



Réf:.....

**Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:**

MASTER

**Filière : Electromécanique
Option : Commande électrique**

Thème

**Étude et analyse des commandes d'un onduleur de
tension triphasé**

Présenté par : -Bellache Hocine

- Saadaoui Mohcin

Devant le jury:

Président : Chouder Adel

Université de Bordj Bou Arreridj

Examineur 1 : Zebiri Fouad

Université de Bordj Bou Arreridj

Examineur 1 : Ben Touhami lârafi

Université de Bordj Bou Arreridj

Rapporteur : Merabet Elkheir

Université de Bordj Bou Arreridj

REMERCIEMENTS

*Nos remerciements vont tout
premièrement, à Dieu le tout puissant de
nous avoir donné le courage pour réaliser ce
travail.*

On tient à remercier :

*Notre encadreur Mr : Elkheir Merabet POUR SON
suivi*

*continu ainsi que sa bonne orientation du
travail.*

*On remercie également les membres de
jury : D'avoir acceptés d'honorer par
leur présence la soutenance de notre
mémoire de fin d'étude.*

*nos remercie aussi tous les enseignants
du département délectromecanique*

*Enfin on remercie tous ceux qui nous ont
aidé de près ou de loin afin d'achever ce
travail.*

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Ma très chère mère,

Mon cher père,

Mon cher frère et ma sœur,

Toute ma famille BELLACHE,

Et tous mes amis,

*Et toute la promotion d'électrotechnique
(2021).*

Hocine Bellache

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

✓ mon père

✓ ma mère

✓ mes frères et soeurs

*✓ tout les membres de la famille ainsi que
mes amis.*

Mohcine Saadaoui

SOMMAIRE

Table des matières

REMERCIEMENTS	i
<i>Dédicace</i>	ii
<i>Table des matières</i>	iii
<i>Liste des figures</i>	vii
<i>Liste des tableaux</i>	x
<i>Notation et symbole</i>	xi
<i>Introduction Générale</i>	1

CHPITRE 1 : *Structure et Principe de fonctionnement et commande de l'onduleur à deux niveaux*

1.1 Introduction	3
1.2 Définition de l'onduleur	3
1.3 Les différents types d'onduleur	4
1.3.1 Onduleur autonome	4
1.3.1.1 Onduleur de courant	4
1.3.1.2 Onduleur de tension	4
1.3.2 Onduleur non autonome	4
1.3.3 Onduleurs à résonance	4
1.4 Principe de fonctionnement	5
1.4.1 Interrupteurs semi-conducteur de puissance	5
1.4.2 Cellules de commutation	6
1.4.3 L'onduleur monophasé en demi pont	7
1.4.4 L'onduleur monophasé en pont	8
1.4.5 L'onduleur triphasé à deux niveaux en pont	9
1.5 Modulation de l'onduleur triphasé à deux niveaux	11
1.5.1 Modulation de l'onduleur triphasé de tension à deux niveaux	11
1.5.2 Modulation de l'onduleur triphasé à deux niveaux de courant	13
1.6 Les applications des onduleurs	14
1.6.1 R'eglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone	15
1.6.2 Alimentation de secours	15
1.6.3 Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes	15
1.6.4 Les alimentations sans interruption (ASI)	16

SOMMAIRE

1.6.5	La protection des équipements.....	16
1.6.6	Les installations photovoltaïques	16
1.7	Analyse harmonique de la tension de sortie de l'onduleur	16
1.7.1	Origine des harmoniques.....	16
1.7.2	Mode de représentation ; le spectre en fréquence	17
1.7.3	Les harmoniques mesurés en pratique.....	17
1.7.4	Caractérisation des perturbations harmoniques.....	17
1.8	Techniques de commande de l'onduleur de tension triphasé	18
1.8.1	Commande 180°(plein onde)	18
1.8.1.1	Principe de fonctionnement.....	19
1.8.2	Commande MLI.....	19
1.8.2.1	Commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI).....	19
1.8.2.2	Principe de base de MLI.....	20
1.8.2.3	Caractéristiques de la modulation	21
1.8.2.4	Types de Modulation.....	22
1.8.2.4.1	Modulation naturelle.....	22
1.8.2.4.2	Modulation Régulière.....	22
1.8.2.5	Technique de production d'onde MLI.....	22
1.8.2.5.1	Technique analogique	23
1.8.2.5.2	Technique numérique	23
1.8.2.5.3	Technique hybride	23
1.8.2.6	Différentes techniques de modulation de longueur d'impulsions	24
1.8.2.6.1	La modulation linéaire multiple.....	24
1.8.2.6.2	La modulation sinusoïdale triangulaire unipolaire	24
1.8.2.6.3	La modulation sinusoïdale partielle (ou modifiée).....	25
1.8.2.6.4	La modulation sinusoïdale avec porteuse bidirectionnelle	25
1.8.3	La Modulation vectorielle.....	26
1.8.3.1	Le principe de la modulation vectorielle.....	26
1.8.3.2	La transformation de Clarke	26
1.8.3.3	Les configurations possibles	27
1.9	Simulation de commande MLI-ST, plein onde et MLI-Vectorielle d'un onduleur à deux niveaux	28
1.9.1	commande plein onde	28

SOMMAIRE

1.9.1.1 Résultats de simulation	29
1.9.2 commande MLI-ST	31
1.9.2.1 Résultats de simulation pour charge 1	32
1.9.2.2 Résultats de simulation pour charge 2	34
1.9.3 Commande MLI-vectorielle (SVPWM)	35
1.9.3.1 Résultats de simulation pour charge 1	35
1.9.3.2 Résultats de simulation pour charge 2	37
1.10 Conclusion.....	38

CHPITRE 2 : *Structure et Principe de fonctionnement et commande de l'onduleur à trois niveaux*

2.1 Introduction.....	39
2.2 Modélisation de l'alimentation de la charge (machine asynchrone)	39
2.2.1 Modélisation de Redresseur triphasé double alternance à diodes.....	40
2.2.2 Modélisation de filtre passe bas(LC)	41
2.2.3 Onduleur à trois niveaux de type NPC	43
2.2.3.1 Structure de l'onduleur à trois niveaux	43
2.2.3.2 Configurations et principe fonctionnement d'un bras de l'onduleur à trois niveaux... 44	
2.2.4 Modèle de la commande de l'onduleur à trois niveaux de type NPC.....	48
2.2.4.1 Commandabilité des convertisseurs statiques	48
2.2.4.2 Commande complémentaire	48
2.2.5 Fonctions de connexion.....	50
2.2.6 Modélisation des valeurs instantanées	51
2.3 Simulation de commande MLI-ST d'un onduleur à Trois niveaux.....	55
2.3.1 Commande MLI-ST (charge RL)	55
2.3.1.1 Résultats de simulation pour charge 1 ($R = 1000\Omega$, $L = 10\text{ mH}$)	55
2.3.1.2 Résultats de simulation pour charge 2 ($R = 300\Omega$, $L = 80\text{ mH}$)	57
2.4 Conclusion.....	58

CHPITRE 3 : *Structure et Principe de fonctionnement et commande de l'onduleur à cinq niveaux*

3.1 Introduction.....	59
3.2 Onduleur à cinq niveaux de type NPC	59
3.2.1 Structure de l'onduleur à cinq niveaux.....	59

SOMMAIRE

3.2.2	Différentes configurations d'un bras de l'onduleur NPC à cinq niveaux	60
3.2.3	Modélisation de l'onduleur triphasé à cinq niveaux à structure NPC	65
3.2.4	Expressions des tensions V_{an}, V_{bn}, V_{cn} en fonction des tensions V_{a0}, V_{b0}, V_{c0}	66
3.3	Modélisation en vue de la commande d'onduleur cinq niveaux NPC	66
3.3.1	Fonction de connexion des interrupteurs.....	66
3.3.2	Commande complémentaire.....	67
3.3.3	Fonction de connexion du demi-bras.....	67
3.3.4	Modélisation aux valeurs instantanées	67
3.4	Simulation de commande MLI-ST d'un onduleur à cinq niveaux	70
3.4.1	commande MLI-ST charge (RL).....	70
3.4.1.1	Résultats de simulation pour charge 1	70
3.4.1.2	Résultats de simulation pour charge 2	72
3.5	Conclusion.....	73

