²REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Département du **G**énie **E**lectrique

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : électrotechnique

Spécialité : commande électrique.

Commande SVPWM d'un onduleur Z-source multi-niveaux à structure NPC

Présentés par :

BENZERGA ISLAM EDDINE

BENSMAIN ISMAIL

Proposés et Dirigés par :

KADDOUR BENYOUCEF

Promotion 2022

Remerciement

Nous remercions tout d'abord ALLAH de nous avoir donnéla force d'accomplir ce travail qui reflète nos efforts le longdes annéesd'étude.

Noustenonsàexprimernosgratitudesetvifsremerciements à notre promoteur, Monsieur ***KADDOURBENYOUCEF*** *nous avoir proposé et suivi ce sujet ainsipour leurs orientations et précieux conseils pendant la duréede travail surceprojet.*

Nos remerciements les plus sincères s'adressent également aux membres du jury, qui ont accepté de participer à lavalorisationdecetravail.

Nous remercions tous les enseignants du département génie électrique ettous ceux qui ont contribué de près ou de loin, directement ouindirectementà l'élaborationde cemodeste travail.

Nous tenons à exprimer nos remerciements à tous lesétudiantsdudépartementscienceettechnologie,notamment lesétudiantsdela2-èmeannéemastercommande électrique pourleurespritdegroupe et leur solidarité.

DIDICACE

Je tiens c'est avec grande plaisir que je dédie ce modeste travail :

Àl'être le plus cher de ma vie, ma mère

A celui qui m'a fait un homme, mon père

A mes chèresfrères et sœurs

A tous mes amis de promotion de 2 éme année master commande électrique

Toute personne qui occupe une place dans mon cœur

Àtous les membres de ma famille et toute personne qui porte le nom

BENZERGA

Je dédie ce travail à tous ceux qui ont participé à ma réussite

BENZERGA ISLAM EDDINE

DIDICACE

Je tiens c'est avec grande plaisir que je dédie ce modeste travail :

À l'être le plus cher de ma vie, ma mère

A celui qui m'a fait un homme, mon père

À mes chères frères et sœurs

A tous mes amis de promotion de 2 éme année master commande électrique

Toute personne qui occupe une place dans mon cœur

À tous les membres de ma famille et toute personne qui porte le nom

BENSMAIL

Je dédie ce travail à tous ceux qui ont participé à ma réussite

BENSMAIL ISMAIL

Sommaire

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE12

Chapitre I onduleur Z-source

I.1 Introduction 2
II.1. Définition de l'onduleur Z-source 2
III. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE L'ONDULEUR Z-SOURCE 3
III.1. Détermination des coefficients d'amplification 4
III.2.1. Etude de l'amplification maximale 7
III.2.3. Dimensionnement et contraintes des composants: 9
IV.1 COMPARAISON ENTRE L'ONDULEUR Z-SOURCE ET UNE STRUCTURE EQUIVALENTE 12
V.Conclusion : 14

chapitreII onduleur multi-niveaux

II.1 Introduction. 16
II.1. Définition de l'onduleur multi niveaux 16
III.1. Historique et avantages des structures de conversion multi niveaux. 17
IV.1. Principales topologies des onduleurs multi-niveaux 19
IV.2.1 Intérêt des onduleurs multi-niveaux 19
IV.2.2 Structure des onduleurs à 3 niveaux : 19
V.1. Les onduleurs multi-niveaux : 20
V.2.I Les divers types des onduleurs : 20
V.2.2 Différentes structures de convertisseurs multi-niveaux : 20
- **Onduleur multi-niveaux de type NPC** : 20
- **Onduleur multi-niveaux de type FC à 3 niveaux :** 23
- **Onduleur multi-niveaux de type pont en H à 3 niveaux :** 26
- **Onduleur multi-niveaux de type MNP à 3 niveaux :** 27

VI. Conclusion 36

chapitreIII stratégie de commande des onduleurs multi-niveaux

III.1 Introduction 38
III.2 Commande par hystérisées 39
III.4 Commande par La modulation de largeur d'impulsion 42
III.4.1 Commande par La modulation sinusoïdale naturelle 43
III.4.1.1 Caractéristique de la modulation sinusoïdale naturelle 43
III.4.2 Commande par La modulation vectorielle 44
III.4.2.1 Principe de La modulation vectorielle 44
III.5 Modulation vectorielle de l'onduleur à trois niveaux 46
III.5.1 Structure générale de l'onduleur à trois niveaux 46

III.5.2 Fonctions de commutation 46
III.5.3 Commande complémentaire des interrupteurs 47
III.5.4 Etats d'un bras de l'onduleur 47
III.5.5 Etats de l'onduleur 48
III.5.6 Tensions de sortie 49
III.5.8 Vecteur tension de référence 52
III.5.9 Séquence des états de l'onduleur 54
III.5.10 Vecteurs de tension de l'onduleur multi-niveau triphasé à Z-source 61
III.6. Simulations et Résultats des simulations : 63
III.6.1. simulation de bloc Z source 63
III.6.1.a résultats et interprétations. 63
III.6.2. simulation onduleur avec la commande svpwm 65
III.6.2.a.interpretation des résultats. 66
III.6.3. simulation onduleur à Z source avec la commande svpwm 67
III.6.3.a. interprétation des résultats. 67
III.7. Conclusion. 68

Résumé :

L'objectif de ce mémoire est d'étudier la commande d'un onduleur triphasé à source impédente. Cette mémoire présente le fonctionnement des onduleurs Z-source. Ils utilisent un réseau d'impédance pour coupler l'onduleur à la source de tension continue. Il permet à l'onduleur d'amplifier la tension de sortie. D'autre part, une méthode de contrôle de modulation de largeur d'impulsion vectorielle modifiée (SVPWM) a été utilisée pour commander avec l'onduleur Z-source par l'insertion de l'état court-circuit, pour obtenir le meilleur rendement.

Mots clés : onduleur Z-source, la méthode SVPWM, onduleur multiniveaux, NPC…..

Abstract

The objective of this memory is to study the control of a three-phase inverter with an impedent source. This memory presents the operation of Z-source inverters. They use an impedance network to couple the inverter to the DC voltage source. It allows the inverter to amplify the output voltage.On the other hand, a control method vector modified pulse-width modulation (SVPWM) was used to control with the Z-source inverter by inserting the short-circuit state, to get the best performance.

Keywords:impedent source, Z-source, the SVPWM method, multilevel inverter, NPC……

الملخص:

الهدف من هذه المذكرة هو دراسة التحكم على العاكس الثالثي مع مصدر معاقة. تظهر هذه المذكرة كيفية عمل عاكسات المصدر .Z_تستخدم شبكة المعاقة لربط العاكس إلى مصدر الجهد.DC فانه يسمح العاكس لتضخيم الجهد في المخرج .من ناحية أخرى، تم استخدام طريقة التحكم في تعديل عرض النبض المتجه المعدل (SVPWM) للتحكم بعاكس المصدر Z عن طريق إدخال حالة الدائرة القصيرة، لتحقيق أفضل كفاءة.

الكلمات المفتاحية:. العاكسالمصدرz ، طريقةSVPWM ,العاكس الثالثي,NPC,….

Liste des tableaux

Tableau (I.1) : états utilisés avec la commande Z-source……...……4

Tableau (V.1) : Table de commutation du convertisseur NPC 3 niveaux……23

Tableau (V.2) : Réalisation des différents niveaux pour l'onduleur FC à 3 niveaux……..…25

Tableau (V.3): Tableau de commutations du convertisseur en H……..……..27

Tableau (V.4) récapitulatif du nombre de composants pour les MNP…….…….……30

Tableau (V.5) : État des interrupteurs pour un courant de charge positive……..……33

Tableaux (III.1) Etat d'un bras de l'onduleur…….....46

Tableaux (III.2) Etats de l'onduleur a trois niveaux et les coordonnées de vecteur Vs…….…….50

Tableau (III.3) Décomposition de l'équation ……..……56

Tableau (III.4) Les expressions de dx dy et dz pour les différentes régions d'un secteur……..…….57

Tableau (III.5) Séquences des états dans les différentes régions du diagramme vectoriel……58

Tableau (III.6) Durées de fermeture des interrupteurs dans le cas du premier secteur……...……59

Tableau (III.7) : Vecteurs de tension de l'onduleur multi-niveau triphasé à Z-source……..……..63

Liste des

Chapitre I :

Figure II.1 : Structure de l'onduleur Z-source ……..……1

Figure III. 2: Schéma équivalent du mode 1…….…..….2

Figure III.3 : Schéma équivalent du mode 2…….…..5

Figure III.4 : Schéma équivalent du mode 3……..…..…5

Figure. III.5. Variation du facteur de modulation en fonction du rapport cyclique……7

Figure III.6 : Zone de fonctionnement de l'onduleur Z-source……..8

Figure III.7 : Evolution simplifiée de la tension des condensateurs et du courant dans la bobine pour unepériodeT…….…...9

Figure IIII.7 : Structure hacheur survolteur en cascade avec un onduleur, équivalente a la structure Z source…….……12

Figure IV.8 : Zones de fonctionnement des deux structures……...……..13

Figure IV.9: Surdimensionnement en tension de l'onduleur Z-source (%) en fonction de B……13

Chapitre II :

Figure (II.1)Schémadeprincipedel'onduleur……..……..16

Figure (IV.1) : forme d'onde en sortie des onduleurs 3 niveaux……..……19

Figure (V.1) : Onduleur NPC 3 niveaux……..……22

Figure (V.2) : Commutation des interrupteurs du convertisseur NPC 3 niveaux …….…..23

Figure (V.3) : Onduleur FC 3 niveaux…….……24

Figure (V.4) : Réalisation des différents niveaux de tension avec l'onduleur FC 3Niveaux……...……25

Figure (V.5) : Convertisseur pont en H 3 niveaux……....26

Figure (V.6) : Commutation des interrupteurs de l'onduleur pont en H……..…….27

Figure (V.7) : Onduleur multi-niveau de type MNP……..……..28

Figure (V.8) : Configuration impair des onduleurs multi-niveaux de types MNP……...29

Figure (V.9) : Configuration pair des onduleurs multi-niveaux de types MNP……...29

Figure (V.10) : Commutation des interrupteurs du convertisseur MNP à n niveaux……..30

Figure (V.11) : Structure de l'onduleur MNP à 3 niveaux……....31

Figure (V.12) : La circulation du courant dans le cas I>0 et V>0……..……..…33

Figure (V.13) : La circulation du courant dans le cas I>0 et V>0, en commutant T1 et T2 en même temps……..……...34

Figure (V.14) : La circulation du courant dans le cas I>0 et V=0……..…….34

Figure (V.15) : La circulation du courant dans le cas I>0 et V<0……..…….34

Figure (V.17) : Court-circuit de V1……..…35

Figure (V.18): Court-circuit V1+V2……..……..35

Figure (V.19): Court-circuit V2……..…….36

ChapitreIII :

Figure (III.1) :Schémadecommandeparhystérésis……..……..39

Figure (III.2) : Onduleur de tension triphasée …….……40

Figure (III.3) :Commandeetchronogrammesdesgrandeursdel'onduleurtriphasépleinonde…….....41

Figure (III.4) :principedelamodulationMLIsinusoïdalenaturel……..……42

Figure (III.5) : Onduleurdetensionà troisniveauxdetypeNPC……..……..44

Figure (III.6) :Etatsd'unbras del'onduleuràtroisniveaux……..……46

Figure (III.7) : Etatdel'onduleur……..……...47

Figure (III.8) :Diagrammevectorieldel'onduleuràtroisniveaux…….……51

Figure (III.9) :Secteursetrégiondudiagrammevectoriel…….51

Figure (III.10) :La positionde V_s^* à lesquatrerégionsde1^{er}secteur…….……53

Figure (III.11) :lescompensantm1etm2de V_s^*……..53

Figure (III.12) :EtatsX,YetZpourlesdifférentesrégionsdudiagrammevectoriel…….55

Figure (III.13) :FonctionslogiquesF_{ij}danslesquatrerégionsdupremiersecteur……..60

Figure (III.14). Schéma de bloc Z source…….….... 64

Figure. (III.15) : forme d'onde de tensions de sortie pour r=20%.....64

Figure. (III.16) : forme d'onde de tensions de sortie pour r=30%.....65

Figure. (III.17) : forme d'onde de tensions de sortie pour r=40%.....65

Figure(III.18) : Schéma de bloc onduleur avec la commande SVPWM……..66

Figure (III.19) : Signaux de la commande MLI vectorielle, tensions de sortie(sans Z source)..67

Figure(III.20) : Schéma de bloc onduleur à Z source avec la commande SVPWM……..67Figure (III.19 Signaux de la commande MLI vectorielle, tensions de sortie……..68

Notions et symboles

Vdc, Ve : Tension continue de la source.

*V*i ; Tension du bus continu du NSI.

*V*cz : Tension de la capacité du réseau d'impédance

*V*lz : Tension de l'inductance du réseau d'impédance

MLI : modulation de largeur d'impulsion

MAS: moteur asynchrone

THD: Total Harmonic Distorsion

NPC: Neutral Point Clamped

MNP: Multi Neutral Clamped

FC: Flying Capacitor

H: Pont H (H-bridge)

MPC : Multiple Point Clamped

DC : source continue

PI : Proportional Intégral

MOSFET: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

IGBT: Insulated Gate Bipolaire Transistor

GTO: Gate Turn-Off Thyristor

DF : facteur de distorsion

fp: La fréquence du modulation

m: L'indice de modulation

fr : La fréquence de la référence.

r: Le coefficient de réglage en tension

Ar: Amplitude de la référence.

Ap: Amplitude de la porteuse

SVP:SpaceVector Modulation

Sij : Les interrupteurs de l'onduleur J :

J: Les interrupteurs de l'onduleur

I : Numéro de l'interrupteur du bras

Fij : Fonction de commutation

N : Etats d'un bras de l'onduleur

Vxo : Tension phase point milieu

S1,S 2 et S3 : Tension phase point neutre

V*s : Tension de sortie

V s : Vecteur Tension de référence

Vx Vy Vz : Les composants du vecteur Vs sur les axes x, y et z

V*1,V*2,V*3 : Les trois vecteurs de référence

Vd,Vq : composantes du vecteur dans le plan d-q

m: taux de modulation

θ : position angulaire du vecteur V*s

Tx Ty Tz : durées d'application des vecteurs Vx Vy et Vz en grandeur relative.

Ts: période d'échantillonnage de l'onduleur. Sec

dxdy et dz : durées d'application des vecteurs Vx Vy et Vz en grandeur relative.

Vmax : Amplitude maximale du vecteur V*s

S : secteur triangulaire

m : L'indice de modulation.

n : Le nombre de niveaux de tension.

r : Le coefficient de réglage.

Sa,Sb, Sc : Les temps de commutation des interrupteurs.

I : Le courant mesuré.

Vab, Vbc, Vca : Les tensions composées entre les phases.

Sj : L'état des interrupteurs Sj (j=a, b, c).

Ka : L'interrupteur de haut d'un bras de l'onduleur à deux niveaux

Ka' : L'interrupteur de haut d'un bras de l'onduleur à deux niveaux

T : La période de modulation.

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les convertisseurs de type onduleur à source impédance, sont apparus dans la littérature scientifique dans les années 2000 à travers les travaux du Professeur Fang Zheng Peng [1], [2], ce type de convertisseur est généralement utilisé dans le domaine de l'énergie renouvelable et de la traction électrique. Plusieurs topologies des onduleurs sont proposées dans la littérature, telles que : onduleur à Z-source, onduleur à Quasi-Z-source, onduleur à semi-Z-source etc …...le nom de la topologie est lié à la forme du réseau d'impédance entre la source continue et les bras de l'onduleur.

L'onduleur à Z-source permet non seulement de convertir une tension continue en une tension alternative mais possède également la fonction d'amplification de la tension continue, ce qui le rend équivalent à la mise en cascade d'un hacheur élévateur avec un onduleur classique. Son intérêt principal est de pouvoir obtenir une tension alternative de sortie d'onduleur plus importante qu'avec un onduleur classique.

Afin de trouver une solution à ce problème et utiliser des composants d'électronique de puissance plus performants, de nouvelles structures de convertisseurs ont été développées telles que les "Convertisseurs multi-niveaux". Tout convertisseur possédant au moins trois niveaux de tension par bras fait partie des familles des convertisseurs multi-niveaux, c'est à dire que la tension de sortie peut prendre au moins trois valeurs différentes au lieu des deux traditionnellement utilisés. Ils consistent à mettre en série les interrupteurs de puissance et d'accroître la tension commutée et d'assurer la répartition de la contrainte en tension sur différents interrupteurs. Ils permettent aussi d'utiliser des composants de faibles calibres qui sont donc moins coûteux et plus performants. L'avantage de ces structures multiniveaux réside dans leur capacité à améliorer les formes d'onde et les spectres harmoniques des grandeurs de sortie. Les quatre principales topologies multi-niveaux utilisées sont :

- La topologie à diodes clampées (NPC-Neutral Point Clamped) permet de clamper les interrupteurs ouverts par l'intermédiaire des diodes de clampage. Elle permet aussi de réduire le taux de distorsion harmonique, limitant ainsi la taille des éléments de filtrage.

- La topologie basée sur des cellules imbriquées (topologie à capacités flottantes FCFlyingCapacitor ou encore topologie multicellulaire) permet de répartir les tensions aux bornes des semi-conducteurs mis en série par l'intermédiaire des condensateurs flottants. Elle joue aussi un rôle sur la réduction du taux de distorsion harmonique.

- La topologie basée sur la mise en série d'onduleurs monophasés sur chaque phase (topologie en cascade ou pont en H), présente l'énorme avantage d'être modulaire, cela P a g e 2 | 106 veut dire qu'elle est facilement extensible à un nombre élevé de niveaux, ce qui réduit le taux de distorsion des harmoniques.

- La topologie MNP (Multi Neutral Clamped) Cette structure possède les avantages de nécessiter une seule source continue, sans diodes de bouclage, de pouvoir fonctionner avec des nombres de niveaux quelconque, pairs et impairs et de pouvoir travailler en mode dégradé

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

L'application des techniques de modulation comme stratégie de commande de l'ouverture et la fermeture des interrupteurs aux onduleurs conventionnel ou multi-niveaux de tension pour réduire les harmoniques. Tel que la MLI sinusoïdale, et la MLI vectorielle.

La MLI vectorielle est la méthode récemment la mieux adaptée au contrôle des moteurs asynchrones contrairement à d'autres méthodes.

Pour réduire ces phénomènes, deux possibilités sont envisagées : soit augmenter le nombre des niveaux de la tension générée par le convertisseur (onduleur), soit d'imposer sur chaque période des commutations judicieusement placées de manière à faire varies la valeur du fondamental de la tension de sortie tout en minimisant son contenu harmonique. [3]

Les avantages de ces convertisseurs :

- Transfert de puissance peut être contrôlé et même régulé.
- Système moins encombrant et moins lourd.
- Un rendement excellent.
- Protections plus efficaces.
- Grâce aux progrès dans la fabrication et le montage des composants,
- Un coût relatif en baisse [4].

Dans notre travail, on se présente l'onduleur à trois niveaux de tension de type NPC commandé par la modulation SVPWM. Nous avons organisé ce mémoire en **III**chapitres :

- Le premier chapitre présenteune généralité sur les onduleurs à z-source.

- Le deuxième chapitreprésenteune étude sur les onduleurs multi-niveaux.

- Le troisième chapitre traite la stratégieSVPWMde Commande del'Onduleurs troisniveaux.

Enfin, ce travail sera conclu par une conclusion générale à travers laquelle on exposera les principaux résultats obtenus et on donnera les perspectives à envisager suite à ce travail.

CHAPITRE I

ONDULEUR Z-SOURCE

I.1 Introduction

Ce chapitre présente le fonctionnement des onduleurs Z-source. Ils utilisent un réseau d'impédance pour coupler l'onduleur à la source de tension continue. Ce réseau d'impédance est constitué d'une structure L C hybride croisée. Il permet à l'onduleur d'amplifier la tension de sortie grâce à une commande spécifique, ce qui le rend équivalent à la mise en cascade d'un hacheur survolteur avec un onduleur classique. L'étude du principe de fonctionnement ainsi qu'une comparaison avec une structure classique équivalente montreront les limites de cette structure récemment introduite.

II.1. Définition de l'onduleur Z-source

L'onduleur Z-source a été récemment introduit, la terminologie Z-source (Source d'Impédance) étant liée au remplacement du bus continu classique de l'onduleur par un étage continu L C hybride croisé. Son intérêt est de pouvoir obtenir une tension alternative de sortie d'onduleur plus importante qu'avec un onduleur classique, soit un effet "boost naturel". Cette modification est liée à la possibilité d'introduire des phases de court-circuit des bras de l'onduleur, en superposition avec la commande classique de l'onduleur MLI. La source continue d'entrée ne doit pas être réversible et la commande de l'onduleur est légèrement modifiée [5].

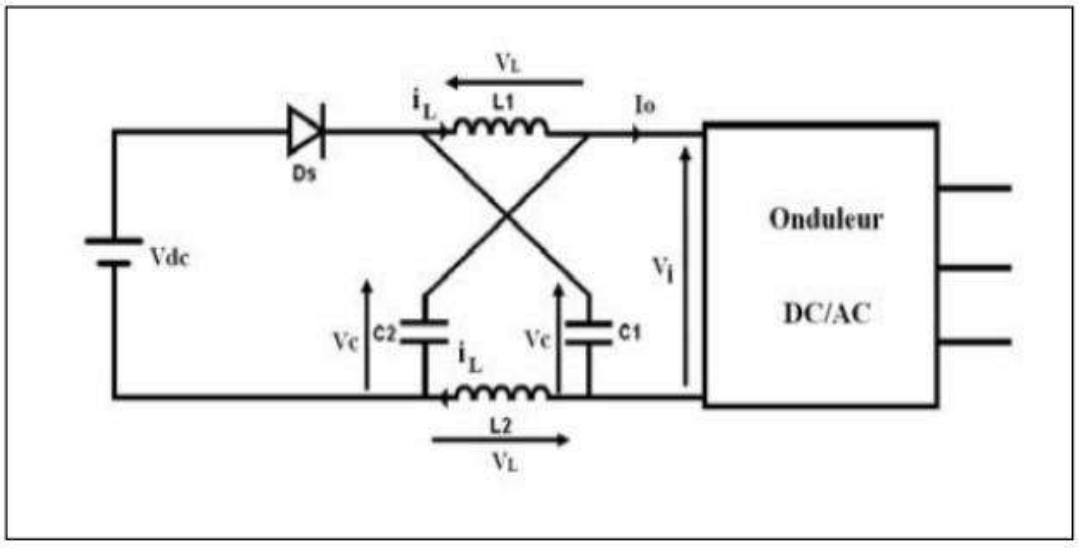


Figure II.1 : Structure de l'onduleur Z-source.

On définit vi la tension d'entrée de l'onduleur (figure 1), $\hat{V}_M$ la valeur crête du fondamental de la tension simple de sortie de l'onduleur, i $\hat{V}_i$ la valeur crête de la tension d'entrée de l'onduleur.

m, profondeur de modulation est définie par :

$$m = \frac{2\hat{V}_M}{\hat{V}_i} \quad \text{(II.1)}$$

b, amplification de l'étage continu est définie par :

$$b = \frac{2\hat{V}_i}{\hat{V}_{dC}} \quad \text{(II.2)}$$

B, amplification globale du système est définie par :

$$B = mb = \frac{2\hat{V}_M}{\hat{V}_{dC}} \quad \text{(II.3)}$$

L'étage continu de l'onduleur Z-source est une structure symétrique avec deux capacités nommée C1 et C2 de valeur C et deux inductances L1 et L2 de valeur L. Nous pouvons en déduire que les tensions aux bornes de capacités C1 et C2 sont identiques (notéesV_c) ainsi que les courants dans les bobines (notési_L).

III. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE L'ONDULEUR Z-SOURCE

L'onduleur Z-source est un onduleur capable de régler les tensions de sortie grâce à sa profondeur de modulation m (comme dans un onduleur classique), mais aussi par modification de la tension d'entrée vi par réglage des durées de court-circuit de bras de l'onduleur.

Ces courts-circuits sont effectués pendant les phases de roue libre sur la charge triphasée de l'onduleur (vecteurs nuls des MLI vectorielles). Les états de l'onduleur vus par la charge restent inchangés. Ainsi, la charge est insensible aux courts-circuits faits sur l'étage continu Z-source. L'amplification maximale b est obtenue lorsqu'on court-circuit le plus longtemps possible l'étage continu de l'onduleur. Cette durée dépend de la durée des vecteurs nuls, donc de la profondeur de modulation m.

Le fonctionnement du dispositif est lié aux comportements des éléments non linéaires entourant l'étage continu Z-source :

- l'état de la diode D_S : passante ou bloquée

- l'état de l'onduleur : roue libre, état actif (échange de puissance entre l'étage continu et la charge), court-circuit des bras de l'onduleur

Le tableau 1 montre les différentes configurations réellement présentes avec les commandes classiques.

