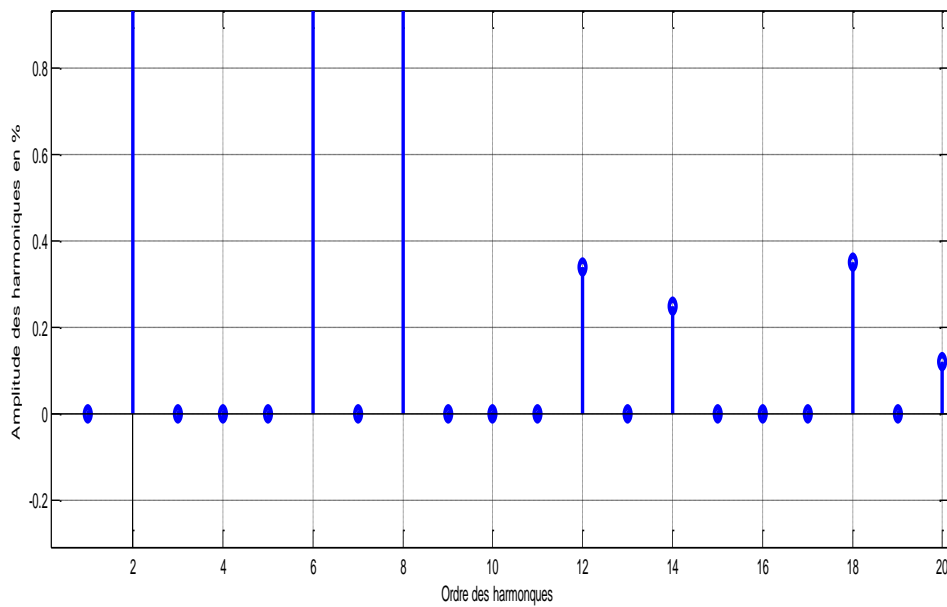


Figure III.9 : Le zoom du spectre d'harmoniques du Courant Ian.

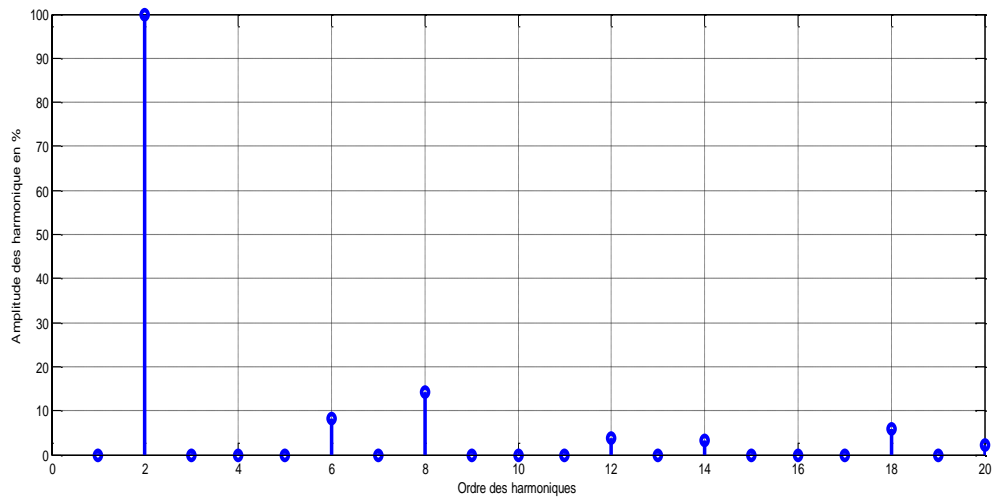


Figure III.10 : Le spectre d'harmoniques de la tension Van

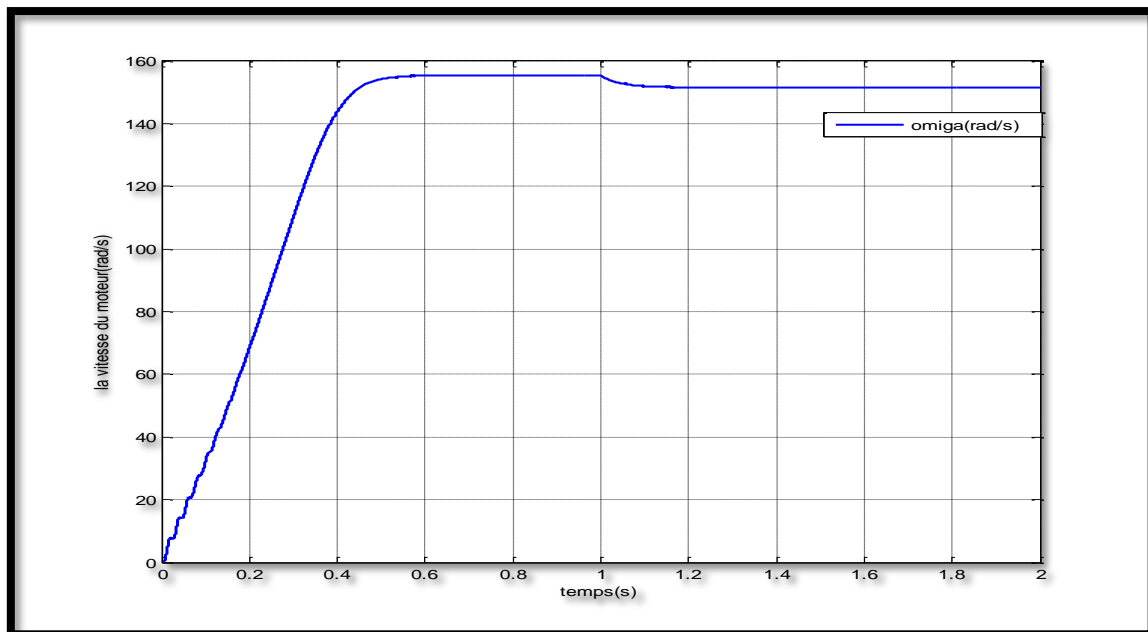


Figure III.11 : La vitesse du moteur (rd/s).

III.4.2 Cas où la durée « a » égale à 22.5% (cas le plus favorable)