CHPITRE 4 : *Etude comparative*

4.1	Introduction.....	74
4.2	Les résultats des commandes	74
4.2.1	résultats de commande MLI-ST	74
4.2.2	Résultats de commande MLI-Vectorielle (SVPWM).....	74
4.3	Comparaisons des résultats des commandes	75
4.3.1	Comparaison entre deux charge (1 et 2) en commande MLI-ST	75
4.3.2	Comparaison entre les niveaux par une charge (2) en commande MLI-ST	76
4.3.2	Comparaison entre deux charge (1 et 2) en commande MLI-Vectorielle	76
4.4	Comparaison entre deux techniques de commande (MLI-ST et MLI-Vectorielle)	77
4.5	Conclusion	78
	Conclusion générale.....	79
	<i>ANNEXE</i>	81
	<i>BIBLIOGRAPHIE</i>	82
	<i>RESUME</i>	85

Liste des figures

CHPITRE 1 : *Structure et Principe de fonctionnement et commande de l'onduleur à deux niveaux*

Figure 1.1: Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC).....	3
Figure 1.2: Cellule de commutation élémentaire d'un convertisseur.....	6
Figure 1.3: Onduleur monophasé en demi-pont.....	7
Figure 1.4: Allure de courant et tension pour l'onduleur monophasé en demi pont(charge inductive).....	8
Figure 1.5: Onduleur monophasé en Pont.....	8
Figure 1.6: Allure de courant et tension pour l'Onduleur Monophasé en Pont (charge inductive).....	9
Figure 1.7: Onduleur triphasé de tension à deux niveaux en pont.....	9
Figure 1.8: Allure des tensions simple et composé pour l'onduleur triphasé à deux niveaux en Pont (charge résistive).....	10
Figure 1.9: Modes de fonctionnement de l'onduleur triphasé à deux niveaux en Pont.....	10
Figure 1.10: Onduleur triphasé de tension à deux niveaux en pont.....	11
Figure 1.11: Onduleur triphasé à deux niveaux de courant.....	14
Figure 1.12: Principe de réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone.....	15
Figure 1.13: Alimentation de secours.....	15
Figure 1.14 : Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes.....	16
Figure 1.15: Spectre d'harmonique d'un signal électrique donné.....	17
Figure 1.16: Principe de la modulation.....	20
Figure 1.17: Schéma synoptique de la M.L.I.....	20
Figure 1.18: Schéma synoptique de la commande en MLI (triphasé).....	22
Figure 1.19: Technique analogique.....	23
Figure 1.20: Technique numérique.....	23
Figure 1.21: Technique hybride.....	23
Figure 1.22: La modulation de largeur d'impulsions multiples.....	24
Figure 1.23: MLI sinusoïdal triangulaire unipolaire.....	24
Figure 1.24: La modulation sinusoïdale modifiée.....	25

Liste des figures

Figure 1.25: La modulation sinusoïdale avec porteuse bidirectionnelle.....	25
Figure 1.26 : transformation de clarcke.....	26
Figure 1.27: Représentation du polygone de commutation.....	27
Figure 1.28: Schéma bloc de la commande a 180°(plein onde).....	28
Figure 1.29: les résultats de simulation de commande plein onde charge RL.....	29
Figure 1.30: Schema bloc de la commande MLI charge RL.....	31
Figure 1.31: les résultats de simulation de commande MLI charge RL (1).....	32
Figure 1.32: les résultats de simulation de commande MLI charge RL (2).....	34
Figure 1.33: Schema bloc de la commande MLI-Vectorielle(SVM).....	35
Figure 1.34: les résultats de simulation de commande MLI-Vectorielle SVPWM charge RL (1).....	35
Figure 1.35: les résultats de simulation de commande MLI-Vectorielle (SVPWM) charge RL (2)....	37

CHPITRE 2 : *Structure et Principe de fonctionnement et commande de l'onduleur à trois niveaux*

Figure 2.1: Association convertisseur – machine.....	39
Figure 2.2: Représentation de redresseur double alternance à diodes.....	40
Figure 2.3: Tension redressée U_{red}	41
Figure 2.4: Schéma du filtre (LC).....	42
Figure 2.5: Tension filtrée.....	42
Figure 2.6: Onduleur triphasé à trois niveau.....	43
Figure 2.7: Un bras de l'onduleur à trois niveaux de type NPC.....	44
Figure 2.8: 1 ^{ème} configuration du 1 ^{er} bras.....	45
Figure 2.9: 2 ^{ème} configuration du 1 ^{er} bras.....	46
Figure 2.10: 3 ^{ème} configuration du 1 ^{er} bras.....	47
Figure 2.11: Forme d'onde de la tension de sortie d'un bras d'onduleur à trois niveaux de type NPC.....	48
Figure 2.12: Schema bloc de la commande MLI-ST d'un onduleur 3 N charge RL.....	55
Figure 2.13: les résultats de simulation de commande MLI-ST charge RL (1).....	55
Figure 2.14: les résultats de simulation de commande MLI-ST charge RL (2).....	57

CHPITRE 3 : *Structure et Principe de fonctionnement et commande de l'onduleur à cinq niveaux*

Figure 3.1: Bras d'un onduleur NPC à cinq niveaux.....	59
Figure 3.2: 1 ^{ère} configuration du 1 ^{er} bras.....	60
Figure 3.3: 2 ^{ème} configuration du 1 ^{er} bras.....	61
Figure 3.4: 3 ^{ème} configuration du 1 ^{er} bras.....	62
Figure 3.5: 4 ^{ème} configuration du 1 ^{er} bras.....	63
Figure 3.6: 5 ^{ème} configuration du 1 ^{er} bras.....	64
Figure 3.7: les signaux de commande de chaque interrupteur et la forme d'onde de la tension de sortie V_{a0}	65
Figure 3.8: Schema bloc de la commande MLI-ST d'un onduleur 5 N charge RL.....	70
Figure 3.9: les résultats de simulation de commande MLI charge RL (1).....	70
Figure 3.10: les résultats de simulation de commande MLI-ST charge RL (2).....	72

Liste des tableaux

CHPITRE 1 : *Structure et Principe de fonctionnement et commande de l'onduleur à deux niveaux*

Tableau 1.1: Interrupteurs semi-conducteur de base de l'électronique de puissance.....	5
Tableau 1.2: Fonctionnement de l'onduleur triphasé de tension à deux niveaux.....	13
Tableau 1.3: Fonctionnement de l'onduleur triphasé à deux niveaux de courant.....	14
Tableau 1.4: Composantes de Clarke des tensions de sortie.....	28

CHPITRE 2 : *Structure et Principe de fonctionnement et commande de l'onduleur à trois niveaux*

Tableau 2.1: Table de commutation du convertisseur NPC 3 niveaux.....	47
Tableau 2.2: La table logique correspondante de la commande N°1.....	49
Tableau 2.3: La table logique correspondante de la commande N°2.....	49
Tableau 2.4: La table logique correspondante de la commande N°3.....	50

CHPITRE 3 : *Structure et Principe de fonctionnement et commande de l'onduleur à cinq niveaux*