Etat de la diode D_S	onduleur en roue libre	Onduleur actif	Z-source court-circuit
Passante	Oui	oui	non
Bloquée	Non	non	oui

Tableau I.1 : états utilisés avec la commande Z-source.

En effet, le fonctionnement normal du montage ne permet pas la présence des 6 combinaisons au niveau du Z source [1]:

- Si les bras de l'onduleur sont court-circuités, la diode est nécessairement bloquée (lié au mode élévateur du montage).

- Si l'onduleur est actif (échange de puissance entre l'étage continu et la charge), alors la diode $D_S$est passante.

- Si l'onduleur est en roue libre,$D_S$est normalement passante, ceci étant lié au choix de la fréquence de découpage de l'onduleur et aux valeurs usuelles de L et C.

III.1. Détermination des coefficients d'amplification

Afin de pouvoir calculer ces coefficients, une analyse succincte des trois états utiles de l'onduleur Z-source doit être effectuée, sur une période de modulation, pour déterminer les équations qui régissent ce système.

- Mode 1 -$D_S$passante et onduleur actif : Durant cet état l'onduleur peut être représenté comme une source de courant vu de l'étage continu Z-source (figure 2).

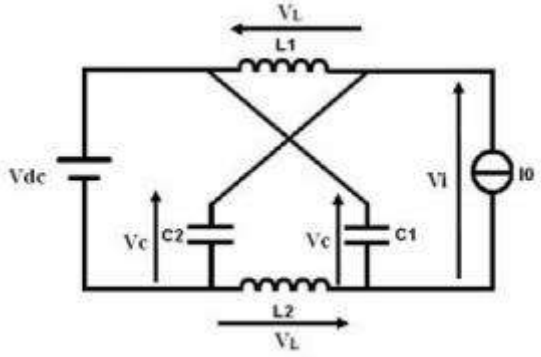


Figure III. 2: Schéma équivalent du mode 1

Les valeurs des tensions (4) et (5) peuvent être déterminées :

$$V_L = V_{dc} - V_c \quad \text{(III.4)}$$

$$V_i = V_C - V_L = 2V_c - V_{dc} \quad \text{(III.5)}$$

- Mode 2 - D_S passante et onduleur en roue libre (sans court-circuit) :

Durant cet état, l'onduleur peut être représenté comme un circuit ouvert (figure 3) et les tensions V_c et vi restent identiques aux équations (4) et (5). C'est un cas particulier pour lequel i_0 est nul.

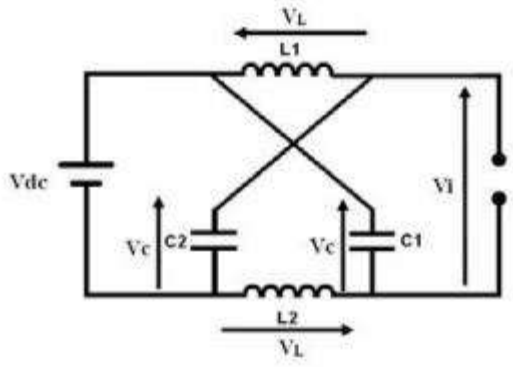


Figure III.3 : Schéma équivalent du mode 2

- Mode 3 –D_S bloquée et Z-source court-circuité :

Durant cet état, au moins un bras de l'onduleur est court-circuit, ce qui impose une tension nulle en sortie de l'étage continu Z-source (figure 4).

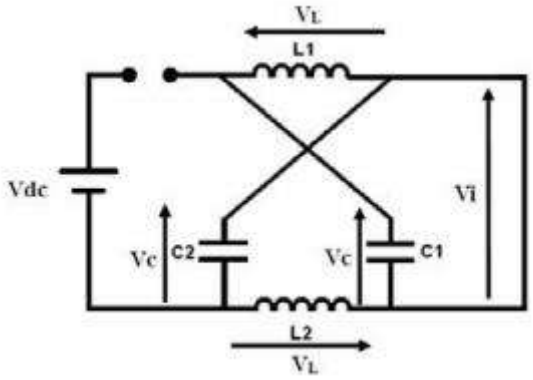


Figure III.4 : Schéma équivalent du mode 3

A partir de la figure 4 nous pouvons déterminer les équations les tensions (6) et (7).

$$V_L = V_C \quad \text{(III.7)}$$

$$V_i = 0 \quad \text{(III.8)}$$

De ces équations électriques, il est possible de déduire la valeur des tensions du montage durant une période de modulation et de déterminer les valeurs des amplifications. T désigne la demi-période de la commande de la structure Z-source, la commande étant élaborée à partir de porteuses triangulaires:

$$T = T_0 + T_1$$

Avec T_0 durée des courts-circuits de l'onduleur Z-source (V_0=0) et T1 la durée des états actifs de l'onduleur durant T. Le rapport cyclique de court-circuitT_0/T est noté D_0.

$$< V_L > = \frac{T_0 * V_C + T_1 * (V_{dc} - V_c)}{T} = 0 \quad \text{(III.9)}$$

La tension aux bornes des capacités peut être calculée à partir de l'équation (9).

$$V_{c1} = V_{c2} = V_c = \frac{T_1}{T_1 - T_0} V_{dc} \quad \text{(III.10)}$$

$$V_i = \frac{T_1 * (2V_c - V_{dc})}{T} = \frac{T_1}{T_1 - T_0} V_{dc} = V_c \quad \text{(III.11)}$$

La tension d'entrée maximale de l'onduleur$\widehat{v_i}$, nous permet de calculer avec les équations (4) et (9), les coefficients d'amplification de la structure.

$$\hat{v}_i = 2v_c - V_{dc} = \frac{T}{T_1 - T_0} V_{dc} = \frac{1}{1 - 2\frac{T_0}{T}} V_{dc} \quad \text{(III.12)}$$

Donc le rapport d'amplification de l'étage continu b est égal à :

$$b = \frac{\hat{V}_i}{\hat{V}_{dC}} = \frac{1}{1 - 2\frac{T_0}{T}} = \frac{1}{1 - 2D_0} \geq 1 \quad \text{(III.13)}$$

Fin de garder une tension positive vi aux bornes de l'onduleur, le rapport cyclique de court-circuit D0 doit être inférieur à 0.5.

Le coefficient d'amplification ou de réduction du dispositif complet (B) répond à l'équation:

$$V_M = m\frac{V_i}{2} = m * b\frac{V_{dc}}{2} = B * \frac{V_{dc}}{2} \text{(III.14)}$$

III.2.1. Etude de l'amplification maximale

L'amplification maximale est obtenue lorsqu'on court-circuite au maximum l'onduleur, avec un rapport cyclique de court-circuit maximal noté 0 $D\hat{}_0$. Cette durée est limitée à celle des états nuls afin de ne pas modifier la modulation appliquée à la charge, donc cette valeur maximale dépend de l'indice de modulation [6].

$$D_0 = \frac{2\pi - 3\sqrt{3m}}{2\pi} \text{(III.15)}$$

La contrainte sur le rapport cyclique de court-circuit maximal ($D\hat{}_0 < 0.5$)) implique une profondeur de Modulation $m > \frac{\pi}{3\sqrt{3}} (\approx 0.6)$

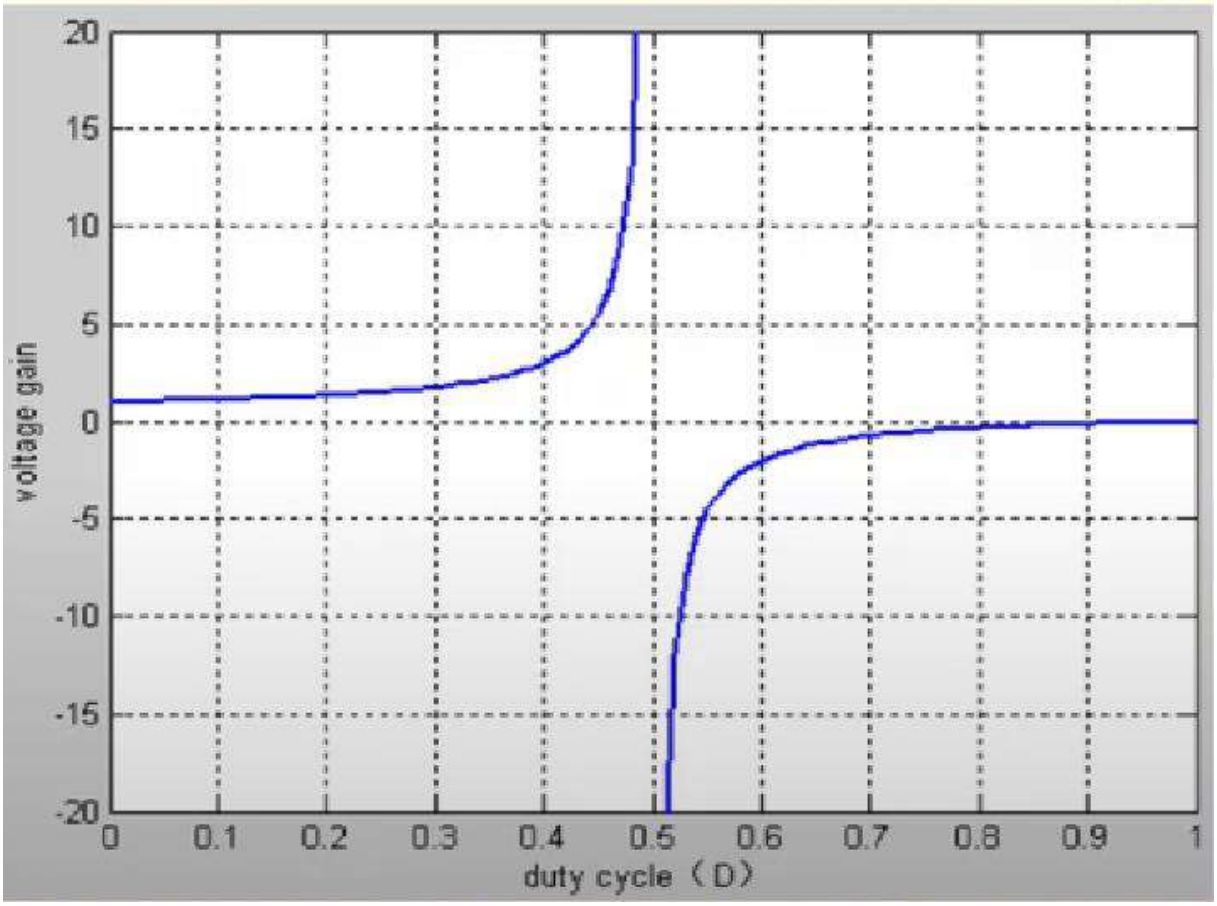


Fig. III.5. Variation du facteur de modulation en fonction du rapport cyclique

Nous pouvons en déduire, à partir des équations 3, 13 et 15, les coefficients d'amplification maximaux en fonction de la profondeur de modulation :

$$b\hat{} = \frac{\pi}{3\sqrt{3m}-\pi} \text{(III.16)}$$

$$B\hat{} = \frac{\pi m}{3\sqrt{3m}-\pi} \text{(III.17)}$$

La figure 6 montre l'amplification globale B possible en fonction de m. L'onduleur Z source travaille sur la droite $B = m$ quand il n'y a pas d'amplification (sans court-circuit avec 0 <m< 1,15). La zone $1 < m <$ correspond à l'utilisation classique de la sur modulation [6]. Par contre s'il y a une amplification, le coefficient B se trouve, selon la valeur deD_0, dans l'aire grisée, avec m compris entre $\frac{\pi}{3\sqrt{3}} et \frac{2}{\sqrt{3}}$

En pratique, il est préférable de travailler pour un B donné à la valeur maximale de m (contour de la zone grisée représentée en trait plein), ce qui correspond à m maximal pour un B donné. Ce choix permet de diminuer au maximum la tension V_i qui est appliquée aux composants de l'onduleur et réduit leur calibre en tension. Le segment vertical pour

m = 1.154 ($\approx\frac{2}{\sqrt{3}}$) correspond à l'utilisation du léger temps de roue libre pour réaliser un court-circuit.

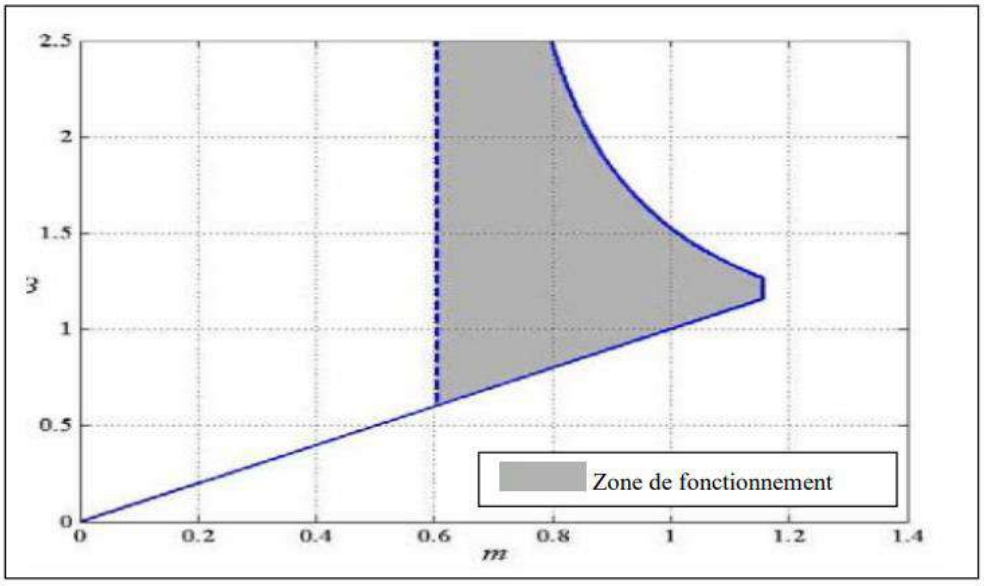


Figure III.6 : Zone de fonctionnement de l'onduleur Z-source

III.2.3. Dimensionnement et contraintes des composants:

L'évolution simplifiée des grandeurs de l'étage Z-source est représentée figure 6. Si l'ondulation est suffisamment petite [4], cette courbe est supposée linéaire. Ce n'est pas l'évolution réelle car des hypothèses simplificatrices ont été effectuées comme :

- utiliser une seule phase active de durée T1 alors que l'onduleur a classiquement quatre phases de fonctionnement

- introduire le temps de court-circuit T0 en une seule partie au lieu de trois parties séparées Ces hypothèses surévaluent la valeur de l'ondulation de Vc et il

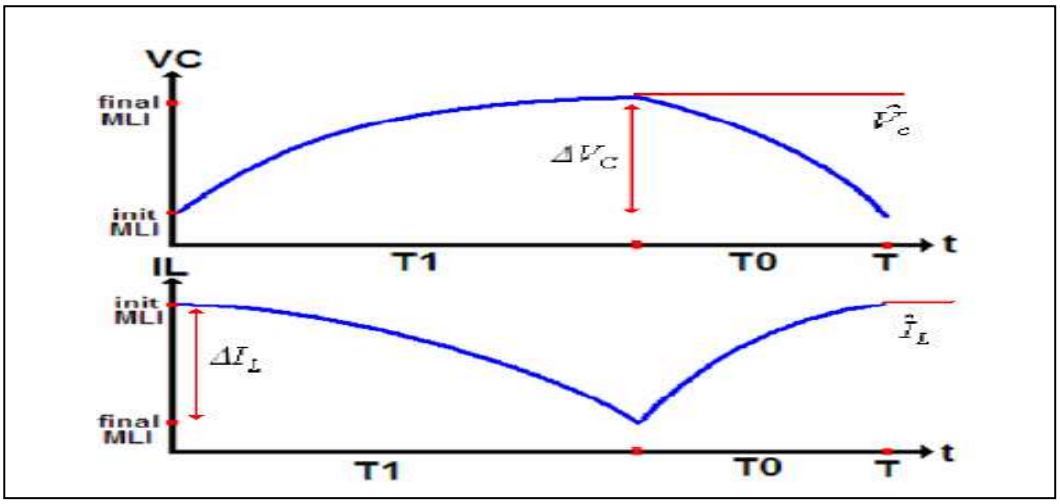


Figure III.7 : Evolution simplifiée de la tension des condensateurs et du courant dans la bobine pour unepériodeT

Donc :

$$\Delta V_c = \frac{i_c}{c}\Delta t \; et \; \Delta i_2 = \frac{v_L}{L}\Delta t \text{(III.18)}$$

On en déduit :

$$C = \frac{i_l}{2\Delta V_c}T \; et \; L = \frac{V_c}{2\Delta i_2}T \text{(III.19)}$$

Le coefficient d'ondulation K est défini par rapport à la valeur moyenne des grandeurs d'état (20) et est choisi ici identique pour les deux grandeurs.

$$K = \frac{ondulation\ V_c}{v_c} = \frac{ondulation\ I_L}{i_l}$$

Cette valeur est définie par l'utilisateur et est valable pour une période de MLI et permet de dimensionner L et C :

$$C = \frac{I_0}{2kV_{dc}} T_0 \quad \text{Et} \quad L = \frac{V_{dc}}{2kI_0} T \text{(III.20)}$$

$$C = \frac{I_0 * T_0}{2kV_{dc}} D \quad \text{ET} \quad L = \frac{V_{dc} * T_0}{2kI_0} D \quad \text{(III.21)}$$

Avec ces équations le dimensionnement de l'étage filtre de l'onduleur Z-source peut être réalisé.

$$\frac{T_0}{T} = \frac{2V_M - V_{dc}}{4V_M - V_{dc}} \text{(III.23)}$$

Les tensions nécessaires au système sont introduites (23) afin de pouvoir directement calculer les valeurs des éléments passifs.

$$C = \frac{I_0}{2kV_{dc}} \left(\frac{2V_M - V_{dc}}{4V_M - V_{dc}}\right) \text{(III.24)}$$

$$L = \frac{V_{dc} * T_0}{2kI_0} \left(\frac{2V_M - V_{dc}}{4V_M - V_{dc}}\right) \text{(III.25)}$$

Des équations (10) et (13), nous pouvons en déduire les contraintes sur les éléments passifs (V_c *et* l ¡sont les grandeurs crêtes importantes) (26 et 27). L'ondulation de ces grandeurs est supposée suffisamment petite pour pouvoir la négliger.

$$V_c = \frac{b+1}{2} V_{dc} \text{(III.26)}$$

De même pour le courant dans la bobine :

$$V_c = \frac{1 - D_0}{1 - 2D_0} I_0 = \frac{b+1}{2} I_0 \text{(III.27)}$$

Avec le bilan de puissance nous pouvons calculer I0 :

$$I_0 = \frac{3V_M I_M}{2V_{i(T1)}(1-D_0)} = \frac{3V_M I_M}{3(2V_c - V_{dc})(1-D_0)} \text{(III.28)}$$

Les contraintes en tension-courant sur les semi-conducteurs peuvent également être estimées.

Contraintes sur la diode d'entrée :

La diode est bloquée seulement lorsque l'onduleur est en court-circuit (figure 4) et il y a une tension à ses bornes uniquement pendant ce moment, donc :

$$\tilde{V}_{DS} = V_{DS} - 2\tilde{V}_c = -b * V_{dc} \text{(III.29)}$$

La diode est passante tout le reste du temps donc:

$$\tilde{I}_{DS} = 2\tilde{I}_L - I_0 = -b * I_0 \text{(III.30)}$$

Contraintes sur les transistors de l'onduleur :

Les transistors de l'onduleur doivent supporter la tension maximale, notée $\tilde{V}_{Tr}$ lorsque l'onduleur est en fonctionnement classique (figure 3) donc :

$$\tilde{V}_{Tr} = \tilde{V}_i = b * V_{dc} \text{(III.31)}$$

Le courant maximal noté$\tilde{I}_{Tr}$ ÎTr est obtenu lors d'une phase de court-circuit car les transistors doivent supporter le courant maximal de la charge mais aussi un courant de court-circuit supplémentaire, donc :

$$\tilde{I}_{Tr} = 2I_L + I_M = (b-1)I_0 + \tilde{I}_M \text{(III.32)}$$

Avec $\tilde{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{M}}$, courant maximal dans les phases du moteur. Les contraintes critiques sur les composants sont donc liées à la valeur de **b** qu'il convient de minimiser.

IV.1 COMPARAISON ENTRE L'ONDULEUR Z-SOURCE ET UNE STRUCTURE EQUIVALENTE

L'onduleur Z-source peut être comparé à une structure équivalente telle que le hacheur survolteur en cascade avec un onduleur (figure II.7) [7].

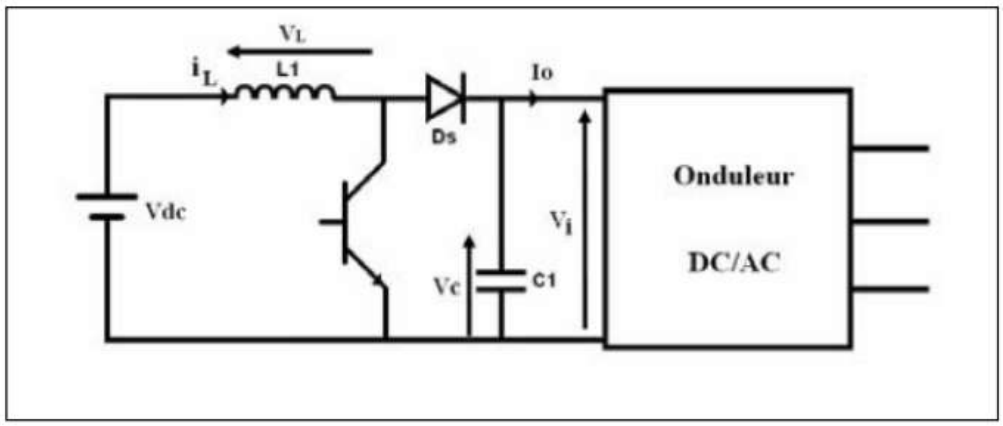


Figure IV.7: Structure hacheur survolteur en cascade avec un onduleur, équivalente a la structure Z source.

La figure 8 présente les zones de fonctionnement des deux structures. Elle fait remarquer que la commande séparée de la structure traditionnelle (gris clair) a une zone de fonctionnement plus étendue que la structure Z source (gris foncé). Le hacheur boost et l'onduleur se répartissent indépendamment l'amplification avec m pris maximal pour diminuer b pour l'onduleur, et b pour le hacheur survolteur.

Par contre l'onduleur Z-source doit effectuer une réduction de son indice de modulation m afin d'augmenter le temps des vecteurs nuls et amplifier suffisamment (m et b non indépendant (16). Le coefficient b doit être plus grand pour avoir une amplification globale identique.

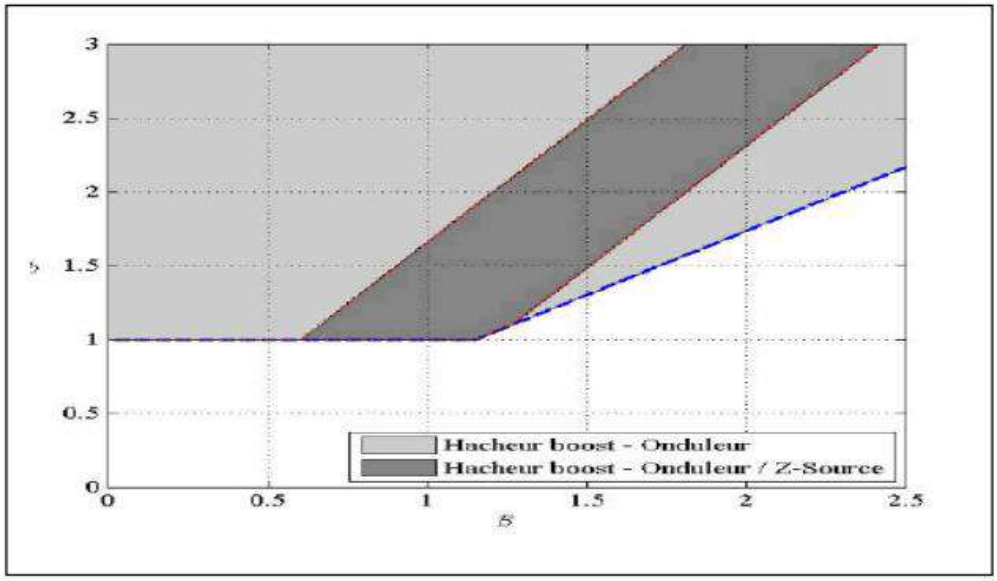


Figure IV.8 : Zones de fonctionnement des deux structures

Pour une amplification globale donnée nous pouvons remarquer trois zones de fonctionnement pour un b minimal. De 0 à 1.154, nous utilisons uniquement la profondeur de modulation, de 1.154 à 1.27 (17) nous utilisons le peu de court circuit possible avec m égal à 1.154 puis, au-dessus de 1.27, il nous faut jouer sur le couple m et b (limite droite de la zone grise foncée). Cette dernière partie impose un coefficient b plus grand pour le Z-source que la structure classique. Ce coefficient est directement lié la tension d'entrée de l'onduleur et donc au calibre des transistors de l'onduleur. Le taux de surdimensionnement en tension (en %) de l'onduleur Z-source par rapport à la structure équivalente est présenté sur la figure II.9. Il peut atteindre 91% pour une grande amplification B.