Simulation et interprétation des résultats

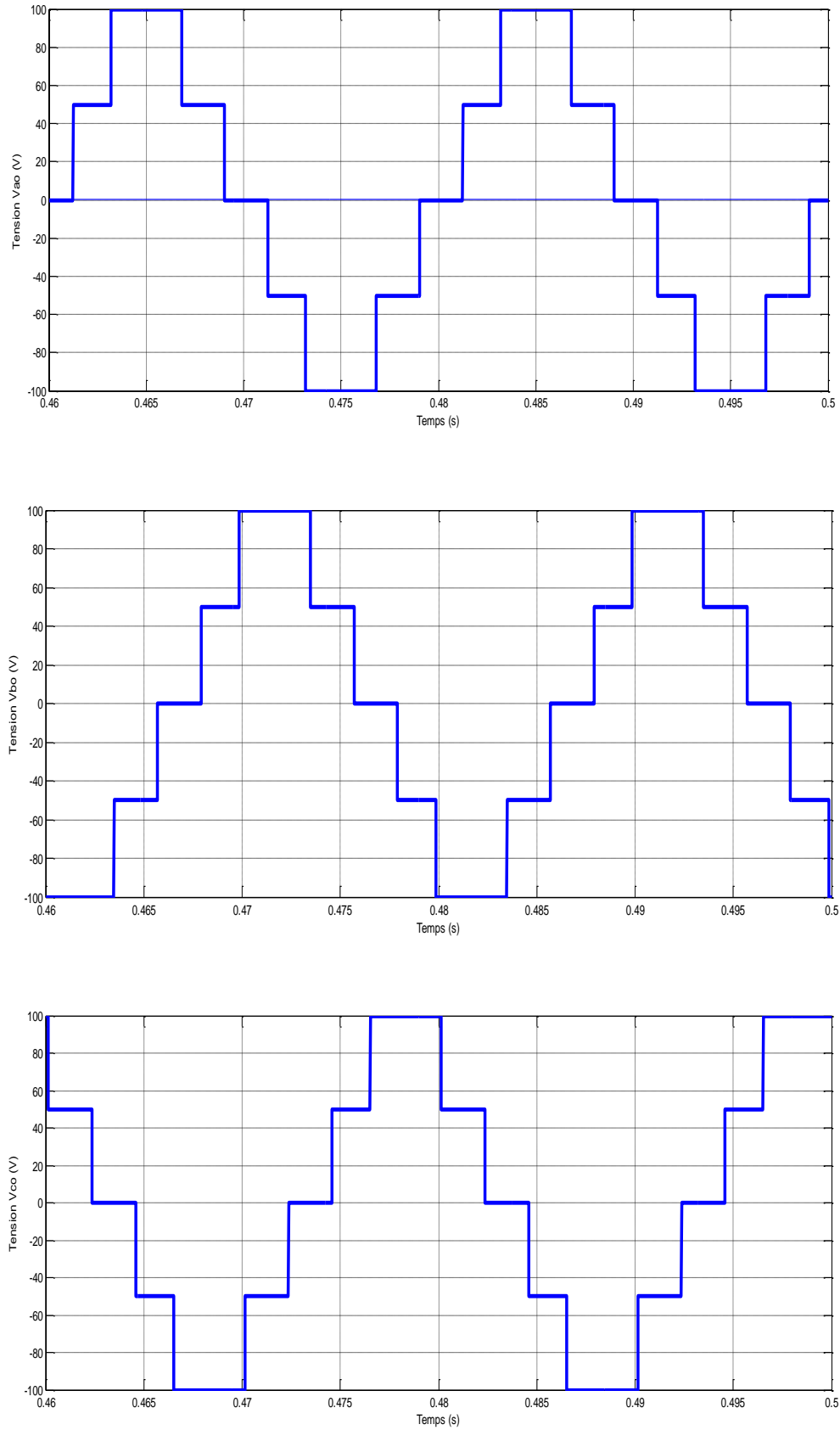


Figure III.12 : Tension de phase Vao, Vbo , Vco sur les deux dernières périodes de simulation.

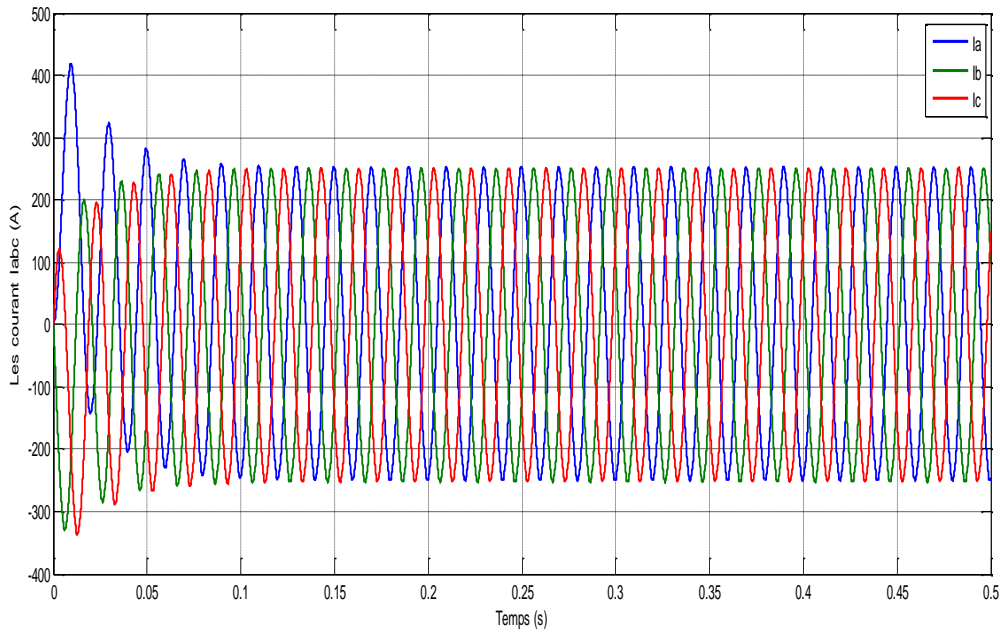


Figure III.13 : L'allure des courants de phase I_a , I_b et I_c

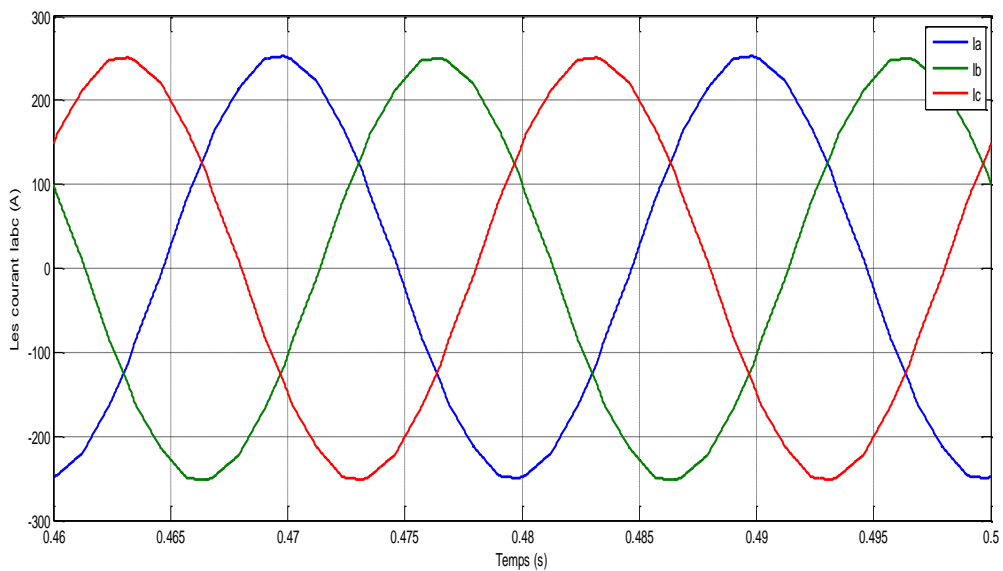


Figure III.14 : L'allure des courants de phase I_a , I_b et I_c et leurs zoom sur les deux dernières périodes de simulation