Tableau 3.1: Table de commutation de l'onduleur NPC à 5 niveaux.....	64
---	----

CHPITRE 4 : *Etude comparative*

Tableau 4.1: représente la valeur des harmoniques(THD) des tensions et courants de d'un onduleur deux à niveaux , trois niveaux et cinq niveaux de type NPC ,pour charge 1	74
Tableau 4.2: représente la valeur des harmoniques des tensions de sortie d'un onduleur deux niveaux , trois niveaux et cinq niveaux de type NPC et THD des courants.pour charge 2	74
Tableau 4.3: représente la valeur des harmoniques des tensions de sortie d'un onduleur deux niveaux ,de type NPC et THD des courants d'un commande SVPWM,pour charge 1 et 2	75
Tableau 4.4: représente une comparaison entre deux charge à tous les niveaux par le THD de courant et tension.....	75
Tableau 4.5: montre la comparaison entre l'onduleur NPC à deux niveaux ,3niveaux et cinq niveaux par la commande MLI-ST.....	76
Tableau 4.6: représente une comparaison entre deux charge d'un onduleur à deux niveaux par le THD de courant et tension en commande MLI-Vectorielle.....	76
Tableau 4.7: montre la comparaison entre deux techniques de commande d'un onduleur NPC à deux niveaux les résultats pour charge 2.....	77

Notation et symbole

<i>DC</i>	Direct Current.
<i>AC</i>	Alternatif Current.
<i>NPC</i>	Neutral Point Clamped.
<i>THD</i>	Total Harmonic Distortion.
<i>MLI-ST</i>	modulation de largeur d'impulsions sinus triangulaire.
<i>MLI-V</i>	MLI vectoriel.
<i>A_r</i>	Amplitude de la référence.
<i>A_p</i>	Amplitude de la porteuse triangulaire.
<i>f_p</i>	La fréquence du modulation.
<i>f_r</i>	La fréquence de la référence.
<i>m</i>	Indice de modulation.
<i>r</i>	Coefficient de réglage en tension.
<i>T_i</i>	Semi-conducteur commandé (IGBT, GTO).
<i>T</i>	La période de modulation.
<i>k_i; k'_i</i>	Interrupteurs de l'onduleur.
<i>V_{réf}</i>	Tension de référence.
<i>E</i>	Tension principale de l'onduleur NPC.
<i>N</i>	le nombre de niveaux de tension obtenus.
<i>PWM</i>	(Pulse Width Modulation) : Modulation de largeur d'impulsion.
<i>SVPWM</i>	Space Vector Pulse Width Modulation.
<i>IGBT</i>	Insolated Gate Bipolar Transistor.
<i>GTO</i>	Thristor à extinction par la gachette
<i>K</i>	le nombre de commutateurs principaux.
<i>D</i>	Le nombre de diodes principales.
<i>U_{C2}</i>	La tension continue au borne du C ₂ .
<i>U_{C1}</i>	La tension continue au borne du C ₁ .
<i>DD_{K1}, DD_{K2}</i>	Les deux diodes médianes.
<i>V_{Ka1}, V_{Ka2}...</i>	Les tensions inverses appliquées aux bornes des interrupteurs bloqués.
<i>V_{Ki}</i>	La tension au borne de l'interrupteur bidirectionnel K _S .
<i>V_{a0}, V_{b0}, V_{c0}</i>	Les tensions simples à la sortie de l'onduleur entre les phases de la charge et le point milieu O.
<i>V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}</i>	Les tensions composées aux bornes de la charge.
<i>MAS</i>	Machine Asynchrone.
<i>L_F</i>	Inductance de filtre.
<i>C_F</i>	Condensateur de filtre.
<i>U_{red}</i>	Tension de sortie de redresseur.
<i>I_{red}</i>	Courant redressé.

Notation et symbole

U_{dc}	Tension de sortie de filtre.
I_{dc}	Courant d'entrée de l'onduleur.
f_c	Fréquence de coupure.
K	Interrupteur bidirectionnel en courant.
F_{KS}	Fonction de connexion, avec (k=1, 2, 3) et (s=1, 2, 3).
F_{K0}^b	Fonction de connexion du demi bras en bas.
F_{K1}^b	Fonction de connexion du demi bras en haut.
K_{a1}, K_{a2}	Sont les commutateurs en haut de l'onduleur NPC à trios niveaux de tension.
K_{a3}, K_{a4}	Sont les commutateurs en bas de l'onduleur NPC à trios niveaux de tension.
$M(t)$	Matrice de conversion composée.
$N(t)$	Matrice de conversion simple.
O	Le point milieu entre C_1 , et C_2 .

Introduction Générale

Introduction Générale

Dans le domaine de l'électricité, l'électronique de puissance est un domaine vital touche plusieurs activités tel que le réseau électrique, le transport (urbain, ferroviaires, maritime.....), l'énergie renouvelable et l'industrie. Dans cette époque l'énergie est devenue l'une des choses importantes dans la vie quotidienne de l'homme. Elle est devenu nécessaire d'améliorer les performances des dispositifs de l'électronique de puissance, cette dernière peut être contribue pour l'améloiration du signal électrique.

Les convertisseurs électriques sont des dispositifs basés sur les composants semi-conducteurs, ainsi que des éléments passifs comme les résistances, les condensateurs et les inductances. La combinaison entre elle permet de convertir la forme de signal électrique soit tension ou courant à autre forme cette conversion utiliser dans les activités industrielles actuellement. Ce qui nous donne quatre types de convertisseur soit :

- ✓ **DC/DC** : hacheur qui permet de convertir le signal continue à le continue commandable;
- ✓ **DC/AC** : onduleur qui permet de convertir le signal continue à l'alternative;
- ✓ **AC/DC** : redresseur qui permet de convertir le signal alternatif à le continue;
- ✓ **AC/AC** : gradateur qui permet de convertir le signal continue à le continue commandable.

Un onduleur est un convertisseur statique, assurant la conversion continue alternative. Ces dernières années, des convertisseurs statiques sont de plus en plus exploités dans des applications diverses. Certaines d'entre elles exigent une alimentation électrique à haute tension, facilement réglable et ayant de bonnes performances spectrales. Des nouvelles techniques dites multiniveaux ainsi que des nouvelles topologies des convertisseurs ont été développées. elles permettent de générer plusieurs niveaux de tension à la sortie du convertisseur. Le nombre de semi-conducteurs nécessaires à la réalisation de ces topologies augmente avec le nombre des niveaux désirés.

Les chercheurs ont été développé plusieurs topologies pour trouver la meilleur valeur de THD, cette évolution apparue dans les convertisseurs multiniveaux (2 niveaux 3.....). sujet de ce mémoire, cette structure prenait plusieurs avantages et élève l'esprit de recherche quand les chercheurs.

Parmi les méthodes utilisées pour améliorer les performances de sorties d'onduleur c'est le nombre de niveau d'onduleur et la stratégie de commande. Dans ce travail nous allons étudier l'onduleur multiniveaux NPC (Neutral Point Clamped) pour voire l'influence de nombre des niveaux sur performances de convertisseur, et on va comparer entre deux stratégies MLI-ST (triangle sinusoïdale) et MLI vectorielle.

Introduction Générale

Dans ce travail nous intéressons à l'étude des convertisseurs multiniveaux et les différents types de commande et on essayera de faire une comparaison entre certaine stratégie de commande pour atteindre un taux de distorsion THD minimal .

Cette étude est sera basée sur la simulation sous Matlab qui a été utilisée pour effectuer les simulations numériques.

L'objectif de notre étude théorique et sa simulation est : de trouver une bonne stratégie de commande ainsi que pour choisir le niveau désiré qui donne le meilleur résultat (la tension de sortie de l'onduleur soit proche à la sinusoïdale). Notre étude sera limitée aux onduleurs des niveaux deux, trois, et cinq.

Le premier chapitre, sera consacré à l'étude le principe de fonctionnement et la modélisation de l'onduleur à deux niveaux avec la simulation des commandes (commande MLI-ST, commande pleine onde et la commande MLI-vectorielle) avec deux charge différentes, le THD sera calculé.

Le deuxième chapitre, sera présenté l'étude de principe de fonctionnement et la modélisation de l'onduleur à trois niveaux avec la simulation de la commande MLI-ST alimentant deux charges différentes.

L'étude de principe de fonctionnement et la modélisation de l'onduleur à cinq niveaux avec sa simulation de sa commande MLI-ST alimentant deux charges différentes fera l'objet de troisième chapitre.

Une étude comparative des niveaux (deux niveaux , trois niveaux et cinq niveaux) en termes de THD de courant et de tension, et la comparesion entre la commande MLI-ST et MLI-Vectorielle sera présenté au dernier chapitre.