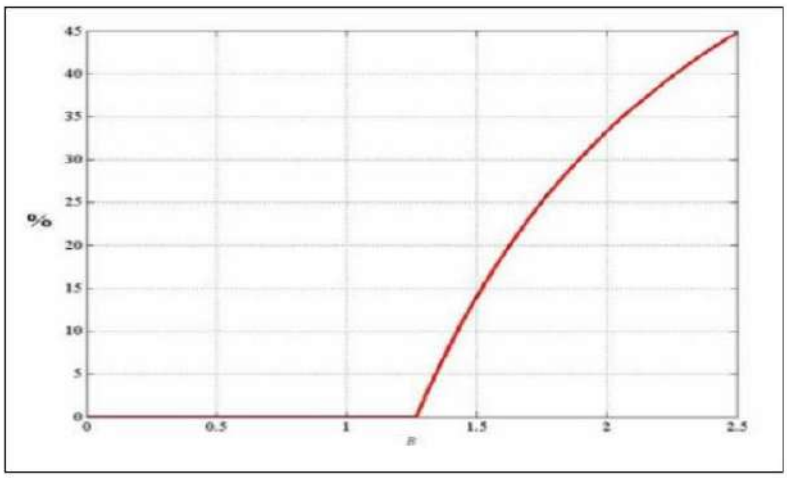


Figure IV.9: Surdimensionnement en tension de l'onduleur Z-source (%) en fonction de B

L'onduleur Z-source effectue un nombre de commutations plus important (courts-circuits de l'onduleur), sous une tension et un courant plus grand. Les pertes par commutation seront par conséquent plus grandes. Les pertes par conduction sont aussi plus importantes à cause des phases de court-circuit. Il faut par conséquent

V. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons détaillé l'analyse théorique et le fonctionnement de l'onduleur à structure Z-source qui nous a permis d'établir les équations de sortie du convertisseur. L'onduleur Z-source emploie un réseau unique d'impédance pour coupler le circuit principal de l'onduleur à la source d'alimentation continu, et fournissant ainsi une tension alternative amplifiée, Suivant la figure (III.5) de l'équation (III.11) on peut dire que c'est un convertisseur boost. Et nous avons vu la particularité de ce type de convertisseur qui se caractérise par l'insertion d'un court-circuit (Shoot-through) ce qui nous permet d'obtenir à la fin des tensions alternatives amplifiée et indépendantes de la tension d'entrée.

Chapitre II

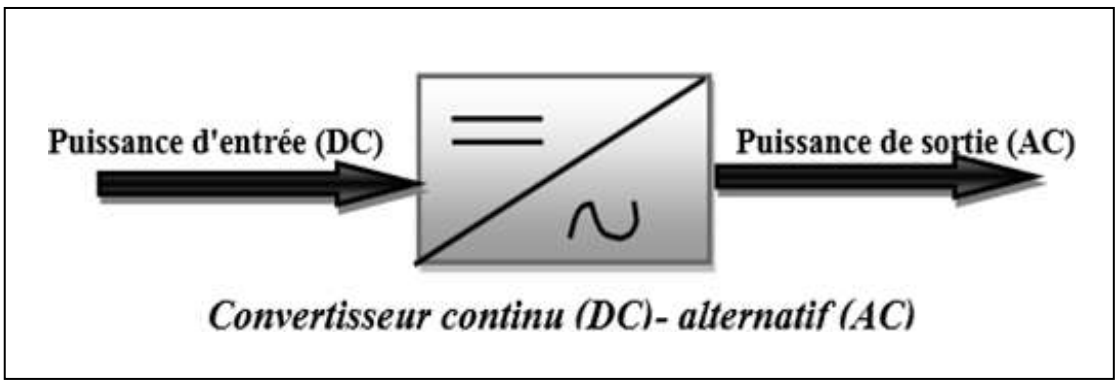
ONDULEUR MULTI - NIVEAUX

II.1 Introduction.

Un onduleur est un convertisseur statique, assurant la conversion continue alternatif. Cesdernièresannées,desconvertisseursstatiquessontdeplusenplusexploitésdansdesapplications diverses. Certaines d'entre elles exigent une alimentation électrique à haute oumoyennetension,facilementréglableetayantdebonnesperformancesspectrales.Denouvelles techniques dites multi niveaux ainsi que de nouvelles topologies de convertisseursont été développées. Elles permettent de générer plusieurs niveaux de tension à la sortie duconvertisseur. Le nombre de semi-conducteurs nécessaires à la réalisation de ces topologiesaugmente avec le nombre de niveaux désirés.Dans ce travail nous intéressons à l'étude des convertisseursmulti niveaux et leursdifférents types.

II.1.Définitiondel'onduleurmultiniveaux

Unonduleur estun convertisseurstatique assurant la conversioncontinue-alternative,alimenté en continu, il modifie de façon périodique les connexions entre entrée et la sortie etpermet d'obtenirl'alternatifàlasortie



Figure(II.1)Schémadeprincipedel'onduleur

L'onduleur de tension multi-niveaux possède trois ou plusieurs niveaux. Par leur

structure,Lesonduleursàtroisniveauxsontréversibles.Ils peuvent fonctionnerenonduleurpourtransférer l'énergie de la source de tension continue à la source de courant alternatif ou bienfonctionneren redresseuretassureralorsletransferténergétiquedanslesensinverse

III.1. Historique et avantages des structures de conversion multi niveaux.

- **. Historique**

L'histoire de la conversion multi niveaux commence au début des années 70. La première structure décrite est une mise en série de pont en H pour synthétisé une tension de sortie alternative sous forme d'escalier. Puis au début des années 80 est apparu le convertisseur clampé par le neutre NPC. Cette structure est considérée comme le premier convertisseur multi niveaux pour des applications de moyennes puissances. Puisque l'onduleur NPC double effectivement le niveau de tension sans exiger une tension assorti précise, la topologie NPC a régné dans les années 80. L'application de l'onduleur NPC et de son extension aux convertisseurs multi niveaux a été publié par. Depuis, de nombreuses études ont été proposées pour étudier ses propriétés et les évolutions possibles de cette structure.

Bien que l'onduleur multi niveaux en cascade ait été inventé le premier, ses applications n'ont pas régné jusqu'au milieu des années 90. Deux brevets importants ont été publiés pour indiquer la supériorité des onduleurs en cascade pour l'entrainement des moteurs. En raison de la grande demande des onduleurs de haute puissance et de moyenne tension, l'onduleur multi niveaux en cascade a tiré d'énorme intérêt.

Dans les années 90, les recherches sont tournées vers de nouvelles structures et ils sont portées vers les convertisseurs multicellulaires série, aussi connus dans la littérature sous le nom de FlyingCapacitor.(FC) Et c'est à la fin des années 90 qu'est né le convertisseur multicellulaire superposé, cette structure est une suite de la réflexion sur les convertisseurs multicellulaires série. Ces structures peuvent être considérées comme les structures de base de la conversion multi niveaux. Beaucoup de propriétés de ces structures de base sont communes avec les nouvelles structures découvertes [8]

- **Avantages**

Un convertisseur multi niveaux à plusieurs avantages par rapport a un convertisseur conventionnel a deux niveaux qui utilisent la modulation de largeur d'impulsion MLI à haute fréquence de commutation. Les caractéristiques techniques attrayantes d'un convertisseur multi niveaux peuvent être brièvement récapitulées comme suit :

• Qualité de forme d'onde en escalier : les convertisseurs multi niveaux non seulement peuvent générer des tensions de sortie avec de très faible déformation, mais également peuvent réduire les efforts dv/ dt , pour cette raison les problèmes d'électromagnétique peuvent être réduits.

• Mode commun de tension (MC) : les convertisseurs multiniveaux produisent une plus petite tension de (MC) , pour cette raison, l'effort dans les roulements d'un moteur connecté à un onduleur multi niveaux peut être réduit. En outre, on peut éliminer la tension de (MC) en employant des stratégies de modulation avancées.

• Courant d'entrée : les convertisseurs multi niveaux peuvent dessiner un courant d'entré avec faible taux de déformation.

• Fréquence de commutation : les convertisseurs multi niveaux peuvent fonctionner à la fréquence fondamentale et à haute fréquence de commutation MLI . Il est convient a noté que une faible fréquence de commutation signifie habituellement une faible perte par commutation donc le rendement est plus élevé. Malheureusement, les convertisseurs multiniveaux ont quelques inconvénients. Un inconvénient particulier est le grand nombre d'interrupteurs semi-conducteur requis. Bien que des commutateurs évalués à tension réduite puissent être utilisés dans un convertisseur multi niveaux, chaque commutateur exige un circuit relatif de commande de gâchettes. Ceci peut rendre le système général plus cher et complexe. Nous présentons ci-dessous, les principales topologies de convertisseurs multi niveaux évoquées dans la littérature, aussi bien que ses principaux atouts et faiblesses [8].

IV.1. Principales topologies des onduleurs multi-niveaux

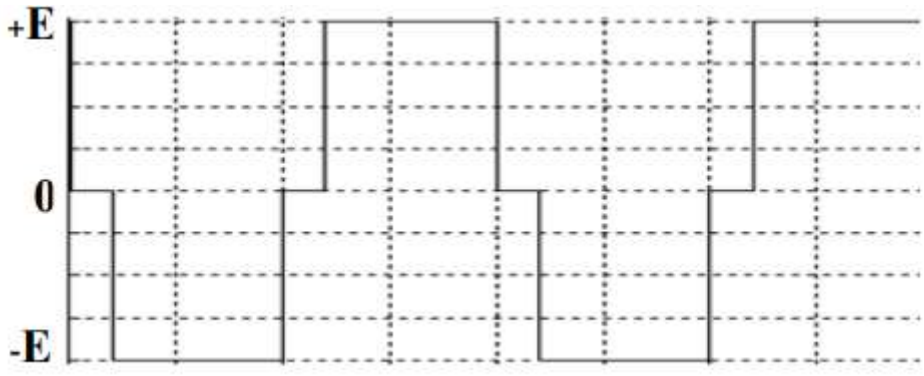
IV.2.1 Intérêt des onduleurs multi-niveaux

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 [9].

IV.2.2 Structure des onduleurs à 3 niveaux :

Par le jeu de commande des interrupteurs, ses onduleurs sont capables de fournir 3 niveaux de tension en sortie. Cette commande est obtenue par l'association des ondes rectangulaires déphasées, l'une par rapport à l'autre avec un angle variable d'où une commande à trois états de sortie (-E, 0, +E) **figure 1**. Avec la valeur efficace de la tension de sortie de l'onduleur est réglable en agissant sur la durée du créneau [11].



Figure(IV.1) : forme d'onde en sortie des onduleurs 3 niveaux

V.1. Les onduleurs multi-niveaux :

V.2.I Les divers types des onduleurs :

On distingue les onduleurs de tension et les onduleurs de courant, en fonction de la source d'entrée continue : source de tension ou source de courant. La technologie des onduleurs de tension est la plus maitrisée et présentée dans la plupart des systèmes industriels, dans toutes les gammes de puissance (quelques Watts à plusieurs MW).

Le classement des onduleurs dépend essentiellement :

- de la nature des sources reliées entre elles : tension ou courant ;

- du mode de commande des interrupteurs, ce qui détermine les formes d'onde de la tension ou du courant.

V.2.2 Différentes structures de convertisseurs multi-niveaux :

Le choix de la meilleure topologie d'onduleurs multi-niveaux et de la meilleure stratégie de commande, pour chaque application donnée, n'est pas souvent clair. Ces derniers font sans cesse l'objet de nombreuses publications [10] [11].

Les principales topologies des onduleurs multi-niveaux sont :

- ✓ Les onduleurs à diodes de bouclage (en anglais clamping diodes appelé diode Clamp) NPC (Neutra Point Clamped) et MPC (Multiple Point Clamped)
- ✓ L'onduleur à condensateur flotteur [ou FlyingCapacitor (FC)
- ✓ L'onduleur à pont en cascade H-bridge.
- ✓ L'onduleur MNP (Multiple Point Clamped)

- ❖ **Onduleurs multi-niveaux de type NPC** :

L'évolution rapide des techniques de fabrication des dispositifs à semi-conducteurs et l'orientation des concepteurs vers la technologie des composants hybrides tels que l'IGBT ont permis de développer de nouvelles structures d'onduleurs que le NPC (Neutral Point Clampedconverter) qui est la première structure d'onduleurs multi-niveaux à trois niveaux, proposé par Nabea[12].

En se basant sur l'onduleur de tension de type NPC, on peut étendre l'étude à des niveaux supérieurs. Selon le nombre de niveaux, on distingue deux cas :

- Si le nombre de niveaux est impair, le point neutre existe au milieu des condensateurs. Alors, la topologie NPC s'applique encore

- Si le nombre de niveaux est paire, le point neutre n'existe plus vu le nombre impair des condensateurs. La topologie qui s'applique dans ce cas, est celle à diodes de bouclage.

Pour un onduleur à N niveaux, le nombre d'éléments constituant sa topologie, notamment le nombre de sources secondaires de tension continue S, les interrupteurs Q et les diodes de bouclage D sont régis par les relations suivantes :

$$S = N - 1$$

$$Q = 2 * (N - 1) \qquad \text{(V.1)}$$

$$D = 2 * (N - 2)$$

La tendance vers l'augmentation du nombre de niveaux est dictée par le besoin de tensions plus élevées pour les applications de forte puissance. Dans cette étude, on se limite à l'analyse des onduleurs multi-niveaux de type NPC. Donc seul le nombre de niveaux impair est considéré.

- **Hypothèse :**

Les tensions d'entrée de l'onduleur sont supposées parfaites. En pratique, cela se traduit par le fait que, quel que soit le courant délivré par cette alimentation, la tension à ses bornes reste constante$U_{c1} = U_{c2} = \cdots = U_{cs} = U_s$. La chute de tension aux bornes des semi-conducteurs est négligeable devant la tension d'alimentation qui est de l'ordre de quelques centaines de volts.

Remarque :

Pour des applications ne nécessitant pas d'apport de puissance active, on peut se passer d'alimentation et se contenter d'éléments stockeurs, comme des condensateurs.

❖ Onduleurs multi-niveaux de type NPC à 3 niveaux :

L'idée de base de l'onduleur NPC est l'obtention d'une tension de sortie à trois niveaux. A partir l'équation I-4 ; on a le niveau N=3, donc

- Le nombre de source de tension est : S = 3-1= 2.
- Le nombre des interrupteurs est : Ka = 2(3 – 1) = 4.
- Le nombre des diodes est : D = 2(3 – 2) = 2.

Par la superposition de deux interrupteurs élémentaires alimenté chacun par une source de tension continue distincte.

A l'aide d'un diviseur de tension capacitif formé par les condensateurs C1 et C2 de même capacité, on obtient deux sources secondaires de tension continue délivrant chacune un potentiel à demi tension E/2. Cette structure crée alors un point neutre O entre les condensateurs C1 et C2 [13].

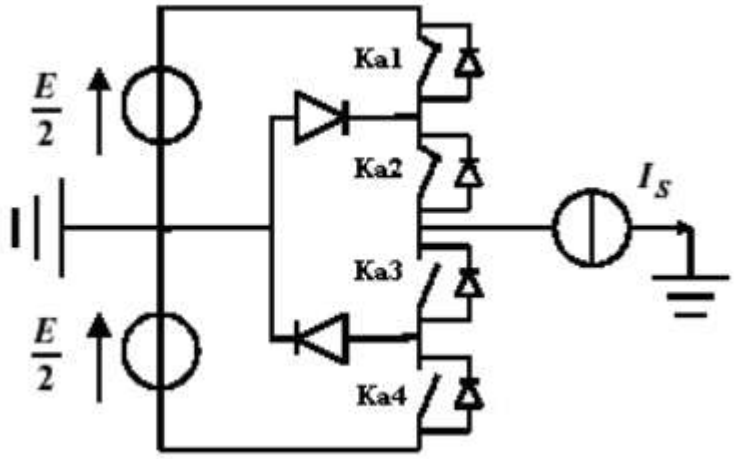


Figure (V.1): Onduleur NPC 3 niveaux

Les transistors IGBTs en série avec un point commun relié par une diode au point neutre O. Des diodes antiparallèles sur les transistors assurent la réversibilité des courants de la charge.

Lors du passage d'une configuration à une autre, il faut laisser un petit intervalle de temps entre la commande à l'ouverture de l'interrupteur qui doit s'ouvrir et la commande à la fermeture de l'interrupteur complémentaire pour éviter la mise en court-circuit des condensateurs C1 ou C2.

- **Principe de fonctionnement :**

La tension de sortie Vs entre les bornes de la charge et le point neutre o est entièrement définie par l'état (0 ou 1) des quatre interrupteurs Ka1, Ka2, Ka3 etKa4. Lorsque la source de tension est génératrice et la charge est réceptrice, le courant passe à travers les transistors. Lorsque le transfert d'énergies effectue de la charge vers la source d'entrée, ce sont les diodes antiparallèles qui assurent le passage du courant. Cette tension Vao (V_s) doit prendre les trois potentiels (-E/2, 0, E/2) d'où l'appellation onduleur à trois niveaux.

Etat des interrupteurs				***Tension de sortie V_{ao}***
k_{a1}	k_{a2}	k_{a3}	k_{a4}	
1	***1***	***0***	***0***	***E/2***
0	***1***	***1***	***0***	***0***
0	***0***	***1***	***1***	***-E/2***

Tableau V.1 : Table de commutation du convertisseur NPC 3 niveaux

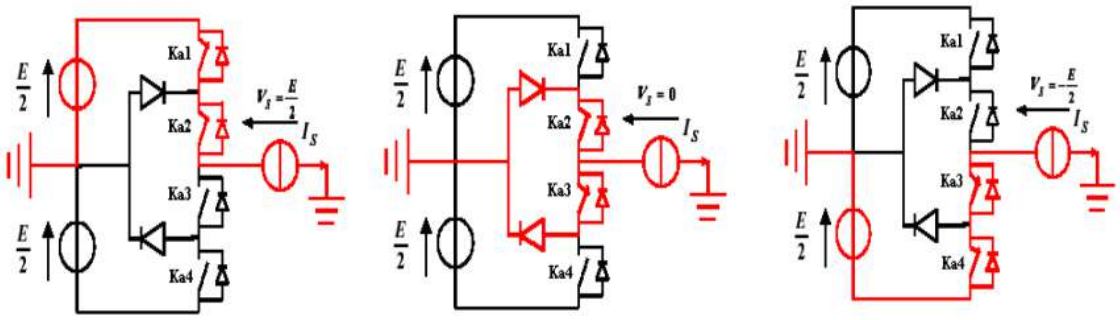


Figure (V.2): Commutation des interrupteurs du convertisseur NPC 3 niveaux

❖ Onduleurs multi-niveaux de type FC à 3 niveaux :

Le convertisseur à condensateurs flottants (FlyingCapacitorMultilevelInverters) ou convertisseur multicellulaire est une topologie de conversion d'énergie qui repose sur la mise en série d'interrupteurs commandés. Elle est apparue au début des années 1990 à la suite d'un brevet déposé par Meynard et Foch.

Cet onduleur est obtenu par raccordement de cellules de condensateurs de bouclage. Le premier avantage de cette topologie est l'absence des diodes de bouclage propres aux topologies des onduleurs NPC et MPC. De plus, les contraintes en tension imposées aux composants de puissance sont naturellement limitées : on note une faible valeur de dv/dt aux bornes des composants. Des ''*redondances*'' de commutation dans les séquences de fonctionnement introduisent des états qui peuvent être utilisés pour le maintien de l'équilibre des charges des condensateurs. Ainsi, par phase, une seule source DC est nécessaire. Les onduleurs FC peuvent présenter des nombres pairs ou impairs de niveaux, comme montre **lafigure** 4[14] [15] .

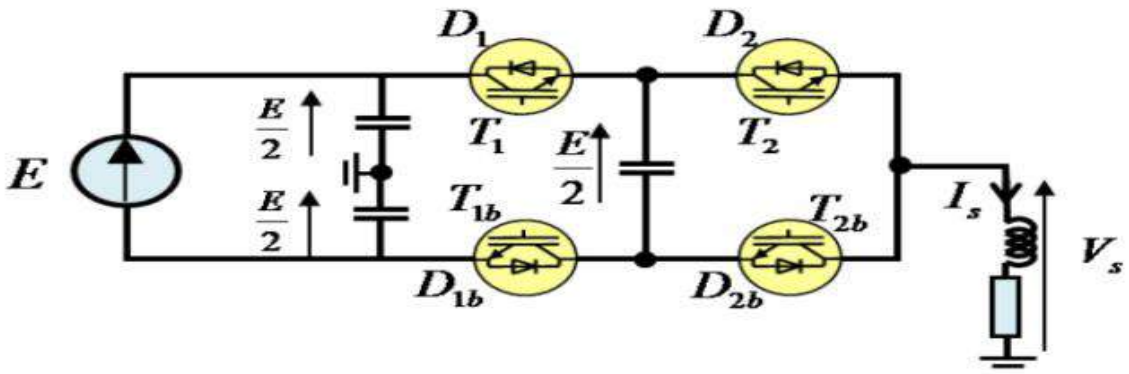


Figure (V.3): Onduleur FC 3 niveaux

- **Principe de fonctionnement de l'onduleur FC :**

Pour éviter de court-circuiter les sources de tension, les interrupteurs T1 et T1b, ou T2 et T2b doivent être commandés de manière complémentaire.

Ces deux couples d'interrupteurs forment alors deux cellules de commutation. Cette structure permet d'avoir trois niveaux de tension en sortie -E/2, 0 et E/2.

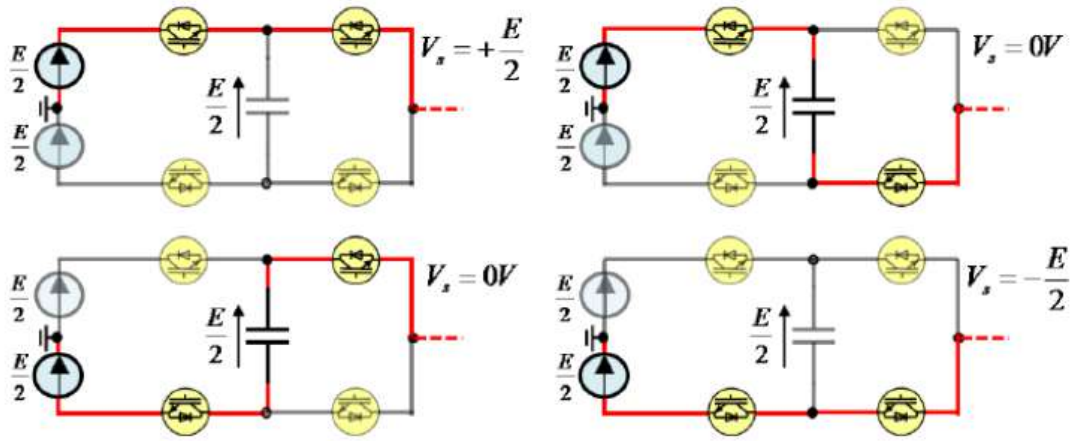


Figure (V.4): Réalisation des différents niveaux de tension avec l'onduleur FC 3Niveaux

Les différentes possibilités sont résumées dans le Tableau

Tension de sortie	Interrupteurs rendus passants	Sens du courant	Le courant circule dans..
E/2	**T1 et T2**	$Is > 0$	**T1 et T2**
		$Is < 0$	**D1 et D2**
0	**T1 et T2b**	$Is > 0$	**T1 et D2b**
		$Is < 0$	**D1 et T2b**
	T1 et T2	$Is > 0$	**T1 et T2**
		$Is < 0$	**T1b et T2**
-E/2	**T1 et T2b**	$Is > 0$	**D1b et D2b**
		$Is < 0$	**T1b et T2b**

Tableau V.2 : Réalisation des différents niveaux pour l'onduleur FC à 3 niveaux

Le FC a quelques inconvénients comme :

- Le contrôleur de la charge du condensateur augmente la complexité du contrôle du circuit entier ;
- Il exige des condensateurs mis en parallèle, dont, les forts courants pourront circuler à travers ces condensateurs ;

- Il existe un potentiel de résonance parasite entre les condensateurs découplés. Pour un onduleur à k niveaux, le nombre des éléments constituant la topologie : s pour la source DC, bc pour les bancs de condensateurs, n pour les transistors de puissance est donné, pour chaque phase, par les relations suivantes

$$S = 1$$

$$n = 2 * (k - 1) \qquad \text{(V.2)}$$

$$bc = (k - 2)$$

❖ **Onduleurs multi-niveaux de type pont en H à 3 niveaux :**

Le premier modèle d'onduleur était l'onduleur en pont H (en anglais H-bridge), apparu en 1975. Un progrès des onduleurs multi-niveaux a été dû au modèle en pont H cascadé en série. La première application d'onduleur pont H était pour la stabilisation des plasmas en 1988.