Simulation et interprétation des résultats

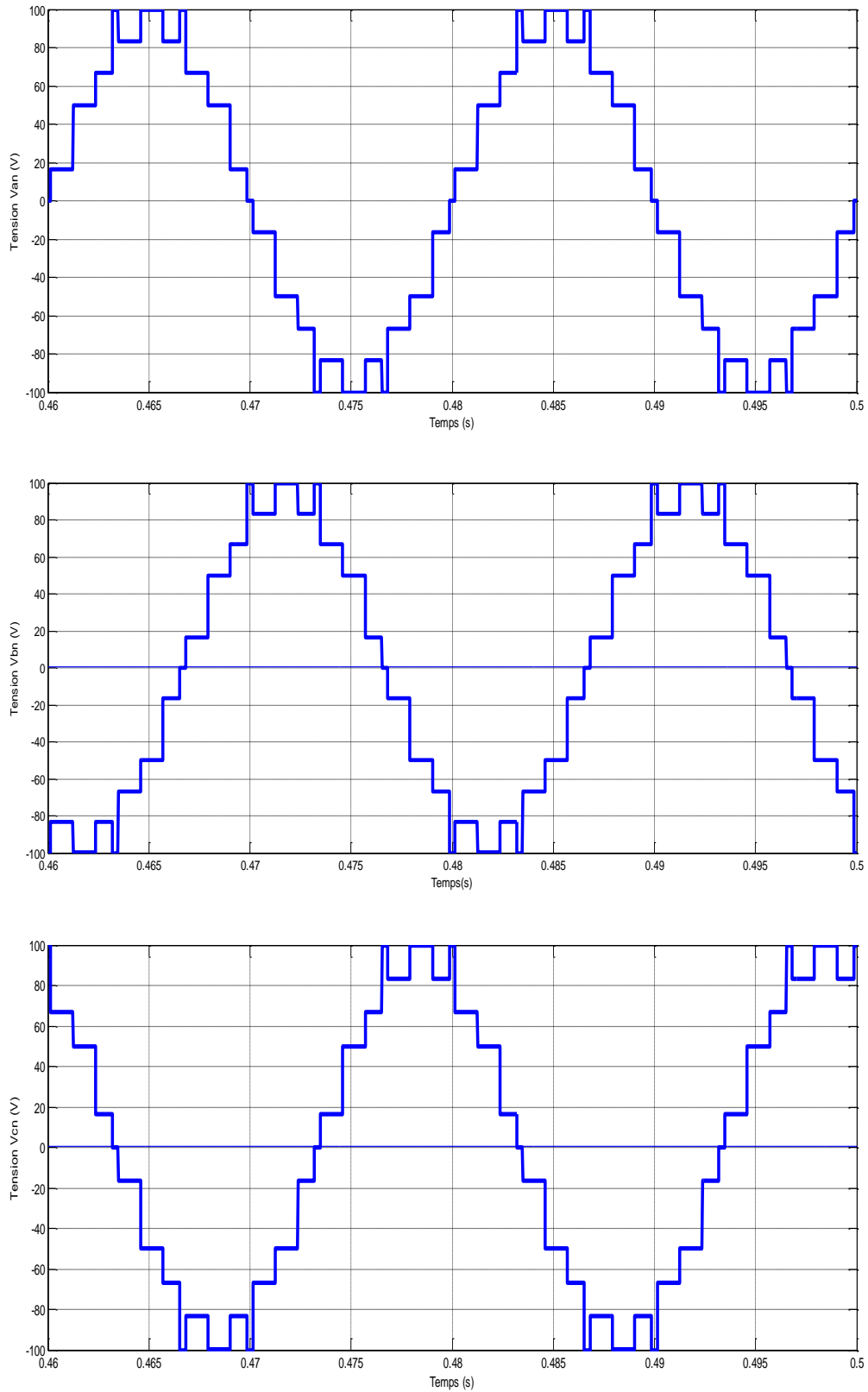


Figure III.15 : Tension de phase V_{an} , V_{bn} , V_{cn} sur les deux dernières périodes de simulation.

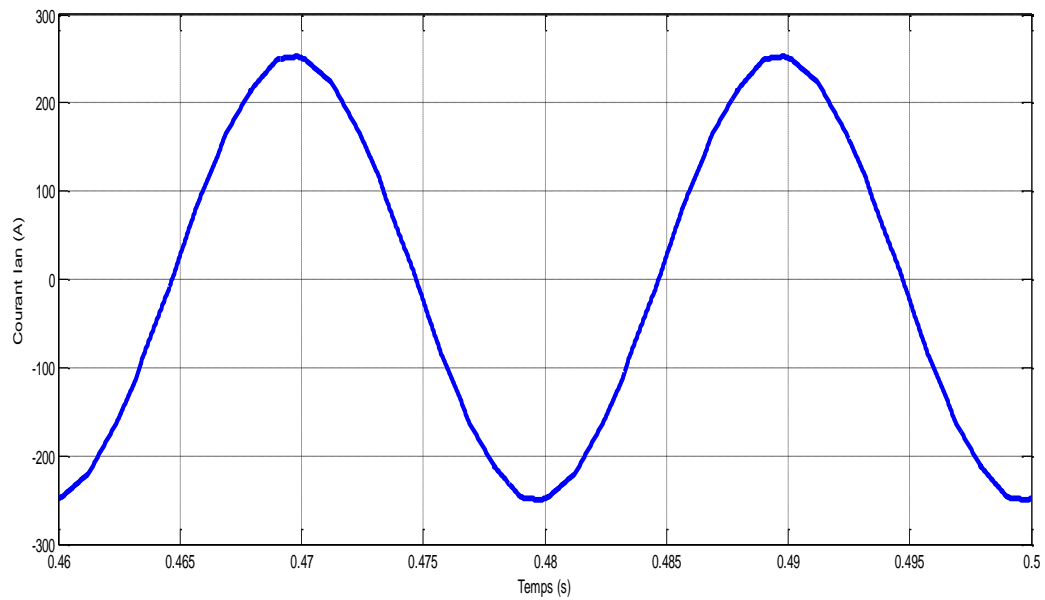


Figure III.16 : Courant de phase I_{an} sur les deux dernières périodes de simulation.

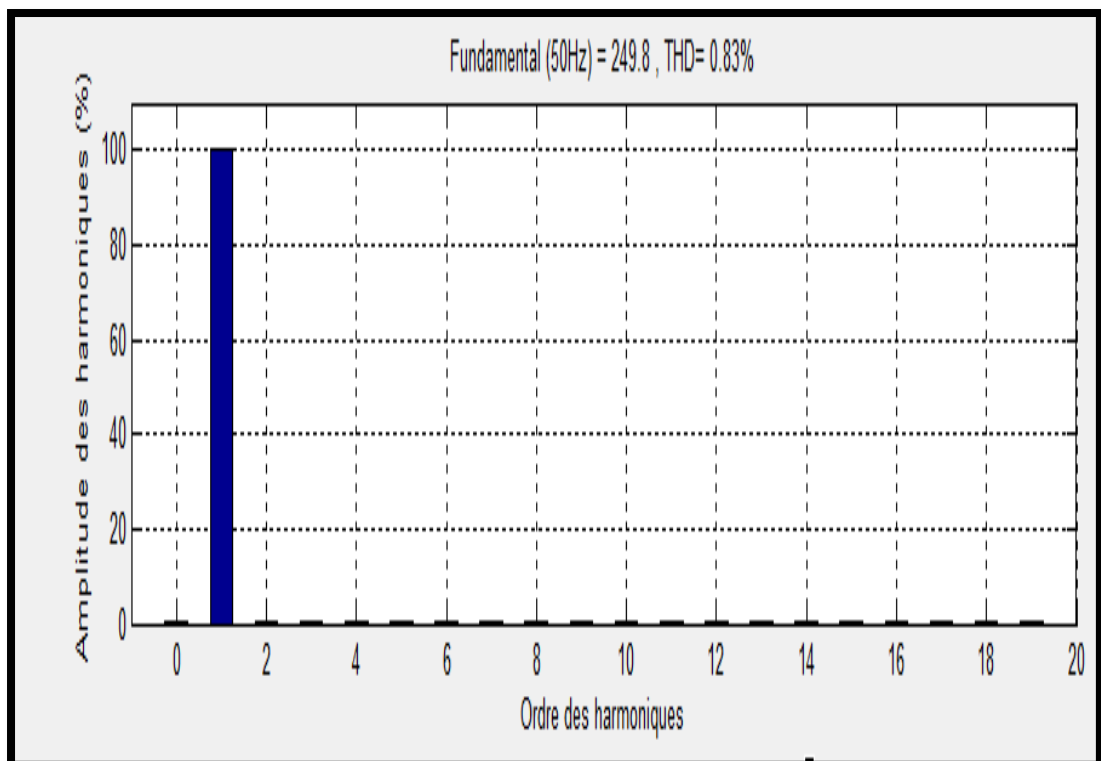


Figure III.17 : Le spectre d'harmoniques du Courant I_{an} (en barre)