Finalement, on terminera notre travail par une conclusion générale et quelques perspectives.

Chapiter 1

Structure et Principe de fonctionnement et commande de l'onduleur à deux niveaux

1.1 Introduction

L'énergie électrique est généralement transportée et distribuée sous forme de tensions alternatives sinusoïdales. L'électronique de puissance permet de modifier la forme de l'énergie électrique pour l'adapter aux différents besoins. [1]

Grâce aux progrès technologiques réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance, les convertisseurs statiques comme les onduleurs voient progressivement leur champ d'applications s'élargir, le filtrage actif, les systèmes d'énergies renouvelables et l'entraînement des moteurs électriques sont les applications des onduleurs les plus populaires dans la vie quotidienne et industrielle.

La conversion continue-alternative a pour objectif de transformer un signal de tension continu à un signal de tension alternatif d'amplitude et de fréquence désirées. Cette transformation s'opère dans un convertisseur appelé onduleur, la figure 1.1 montre un schéma synoptique de la conversion continue alternative. [2]

Dans ce chapitre, nous allons étudier en détail l'onduleur de tension à deux niveaux (structure et principe de fonctionnement), nous verrons ensuite citer quelques domaines d'applications des onduleurs de tension. enfin, nous allons présenter les techniques de commande MLI-ST, commande pleine onde et MLI-vectorielle, la simulation pour chaque commande de cet onduleur sera aussi présenté.

1.2 Définition de l'onduleur

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

Cette tension peut comporter un ou plusieurs créneaux par alternance suivant qu'il s'agit d'une commande à un créneau par alternance ou d'une commande par Modulation de Largeur d'Impulsions (Pulse Width Modulation). [3]

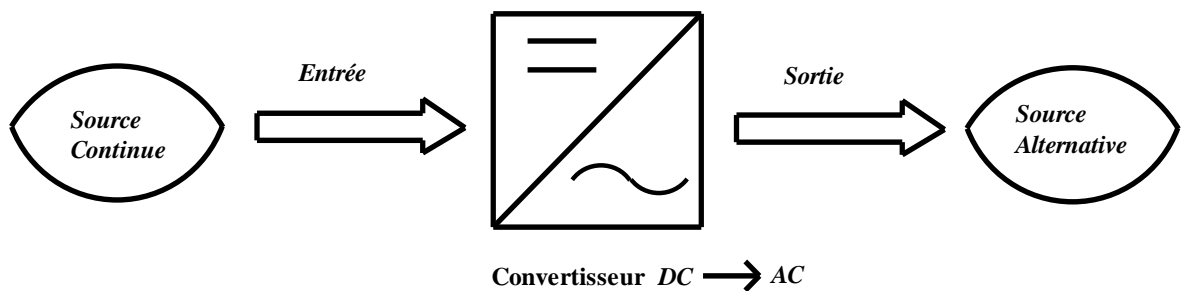


Figure 1.1: Schéma synoptique de la conversion Continu - Alternative (DC – AC).

1.3 Les différents types d'onduleur

Les onduleurs sont classés en deux grandes catégories :

1.3.1 Onduleur autonome

Un onduleur est dit autonome s'il utilise l'énergie d'un circuit auxiliaire propre à lui pour la commutation des thyristors ou l'autre semi conducteurs dans ce cas nous commandons la fréquence la forme d'onde de la tension de sortie. On distingue deux types d'onduleurs autonomes: [3][4]

- Les onduleurs de tension alimentée par une source de tension continue.
- Les onduleurs de courant alimentés par une source de courant continue.

1.3.1.1 Onduleur de courant

L'onduleur de courant transforme un courant continu en courants triphasés dans les enroulements de la machine. Il peut fonctionner en commutation naturelle, c'est le cas des machines synchrones. La commutation forcée est réalisée pour toutes les autres machines. Ce type d'onduleur ne permet que le réglage de la fréquence des grandeurs de sortie, l'amplitude de celle-ci doit être réalisée par ajustement de la grandeur d'entrée. [3]

1.3.1.2 Onduleur de tension

Les onduleurs de tension constituent une fonction incontournable de l'électronique de puissance. Les deux grands domaines d'application classiques des onduleurs de tension sont les alimentations de secours et les entraînements à vitesse variable, la forte évolution des onduleurs de tension s'est appuyée, d'une part, sur le développement des composants semiconducteurs contrôlables, puissants, robustes, et rapides, et d'autre part, sur l'utilisation quasi généralisée des techniques dites de modulation de largeur d'impulsion. [3]

1.3.2 Onduleur non autonome

C'est le nom donné au montage redresseur tous les thyristors (pont de Graëtz) qui, en commutation naturelle assistée par le réseau auquel il est raccordé, permet un fonctionnement en onduleur (par exemple par récupération de l'énergie lors des périodes de freinage dans les entraînements à moteurs électriques). À la base du développement des entraînements statiques à vitesse variable pour moteurs à courant continu et alternatif, cycloconvertisseurs, onduleurs de courant pour machines synchrones et asynchrones, jusqu'à des puissances de plusieurs MW, ce type de montage est progressivement supplanté, au profit de convertisseurs à IGBT ou GTO. [3][4]

1.3.3 Onduleurs à résonance

Les onduleurs à résonance sont des onduleurs de tension ou de courant à un créneau par alternance fonctionnant dans des conditions particulières. La charge doit être un circuit oscillant peu amorti. On commande les interrupteurs par une fréquence voisine de la fréquence de résonance de la charge. Si

celle-ci varie, il faut faire varier la fréquence de commande. L'onduleur doit donc être piloté par la charge, il n'est plus autonome. [5]

1.4 Principe de fonctionnement

1.4.1 Interrupteurs semi-conducteur de puissance

Dans le cas où les semi-conducteurs de puissance peuvent être considérés comme des interrupteurs parfaits, l'analyse du principe de fonctionnement des convertisseurs de puissance est évidemment grandement facilitée. cette approche a l'avantage de ne pas concentrer sa réflexion sur les détails du fonctionnement des convertisseurs.

Les semi-conducteurs de puissance actuels peuvent être classés en trois catégories : Diodes, Thyristor et Interrupteurs commutable à l'ouverture et à la fermeture. La catégorie des interrupteurs commutable inclut de nombreux types de composants. Les trois types d'interrupteurs sont unidirectionnels. Le courant ne peut les traverser que dans un sens. Il est possible d'associer deux interrupteurs en parallèle pour réaliser un interrupteur bidirectionnel

Le Tableau 1.1 est un récapitulative des interrupteur semi-conducteur le plus utilisés dans l'électronique de puissance.[6]


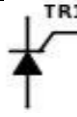


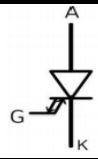

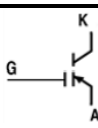
<i>Semi-conducteur</i>	<i>Ouverture/Fermeture</i>	<i>Symbol</i>
Diodes	États fermé ou ouvert contrôlés par le circuit de puissance	
Thyristors	Fermé par un signal de commande, mais doit être ouvert par le circuit de puissance.	
Transistors Bipolaires à Jonctions (BJT)	Interrupteurs commutable à l'ouverture et à la fermeture	
Transistors à effet de champ (Metal-Oxyde Semiconductor Field effet transistor – MOSFETs)		
Thyristors commandés à l'ouverture (Gate-Turn-Off Thyristors - GTO Thyristors)		
Transistors bipolaires à grille isolée (Insulated Gate Bipolar Transistors - IGBTs)		
Thyristors MOS Commandés (MOS-Controlled Thyristors – MCTs)		

Tableau 1.1:Interrupteurs semi-conducteur de base de l'électronique de puissance.

Un interrupteur peut assumer deux états : ouvert ou fermé. Dans l'état fermé, on dit que l'interrupteur est passant ou ON. Dans l'état ouvert, on dit que l'interrupteur est ouvert ou OFF.