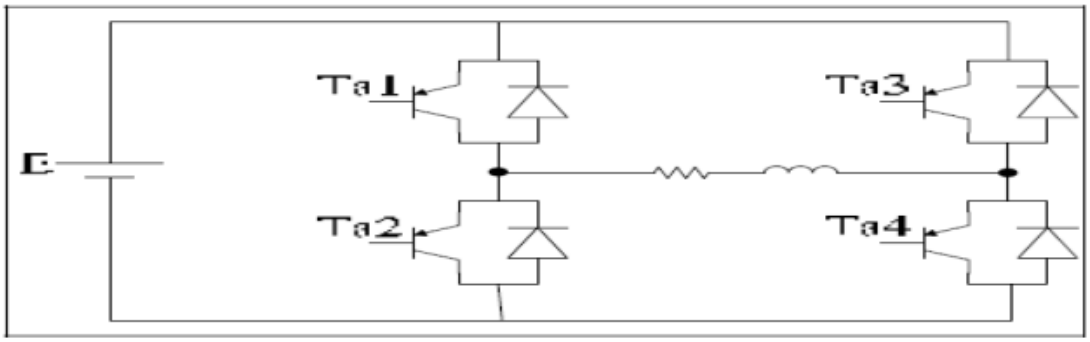


Figure (V.5): Convertisseur pont en H 3 niveaux

Les sorties des onduleurs en pont sont connectées en série de telle sorte que l'onde de la tension synthétisée soit la somme des tensions de sortie. L'avantage majeur de cette approche est que le nombre de paliers sur le motif de la tension de sortie peut être augmenté sans aucun ajout de nouveaux composants. L'utilisation de cellules de conversion de puissance en série permet d'accroître le nombre de niveaux de tension et de puissance du convertisseur. Mais l'inconvénient majeur de cette topologie est le grand nombre de tensions continues isolées et exigées pour chaque pont [16] [17] [18].

- **Principe de fonctionnement de l'onduleur pont en H :**

En comparaison avec les deux topologies précédentes, nous remarquons que nous pouvons obtenir le même nombre de niveaux avec le même nombre d'interrupteurs et sans diodes de calage ni de capacités flottantes. Néanmoins, pour chaque paire de niveaux additionnelle il faut une source de tension supplémentaire, ce qui représente un inconvénient majeur pour cette topologie

Ta1	Ta2	Ta3	Ta4	Vs
0	1	1	0	-E
0	1	0	1	0
1	0	0	1	E

Tableau V.3 : Tableau de commutations du convertisseur en H

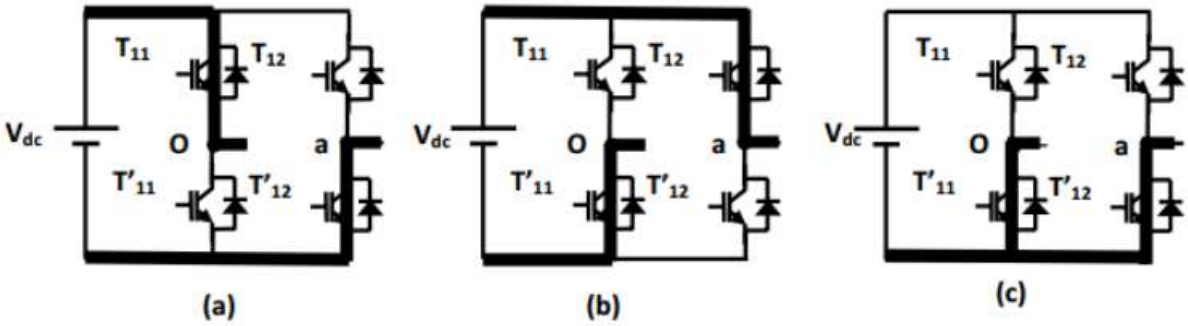


Figure (V.6): Commutation des interrupteurs de l'onduleur pont en H

- **Onduleurs multi-niveaux de type MNP à 3 niveaux :**

Cet onduleur multi-niveau est une nouvelle extension appelé 'Multi Neutral Clamped'. La topologie de l'onduleur MNP découle des onduleurs NPC et pont en H. Cette topologie supprime toutes les diodes de bouclage et utilise des transistors IGBT formant un montage bidirectionnel. Ce montage permet de développer une commande simple réalisée à l'aide d'une seule porteuse quel que soit le nombre de niveaux de l'onduleur [6] [9].

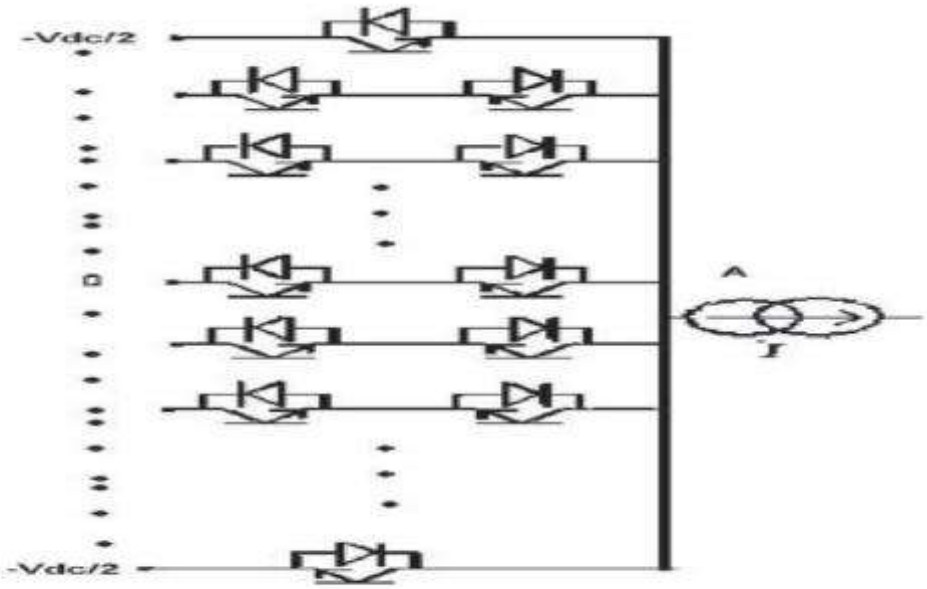


Figure (V.7): Onduleur multi-niveau de type MNP

- **Hypothèse**

L'onduleur MNP comporte des interrupteurs monodirectionnels sur les bras extérieurs (premier de deuxième étages) et bidirectionnels pour les autres bras. Les interrupteurs dits ''positifs'' sont ceux qui conduisent le courant de la source vers la charge et on les numérote de 1 à n-1, tandis que les autres interrupteurs, dits ''négatifs'', sont numérotés de n à 2n-2.

Pour les niveaux impaires, l'étage de tension zéro comportera l'interrupteur positif de numéro (n+1) /2 et l'interrupteur négatif de numéro 3(n-1) /2. L'onduleur ainsi présenté peut contenir une structure globale disposant des niveaux pairs et impairs supérieurs à 2. Dans le cas général, la figure I.8montre un onduleur MNP avec un nombre impair de niveaux et la figure I.9avec un nombre pair.

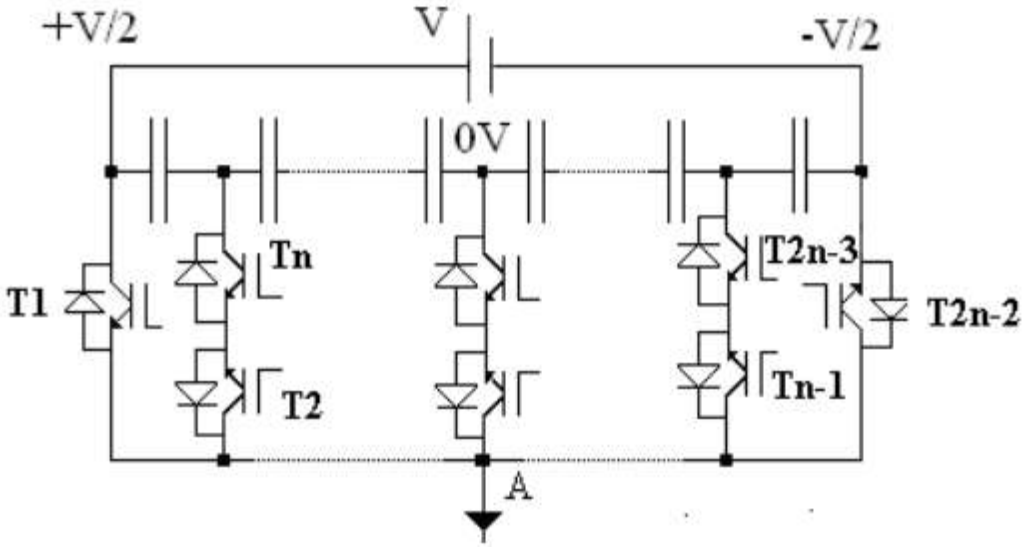


Figure (V.8): Configuration impair des onduleurs multi-niveaux de types MNP

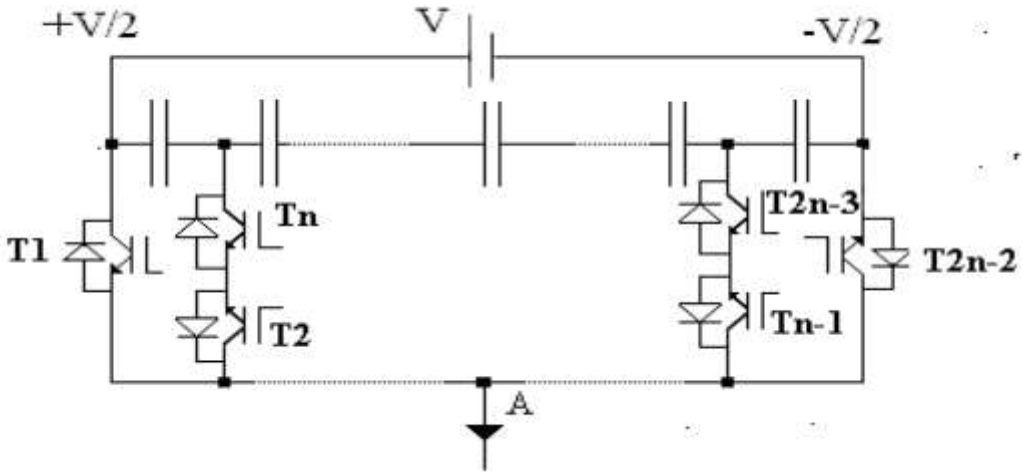


Figure (V.9): Configuration pair des onduleurs multi-niveaux de types MNP

Dans les cas d'un onduleur avec un niveau impair, le tableau I.4 présente les différentes possibilités de la formation de la tension de sortie. Sur ce tableau, la colonne de gauche présente les différentes tensions d'entrée aux bornes des condensateurs, et la colonne 'bras ', les interrupteurs [11]. Par exemple, si nous voulons avoir une tension de sortie symétrique :

- A deux niveaux, nous devrons commander les interrupteurs des bras symétriques (exemple, selon la Figure I.10 : 1 et n, ou 2 et n-1, ou 3 et n-2 …)
- A trois niveaux, nous devrons commander les interrupteurs des bras symétriques (exemple, selon la Figure I.10 : 1 et n, ou 2 et n-1, ou 3 et n-2 …) et aussi le bras central à 0V
- A n niveaux, nous devrons commander tous les interrupteurs des bras

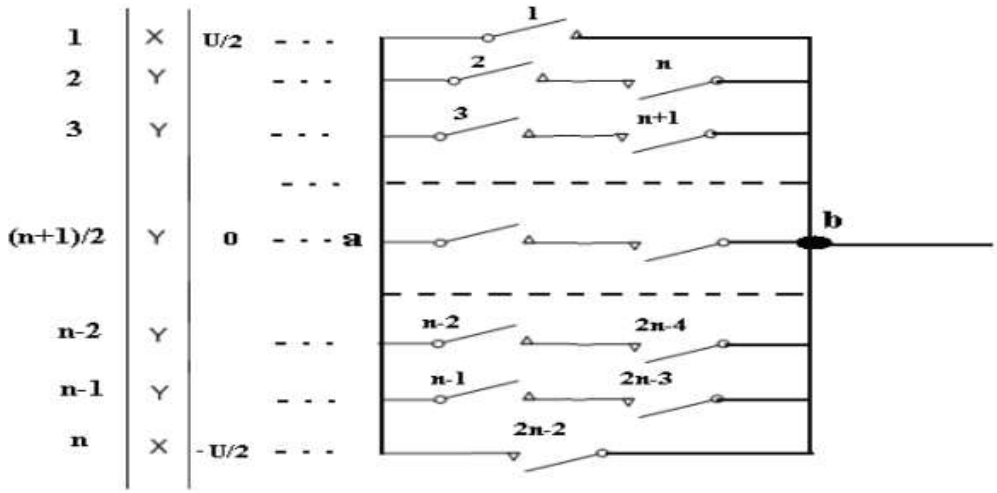


*Figure (V.10): Commutation des interrupteurs du convertisseur MNP à n nive*L'avantage de ce nouvel onduleur est de fonctionner en mode dégradé, ce qui n'est pas le cas dans les autres modèles. Ceci montre la très grande souplesse de cette configuration. Voici un tableau qui représente le nombre des composants électroniques dans l'onduleur MNP.

Tableau récapitulatif du nombre de composants pour les MNP

Nombre de niveaux	3	4	5	7
Interrupteur monodirectionnel	2	2	2	2
Interrupteur bidirectionnel	1	2	3	5
Condensateur	1	3	4	6

Généralisation :

- Interrupteurs monodirectionnels : 2
- Interrupteurs bidirectionnels : n-2

- **Principe de fonctionnement de l'onduleur multi-niveaux MNP à 3 niveaux.**

La figure 12 montre la configuration de l'onduleur MNP à 3 niveaux.

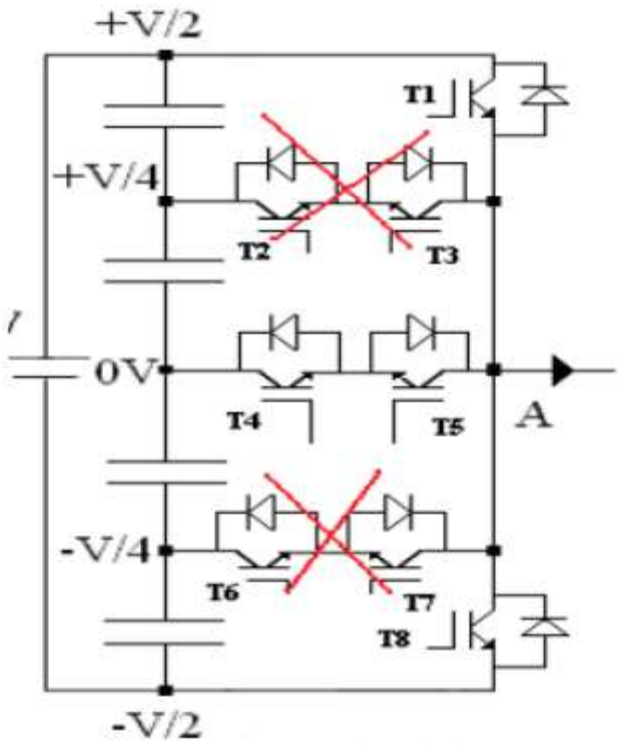


Figure (V.11): Structure de l'onduleur MNP à 3 niveaux

Pour un onduleur MNP, dans le cas d'une répartition identique de tension de l'étage continue (U), aux bornes de chaque condensateurV_{capa}, nous avons :

$$\Delta V_{capa} = \frac{u}{n-1} \qquad \text{(V.3)}$$

Ainsi, le potentiel d'un bras à l'autre se déduit de proche en proche et de façon récurrente par:

$$V_{i+1} = V_i - \Delta V_{capa} \qquad \text{(V.4)}$$

Si on suppose que la tension du premier et dernier bras est $|U\ /\ 2|$, dont $V_1 = U/2$,

$$V_n = -\frac{U}{2}\ et\ i \in [1, n]$$

Pour les contraintes électriques, par exemple dans le cas d'un onduleur MNP à 3 niveaux, la tension aux bornes de chaque IGBT dans l'état passant et bloqué peut être calculée comme suit : Si T1, T2, T3 et T4 sont bloqués :

$$\begin{cases} T_1 = u_0/2 \\ T_2 + d_3 = 0 \\ T_3 + d_2 = 0 \\ T_{4=} u_0/2 \end{cases}$$

Si T1 est passant :

$$\begin{cases} T_1 = 0V \\ T_2 + d_3 = u_0/2 \\ T_3 + d_2 = u_0/2 \\ T_{4=} u_0 \end{cases}$$

Si T4 est passant :

$$\begin{cases} T_1 = u_0 \\ T_2 + d_3 = u_0/2 \\ T_3 + d_2 = u_0/2 \\ T_{4=} 0V \end{cases}$$

Si T2 est passant :

$$\begin{cases} T_1 = u_0/2 \\ T_2 + d_3 = 0 \\ T_3 + d_2 = 0 \\ T_{4=} u_0/2 \end{cases}$$

Si T3 est passant :

$$\begin{cases} T_1 = u_0/2 \\ T_2 + d_3 = 0 \\ T_3 + d_2 = 0 \\ T_{4=} u_0/2 \end{cases}$$

- **Analyse topologique de l'onduleur MNP :**

L'analyse topologique effectue l'étude des séquences de configurations du convertisseur. Elle met alors en évidence les séquences physiquement réalisables et les séquences interdites.

- **Les configurations valides.**

Les configurations valides sont des séquences qui ne portent pas atteinte à l'intégrité des transistors de puissance. Pour faciliter la compréhension, le cas d'un onduleur MNP à 3

niveaux, nous étudions pour le courant positif dans la charge ; le même raisonnement peut être appliqué pour un courant négatif avec les interrupteurs appropriés.

	T1	T2	T3	T4
i>0 v>0	1	*	0	0
i>0 v=0	0	1	*	0
i>0 v<0	0	0	*	*

Tableau V.4 : État des interrupteurs pour un courant de charge positive

Sur le tableau V.4, ‘’1’’ indique un état passant de l’interrupteur, ‘’0’’ : un état bloqué, et ‘’*’’: un état quelconque. Nous montrons les configurations valides, quand le courant de la charge est positif. Les séquences de configurations associées à ce tableau sont données sur les figures 12 et la figure 13.

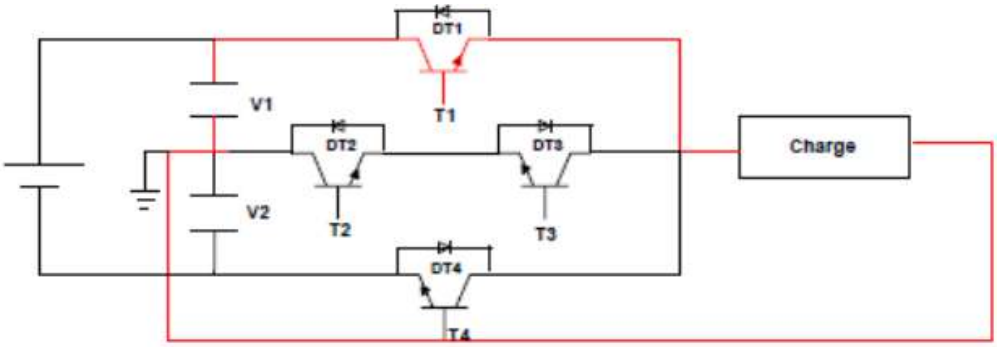


Figure (V.12): La circulation du courant dans le cas I>0 et V>0

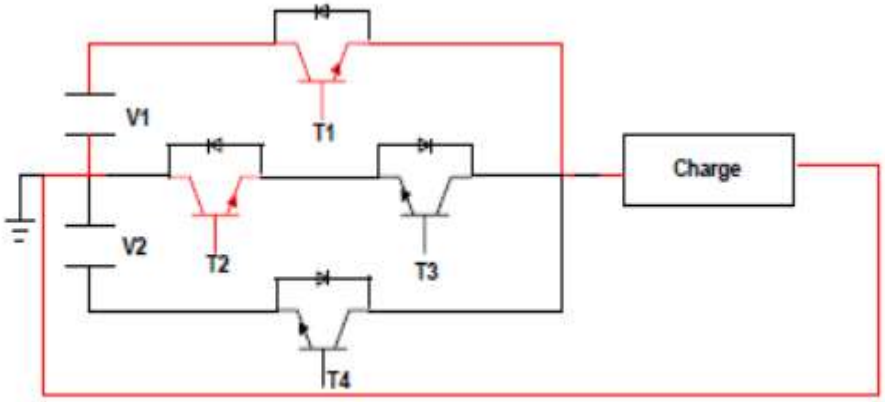


Figure (V.12): La circulation du courant dans le cas I>0 et V>0, en commutant T1 et T2 en même temps.

Figure (V.13): 11) ; 12) configuration positive validé d'un onduleur MNP 3 niveaux

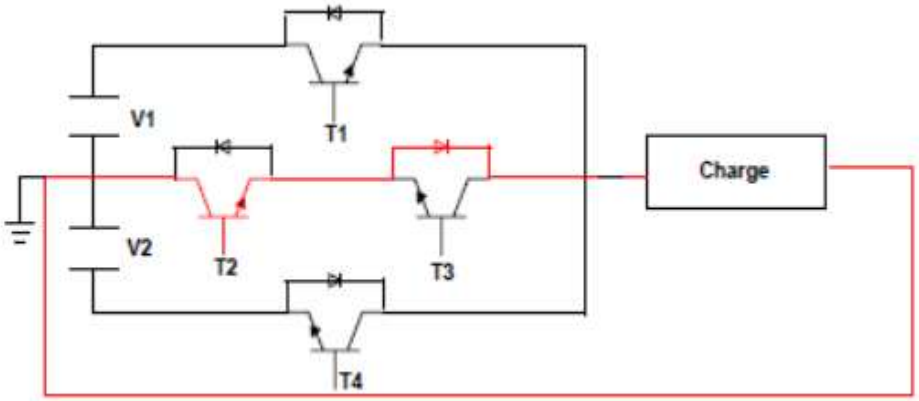


Figure (V.14): La circulation du courant dans le cas I>0 et V=0

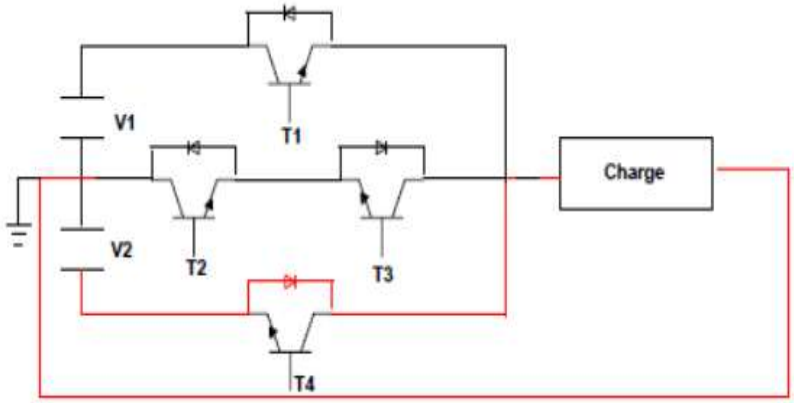
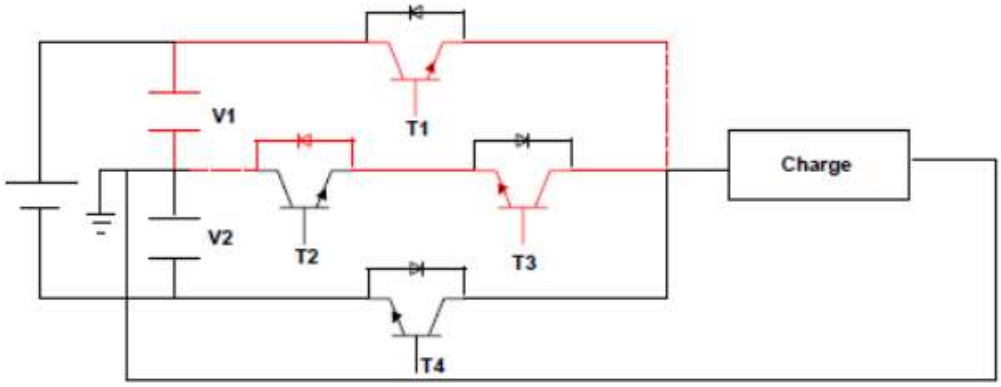


Figure (V.15): La circulation du courant dans le cas I>0 et V<0

Figure (V.16): 14) ; 15) configuration à l'état de la sortie égale à zéro et négative de l'onduleur MNP

❖ **Les configurations interdites**

Les configurations interdites sont celles qui risquent de porter atteinte à l'intégrité d'onduleur. Elles sont essentiellement dues à des courts-circuits des sources de tension. Dans l'onduleur MNP, on ne rencontre jamais d'ouverture de source de courant grâce aux diodes antiparallèles. La figure 14 et la figure 15 montrent les combinaisons interdites des interrupteurs.