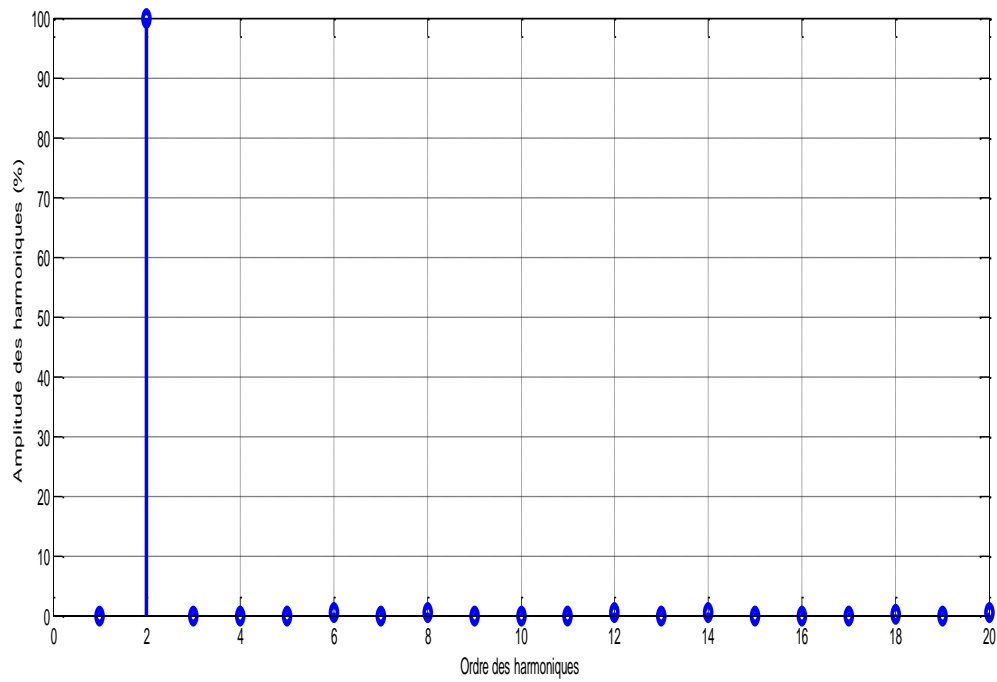


Figure III.18 : Le spectre d'harmoniques du Courant Ian

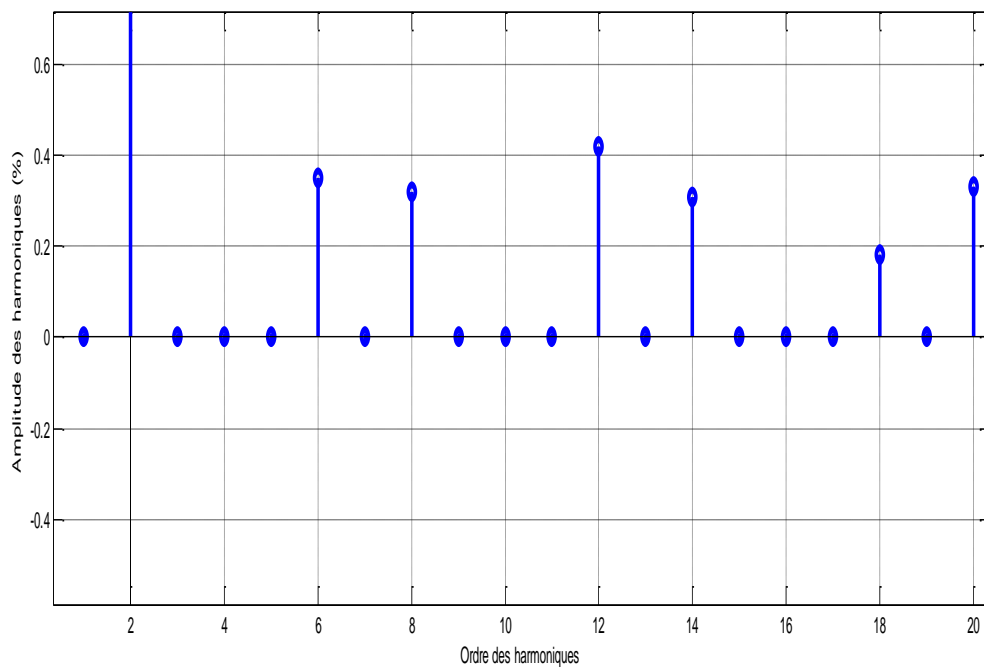


Figure III.19 : Le zoom du spectre d'harmoniques du Courant Ian.

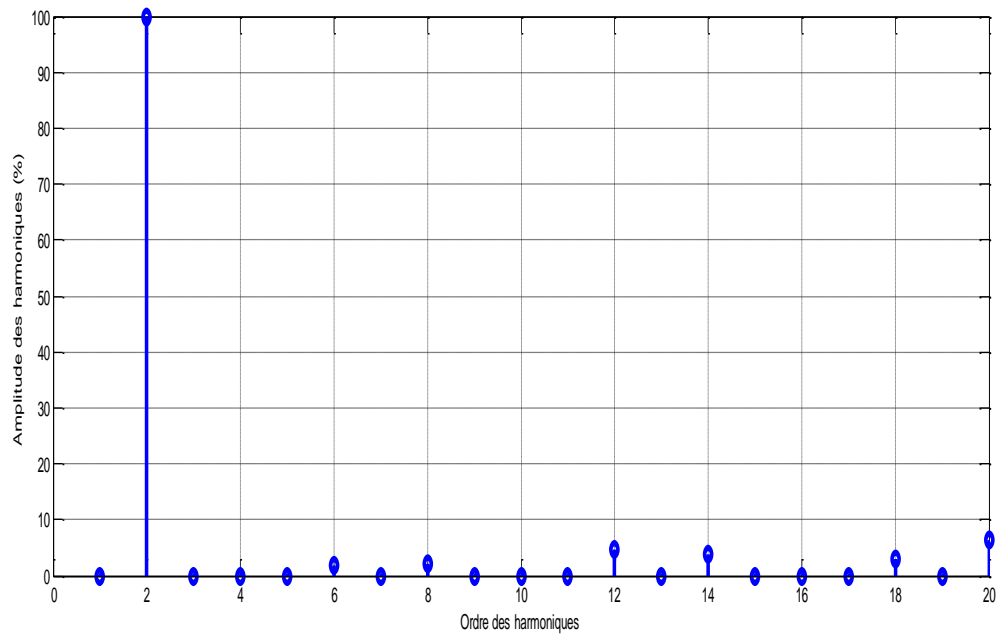


Figure III.20 : Le spectre d'harmoniques de la tension Van

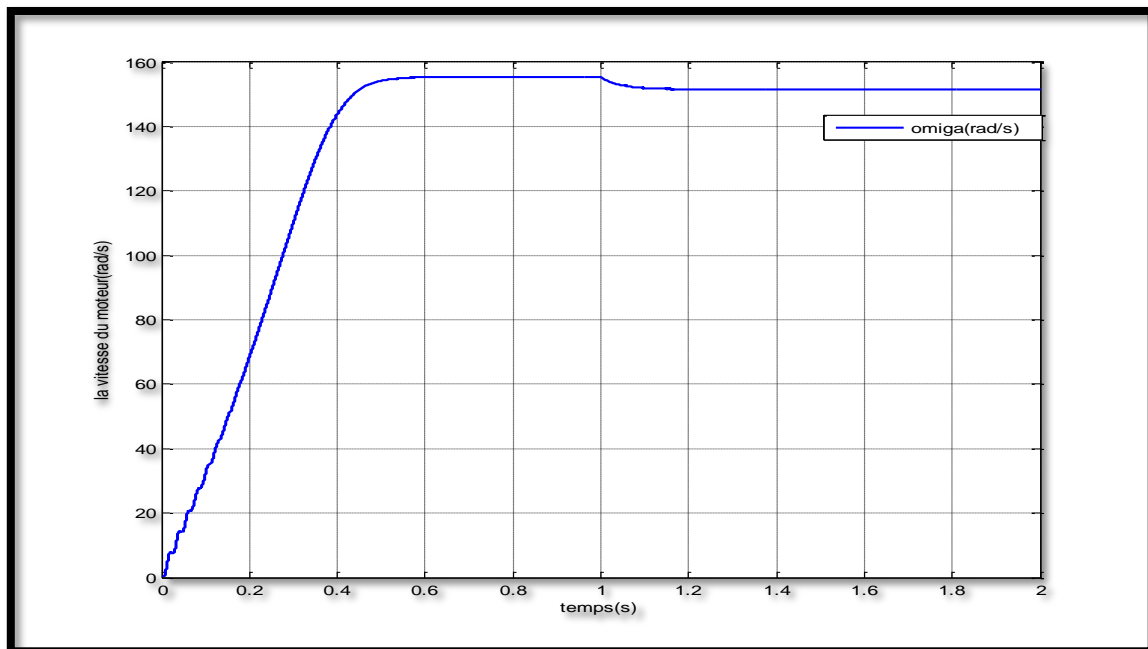


Figure III.21 : La vitesse du moteur (rd/s).