La fermeture d'un interrupteur à semi-conducteur connecte les bornes qu'il relie, son ouverture interrompt cette connexion.

Au moment où il se ferme, il force les potentiels de deux bornes qu'il relie à devenir égaux. La fermeture d'un interrupteur entraîne une discontinuité du potentiel d'au moins une des bornes, sauf si à cet instant, les deux potentiels étant égaux, la tension aux bornes de l'interrupteur est nulle.

Au moment de l'ouverture, l'interruption de la connexion entre les deux bornes que l'interrupteur reliait force le courant qui circulait d'une borne à l'autre à s'annuler. ce courant subit une discontinuité, sauf si à cet instant il était nul.

Ces contraintes sont acceptables si elles sont compatibles avec la continuité de l'énergie au sein du montage dans lequel les interrupteurs sont insérés. en pratique cela revient généralement à vérifier que les commutations n'entraînent pas

- de discontinuité de la tension aux bornes d'un ou plusieurs condensateurs
- de discontinuité du courant dans une ou plusieurs inductances.

1.4.2 Cellules de commutation

Le plus petit convertisseur a au moins deux interrupteurs qui forment une cellule élémentaire de commutation. Le fonctionnement de ces deux interrupteurs doit être rigoureusement complémentaires.

Figuer 1.2 montre une cellule de commutation qui relie une source de tension à une source de courant. On peut aussi relier une source de courant à l'entrée avec une source de tension au sortie.[6]

On voit que :
$$\begin{cases} V_{S2} = V \text{ et } I_{S1} = I \text{ si } S_1 \text{ est passant (ON)} \\ V_{S1} = V \text{ et } I_{S2} = -I \text{ si } S_2 \text{ est passant (ON)} \end{cases}$$

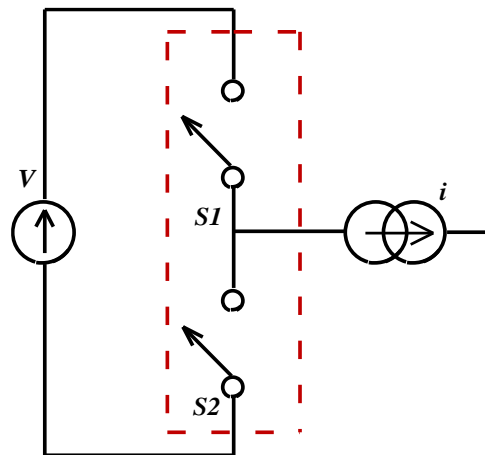


Figure 1.2: Cellule de commutation élémentaire d'un convertisseur.

Dans une cellule de commutation, la tension aux bornes d'un interrupteur bloqué est égale à la tension de la source de tension. Au signe près, le courant dans un interrupteur qui conduit est égal au courant de la source de courant.

Par conséquent si la source de tension est bidirectionnelle, l'interrupteur devra supporter une tension bidirectionnelle. De même si la source de courant est bidirectionnelle, l'interrupteur devra supporter un courant bidirectionnel.

En guise de conclusion, la réversibilité des interrupteurs est liée à la réversibilité des sources en tension pour une source de tension et en courant pour une source de courant.

1.4.3 L'onduleur monophasé en demi pont

C'est la configuration la plus simple, comme montré dans la Figure 1.3 On utilise une seule cellule de commutation avec deux interrupteurs complémentaires.

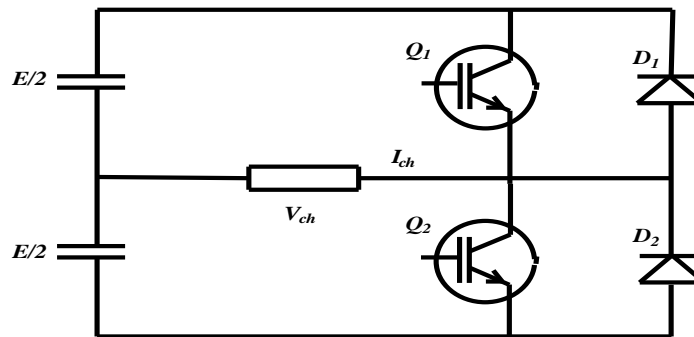


Figure 1.3: Onduleur monophasé en demi-pont.

On met des diodes en parallèle avec les transistors. Leur rôle est d'assurer la continuité de courant. En effet, une charge inductive ne supporte pas l'interruption brusque de courant. Ainsi, après le blocage de Q_1 le courant I_{ch} continue à circuler à travers la diode D_2 qui conduit spontanément.

- Lorsque le transistor Q_1 conduit, la charge voit une tension $V_{ch} = E/2$. Le courant I_{ch} croît exponentiellement selon une constante de temps.
- Lorsque le transistor Q_1 est bloqué, la diode D_2 se met à conduire pour assurer la continuité de courant. La charge voit alors une tension $V_{ch} = E/2$. Le courant I_{ch} diminue alors. Au passage du courant par 0, on envoie un signal de commande vers la base de Q_2 . La diode D_2 se bloque et le courant I_{ch} continue à croître dans le sens opposé.

Au blocage de Q_2 , la diode D_1 prend la relève et la charge voit de nouveau une tension $V_{ch} = E/2$. au passage du courant par 0, on fait conduire Q_1 et le cycle reprend. Figure 1.4 représente les allures de courant et tension :

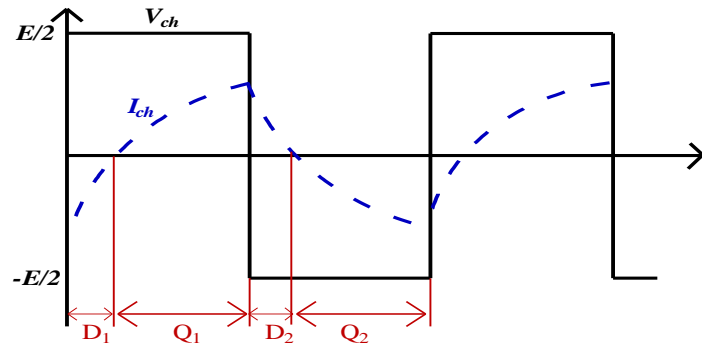


Figure 1.4: Allure de courant et tension pour l'onduleur monophasé en demi pont (charge inductive).

1.4.4 L'onduleur monophasé en pont

Le montage de ce type d'onduleur comprend quatre transistors qui peuvent être remplacés par des thyristors utilisés comme interrupteurs électroniques ainsi que quatre diodes montées en parallèle inverse aux bornes des transistors. Les circuits d'amorçage ou de blocage des transistors ne sont pas représentés. L'avantage de ce montage en pont réside dans l'utilisation d'une seule source de tension E .

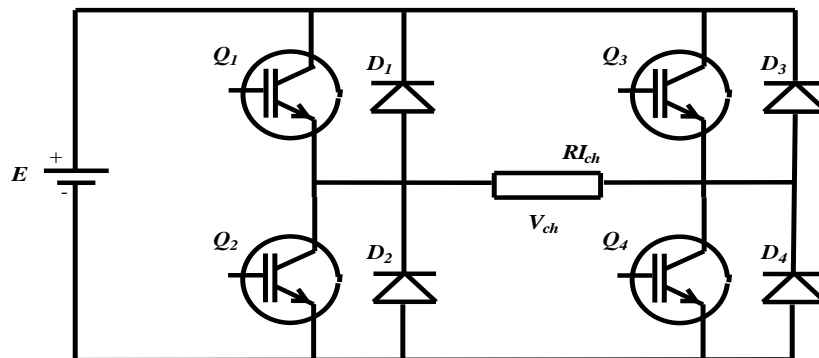


Figure 1.5: Onduleur monophasé en pont.

Dans le cas d'une commande symétrique, l'amorçage des transistors Q_1 et Q_4 a lieu en même temps, et il en est de même pour Q_2 et Q_3 . La tension de sortie est rectangulaire, et sa valeur efficace est égale à E .