Figure(V.17) : Court-circuit de V1

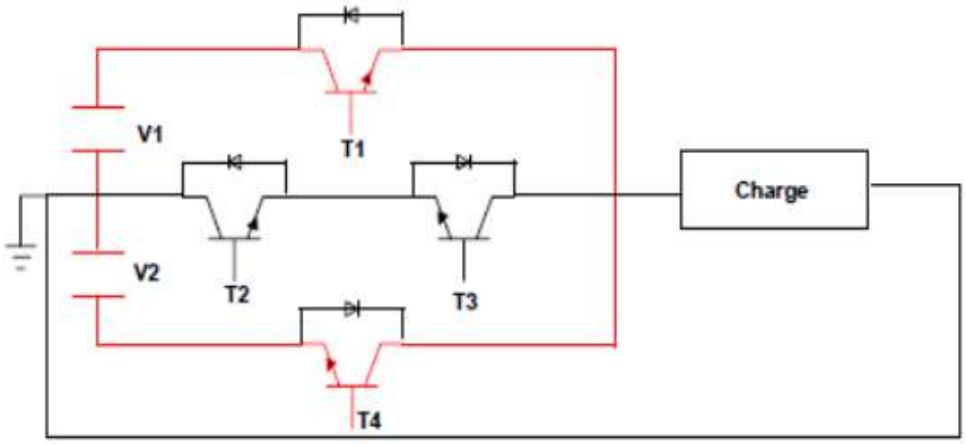


Figure (V.18): Court-circuit V1+V2

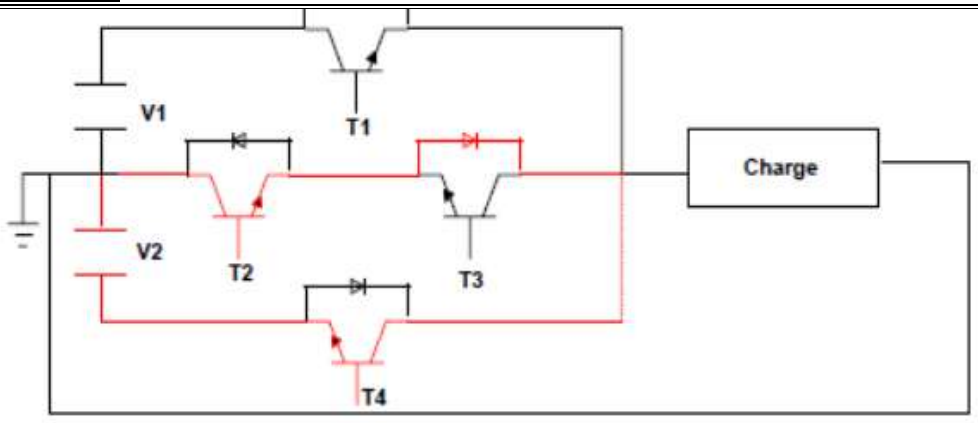


Figure (V.9) : Court-circuit V2

VI.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes topologies de la famille des onduleurs multi-niveaux. Le principe de base de toutes ces topologies est l'association de plusieurs cellules de commutation à caractéristiques spécifiques.

Le développement d'architectures et de techniques basées sur la combinaison série/parallèle de semi-conducteurs est donc profitable à condition de résoudre deux principaux problèmes : l'équilibrage des tensions et la possibilité d'entrelacement des commandes.

Nous avons vu le large domaine d'applications industrielles de ce type de convertisseurs. Le plus connue est celui de la variation de vitesse des machines à courant alternatif.

Chapitre III

Stratégie de Commande des onduleurs multi niveaux

III.1 Introduction

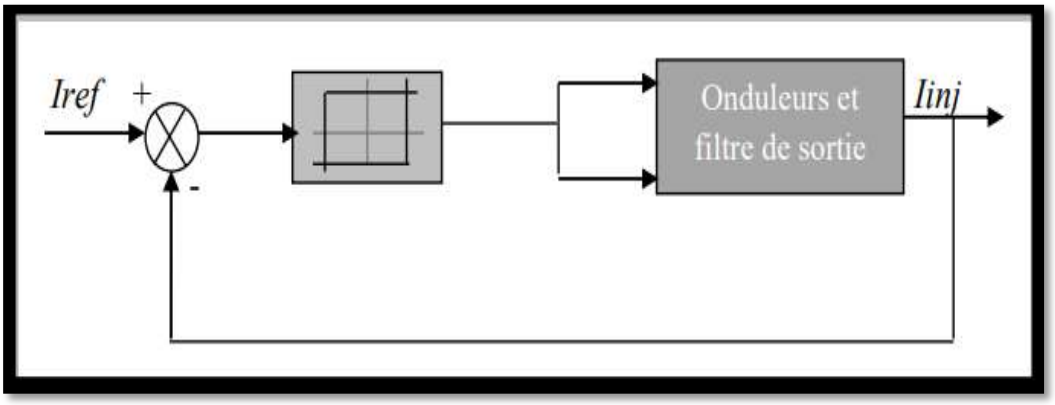
Dans ce chapitre on va voir les différentes techniques de commande les plus utilisées pour la commande des onduleurs multiniveaux.

- ✓ Commande par hystérisées
- ✓ Commande plein d ondes
- ✓ Commande par MLI Sinusoïdale.
- ✓ Commande par MLI vectorielle

Et on synthétise la Commande par MLI vectorielle'SVPWM'

III.2 Commandeparhystérisées

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande nonlinéaire quiutilise l'erreur entre lecourant de référence et le courant produit par l'onduleur.L'erreurest comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis. Dès que l'erreur atteint la bande inférieure ousupérieure,unordre decommande estenvoyéde manière à resteràl'intérieur de la bande.Lasimplicité de la mise en œuvre, illustrée par la Figure III.1, est le principal atout de cette technique. Enrevanche, les commutations évoluant librement à l'intérieur de la bande d'hystérésis, les fréquencessituées dans le haut de cette bande se maîtrisent difficilement à cause des fréquences de commutation.[20]



. *Figure III.1 Schéma de commande par hystérésis.*

Lacommandeparhystérésisassureenmêmetempslamodulationetlaprotectioncontrelessurch argesoulescourts-circuits.Depluslenombredescommutationsparpériodechangeautomatiquementen fonction des variables decommande. [21]

III.3 Commande pleinondes

La structure de bas d'un onduleur de tension triphasée est l'extension à trois cellules de commutationdecelledel'onduleurmonophasé.LeschémaélectriquereprésentésurlaFigureIII .2,estainsiorganisé autour de six ensembles transistor-diodede roue libre, constituant l'interrupteur commandesK1àK6,Latensiond'alimentation Veestsupposéeparfaitement continue.

Lesinterrupteurscommandes(IGBT1a6)sontconsidèrescommeidéauxetcommandes parlessixsignauxlogiques : COM1,COM1…….COM3,COM3.

En réalité, chaque transistor est bien commande a partir d'un signal logique mais un circuitspécialiseappelé"driver»se chargedela mise enformeet del'amplification ducourant degrille.[22]

FigureIII.2Onduleurdetensiontriphasée.

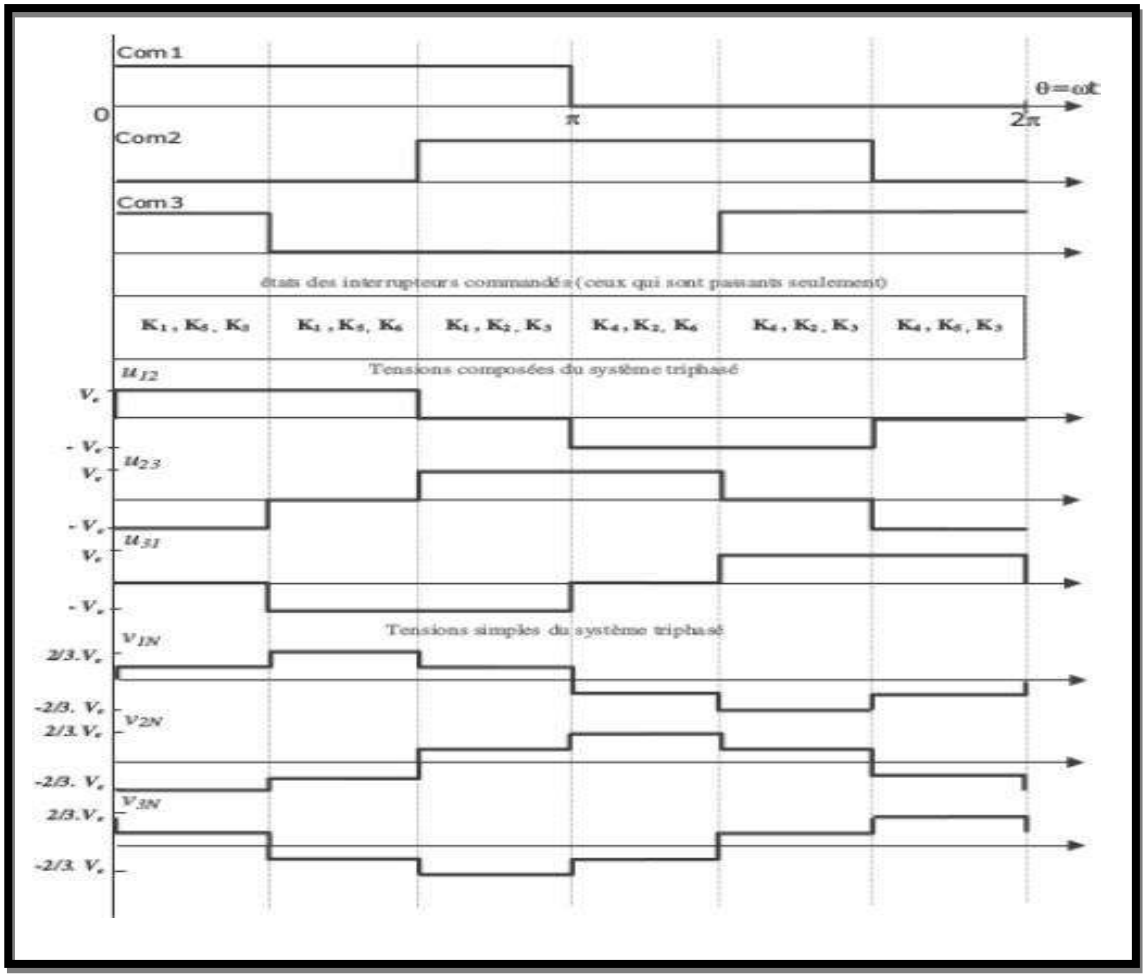
La commande pleine onde correspond ici au fait que chaque « bras » du pont (chaque cellule decommutation)estcommandeparunsignallogique et son complètement, ici COM1 et$\overline{COM1}$ …..COM3etCOM3.Enconsequencechaque« bras »présenteàchaqueinstantuncommutateurpassantet l'autrebloque.

Il est ainsi suffisant de connaitre l'évolution des signaux de commande pour déterminer l'ensemble destensions produites.

La figure II.3illustre ainsi l'allure des signaux de commande associes à la commande « plein onde »des trois bras de pont, identiques et déphases entre eux d'un tiers de periode.de ces signaux sontdéduits,sur chaqueintervalleles commutateursqui son«passants».

L'identification des commutateurs qui sont passants sur chaque intervalle permet ainsi de tracer lesallures des tensions composes du système U_{12}, U_{23}, U_{32}.par exemple.sur le tout premier

intervalletrace,lescommutateursK1,K2etK3sontconducteurs,ilsamènentdonclatensionVentrele sphases1 et 2 ainsi qu'entre les phases 3 et2. On en déduite $U_{12}=V_e$ et $U_{23}=-U_{32}=-V_e$. Enfin, la fermeturesimultanée de K1 et K2 court-circuite les phases 1 et 3, en conséquence U31=0.en faisant de même surles cinq autres intervalles qui forment la période on obtient l'allure complète des tensions composéesreprésentéessur lafigureIII.3. [23]



FigureIII.3Commandeetchronogrammesdesgrandeursdel'onduleurtriphasépleinonde

III.4 CommandeparLamodulationdelargeurd'impulsion

Lamodulationdelargeurd'impulsion(PulseWidthModulation)consisteàadopterunef réquencedecommutationsupérieureàlafréquencedesgrandeursdesortieetformerchaquealter nancedelatension desortied'unesuccessiondecréneauxdelargeur convenable.

L'essor de la modulation de largeur d'impulsion est lié aux progrès de développement dessemi-conducteurs de puissance ; l'augmentation des nombres des commutations entrainerait des pertesexcessivessi on n'avaitpasréussiàréduireles pertes àchacunedescommutations.

La multiplication des nombres d'impulsions formant chacune des alternances d'une tension desortie offre la possibilité de moduler la forme de cette tension de manière à avoir la forme sinusoïdalequepossible.

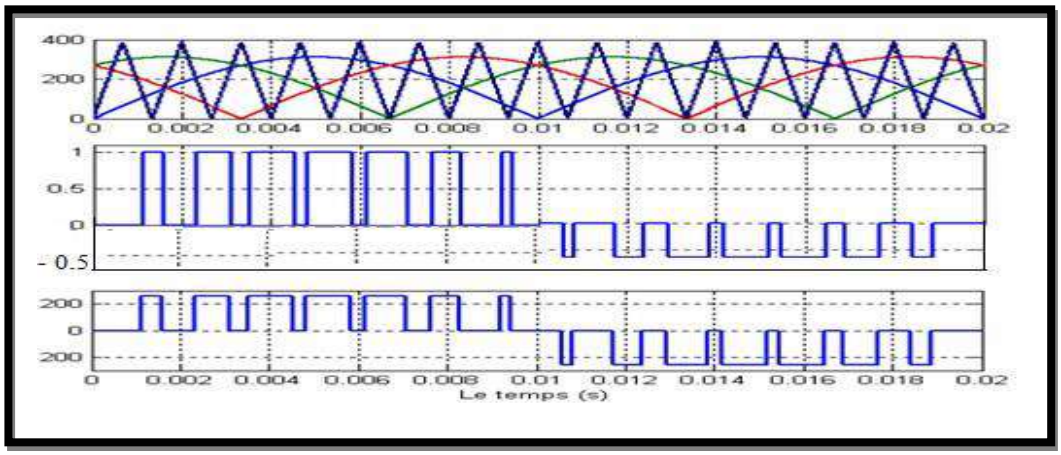
La modulation de largeur d'impulsion permet de repousser vers des fréquences, élevées lesharmoniquesdelatensiondesortie;cequifacilitelefiltrage,lamultiplicationdunombredesim pulsions,formantchacunedesalternancesd'unetensiondesortie,fairevarierlavaleurdufonda mental de la tension de sortie. Offre la possibilité de moduler la forme de cette tension et

obteniruneforme d'ondeapproximant de lasinusoïde.

La génération des signaux de commande de la modulation se fait le plus souvent en temps réel.Pour déterminer en temps réel les instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs on fait appel àl'électronique de commande analogique ou numérique ou les deux simultanément. La modulation delargeurd'impulsion nous permet cettedétermination. [24]

III.4.1 CommandeparLamodulationsinusoïdalenaturelle

Laconversioncontinuealternativeestassuréeparlescommutationsdesinterrupteursdel'onduleurquivontainsieffectuerdesconnexionstemporairesentrelesbonnesdelasourced'alimentation continue et les lignes de la charge triphasée alternative. Le transfert d'énergie estcontrôlé par le rapport entre intervalles d'ouverture et de fermeture (rapport cyclique) de chaqueinterrupteur, donc par la modulation de largeurs d'impulsions de contrôle de ces interrupteurs (MLI),cettetechniqueestbaséesurlacomparaisond'unsignalderéférenceappeléaussimodulatriced'amplitude Ar et de fréquence f, avec un signal appelé porteuse d'amplitude $A_p$et de fréquence $f_p$très élevée. FigureIII.4. [7]



FigureIII.4principesdelamodulationMLIsinusoïdalenaturel

III.4.1.1 Caractéristiquedelamodulationsinusoïdalenaturelle

Lesparamètresessentiels delaMLIsont:

- Lafréquencede la modulation:f_p
- L'indicedemodulation:m= f_p/f_r *ou*$f_r$estlafréquencedela référence.
- Lecoefficient deréglageentension**r**: r=A_r/A_P.

Avec:

A_r:Amplitudedela référence.

A_P:Amplitude de la porteuse [25]

III.4.2 CommandeparLamodulationvectorielle

Au milieu des années quatre-vingt, La modulation vectorielle (en anglais : SpaceVector Modulationou SVM) a été proposée par. La modulation vectorielle diffère, entre d'autres techniques par le fait queles signaux de commandes sont élaborés en tenant compte de l'état des trois bras de l'onduleur enmême temps. Cette technique est adéquate pour des applications de tension et de puissance élevées carellediminuel'ondulationducourantetpermetuneimplantationrelativementsimpledansles processeurs numériques. La modulation vectorielle consiste à obtenir analytiquement une tension deréférence(envaleurmoyenne)àpartirdesétatsdecommutationdel'onduleur.Lamodulation vectoriellepréseute lesavantages suivants par rapport au restedes techniques demodulation :

- Cettetechnique demodulation est valablepourtousles types deconvertisseurs multi niveaux.
- Ellecontrôledirectementlestroisphasesdel'onduleur.
- Une bonne utilisation de la tension du bus continu est atteinte car le troisième harmonique estintroduit implicitement.
- Le courantdesortieauneondulationtrès réduite.
- Les vecteurs redondants fournissent un degré de liberté additionnel. Ceci permet l'incorporationdesfonctionscomplémentairescommeparexemplel'équilibragedelate nsiondubuscontinu,la minimisation des pertes, la réduction d'harmoniques et la réduction de la tension en modecommun.
- L'implantationphysique estrelativementsimpleavecunprocesseurdesignauxnumériques.

Ily a plusieurs algorithmes utilisant la MLI vectorielle pour commander l'onduleur ou le redresseur.Lebutdetouteslesstratégiesdemodulationestderéduirelespertesdecommutationet lesharmoniques,et d'assurer unecommandeprécise.[26]

III.4.2.1 PrincipedeLamodulationvectorielle

La MLI vectorielle est la méthode récemmentla mieuxadaptée aucontrôle des moteursasynchrones.

Contrairementàd'autresméthodes,laMLIvectoriellenes'appuiepassurdescalculsséparésdesm odulationspourchacundesbrasdel'onduleur.CettetechniquedeMLIsuit lesprincipessuivants:

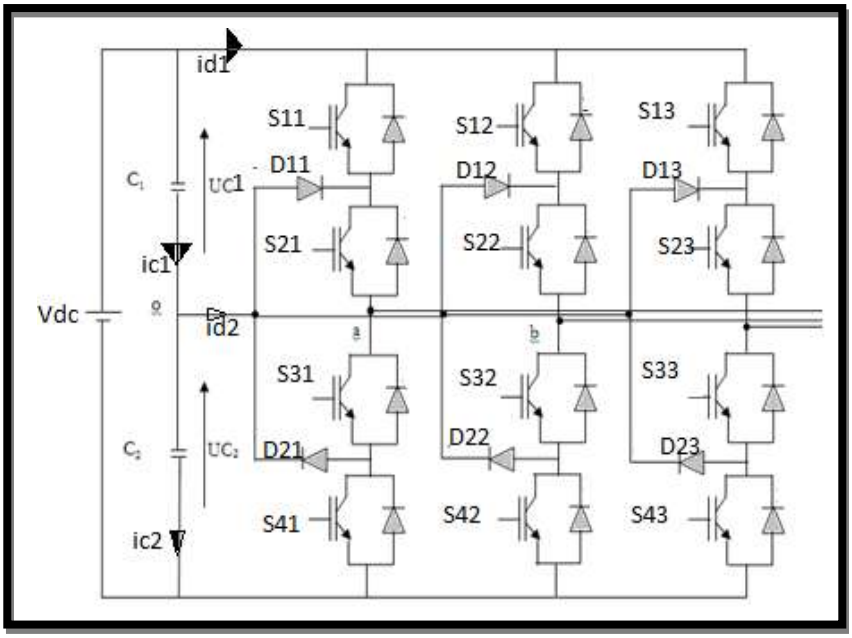
- UnvecteurtensiondecontrôleV_{ref}estcalculéglobalementestapproximésurunepériodedem odulation«Tm»par un vecteur tension moyen.
- Pourchaquephaseréalisationd'uneimpulsiondelargeurTcentréesurlapériodedontlavaleur moyenneestégaleàlatension deréférenceàl'instantd'échantillonnage.
- Tous lesinterrupteursd'un même demi-pont ontunétatidentiqueaucentreetauxdeuxextrémitésdelapériode. [25]

III.5 Modulationvectoriellede l'onduleurà troisniveaux

III.5.1 Structuregénéraledel'onduleuràtrois niveaux

La structure de l'onduleur à trois niveaux de type NPC est représentée sur la Figure. III.5. Cedernier se compose de trois bras symétriques constitué chacun de (4) interrupteurs bidirectionnels ensérie, Ces interrupteurs ne doivent pas être ouverts ou fermés simultanément, afin d'éviter le court-circuit de la source continue de l'entrée de l'onduleur, ou l'ouverture du circuit inductif de sa charge.Chaque interrupteur est composé d'un semi-conducteur bicommandableS_{ij} (i=1 ….4 et j= 1.2 ou 3) etd'une diode montée en antiparallèle. Le nombre des diodes flottantes est (2) par bras D1j D2jassurentl'application des différents niveaux de tension à la sortie de chaque bras [3]. Chaque bras est relié à unealimentationcontinuede force électromotrice2Uccesdeuxgénérateurs sontégauxU_{c1}=U_{c2}=$V_{dc/2}$

Cetonduleurestditàtrois niveauxcar ildélivretroisniveauxdetensionparbras $V_{dc/2}$,0,$-V_{dc/2}$.[13]



FigureIII.5 Onduleurdetensionà troisniveauxdetypeNPC

III.5.2 Fonctionsdecommutation

PourchaqueinterrupteurS_{ij}(*i*=1, 2,3et 4 *j*=1,2 et 3)on définitunefonction decommutationF_{ij}delamanièresuivante

$$F_{ij} = \begin{cases} 1\ si\ S_{ij}\ est\ fermé \\ 0\ si\ S_{ij}\ est\ ouvert \end{cases} \qquad \text{(III ,1)}$$

Avec : j= 1, 2,3 Indicateur de phase, Numéro de l'interrupteur du bras III1

i= 1,2 $F_{ij}j$=fonction deconnexion

III.5.3 Commandecomplémentairedesinterrupteurs

Lesinterrupteursdechaquebrassontcomplémentaires :

$F_{ij}=1-F_{(i-2)j}$ ***i***=3, 4 ***j*** =1, 2, 3 (III, 2)

III.5.4 Etatsd'unbrasdel'onduleur

Les états possibles d'un seul bras de quatre interrupteurs est de 2^4 =16 états que l'on peut représenterpar un quadruplet de 0 et de 1 suivant l'état des interrupteurs S_{x1} S_{x2} S_{x3} et S_{x4} L'analyse topologiqued'un bras de l'onduleur montre l'existence de quatre configurations possibles, dont uneest inutile,c'est là où les deuxinterrupteurs S_{x1}et S_{x4}sont commandés puisqu'elle déconnecte totalement lachargedela sourcecontinue. Doncil reste troisétatsutiles définis comme suit :

Etat 2: Les deux interrupteurs du haut S_{x1} et S_{x2} sont fermés, tandis que les deux interrupteurs du basS_{x3} et S_{x4}sont ouverts. La tension de sortie par rapport au neutre de la source (o) est $V_{x0}=-V_{dc}/2$ Si lecourant ix est positif, il passera par les deux transistors, ou par les deux diodes antiparallèles s'il estnégatif.

Etat1: LesdeuxinterrupteursdumilieuS_{x2}etS_{x3}sontfermés,tandisquelesdeuxinterrupteursdesextrémités S_{x1}et S_{x4}sont ouverts. La tension de sortie par rapport au neutre de la source (o) est V_{x0}=0Silecourantixestpositif,ilpasseraparletransistorS_{x2}etladiodedeclampD_{x1}ouparletransistorS_{x3}et ladiode declampD_{x2}s'il est négatif.

Etat 0: Les deux interrupteurs du bas S_{x3}et S_{x4}sont fermés, tandis que les deux interrupteurs du hautS_{x1} et S_{x2} sont ouverts. La tension de sortie par rapport au neutre de la source (o) est $V_{x0}=-V_{dc}/2$ Si lecourant ix est négatif, il passera par les deux transistors S_{x3} et S_{x4} ou par les deux diodes principales s'ilest positif.

Lesautres configurations sontàéviter

- Soit,ellesprovoquent lecourt-circuit dessources continues U_{c1},U_{c2}ouV_{dc}
- Soit,ellesn'assurentpaslaconnexiondelacharge aupointneutredessourcescontinues.