III.4.3 Cas où la durée « a » égale à 30%

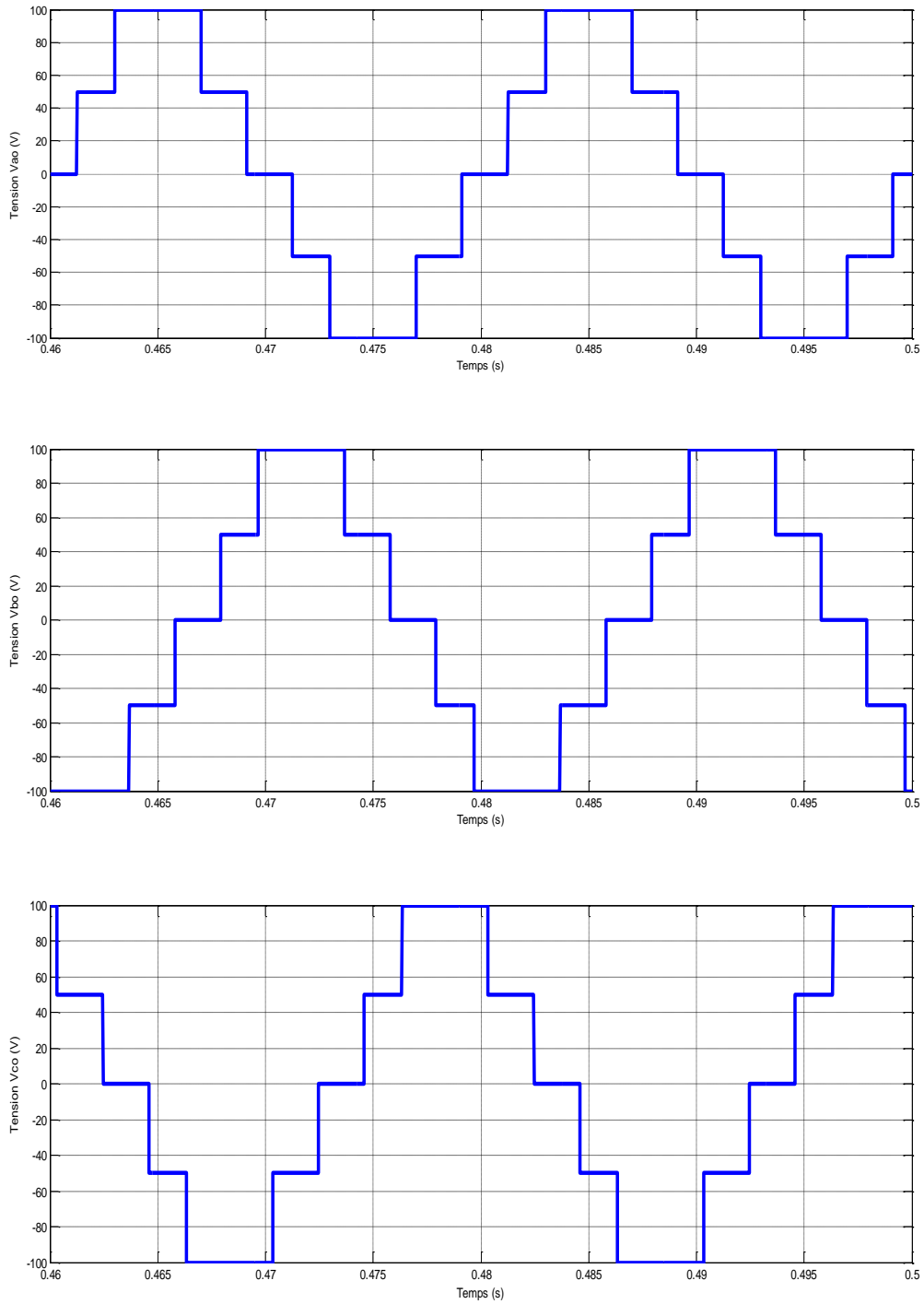


Figure III.22 : Tension de phase Vao, Vbo, Vco sur les deux dernières périodes de simulation.

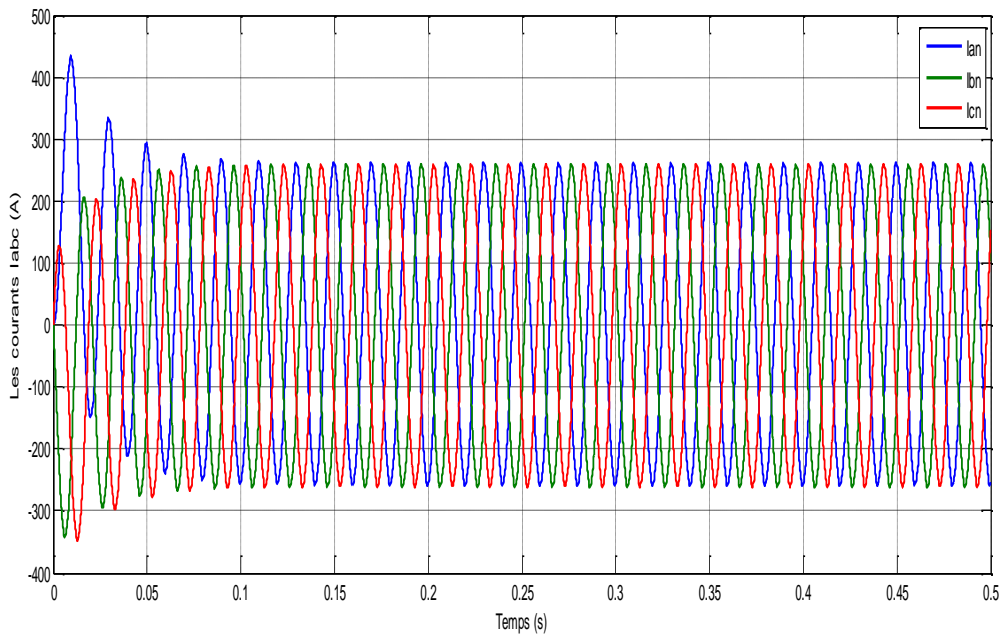


Figure III.23 : L'allure des courants de phase i_a , i_b et i_c

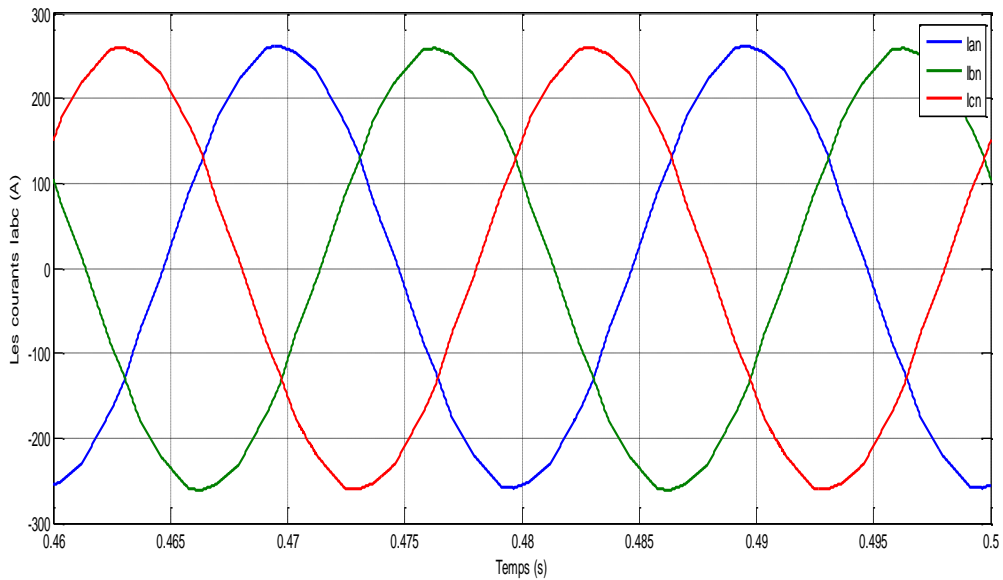


Figure III.24 : L'allure des courants de phase i_a , i_b et i_c et leurs zoom sur les deux dernières périodes de simulation