Lorsque les transistors Q_1 et Q_4 sont amorcés, la charge voit $V_{ch} = E$ et le courant augmente exponentiellement (Charge RL). En bloquant ces derniers (Circuit de commutation forcée), la continuité de courant sera assurée par les diodes D_2 et D_3 et la charge voit $V_{ch} = -E$.

Au passage du courant par 0, on amorce Q_2 et Q_3 . Le courant continue à circuler dans la charge en sens opposé. En bloquant ces derniers, les diodes D_1 et D_4 conduisent et $V_{ch} = E$. Lorsque le courant passe par 0, on réamorce Q_1 et Q_4 .

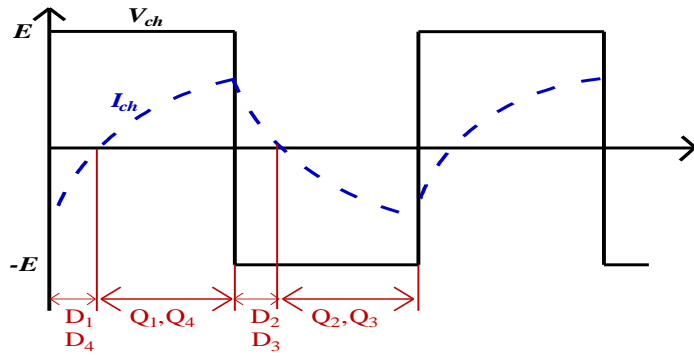


Figure 1.6: Allure de courant et tension pour l'onduleur monophasé en pont (charge inductive).

1.4.5 L'onduleur triphasé à deux niveaux en pont

L'onduleur triphasé à deux niveaux est constitué de 3 cellules de commutation comportant deux interrupteurs commmandable à l'ouverture et à la fermeture et de deux diodes branchées en antiparallèle de ces interrupteurs permettant la bidirectionnalité du courant.

Le montage est constitué d'une source de tension continue E réversible en courant. La charge est généralement une machine à champ tournant et, de ce fait, se comporte comme une source triphasée de courants alternatifs (éventuellement supposés sinusoïdaux). Pour raison de démonstration de principe de fonctionnement on utilise une charge résistive triphasé équilibré.

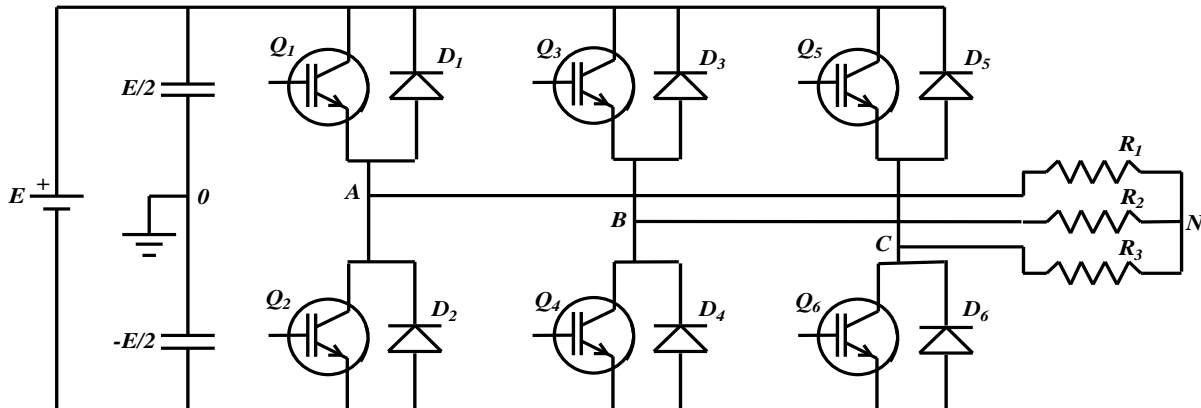


Figure 1.7: Onduleur triphasé de tension à deux niveaux en pont.

Trois transistors sont en conduction à chaque instant. Deux transistors d'un même bras (Q_1 et Q_2 par exemple) sont amorcés à 180° de décalage. Les transistors du bras voisin sont amorcés à 120° de décalage. Cette stratégie de commande s'appelle commande en plein onde 180° . Les allures de tension sont montrées sur la Figure 1.8.

Comme la tension composée a été obtenue avec un angle de phase de 120° , alors ni la troisième harmonique ni ses multiples ne sont mesurés dans ces tensions. C'est une caractéristique importante pour les systèmes triphasés, car le déplacement de l'angle de phase naturel entre les phases permet d'éliminer les harmoniques.

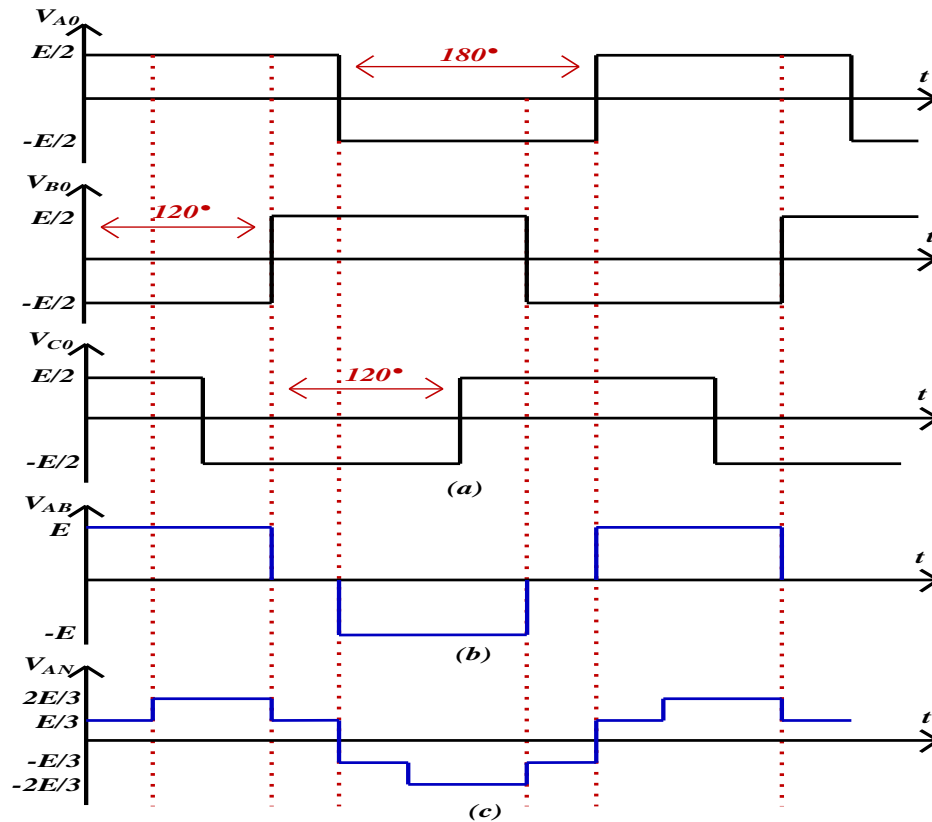


Figure 1.8: Allure des tensions simple et composé pour l'onduleur triphasé à deux niveaux en Pont (charge résistive).

On peut voir à partir de la Figure 1.8 qu'il existe six modes de fonctionnement. Ces modes sont mis en évidence à la Figure 1.9 (a),(f). En plus de ces six modes de fonctionnement, il existe deux autres modes de fonctionnement qui appliquent une tension nulle aux charges. Ce sont les configurations à roue libre présentées dans la Figure 1.9 (g) et Figure 1.9 (h), où trois interrupteurs inférieurs ou supérieurs sont actionnés en même temps.