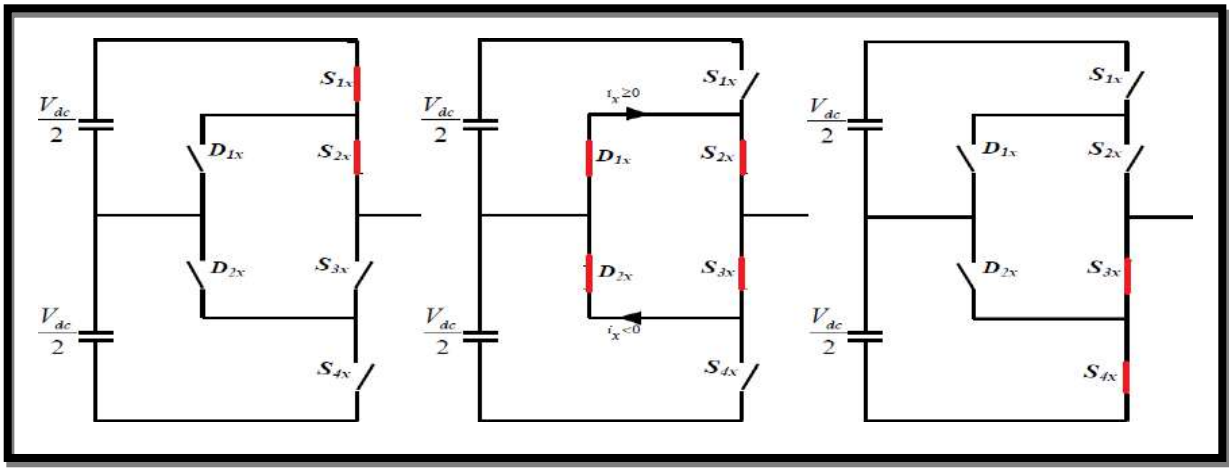
La correspondance entre les états du bras, les états des interrupteurs et la tension de sortie est résuméeautableauIII.1.

On définit pour chaque bras (j) trois fonctions de connections, correspondantes au trois états dubras.[26]

$$F_{c1j}=F_{1j}.F_{2j}$$

$$F_{c2j}=F_{2j}.F_{3j} \qquad j=1,2,3 \qquad \text{(III,3)}$$

$$F_{c3j}=F_{3j}.F_{4j}$$



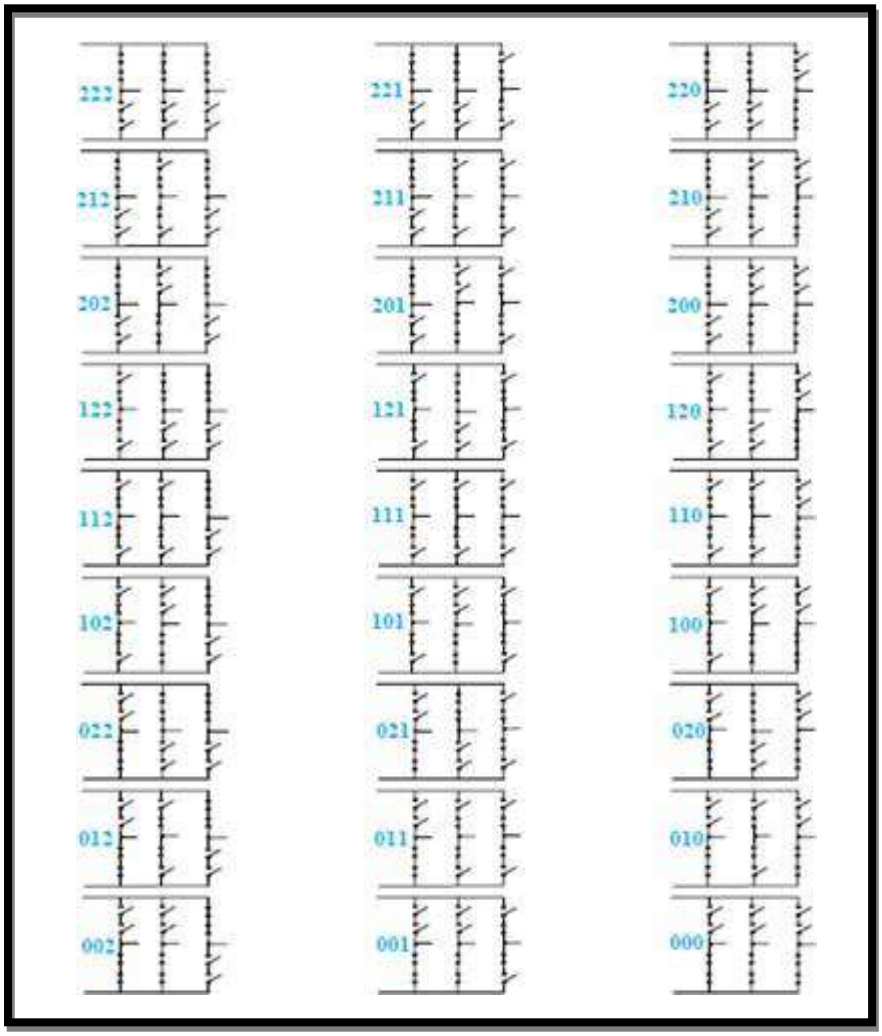
FigureIII.6Etatsd'unbras del'onduleuràtroisniveaux.

tatdubras	Etatd'interrupteursdubras				Tension desortie
	S_{1x}	S_{2x}	S_{3x}	S_{4x}	
2	1	1	0	0	$V_{dc}/2$
1	0	1	1	0	0
0	0	0	1	1	$-V_{dc}/2$

TableauxIII.1Etatd'un brasdel'onduleur

III.5.5 Etats del'onduleur

Chaque bras de l'onduleur peut prendre trois états. Ainsil'onduleur triphasé a 3^3=27 états possibles.Ces états sont identifiés en indiquant les états des trois bras. Par exemple, l'état (210) indique que lepremier bras est à l'état (2), le deuxième est à l'état (1), et le troisième est à l'état (0). La (Fig.III.7)résume les états del'onduleurtriphaséàtrois niveaux[26]:



FigureIII.7 Etatdel'onduleur

III.5.6 Tensionsdesortie

Lestensions desortie par rapport aupoint neutredelasourcecontinue(o) sontexprimées par:

$$\begin{pmatrix} v10 \\ v20 \\ v30 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Fc11 & Fc21 & Fc31 \\ Fc12 & Fc22 & Fc32 \\ Fc13 & Fc23 & F33 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Vdc/2 \\ 0 \\ -Vdc/2 \end{pmatrix} \quad \text{(III,4)}$$

A un instant donné, une seul des trois fonctions de connections des bras pend la valeur 1. Les autresfonctions sont à zéro. Ainsi, on peut avoir trois niveaux de tension pour chacune des tensions V1o V2oetV3ocequi est à l'origine del'appellation : onduleuràtrois niveaux.
Lestensionscomposéesentrelesphasesdelachargesont:

$$\begin{pmatrix} v12 \\ v23 \\ v31 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v10 & v20 \\ v20 & v30 \\ v30 & v10 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Fc11 & -Fc12 & Fc21 & -Fc22 & Fc31 & -Fc32 \\ Fc12 & -Fc13 & Fc22 & -Fc23 & Fc32 & -F33 \\ Fc13 & -Fc11 & Fc23 & -Fc21 & F33 & -Fc31 \end{pmatrix} . \begin{pmatrix} Vdc/2 \\ 0 \\ -Vdc/2 \end{pmatrix} \quad \text{(III, 5)}$$

III.5.7 Vecteurtensiondesortieetdiagrammevectoriel

Onrappellele vecteurtensionderéférence,définipar leséquations:

$$Vs = V10e^{jo} + V20e^{-j2\pi/3} + V30e^{j2\pi/3} = Vd + j.Vq \qquad \text{(III ,6)}$$

$V_d$et$V_q$sont les composantes duvecteur Vs dansle plan*d-q*

Lesdeuxcomposantes $v_d$et$v_q$sont donnéesenfonction desfonctionsdeconnexion par:

$$\begin{pmatrix} Vd \\ Vq \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc} \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3/2} & -\sqrt{3/2} \end{pmatrix} . \begin{pmatrix} Fc11 & -Fc31 \\ Fc12 & -Fc32 \\ Fc13 & -Fc33 \end{pmatrix} \qquad \text{(III ,7)}$$

Le tableau (III.2) représente les différents états de l'onduleur et les coordonnées du vecteur de tensiondesortie*Vs* correspondant à chaqueétat.

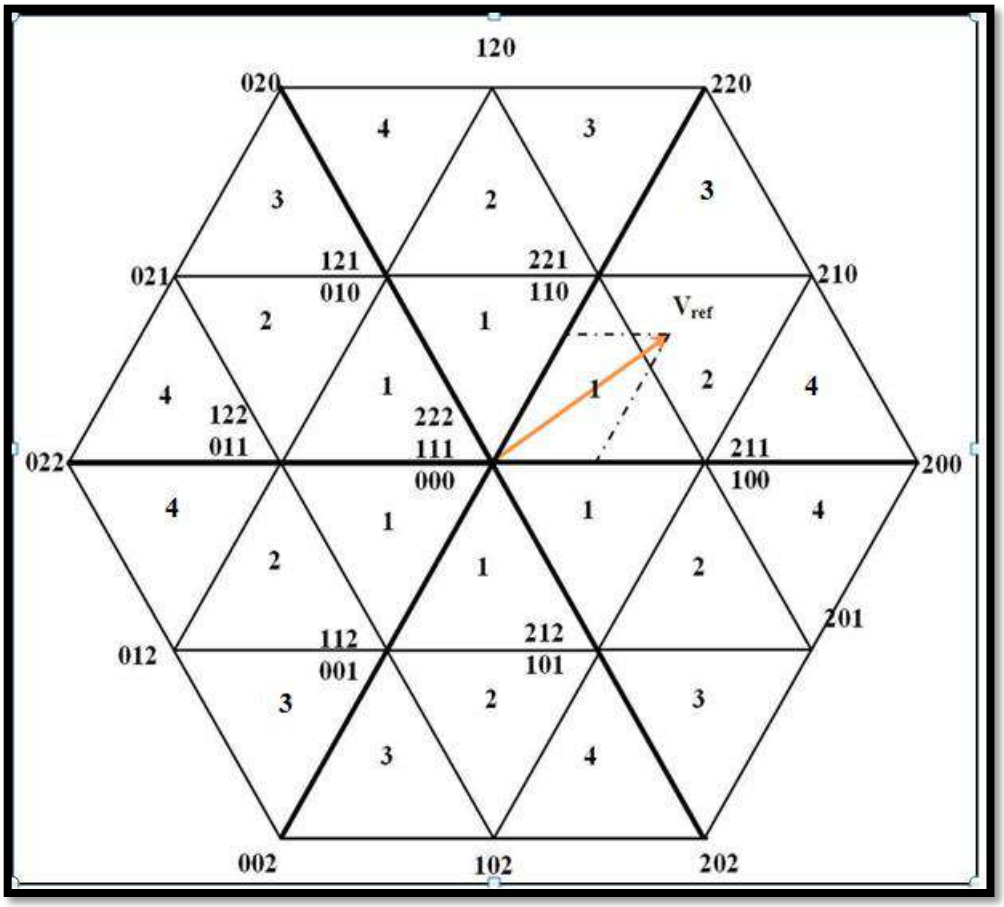
Etatdel'onduleur	$V\alpha i$	$V\beta i$
222,111,000	0	0
211,100	$1/2Vdc$	0
200	Vdc	0
210	$¼Vdc$	$\sqrt{3/4}\,Vdc$
221,110	$½Vdc$	$\sqrt{3/2}\overline{\text{Vdc}}$
220	$¾Vdc$	$\sqrt{3/4}\,Vdc$
120	0	$\sqrt{3/2}\,Vdc$
121,010	$-¼Vdc$	$\sqrt{3/4}\,Vdc$
020	$-½Vdc$	$\sqrt{3/2}\,Vdc$
021	$-¾Vdc$	$\sqrt{3/4}\,Vdc$
122,011	$-½Vdc$	0
022	$-Vdc$	0
012	$-¾Vdc$	$-\sqrt{3/4}\,Vdc$
112,001	$-¼Vdc$	$-\sqrt{3/4}\,Vdc$
002	$-½Vdc$	$-\sqrt{3/2}\,Vdc$
102	0	$-\sqrt{3/2}\,Vdc$
	$¼Vdc$	

212,101		$-\sqrt{3/4}\,Vdc$
202	½Vdc	$-\sqrt{3/2}\,Vdc$
201	¾Vdc	$-\sqrt{3/4}\,Vdc$

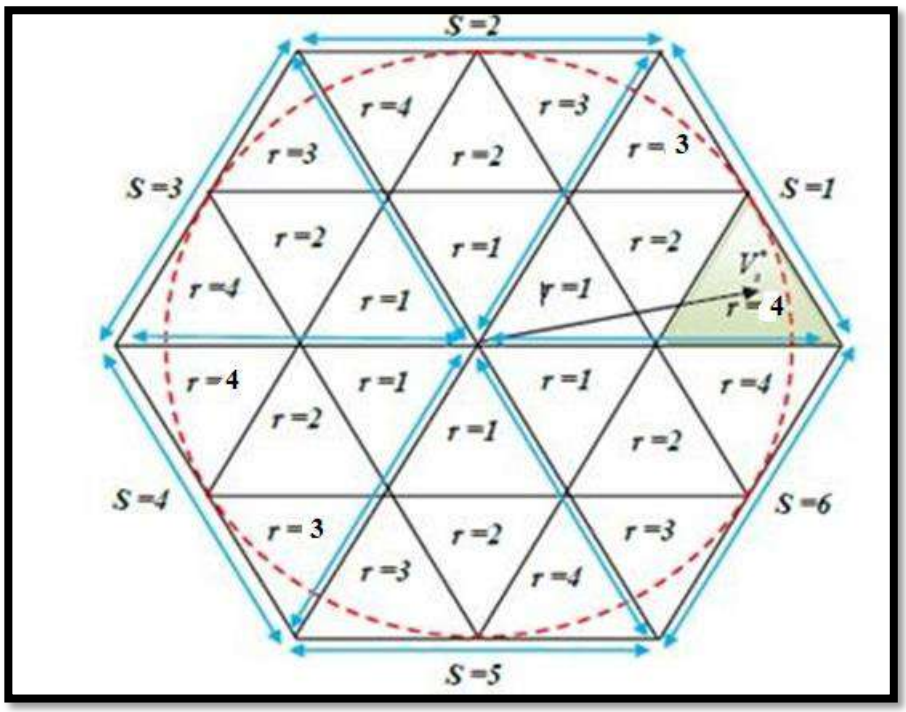
TableauxIII.2Etatsdel'onduleuratroisniveauxetlescoordonnéesdevecteurVs

Ce vecteur prend dix-huit positions discrètes dans le plan d-q suivant les états de l'onduleur. Cespositions sont indiquées sur le diagramme vectoriel de l'onduleur (Fig. III.8). Ils sont rangées sur deuxhexagones:douzepositionssurl'hexagoneexterne(correspondantesauxétats(200,210,220,120,020,021,022,012,002,102,202et210)),sixpositionssurl'hexagoneinterne(correspondantes aux états ((211-100), (221-110), (121-010), (122-011), (112-001) et (212-101)), enplusd'unepositionàl'originedudiagramme,correspondanteauxétats222,111et000.Chaquepositionsur l'hexagoneinterne estproduite pardeuxétatsdistincts.Cesétatssontappelésétatsredondants,et les vecteurscorrespondantssont appelés vecteurs redondants.

Les positions discrètes du vecteur de tension de sortie Vs divise le diagramme vectoriel en sixsecteurs triangulaires, les sommets de ces secteurs triangulaires étant l'origine du diagramme vectorieletlesapexdel'hexagoneexterne.Chaquesecteurestcomposédequatrerégionstriangulaires(Fig.III.8).Onaainsi24 régions danslatotalité dudiagrammevectoriel[26]



FigureIII.8Diagrammevectorieldel'onduleuràtroisniveaux



FigureIII.9Secteursetrégiondudiagrammevectoriel

III.5.8 Vecteurtensionderéférence

A partir des tensions de référence triphaséesV1*,V2 *et V3 * on définit le vecteur tension deréférence

$$V^*s=V^*1\ e^{j0}+V^*2e^{-j2\pi/3}+V^*\ 3e^{j2\pi/3}$$

$$=V^*_d+j.V^*_q \qquad \text{(III ,8)}$$

$$=m.V^*_{max}e^{j\theta}$$

V^*_detV^*_qsontlescomposantesduvecteurV*sdansleplan *d-q*

m:$(0 \leq m \leq 1)$:Tauxdemodulation

$$m=\frac{\sqrt{2}Vs}{Vdc} \qquad \text{(III ,9)}$$

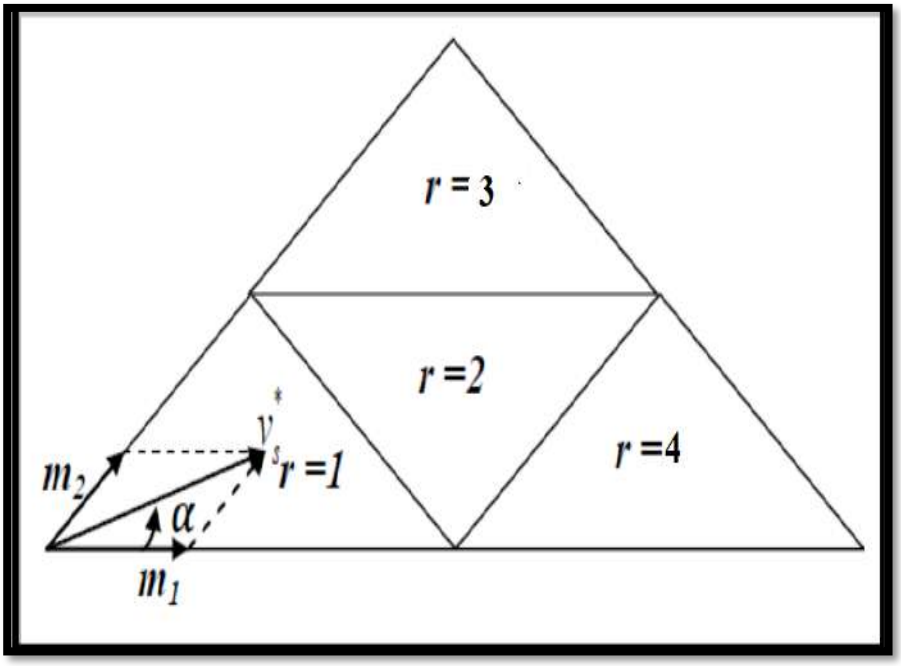
V_{max}: amplitudemaximaledu vecteur V^*_s

θ: PositionangulaireduvecteurV^*s danslepland*d_q*

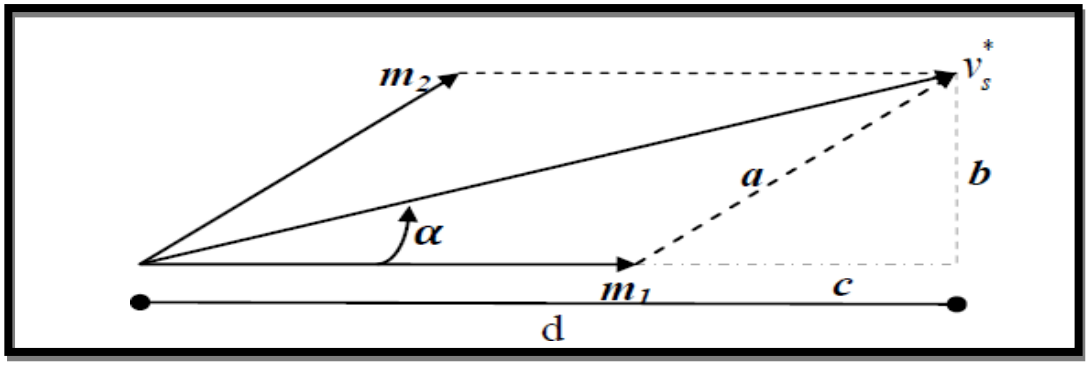
A partir des coordonnées V_d^* ,V_q^*et de la position angulaire θ, on déduit dans quel secteur(s), etdans quelle région(r) se situe le vecteur V*s dans le plan *d_q*figure III 9, Le secteur triangulaire s sedéduitdela manièresuivante**:**

$$S= \begin{cases} 1 \text{si } 0 \le \theta \le \pi/3 \\ 2 \text{si} \pi/3 \le \theta \le 2\pi/3 \\ 3 \text{ si } 2\pi/3 \le \theta \le \pi \\ 4 \text{si } \pi \le \theta \le 4\pi/3 \\ 5 \text{ si } 4\pi/3 \le \theta \le 5\pi/3 \\ 6 \text{si } 5\pi/3 \le \theta \le 2\pi \end{cases} \quad \text{(III,10)}$$

La région triangulaire à l'intérieur de chaque secteur se déduise en utilisant les équations de tempsT_x,$T_Y$et T_z. Par exemple, les quatre régions (r=1, 2, 3,4) à l'intérieur du secteur s=1, représenté dans la(fig.III.9).



FigureIII.10La positionde V^*s à lesquatrerégionsde1^{er}secteur.



FigureIII.11lescompensant*m1*et*m2*de $V^{*}s$

Delafigure.III.11on calcule*m1*et*m2*:

$$\begin{cases} a = m_2 = \frac{b}{\sin(\frac{\pi}{3})} == \frac{2}{\sqrt{3}} b = \frac{2}{\sqrt{3}} V^* s \, sin\alpha \\ m_1 = V^* s \, cos\alpha - \left(\frac{2}{\sqrt{3}} V^* s \, sin\alpha\right) cos(\frac{\pi}{3}) \\ m_1 = V^* s \left(cos\alpha - \frac{sin\alpha}{\sqrt{3}} \right) \end{cases} \quad \text{(III ,11)}$$

Donc :

Si m_2<0.5 ($\sqrt{2/3}V_{dc}$)et m_1< 0.5 ($\sqrt{2/3}V_{dc}$)et $m_1 + m_2$< 0.5 ($\sqrt{2/3}V_{dc}$)alors V* s et dans la région1.
Si m_2<0.5 ($\sqrt{2/3}V_{dc}$)et m_1< 0.5 ($\sqrt{2/3}V_{dc}$)et $m_1 + m_2$< 0.5 ($\sqrt{2/3}V_{dc}$)alors V* s et dans la région2.

Si m_1< 0.5 ($\sqrt{2/3}V_{dc}$) alors V* s et dans la région3.

Si m_2< 0.5 ($\sqrt{2/3}V_{dc}$) alors V* s et dans la région4.

Afin de minimiser les harmoniques de tension de sortie, on impose à la vectrice tension de référence de ce localisé à l'intérieur du cercle délimité par l'hexagone externe, ce qui donne :

$$V_{max} = \frac{\sqrt{2}}{3} V_{dc} \quad \text{(III ,12)}$$

III.5.9 Séquencedes étatsdel'onduleur

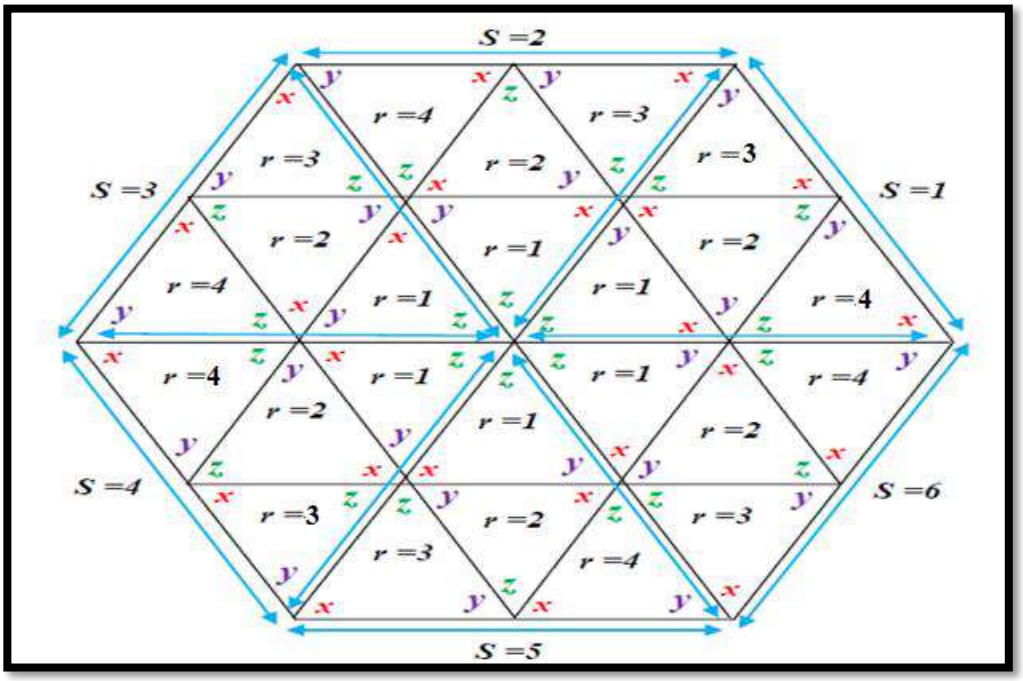
Sur une période d'échantillonnage Ts, le vecteur tension de référence Vs* doit coïncider avec lamoyennedes vecteurs $VxVyetVz$représentants lesapexdutrianglecontenant Vs*:

$$\overline{Vs} = mV_{max}e^{-j\alpha} = \frac{TxVx+TyVy+TzVz}{Ts} = d_x.v_x + d_y.v_y + d_z.v_z \text{(III, 13)}$$

□C'est laposition angulairedu vecteur V*sàl'intérieurd'un secteur :□□□ □□□□□
$T_xT_yetT_z$sont les durées d'application des vecteurs v_x v_y *et* v_z respectivement à la sortie del'onduleur.Ils sont reliés par l'équation:

$$T_x + T_y + T_z = Ts \text{Et} d_x + d_y + d_z = 1 \quad \text{(III,14)}$$

Les vecteurs $VxVy$ et Vz dépendent de la position du vecteur Vs* dans le plan d _q . Par exemple, levecteurV*sreprésentésurlediagrammevectorieldela(Fig.III.8)sesituedanslarégionr=3dusecteur S=1.Ainsi, le vecteur vx est celui généré par l'état 200 (appelé alors état X), le vecteur y v estcelui généré par l'état 210 (appelé état Y) et le vecteur z v est celui généré par l'état 211 (appeléZ_1)ou l'état 100 (appeléZ_2). La (Fig. III.12) indique les états X,Y et Z pour les différentes régions dudiagrammevectoriel



FigureIII.12EtatsX,YetZpourlesdifférentesrégionsdudiagrammevectoriel.