Simulation et interprétation des résultats

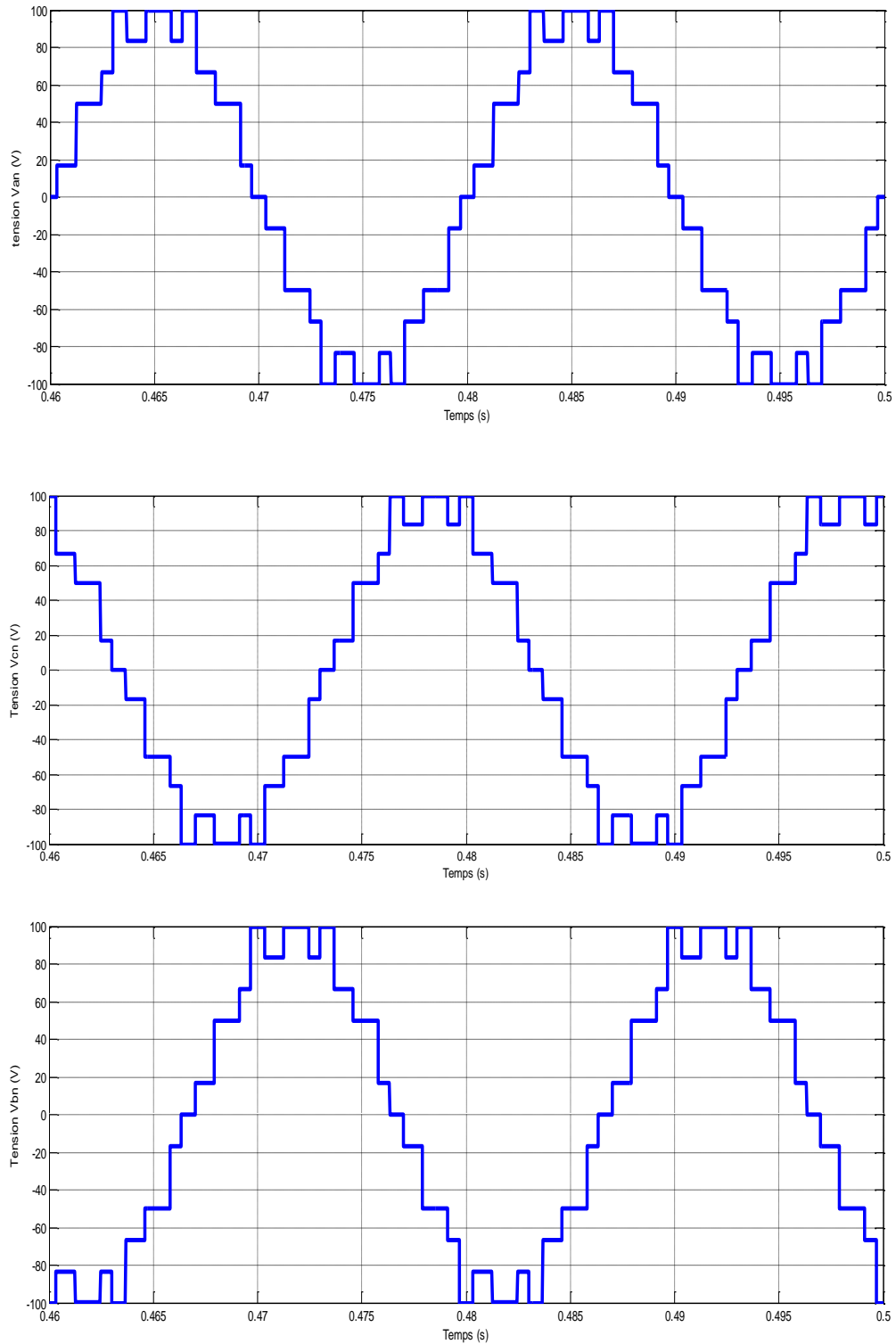


Figure III.25 : Tension de phase V_{an} , V_{bn} , V_{cn} sur les deux dernières périodes de simulation.

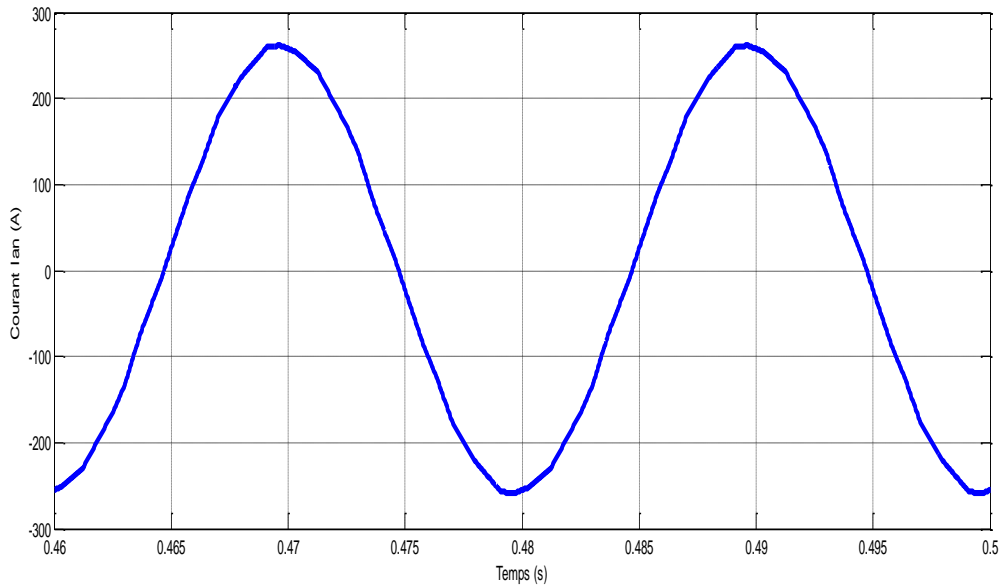


Figure III.26 : Courant de phase I_{an} sur les deux dernières périodes de simulation.

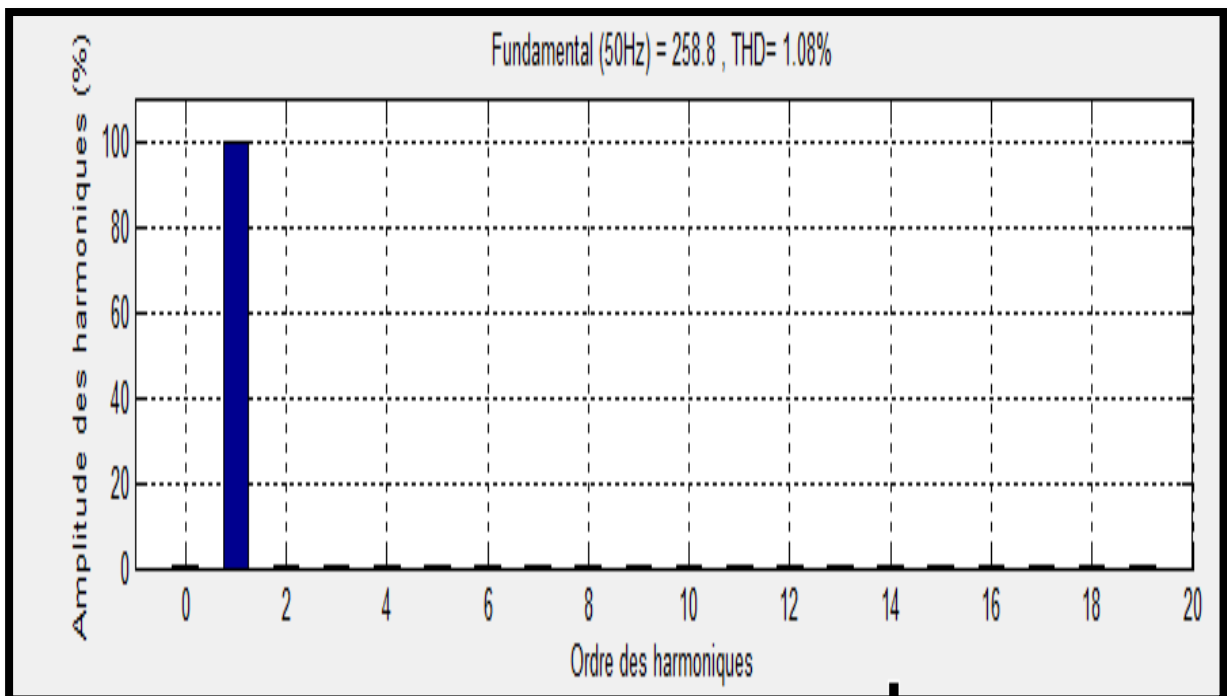


Figure III.27 : Le spectre d'harmoniques du Courant I_{an} (en barre)