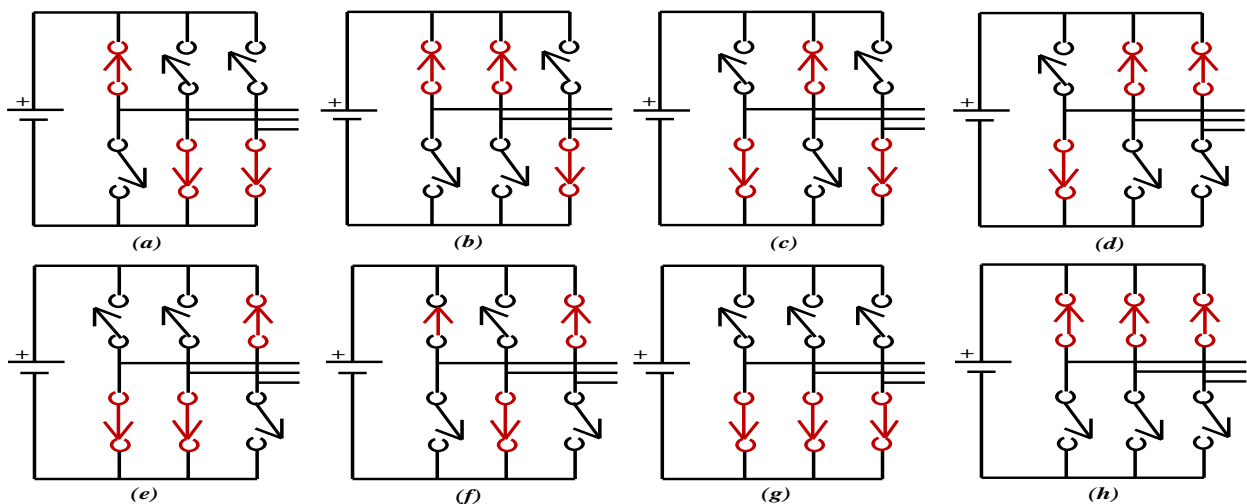


Figure 1.9: Modes de fonctionnement de l'onduleur triphasé à deux niveaux en pont.

1.5 Modulation de l'onduleur triphasé à deux niveaux

1.5.1 Modulation de l'onduleur triphasé de tension à deux niveaux

La Figure 1.10 représente un onduleur triphasé de tension à deux niveaux. Pour avoir une somme des courants nulle, aucune liaison ne doit être met entre le point neutre N de la charge et le point milieu 0 du diviseur capacitif.

Il existe une autre configuration ou le neutre relié à la source est nécessaire pour pouvoir monter des charges monophasées entre phase et neutre ou de pouvoir imposer des références indépendantes aux trois tensions ou aux trois courants de sortie. [6]

Quels que soient les courants, les interrupteurs imposent les tensions entre les bornes de sortie A, B, C et le point milieu fictif 0 de la source de tension continue :

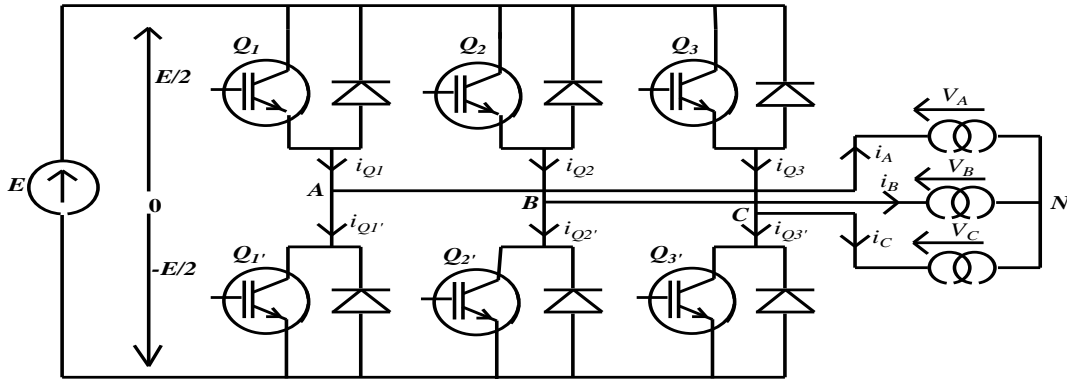


Figure 1.10: Onduleur triphasé de tension à deux niveaux en pont.

$$V_{A0} = V_A - V_0 = \begin{cases} +\frac{E}{2} \text{ quand } Q_1 \text{ Fermé} \\ -\frac{E}{2} \text{ quand } Q_1 \text{ ouvert} \end{cases} \quad (1.1)$$

$$V_{B0} = V_B - V_0 = \begin{cases} +\frac{E}{2} \text{ quand } Q_2 \text{ Fermé} \\ -\frac{E}{2} \text{ quand } Q_2 \text{ ouvert} \end{cases} \quad (1.2)$$

$$V_{C0} = V_C - V_0 = \begin{cases} +\frac{E}{2} \text{ quand } Q_3 \text{ Fermé} \\ -\frac{E}{2} \text{ quand } Q_3 \text{ ouvert} \end{cases} \quad (1.3)$$

Les interrupteurs imposent donc les tensions composées à la sortie de l'onduleur :

$$V_{AB} = V_A - V_B = (V_A - V_0) - (V_B - V_0) = \begin{cases} E \text{ si } Q_1 \text{ fermé et } Q_2 \text{ Ouvert} \\ 0 \text{ si } Q_1 \text{ et } Q_2 \text{ fermé} \\ -E \text{ si } Q_1 \text{ Ouvert et } Q_2 \text{ fermé} \\ 0 \text{ si } Q_1 \text{ et } Q_2 \text{ Ouvert} \end{cases}$$

Le même chose pour les tensions composées V_{BC} et V_{CA}

Quelle que soit leur forme d'onde les trois courants i_A , i_B et i_C somme nulle, il faut donc que les trois fondamentaux aient une somme nulle et qu'il en soit de même pour les divers harmoniques. Puisque le récepteur est équilibré, ses trois phases présentent la même impédance pour le fondamental ainsi que pour les divers harmoniques. Par conséquent les tensions, ont une somme nulle pour les fondamentaux ainsi que pour les systèmes harmoniques successifs. En ajoutant toutes ces sommes nulles on obtient la somme nulle des trois tensions. [6]

$$i_A + i_B + i_C = 0 \text{ Implique } V_{AN} + V_{BN} + V_{CN} = 0$$

On peut donc écrire :

$$(V_{A0} + V_{0N}) + (V_{B0} + V_{0N}) + (V_{C0} + V_{0N}) = 0 \quad (1.4)$$

En arrangeant l'équation (1.4):

$$V_{N0} = \frac{1}{3}(V_{A0} + V_{B0} + V_{C0}) \quad (1.5)$$

On peut aussi écrire les tensions entre les points A, B et C et le point 0 fictif :

$$\begin{cases} V_{A0} = V_{AN} + V_{N0} \\ V_{B0} = V_{BN} + V_{N0} \\ V_{C0} = V_{CN} + V_{N0} \end{cases} \quad (1.6)$$

En substituant (1.5) dans (1.6) et en simplifiant :

$$\begin{cases} V_{AN} = \frac{2}{3}V_{A0} - \frac{1}{3}V_{B0} - \frac{1}{3}V_{C0} \\ V_{BN} = -\frac{1}{3}V_{A0} + \frac{2}{3}V_{B0} - \frac{1}{3}V_{C0} \\ V_{CN} = -\frac{1}{3}V_{A0} - \frac{1}{3}V_{B0} + \frac{2}{3}V_{C0} \end{cases} \quad (1.7)$$

Sachant que les tensions entre les point A, B, et C et le point 0 peuvent être représentés par rapport au états de commutation

$$\begin{cases} V_{A0} = Q_1 \cdot E \\ V_{B0} = Q_2 \cdot E \\ V_{C0} = Q_3 \cdot E \end{cases} \quad (1.8)$$

En substituent (1.8) sur (1.7)

$$\begin{cases} V_{AN} = E\left(\frac{2}{3}Q_1 - \frac{1}{3}Q_2 - \frac{1}{3}Q_3\right) \\ V_{BN} = E\left(-\frac{1}{3}Q_1 + \frac{2}{3}Q_2 - \frac{1}{3}Q_3\right) \\ V_{CN} = E\left(-\frac{1}{3}Q_1 - \frac{1}{3}Q_2 + \frac{2}{3}Q_3\right) \end{cases} \quad (1.9)$$

En forme de matrice

$$\begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

On peut déduire le courant i côté continu des courants i_A , i_B , et i_C :

$$i = i_{Q1} + i_{Q2} + i_{Q3} \quad (1.11)$$

$$\begin{cases} i_{Q1} = i_A \text{ quand } Q_1 \text{ conduit} \\ i_{Q2} = i_B \text{ quand } Q_2 \text{ conduit} \\ i_{Q3} = i_C \text{ quand } Q_3 \text{ conduit} \end{cases} \quad (1.12)$$

Le Tableau 1.2 résume les huit configurations possibles de l'onduleur de tension à deux niveaux.