L'équation (III.15) et la décomposition de l'équation (III.14) suivant les deux axes *d q* permettent dededuirelesrapports d_x, d_y, d_z,etparsuitelesdurées$T_x, T_y et T_z$Letableau(III.3)donnentladécomposition de l'équation (III.12) pour les quatre régions d'un secteur donné. Cette décompositions'applique pour tous les secteurs du diagramme vectoriel : pour passer d'un secteur à l'autre, il suffit depositionnerl'axe*d* sur ledébut du secteur concerné

Region	**Decomposition**
r =1	$\begin{cases} \frac{\sqrt{3}}{2} m\, cos\theta = \frac{1}{2d_x} + \frac{1}{4d_y} \\ \frac{\sqrt{3}}{2} m\, sin\theta = \frac{\sqrt{3}}{4} d_y \end{cases}$
r = 2	$\begin{cases} \frac{\sqrt{3}}{2} m\, cos\theta = 1/2d_x + 1/2d_y + 3/4d_z \\ \frac{\sqrt{3}}{2} m\, sin\theta = \frac{\sqrt{3}}{4}(d_y + d_{x)} \end{cases}$
r = 3	$\begin{cases} \frac{\sqrt{3}}{2} m\, cos\theta = d_x + 3/4d_y + 1/2d_z \\ \frac{\sqrt{3}}{2} m\, sin\theta = \frac{\sqrt{3}}{4} d_y \end{cases}$
r = 4	$\begin{cases} \frac{\sqrt{3}}{2} m\, cos\theta = 3/4d_x + 1/2d_y + 1/4d_z \\ \frac{\sqrt{3}}{2} m\, sin\theta = \frac{\sqrt{3}}{4}(d_x + d_z) + \frac{\sqrt{3}}{2} d_y \end{cases}$

Tableau.III.3Décompositiondel'équation(III.12).

La résolution du système formé par l'équation (III.15) et les deux équations issues de la décompositionde(III.14) donneles expressions dxdyet dzdeindiquées dans letableau (III.4).

Eprissions	**r =1**	**r =2**	**r =3**	**r =4**
$d_x d_y d_z$	*2msin (π/3–α)*	*1-2msin (π/3–α)*	*2msin (π/3–α)-1*	*2msin (π/3–α)-1*
	2msin α	*1-2msinα*	*2msin α*	*2msin α-1*
	Pourtout les régions $d_z = 1 - d_x - d_y$			

Tableau.III.4Lesexpressionsde*dxdyetdz*pourlesdifférentesrégionsd'unsecteur.

Ainsi, pour avoir des tension $V_1, V_2 et\ V_3$de sortie aussi proche que possible aux tensions deréférences sinusoïdales triphasées $V1*, V2*\ et\ V3*$, on applique l'état X pendant une durée$d_x T_x$, l'étatYpendant une durée$d_y T_y$et l'étatZpendant lereste dela périodedzT_z

Certainsétats$X, Y et Z$sontdesétatsredondants.Ilsproduisentlesmêmestensionsdesortie V_1,$v_2$et$v_3$danscecas,onpeutchoisirl'étatredondantàappliquersuivantplusieurscritères:

- La minimisation des pertes de puissance dans l'onduleur par la minimisation du nombred'interruptionsparpériode.
- L'équilibrage des tensions aux bornes des condensateurs au coté continu de l'onduleur. En effet,cescondensateurs sechargent ou sedéchargent suivantles états redondantsappliqués.

Afin de minimiser les pertes dans l'onduleur et de réduire les harmoniques de la tension de sortie, onchoisitune séquencedesétats*X*,*Yet Z* qui consisteà:

- appliquer les trois états dans un ordre donné durant la demi-période, puis dans l'ordre inversedurantlereste dela période.
- dediviserletemps appropriéàchaqueétat surtoutes les redondances.
- d'utiliserlemême étataudébutetàlafindelapérioded'échantillonnage.
- d'inverserl'ordredesuccessiondesétatspar alternance entrelessix secteurs.

Le tableau(III.5) résume la succession des états pendant une demi-période d'échantillonnage danstoutes les régions du diagramme vectoriel. Ces états s'appliquent dans la prochaine demi période dansl'ordre inverse. A partir de cette succession, on déduit les fonction logiques F_{IJ}associées auxinterrupteurs de l'onduleur. La (Fig.III.13) indique la forme des fonctions logiques associées auxinterrupteurs des demi bras supérieurs, sur une période d'échantillonnage Tsdans les quatre régionsdu premier secteur du diagramme vectoriel. Les fonctions logiques des interrupteurs des demi-brasinférieurs se déduisent par complémentation. On remarque que chaque interrupteur change son étatdeuxfois seulement durant lapérioded'échantillonnage.[26]

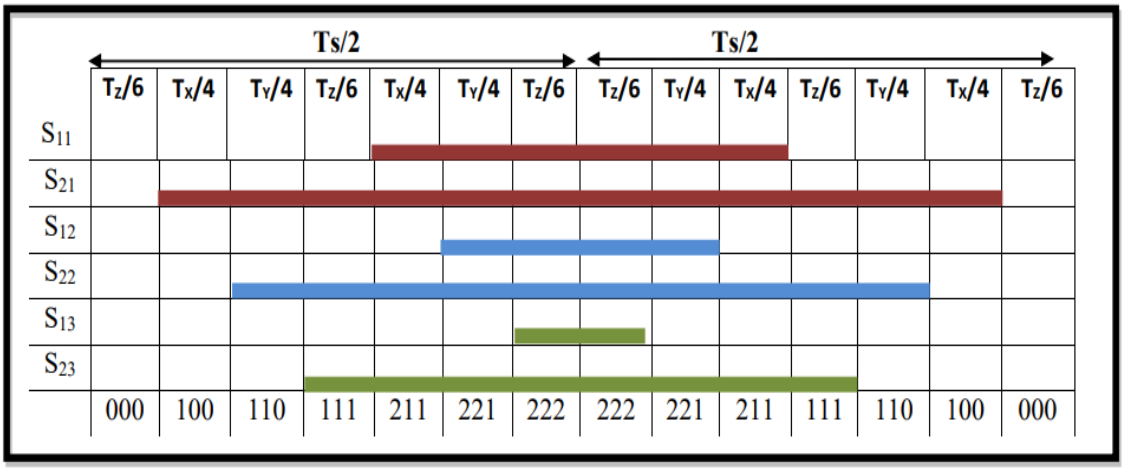
	Région1							**Région2**					**Région3**				**Région4**			
1	*0* *0* *0*	*1* *0* *0*	*1* *1* *0*	*1* *1* *1*	*2* *1* *1*	*2* *2* *1*	*2* *2* *2*	*1* *0* *0*	*1* *1* *0*	*2* *1* *0*	*2* *1* *1*	*2* *2* *1*	*1* *0* *0*	*2* *0* *0*	*2* *1* *0*	*2* *1* *1*	*1* *1* *0*	*2* *1* *0*	*2* *2* *0*	*2* *2* *1*
2	*2* *2* *2*	*2* *2* *1*	*1* *2* *1*	*1* *1* *1*	*1* *1* *0*	*0* *1* *0*	*0* *0* *0*	*2* *2* *1*	*1* *2* *1*	*1* *2* *0*	*1* *1* *0*	*0* *1* *0*	*2* *2* *1*	*1* *2* *0*	*1* *2* *0*	*1* *1* *0*	*1* *2* *1*	*1* *2* *0*	*0* *2* *0*	*0* *1* *0*
3	*0* *0* *0*	*0* *0* *1*	*0* *1* *1*	*1* *1* *1*	*1* *2* *1*	*1* *2* *2*	*2* *2* *2*	*0* *1* *0*	*0* *1* *1*	*0* *2* *1*	*1* *2* *1*	*1* *2* *2*	*0* *1* *0*	*0* *2* *0*	*0* *2* *1*	*1* *2* *1*	*0* *1* *1*	*0* *2* *0*	*0* *2* *2*	*1* *2* *2*
4	*2* *2* *2*	*1* *2* *2*	*1* *1* *2*	*1* *1* *1*	*0* *1* *1*	*0* *0* *1*	*0* *0* *0*	*1* *2* *2*	*1* *1* *2*	*0* *1* *2*	*0* *1* *1*	*0* *0* *2*	*1* *2* *2*	*0* *2* *2*	*0* *1* *2*	*0* *1* *1*	*1* *1* *2*	*0* *1* *2*	*0* *0* *2*	*0* *0* *1*
5	*0* *0* *0*	*0* *0* *1*	*1* *0* *1*	*1* *1* *1*	*1* *1* *2*	*2* *1* *2*	*2* *2* *2*	*0* *0* *1*	*1* *0* *1*	*0* *1* *2*	*1* *1* *0*	*2* *1* *2*	*0* *0* *1*	*0* *0* *2*	*1* *0* *2*	*1* *1* *2*	*1* *0* *1*	*1* *0* *2*	*2* *0* *2*	*2* *1* *2*
6	*2* *2* *2*	*2* *1* *2*	*2* *1* *1*	*1* *1* *1*	*1* *0* *1*	*1* *0* *0*	*0* *0* *0*	*2* *1* *2*	*2* *1* *1*	*2* *0* *1*	*1* *0* *1*	*1* *0* *0*	*2* *1* *2*	*2* *0* *2*	*2* *0* *1*	*1* *0* *1*	*2* *1* *1*	*2* *0* *1*	*2* *0* *0*	*1* *0* *0*

Tableau. III.5 Séquencesdesétatsdanslesdifférentesrégionsdudiagrammevectoriel.

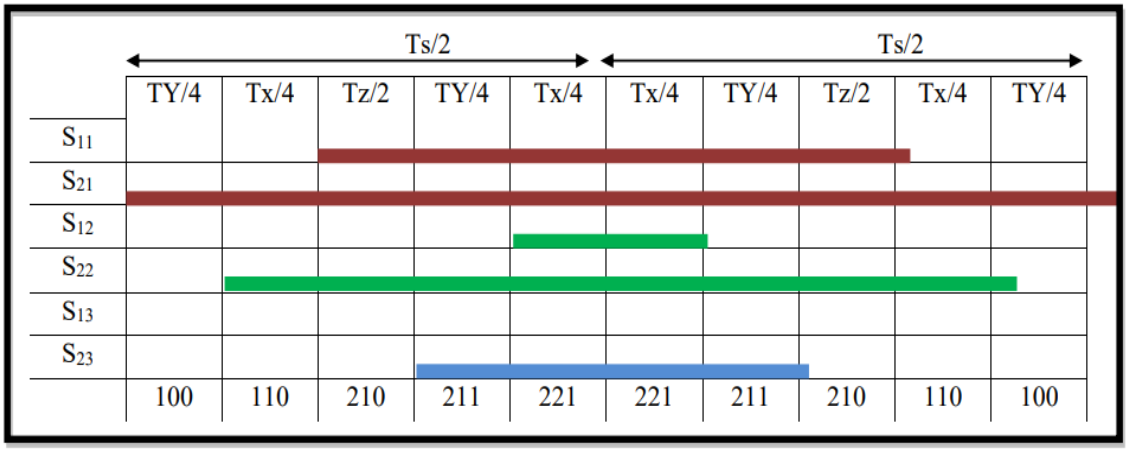
A partir de la (Fig. III.13), on déduit les durées de fermeture des interrupteurs durant la périoded'échantillonnage Tsdans chaque région. Par exemple, pour les quatre régions du premier secteur, lesdurées de fermeture des interrupteurs des demi-bras supérieurs sont résumées dans le tableau(III.6).Lesdurées defermeturedes autres interrupteurssedéduisent par complémentation

Région	Demi-bras1	Demi-bras1	Demi-bras1
1	$S_{11}=T_s/2+T_y/2+T_z/3$ $S_{21}=T_s+T_y+2T_z/3$	$S_{12}=T_y/2+T_z/3$ $S_{22}=T_s/2+T_Y/2+2T_Z/3$	$S_{13}=T_Z/3$ $S_{23}=T_x/2+T_y/2$
2	$S_{11}=T_s/2+T_y/2+T_z$ $S_{21}=T_s+T_y+T_z$	$S_{12}=T_x/2$ $S_{22}=T_s/2+T_Y/2+T_Z$	$S_{13}=0$ $S_{23}=T_x/2+T_y/2+2T_z/3$
3	$S_{11}=T_s+T_y+T_z/2$ $S_{21}=T_s+T_y+T_z$	$S_{12}=0$ $S_{22}=T_Y+T_Z/2$	$S_{13}=0$ $S_{23}=T_z/2$
4	$S_{11}=T_s+T_y+T_z/2$ $S_{21}=T_s+T_y+T_z$	$S_{12}=T_y+T_z/2$ $S_{22}=T_s+T_Y+T_Z$	$S_{13}=0$ $S_{23}=T_z/2$

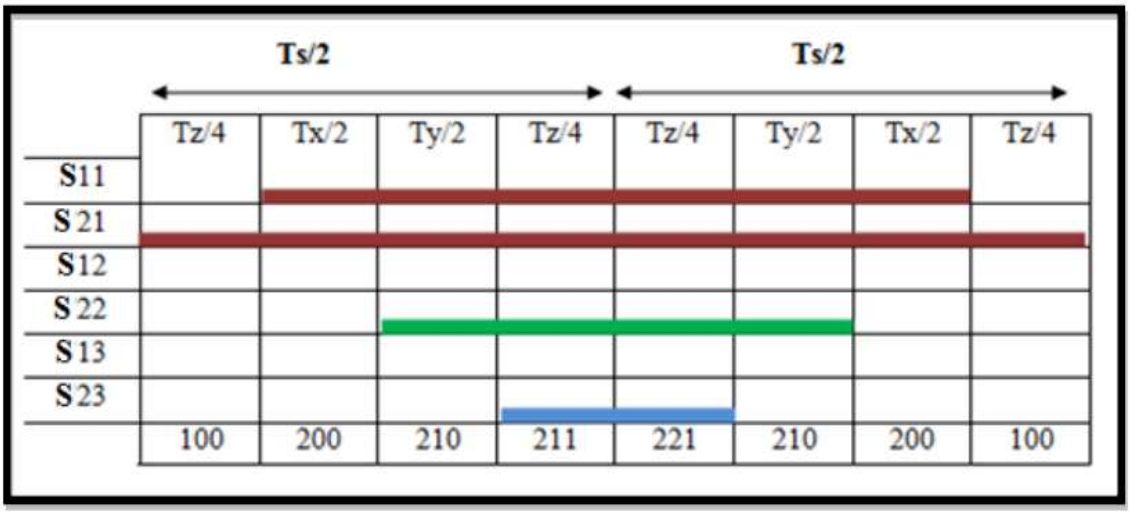
Tableau.III.6Duréesdefermeturedesinterrupteursdanslecasdupremier secteur.



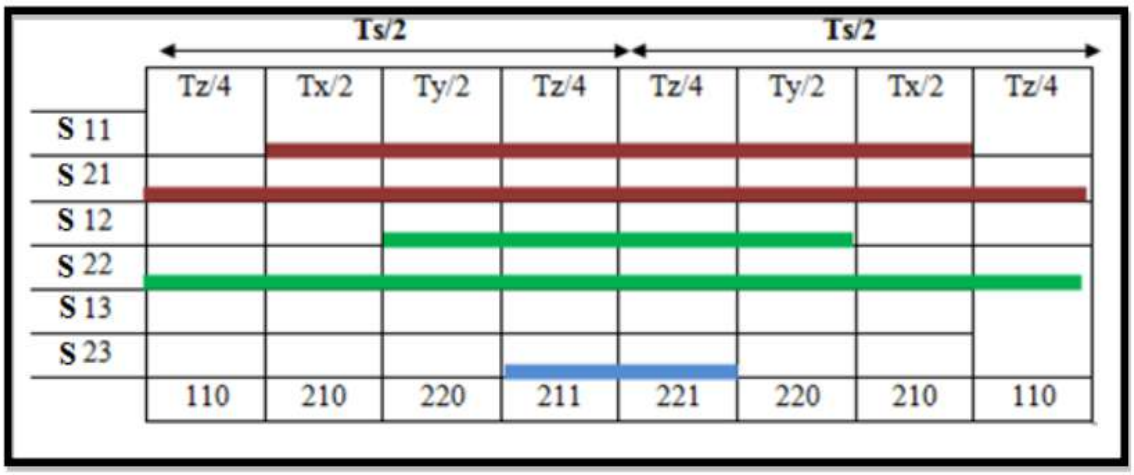
Région1



Région2



Région3



Région4

Fig.III.13FonctionslogiquesF_{ij}danslesquatrerégionsdupremiersecteur.

On résume l'algorithme de la modulation vectorielle de l'onduleur à trois niveaux. Cet algorithmeconsisteàeffectuer les étapes suivantes :

- A partir des tensions de références*V1*, V2* et V3** on déduit le vecteur tension de référenceVs*et ces composantes *V*d et V*q*ainsi que ses coordonnées polaires *m et Θ* (équation(III.29).
  - A partir de *m et Θ* on déduit le secteur *s* (équation (III.11) et la région (équation (III.12) dudiagrammevectoriel contenant levecteur*V*s.*
- Ondéduit(Fig.III.11)lesétats*X,YetZ*qu'ondoitappliquerpourgénérerlestensio

nsdesortie.

- Ondéduit(tableau. III.3) laduréed'applicationde chaqueétat.
- Apartirdu(tableau.III.4),ondéduitlaséquencedesétatsdurantchaquepériode'échantillonnage.
- Apartirdecetteséquence,ondéduitl'étatouvertoufermédechaqueinterrupteur,àtoutinstant.[13]

III.5.10. Vecteurs de tension de l'onduleur multi-niveau triphasé à Z-source

		Etat des vecteurs				*Etat des interrupteurs*											
						$\overline{S_{a1}}$	$\overline{S_{a2}}$	$\overline{S_{a3}}$	$\overline{S_{a4}}$	$\overline{S_{b1}}$	$\overline{S_{b2}}$	$\overline{S_{b3}}$	$\overline{S_{b4}}$	$\overline{S_{c1}}$	$\overline{S_{c2}}$	$\overline{S_{c3}}$	$\overline{S_{c4}}$
	actifs	V1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1
		V2	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1
		V3	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1
		V4	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0
		V5	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0
		V6	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0
		V8	1	0	2	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0
		V9	0	1	2	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0
		V10	2	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1
		V11	2	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0
		V12	0	2	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0
		V13	1	2	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1
		V15	1	2	2	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0
		V16	1	1	2	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0
		V17	2	1	2	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0
		V18	2	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0
		V19	2	2	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0
		V20	1	2	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0

		V21	0	2	2	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0
		V22	0	0	2	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0
		V23	2	0	2	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
		V24	2	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1
	Sans Court-circuit	V0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
		V7	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0
		V14	2	2	2	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
	Court-Circuit Dans Vecteur <<0>>	1 bras	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1
			0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1
			0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0
			1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0
		2 bras	0	1	2	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0
			2	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0
			1	2	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1
			1	2	2	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0
		3 bras	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0
	Court-Circuit Dans Vecteur <<7>>	1 bras	0	1	2	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0
			2	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0
			1	2	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1
			1	2	2	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0
		2 bras	2	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1
			0	2	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0
			2	2	2	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
			1	1	2	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0

		3 bras	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0
	Court-Circuit Dans Vecteur <<14>>	1 bras	2	1	2	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0
			2	2	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0
			0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
			2	0	2	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
		2 bras	2	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0
			1	2	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0
			0	0	2	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0
			2	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1
		3 bras	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1

-

Tableau (III.6) : Vecteurs de tension de l'onduleur multi-niveau triphasé à Z-source

NB : afin d'appliqué des courts circuits sur l'onduleur a z- source on a choisi les critères suivants.

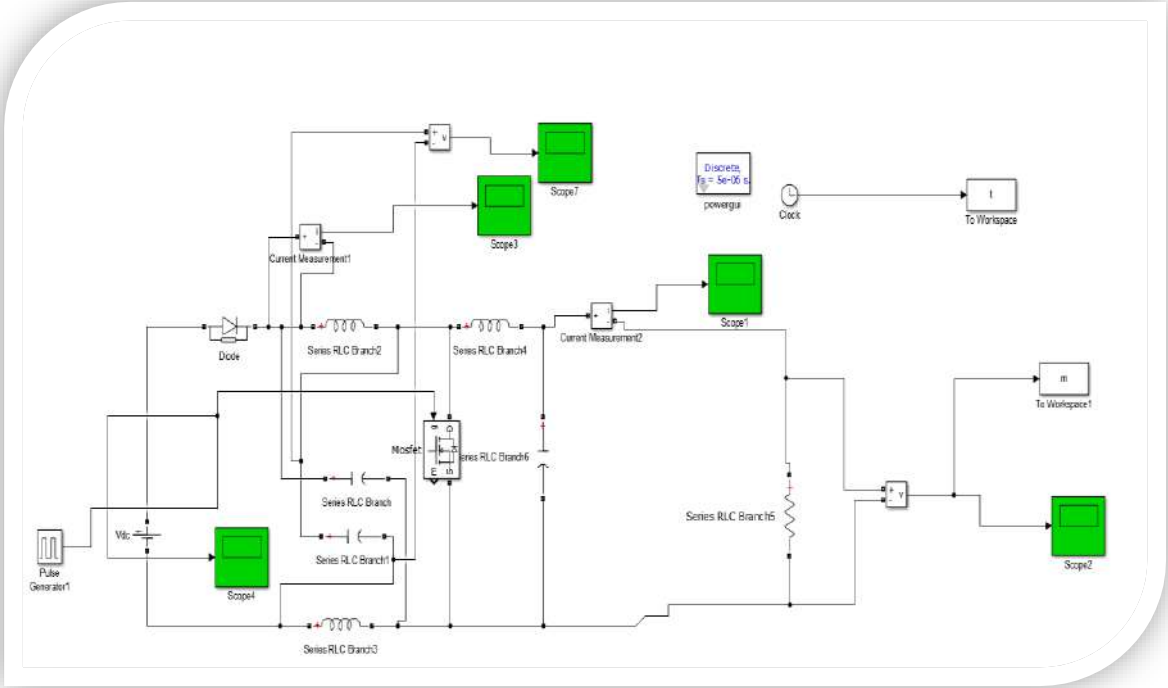
L'utilisation des vecteur V0, V7 ,V14 conduit à :

- Travaillé toujours dans la région Y=1
- Une tension de référence faible.

III.6. Simulations et Résultats des simulations :

Afin d'utilisé les vecteurs non active V0,V7,V14 lors de la commande de l'onduleur on utiliser des vecteurs de références de faibles valeurs.

III.6.1. Simulation de bloc Z source



FigureIII.14. Schéma de bloc Z source

III.6.1.a résultats et interprétations.

Les figures 15,16,17Respectivement donnent les résultats pour des rapports cyclique variant de 20 et 30 et 40 afin de voir l'effet de la durée de court-circuit.