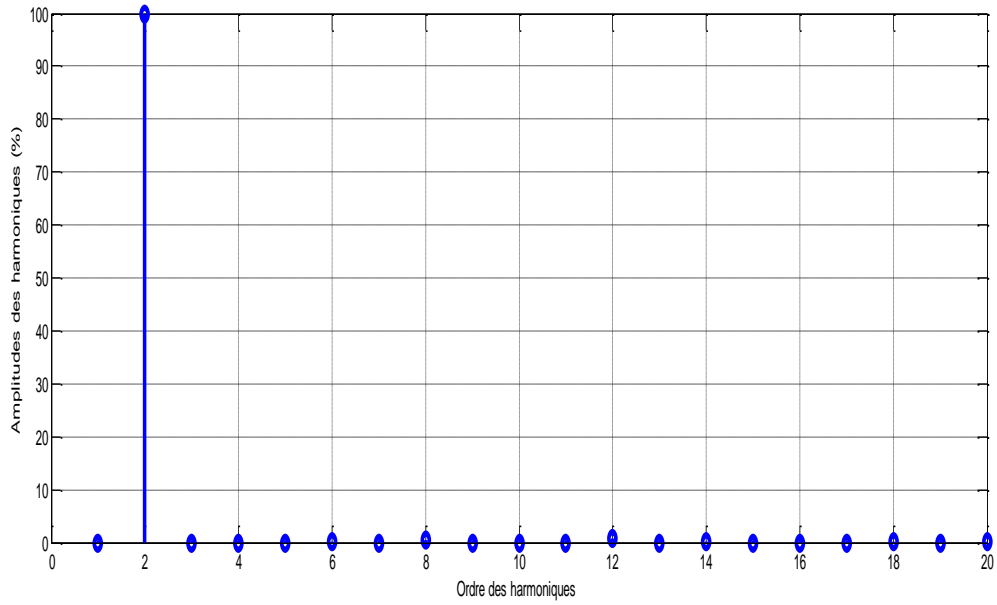


Figure III.28 : Le spectre d'harmoniques du Courant Ian

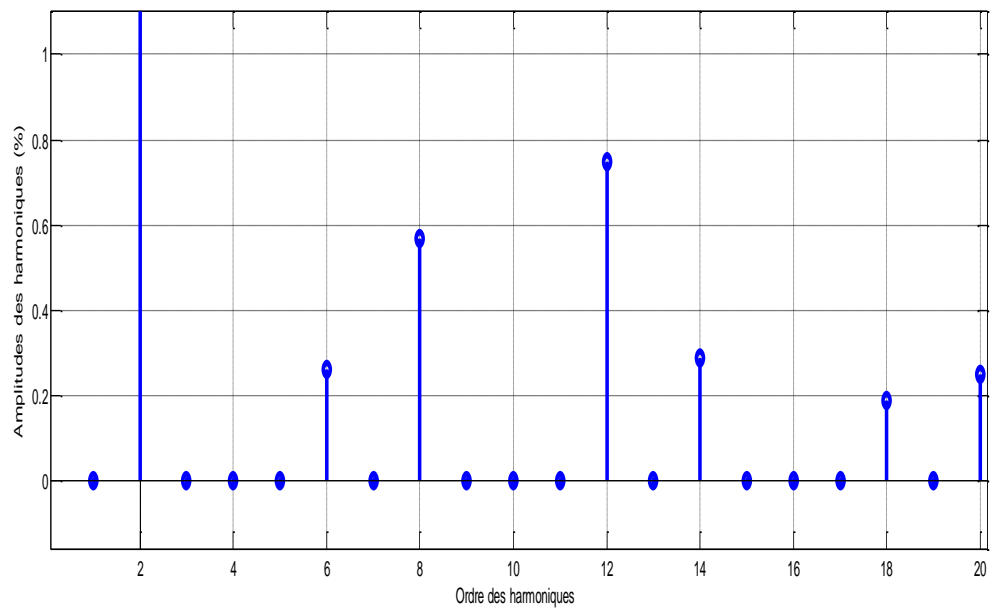


Figure III.29 : Le zoom du spectre d'harmoniques du Courant Ian.

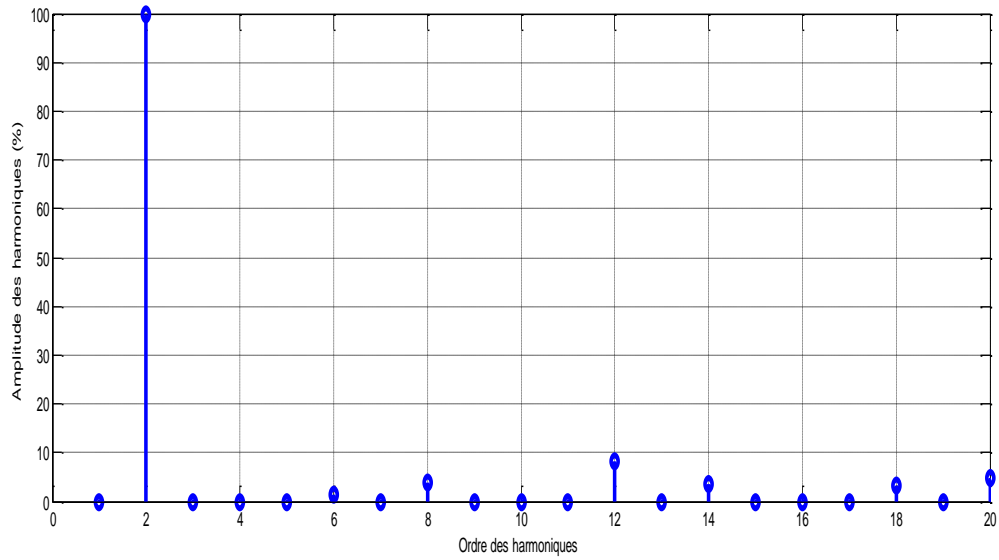


Figure III.30 : Le spectre d'harmoniques de la tension Van

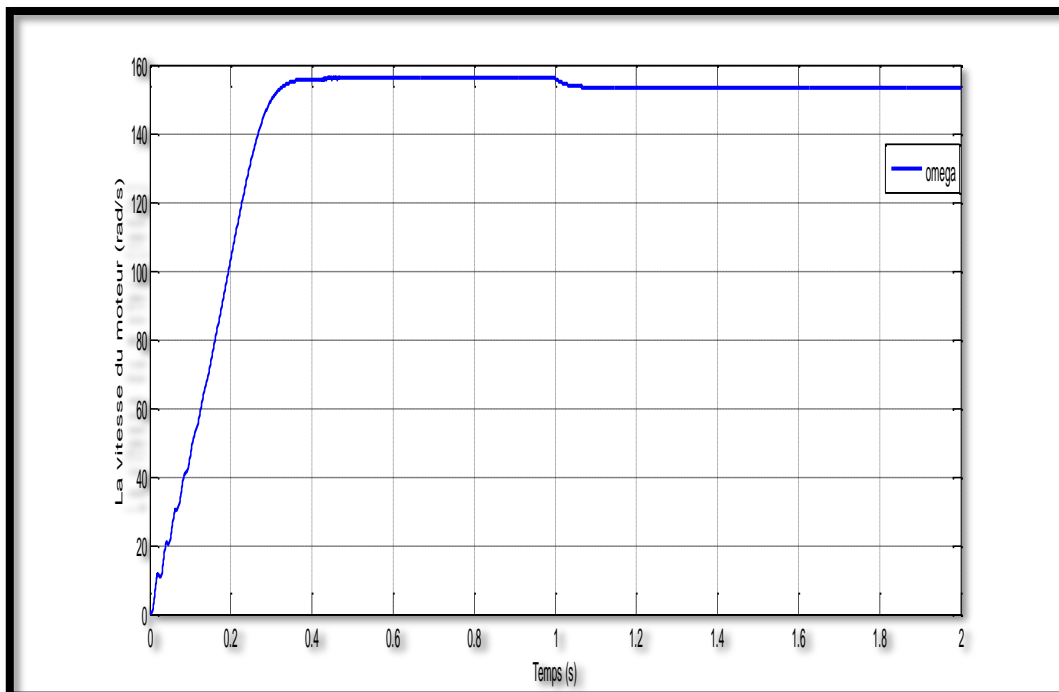


Figure III.31 : La vitesse du moteur (rd/s).

Conclusion

Dans ce chapitre nous nous sommes proposé d'étudier la qualité des signaux électriques de l'onduleur cinq niveaux. Nous avons envisagé d'étudier le cas où les durées des étapes correspondantes aux différents niveaux ne soient pas égales, tout en gardant la symétrie des signaux. Nous avons opté à paramétrer cette dissymétrie des étapes par une durée que nous avons appelée « a ». Nous avons constaté qu'une valeur de cette durée à égale à 22,5% de $T/6$ permet de diviser le taux de distorsion harmonique par plus de 3 fois (de 2.73% à 0,83%). Cette minimisation nous permet d'avancer que cette méthode est très concluante. En effet, certes que l'onduleur multi-niveaux MLI est meilleur que celui sans MLI, mais les différents résultats rencontrés dans la littérature montrent que l'amélioration n'est pas très importante, nous citons les travail qui a été fait par **Mr. Ben Boudaoud kamel** et **Mr. Belkacem abdelmalek** sous le thème intitulé « Etude par simulation sous MATLAB et PSim d'un onduleur cinq niveaux à structure NPC » suivit et encadré par Monsieur **Alloui**, alors qu'elle nécessite un coup plus important et des pertes par commutation plus élevées.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail que nous avons présenté est comme étant une étude simple par simulation d'un onduleur à cinq niveaux à structure NPC avec la commande classique (sans MLI). 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 sur le signal obtenu à la sortie de cet onduleur, nous avons pensé à tester une idée simple pour voir son impact sur le taux de distorsion harmonique. L'idée est de rendre les durées des niveaux de tension différentes tout en gardant la symétrie globale. En testant plusieurs cas, nous avons trouvé une courbe présentant un minimum en fonction de ce paramètre que nous avons appelé « a ». La valeur $a=22,5\%$ correspond à ce minimum qui ramène le THD du courant de 2,73% à 0,83%. Cette amélioration est très importante, l'onduleur devient plus propre, le spectre étant beaucoup moins riche. Nous pensons qu'avec cette commande, l'onduleur MLI, permet de se passer de la modulation.

Ces résultats sont prometteurs, cependant il reste à démontrer le fondement mathématique. Il est aussi envisageable d'incorporer cet onduleur cinq niveaux dans un système d'entraînement à vitesse variable ou dans un système de production d'énergie renouvelable.

Il serait également intéressant de faire une réalisation pratique.

Bibliographie

[A] Mémoire de fin d'étude intitulé « Etude et analyse de la commande des onduleurs Multi-niveaux par MLI sinusoïdale » réalisé par **BRIGHEN Haroun et HALAIMIA Safouane**, promotion 2015-2016.

[B] Mémoire de fin d'étude intitulé « Modélisation et commande d'un onduleur triphasé à structure multi-niveaux » réalisé par **Mr:LAKEHAL Bilel**, Promotion 2014-2015.

[C] Mémoire de fin d'étude intitulé « Etude des différentes stratégies de commande de l'onduleur 5 niveaux à structure NPC » réalisée par **Tahir Nassim et Merabtine Khaled**, promotion 2014-2015.

[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. Segulier, 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] **Larouche, jacques** électronique de puissance convertisseur, édition Dunod. Paris, 2005

[7] **F.Bridiant**, onduleurs autonome. Edition Dunod, paris, 1982

[8] **Alain Merbert**. Machine électrique et électronique de puissance. Édition Dunod ; Paris,

[9] **David Chanez**. Onduleur monophasé de tension. Étude de l'onduleur de tension à 4 interrupteurs

[10] **C.R.D.P** , électronique de puissance : 2 onduleur autonome dossier pédagogique , physique appliquée Edition Lille , France 1987.

[11] fr.slideshare.net/RamzieLidrissi/PFE-réalisation-d'un-onduleur-monophasé-autonome-commande-par-pic-16F877

[12] fr.scribd.com/doc/117692869/chapitre-II-onduleur-triphasé

[13] **onduleur et harmonique**, cahier technique ; Merlin Gerin N°159

[14] **Electric**, "guide de conception des réseaux électriques industriels "

Bibliographie

- [15] **A. Benaboud** “convertisseur de fréquence indirect a rapport de tension fixe :interface entre turbo-alternateurs a haut vitesse et réseau électrique “thèse de doctorat, Ecole polytechnique .Fédérale de Lausanne 2007
- [16] **S. Electric**, “Guide de conception des réseaux électriques industriels”
- [17] **A. Benaboud**, “Convertisseur de fréquence indirect à rapport de tension fixe : Interfaceentre turbo-alternateurs à haut vitesse et réseau électrique”, Thèse de Doctorat, EcolePolytechnique Fédérale de Lausanne, 2007.
- [18] **Muhammad H.Rachid** « Power Electronics, circuits, devices, and applications»,Prentice Hall, Englewood CM s , New Jersey 1993.
- [19] **Anne Marie LIENHARDT**, « Etude de la Commande et de L’Observation d’une Nouvelle Structure de Conversion d’Energie de Type SMC (Convertisseurs Multicellulaire Superposé) », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2006.
- [20] **B. K. Bose**, « Power Electronics and AC Drives », Edition Practice Hall, 1986.
- [21] **L. M. Tolbert**, « Multilevel Converters for Large Electric Drives », IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 35, pp. 36-44, January/February 1999.
- [22] **Subrata K. Mondal, Bimal K. Bose, Valentin Oleschuk, and Joao O. P. Pinto**, « Space Vector Pulse With Modulation of Three Level Inverter Extending Opération Into Over modulation Region », IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.18, N°2, pp.604611, March 2003.
- [23] **Ayse Kocalmis, Sedat Sunter**, « Simulation of a Space Vector PWM Controller for a Three Level Voltage Fed Inverter Motor Drive », Département of Electrical and Electronic Engineering, Firat University, Turkey.
- [24] **Martin AIMÉ**, « Evaluation et Optimisation de la Bande Passante des Convertisseurs Statiques (Application aux Nouvelles Structures Multicellulaires) », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2003.
- [25] **N.Celanovic, D.Boroyevich**, « A Fast Space Vector Modulation Algorithm for Multilevel Three Phase Converters », IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 37, March/April 2001.
- [26] **K.V. Patil, R.M. Mathur, J. Jiang, S.H. Hosseini**, « Distribution System Compensation Using a New Binary Multilevel Voltage Source Inverter », IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, N°2, pp. 459-464, April 1999.
- [27] **Nikola Celanovic**, « Space Vector Modulation and Control of Multilevel Converters », This is for the Degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering and Computer Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, September 2000.
- [28] **Surin Khomfoi, Leon M. Tolbert**, «Multilevel Power Converters », the University of Tennessee USA, Department of Electrical and Computer Engineering, August 2007.

Bibliographie

- [29] **Josep Pou i Fèlix**, « Modulation and Control of Three-Phase PWM Multilevel Converters », Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy in Industrial Engineering, Universitat Politècnica de Catalunya, Departament d'Enginyeria Electronica, November 2002.
- [30] **Roberto Rojas, Tokuo Ohnishi, Takayuki Suzuki**, « An Improved Voltage Vector Control Method for Neutral Point Clamped Inverters », IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 10, N°6, pp. 666-672, November 1995.
- [31] **A. Nabae, I. Takahashi and H. Akagi**, «A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter», IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-17, pp. 518-523, September/October 1981.
- [32] **C.A. Martins, T.A. Meynard, X. Roboam, A.S. Carvalho**, « A Prédicative Sampling Scale for Direct Torque Control of the Induction Machine Fed by Multilevel Voltage Source Inverters », the European Physical Journal, AP 5, pp. 51-61, 1999.
- [33] **Jean-Sébastien MARIÉTHOZ**, « Etude Formelle pour la Synthèse de Convertisseurs Multiniveaux Asymétriques: Topologies, Modulation et Commande », Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2005.
- [34] **Siriroj Sirisukprasert**, « Optimized Harmonic Stepped-Waveform for Multilevel Inverter », Thesis for the Degree of Master of Science in Electrical Engineering, Virginia Polytechnic Institute, September 1999.
- [35] **Xavier del toro garcia, Antoni arias, Marcel g. jayne, phil A. witting, vicenç m. sala and Jose luis romeral**, New DTC Control Scheme for Induction Motors fed with a Three-level Inverter, *Automatika*, pp. 73-81, 2005.
- [36] **X. Hu and L. Zhang**, A predictive direct torque control scheme for a threelevel VSI fed induction motor drive, *Electrical Machines and Drives*, 1999. Ninth International Conference on, pp.334-338, Conf. Publ. No. 468, 1999
- [37] **P. Purkait, R.S. Sriramakavacham**, « A New Generalized Space Vector Modulation Algorithm for Neutral Point Clamped Multilevel Converters », Progress in Electromagnetics Research Symposium, Cambridge, pp. 330-335, March 2006.
- [38] **Subrata K. Mondal, Joao O. P. Pinto, and Bimal K. Bose**, « A Neural Network Based Space Vector PWM Controller for a Three Level Voltage Fed Inverter Induction Motor Drive», IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.38, N°3, pp.660-669, May/June 2002.
- [39] **Yo Han Lee, Bum Seok Suh and Dong Seok Hyun**, « A Novel PWM Scheme for a Three Level Voltage Source Inverter With GTO Thyristors », IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.32, N°2, pp.260-268, March/April 1996.
- [40] **Kambiz Arab Tehrani**, Conception, Synthèse et Application d'une Nouvelle Commande Robuste par PID Fractionnaire pour Les Onduleurs Multiniveaux, Pour obtenir le grade de Docteur de l'INPL, Université de Lorraine-Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL), 2010.

Bibliographie

[41] **Fang Zheng Peng, John W. Mckeever, Donald J. Adams**, « A Power Line Conditioner Using Cascade Multilevel Inverters for Distribution Systems », IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 34, N°6, pp. 1293-1298, November / December 1998.