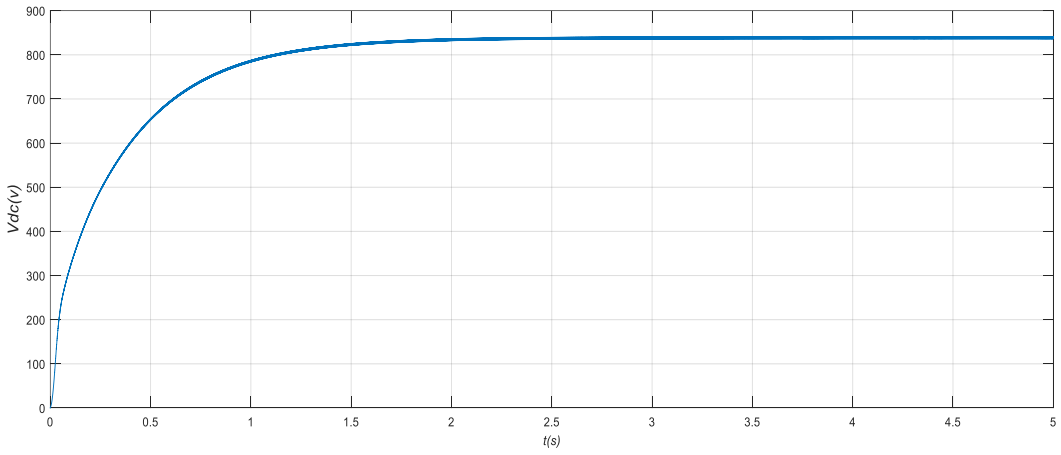


Fig. (III-15): forme d'onde de tensions de sortie pour r=20%

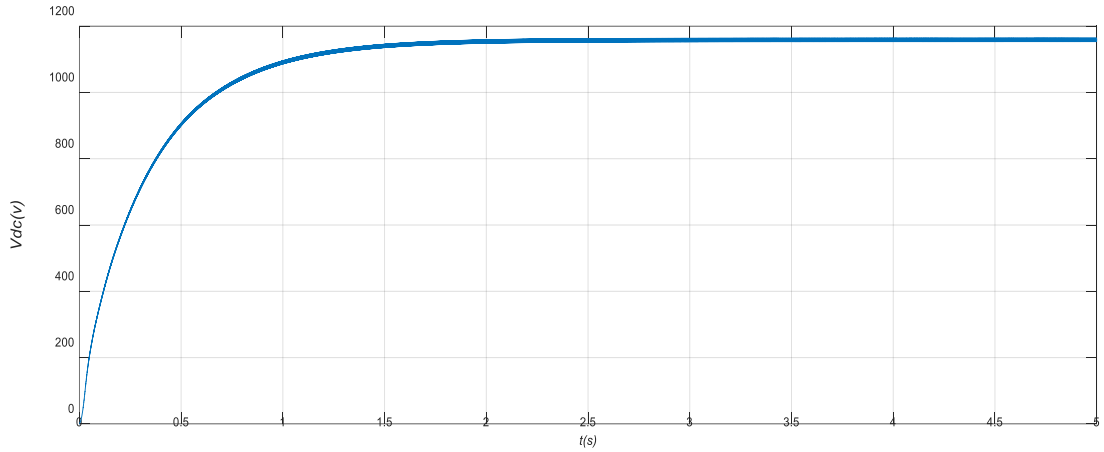


Fig. (III-16) : forme d'onde de tensions de sortie pour r=30%

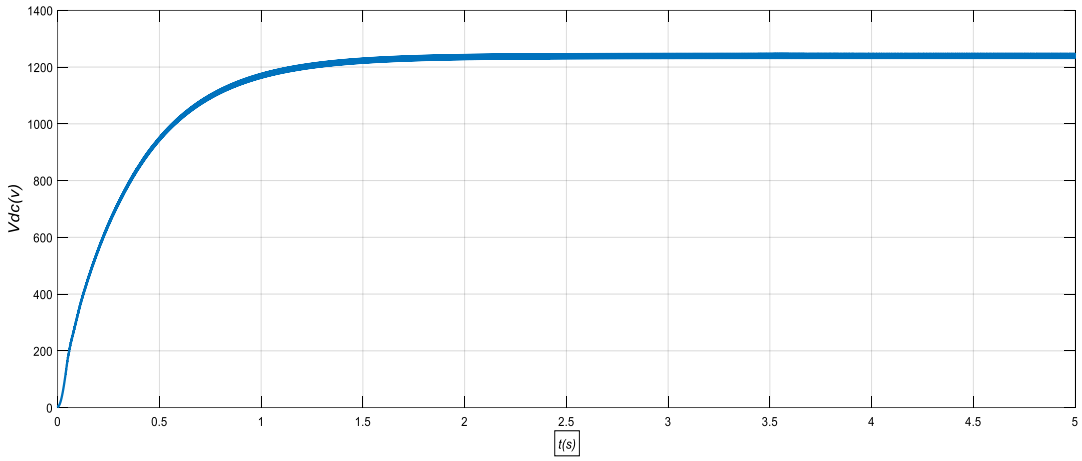
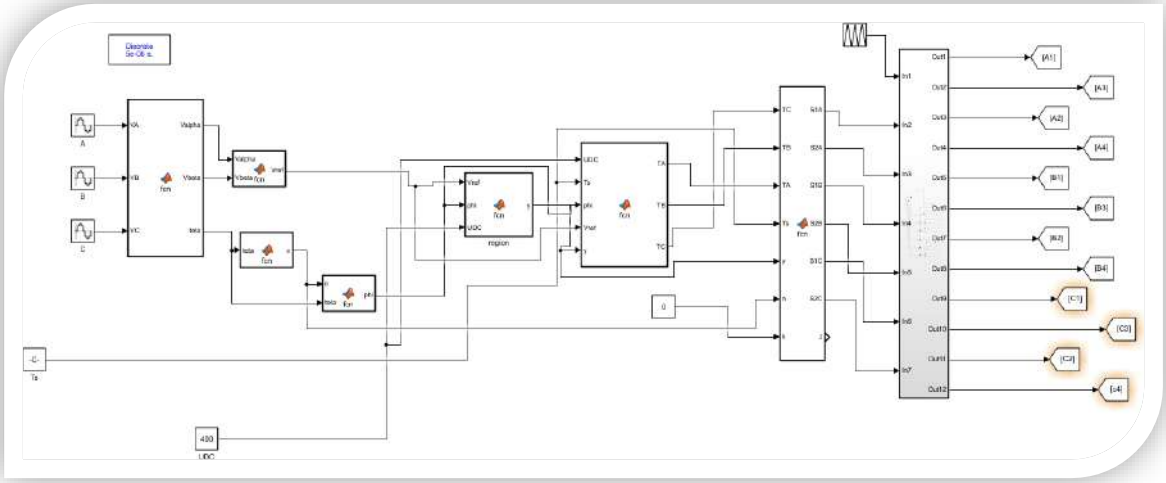


Fig. (III-17) : forme d'onde de tensions de sortie pour r=40%

Les figures ont montré que les résultats de simulation sont compatibles aux relations démontrées analytiquement l'équation (II.11)

On remarque qu'un long court-circuit augmente de plus la tension de sortie, ainsi l'approche de D de la valeur 0.5 (c.a.d proche de 50%)

III.6.2. Simulation onduleur avec la commande SVPWM



FigureIII.18. Schéma de bloc onduleur avec la commande SVPWM

III.6.2a. interprétations des résultats.

On remarque les tensions de sortie de l'onduleur varie suivant la tension d'alimentation de l'onduleur$\boldsymbol{Udc}$.

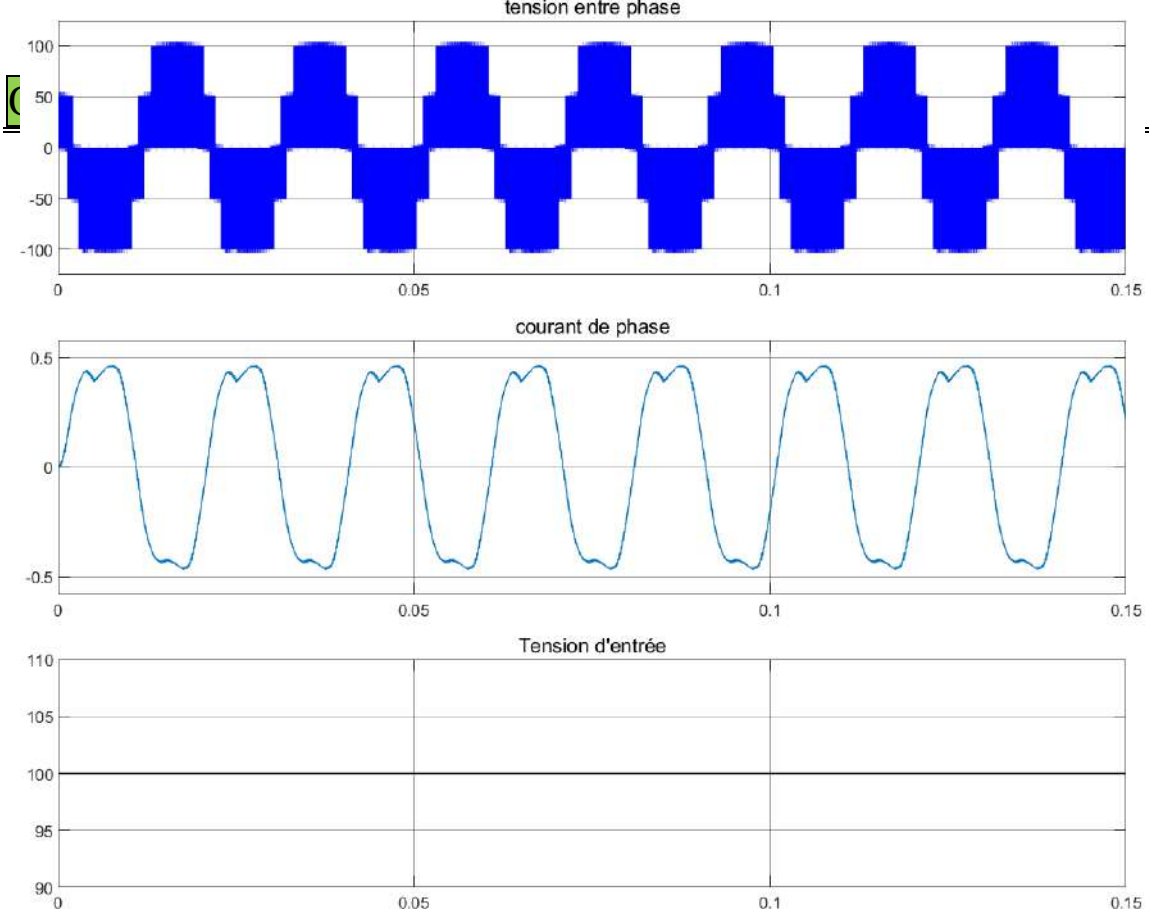
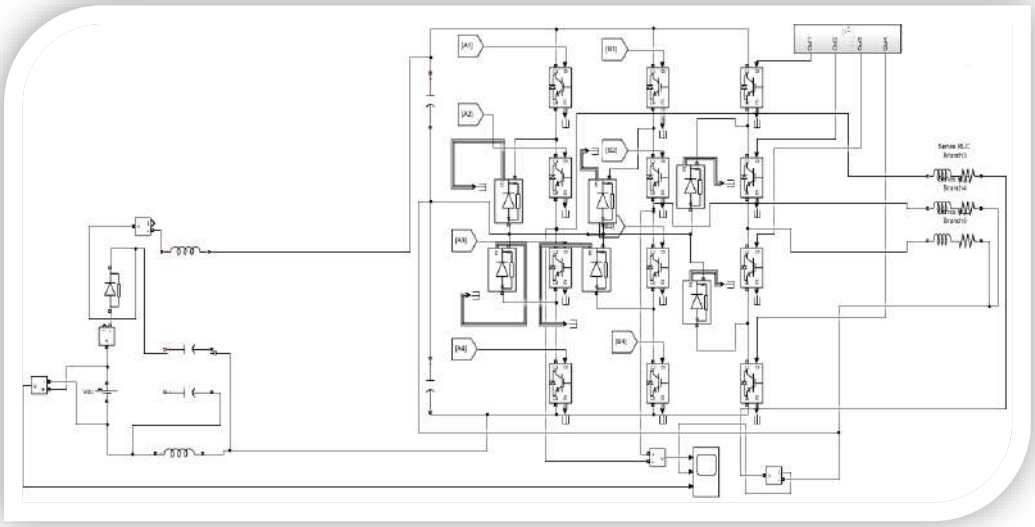


Figure III.19 Signaux de la commande MLI vectorielle, tensions de sortie

III.6.3. Simulation onduleur à Z source avec la commande SVPWM



FigureIII.20. Schéma de bloc onduleur à Z source avec la commande SVPWM

III.6.3.a. interprétation des résultats.

Lors de l'application des courts circuits sur les vecteurs V0, V7, V14 on remarque qu'on trouve les mêmes résultats sur la figure (III.21) Mais avec une amplitude plus élevée. La tension d'entrée reste inchangeable.

La stabilisation des tensions de sortie est au bout de 0.1s, ceci du au condensateur utilisé sur le circuit Z.

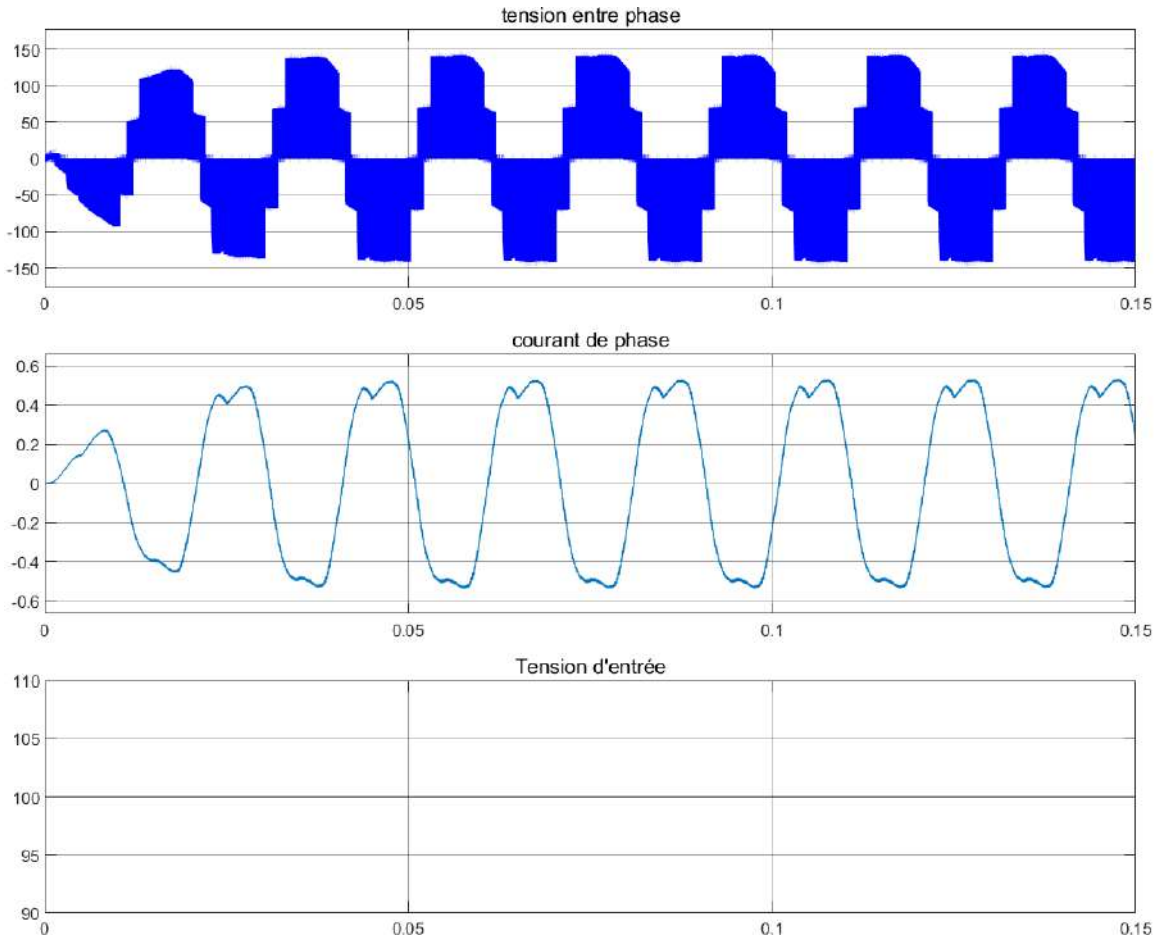


Figure III.21 Signaux de la commande MLI vectorielle, tensions de sortie

La figure III.22 montre l'analyse spectrale de courant.

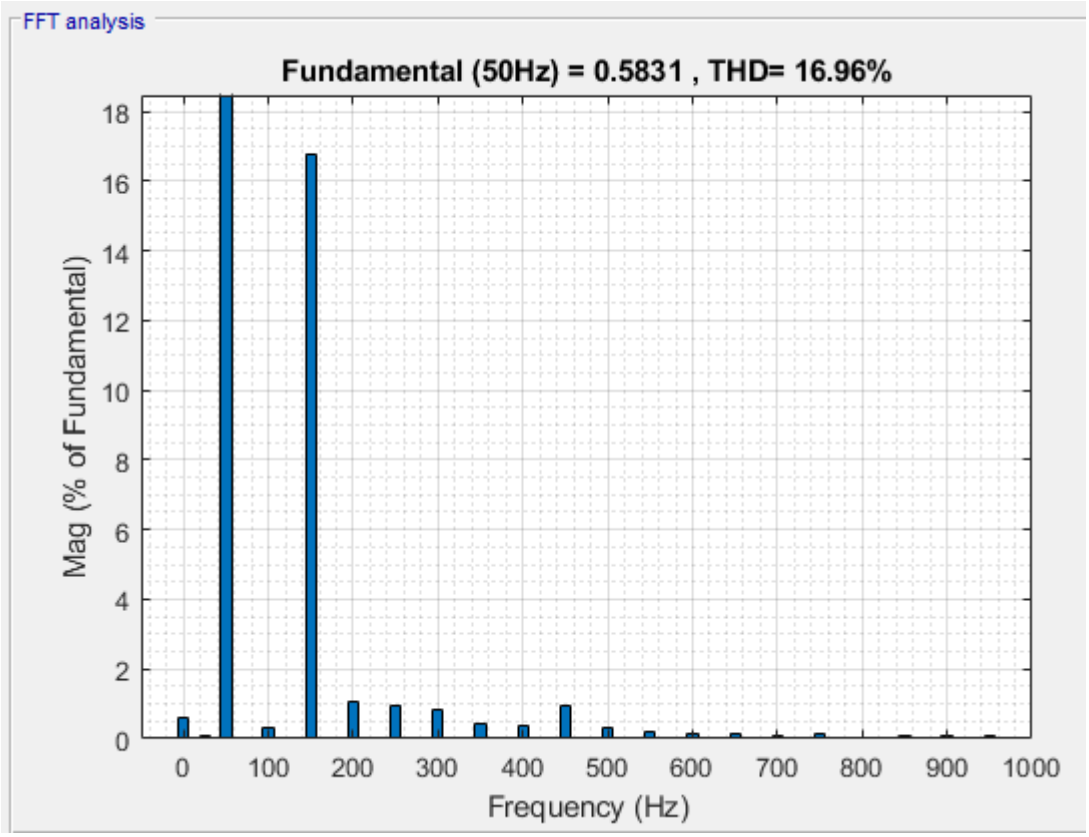


figure III.22 l'analyse spectrale de courant.

III.7.Conclusion.

Dans ce chapitre, on a étudié la stratégie de commande SVPWM d'onduleur de tension triphasés à trois niveaux à structure NPC.

La modulation vectorielle a l'avantage par rapport à les autres modulations, en ce qui concerne le déchet de tension ou le résidu harmonique. La SVM ne s'appuie pas sur des calculs séparés des modulations par chacun des bras de l'onduleur comme la MLI sinusoïdale, elle génère les signaux d'impulsion simultanément avec la rotation du vecteur de référence.

L'analyse spectrale de courant donne un THD de 16.9 pour cent avec une fréquence de perturbation de 150Hz.

Les résultats de simulation ont montré l'effet de court-circuit sur les vecteurs inactifs.

Conclusion générale

Le convertisseur à Z-source surmonte l'obstacle conceptuels et théoriques et limitations du traditionnel convertisseur tension-source et convertisseur source-source et fournit un nouveau concept de conversion d'énergie.

Ce projet est intéressé par la description de principe de fonctionnement, analysé les caractéristiques du circuit, et a démontré son concept et sa supériorité.

Les résultats analytiques et de simulation et ont été présenté. L'onduleur Z-source peut alimenter la tension, minimiser le nombre de composants, augmenter l'efficacité et réduire le Coût.

La stratégie MLI vectorielle à cause de la simplicité de sa mise en œuvre. L'adaptation de cette technique aux onduleurs de niveaux supérieurs à deux est d'une grande diversité. Nous avons étendu les notions connues pour la stratégie citée aux onduleurs à trois niveaux. Pour cela, nous avons appliqué la technique de commande MLI vectorielle pour la commande de l'onduleur trois niveaux à diodes bouclage NPC.

Après simulation, On remarque qu'on obtenu une forme d'onde de courant et de tension a la qualité de l'onde de tension à la sortie d'un onduleur de tension à trois niveaux de type NPC commandé par la MLI vectorielle sans Z source.

Ce réseau d'impédance est constitué d'une structure L C hybride croisée.a permet à l'onduleur d'amplifier la tension de sortie grâce à la commande spécifique SVPWM, ce qui élimine le hacheur survolteur avec un onduleur classique. L'étude du principe de fonctionnement ainsi qu'une comparaison avec une structure classique équivalente montre quel'amplitude de la tension de sortie de l'onduleur Z source est plus élevée.

Nous espérons que ce modeste travail contribue aux futurs étudiants d'améliorer ces résultats et d'introduire une source d'Energie renouvelable.

Références Bibliographiques

[1] Benzineb. F, « Etude et commande d'un onduleur Z-source : Application les systèmes photovoltaïques », Mémoire de master, Université SAAD DAHLAB de Blida, 2016.

[2] Pang. F.Z, « Z-source inverter », In 37th IAS Annual Meeting, Conference Record of the Industry Applications Conference, volume 2, pages 775 –781 vol.2, oct. 2002.

[3] Sofiane Lallam «Etude et réalisation d'un onduleur de tension monophasés multi niveaux », mémoire de fin d'études pour obtention du diplôme d'ingénieur d'état. Ecole militaire polytechnique.2007

[3] Kamel Merabet « Commande d'un onduleurs triphasés basée sur la dispersion de la tension Triphasée », mémoire présente à l'université du Québec a Trois-Rivières Comme Exigence Partielle de la maitrise en génie électrique Maitrise. Université du Québec.2011

[4] BOUDJEMA Noureddine . HAMRARAS Mohamed « Etude et implémentation des stratégies de commande MLI : Application à un onduleur à deux niveaux » projet de fin d'études master génie électrique, Université Dr YAHIA FARES ; MEDEA, 2015

[5] CHETTIH Kheireddine « Réalisation d'un onduleur monophasé avec un bras redondant » » projet de fin d'études master en électrotechnique université des f reres mentouri ;constantine,2015

[6] T. Mohamed. ACHOUR "Etude et commande d'un onduleur triphasé a structure zsource : application aux systemes multi-sources", Mémoire de Magistère, École Militaire polytechnique, Mars 2016.

[7] https://www.robertponge.com/telechargements/ebooks/onduleurs.pdf

[8] https://bu.univ-ouargla.dz/master/pdf/Saifi-imane.pdf?idmemoire=54618

[9] http://l2ep.univ-lille1.fr/pagesperso/francois/files/ITEEM2_TP_mod_sim_2009.pdf

[10] http://www.univ-usto.dz/theses_en_ligne/doc_num.php?explnum_id=431

[11]https://www.researchgate.net/publication/301301530_Commande_par_MLI_pre calculee_d%27un_onduleur_asymetrique_Application_a_la_commande_vectorielle_d% 27une_M[AS _de_forte_puissance

[12] https://bu.umc.edu.dz/theses/electronique/DJE4983.pdf

[13] http://www.univ-tebessa.dz/fichiers/masters/st160094.pdf

[14] https://infoscience.epfl.ch/record/33657/files/EPFL_TH3188.pdf

[15 http://biblio.univ-annaba.dz/wp-content/uploads/2014/07/BEN-ZEMAMOUCHE-HOURIA.pdf

[16] https://www.robertponge.com/telechargements/ebooks/onduleurs.pdf

[17] https://bu.umc.edu.dz/theses/electronique/DJE4983.pdf

[18] http://depot-e.uqtr.ca/1414/1/030165878.pdf

[19] international conference on electrical engineering and its application (ICCEEA'2008) « Commande d'un onduleur avec des approches neuromimétiques pour la compensation des courants harmoniques dans les réseaux électriques sidi bel-Abbas, Alegria 2008

[20] FaÏÇal Mnif « Etude et Réalisation des lois de commande par mode de Glissement et par approche Géométrique: Application à un Onduleur De Tension Monophasés », Thèse présente à l'université du Québec a Trois-Rivières Comme Exigence Pour l'obtention du Déplume de maitrise sciences appliquées en électronique industrielle, Université du Québec.1991

[21] HESPUL « Les Onduleurs pour Systèmes Photovoltaïques Fonctionnement, Etat de l'Art et Etude des Performances »,2007

[22] Luc Lasne « Electronique de puissance », Livre, Dunod 2ème édition, Paris, 2011, 2015.

[23] Houria Ben Zemammouch « Application de la MLI Vectorielle aux Onduleurs Multi niveaux à base de GTO et d'IGBT », Mémoire Présenté en vue d'obtention du diplôme de Magister, Université Badji Mokhtar Annaba.2010

[24] SALMI Salem « commande par MLI vectorielle d'un onduleur a sept niveaux alimentant un moteur a cage » mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme de master en génie électrique. Université de m'sila 2011/2012