N	Q ₁	Q ₂	Q ₃	V _{AB}	V _{BC}	V _{CA}	V _{AN}	V _{BN}	V _{CN}	i _{Q1}	i _{Q2}	i _{Q3}	i
1	F	F	F	0	0	0	0	0	0	i _A	i _B	i _C	0
2	F	0	F	E	-E	0	E/3	-2E/3	E/3	i _A	0	i _C	-i _B
3	F	F	0	0	E	-E	E/3	E/3	-2E/3	i _A	i _B	0	-i _C
4	F	0	0	E	0	-E	2E/3	-E/3	-E/3	i _A	0	0	i _A
5	0	F	F	-E	0	U	-2E/3	E/3	E/3	0	i _B	i _C	-i _A
6	0	0	F	0	-E	E	-E/3	-E/3	2E/3	0	0	i _C	i _C
7	0	F	0	-E	E	0	-E/3	2E/3	-E/3	0	i _B	0	i _B
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 1.2: Fonctionnement de l'onduleur triphasé de tension à deux niveaux.

1.5.2 Modulation de l'onduleur triphasé à deux niveaux de courant

Un onduleur triphasé à deux niveaux de courant est alimenté par une source de courant continu. Il doit débiter sur un récepteur de tension alternative pour que la règle d'alternance des sources soit respectée.

La Figure 1.11 donne le schéma de l'onduleur triphasé à deux niveaux en pont. Les interrupteurs doivent être des interrupteurs trois segments réversibles en tension, commendable à la fermeture et à l'ouverture (GTO, Reverse Blocking IGBT, ou un transistor avec une diode en série). [6]

Pour que la source de courant ne soit jamais en circuit ouvert, il faut que l'un au moins des interrupteurs de chacun des groupes Q_1, Q_2, Q_3 et $Q_{1'}, Q_{2'}, Q_{3'}$ soit fermé. Pour que deux bornes A, B ou C du récepteur de tension ne soient pas mises en court-circuit, il faut qu'un seul interrupteur de chaque groupe soit fermé.

Les interrupteurs Q_1, Q_2, Q_3 et $Q_{1'}, Q_{2'}, Q_{3'}$, forment 2 cellules de commutation triphasées. Il n'y aura à chaque instant que 2 interrupteurs fermés sur 6, ce qui constitue une différence essentielle avec l'onduleur triphasé à deux niveaux de tension.

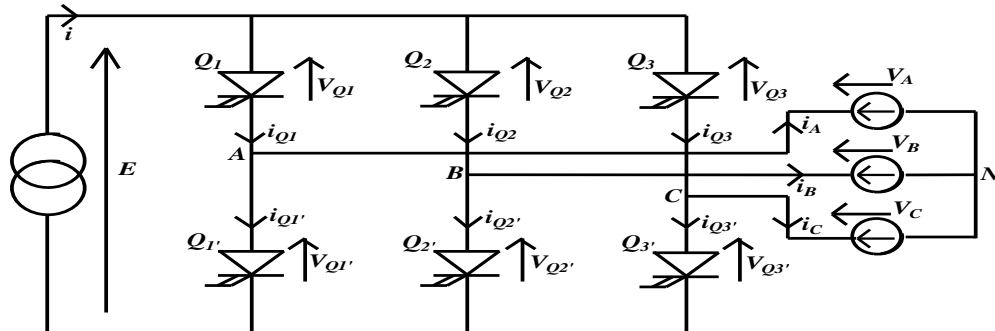


Figure 1.11: Onduleur triphasé à deux niveaux de courant.

Puisque chaque cellule de commutation peut prendre trois états, l'onduleur présente neuf configurations possibles. Pour chacune d'elles il suffit d'indiquer les deux interrupteurs fermés, les autres étant ouverts.

Le Tableau 1.3 résume tous les états de fonctionnement de l'onduleur triphasé à deux niveaux de courant

Interrupteur fermé		i_A	i_B	i_C	V_{Q1}	V_{Q2}	V_{Q3}	$V_{Q1'}$	$V_{Q2'}$	$V_{Q3'}$	E
Q_1	$Q_{1'}$	0	0	0	0	V_{AB}	V_{AC}	0	V_{BA}	V_{CA}	0
Q_1	$Q_{2'}$	i	-i	0	0	V_{AB}	V_{AC}	V_{AB}	0	V_{CB}	V_{AB}
Q_1	$Q_{3'}$	i	0	-i	0	V_{AB}	V_{AC}	V_{AC}	V_{BC}	0	V_{AC}
Q_2	$Q_{1'}$	-i	i	0	V_{BA}	0	V_{BC}	0	V_{BA}	V_{CA}	V_{BA}
Q_2	$Q_{2'}$	0	0	0	V_{BA}	0	V_{BC}	V_{AB}	0	V_{CB}	0
Q_2	$Q_{3'}$	0	i	-i	V_{BA}	0	V_{BC}	V_{AC}	V_{BC}	0	V_{BC}
Q_3	$Q_{1'}$	-i	0	i	V_{CA}	V_{CB}	0	0	V_{BA}	V_{CA}	V_{CA}
Q_3	$Q_{2'}$	0	-i	i	V_{CA}	V_{CB}	0	V_{AB}	0	V_{CB}	V_{CB}
Q_3	$Q_{3'}$	0	0	0	V_{CA}	V_{CB}	0	V_{AC}	V_{BC}	0	0

Tableau 1.3: Fonctionnement de l'onduleur triphasé à deux niveaux de courant.

1.6 Les applications des onduleurs

Parmi les nombreux domaines d'emploi des onduleurs autonomes, on trouve principalement Les onduleurs à fréquence fixe a commutation forcée : Alimentés le plus souvent par une batterie d'accumulateur, ils jouent d'ordinaire le rôle d'alimentation de sécurité. [7][8]

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

1.6.1 Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone

La vitesse d'un moteur synchrone est fixée par la pulsation des courants statiques. Pour changer de vitesse il faut donc changer la fréquence des tensions d'alimentation. il faut donc redresser la tension du réseau puis l'onduleur à la fréquence désirée.[5]

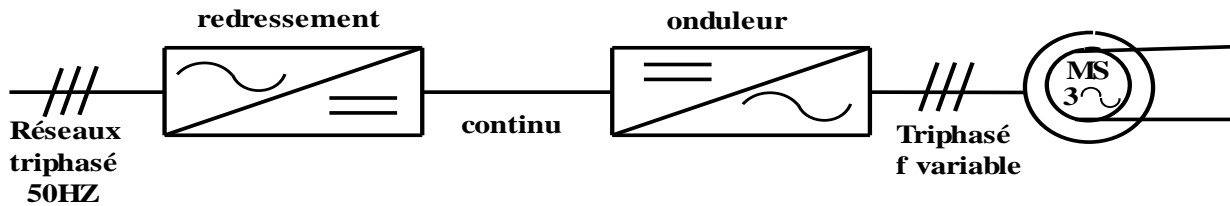


Figure 1.12: Principe de réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone.

Remarque :

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

1.6.2 Alimentation de secours

Lors d'une panne d'électricité, un onduleur assure la continuité de l'alimentation des machines à partir de batteries. En informatique professionnelle, un onduleur est indispensable pour éviter la perte d'informations en cas de panne du secteur. [5]

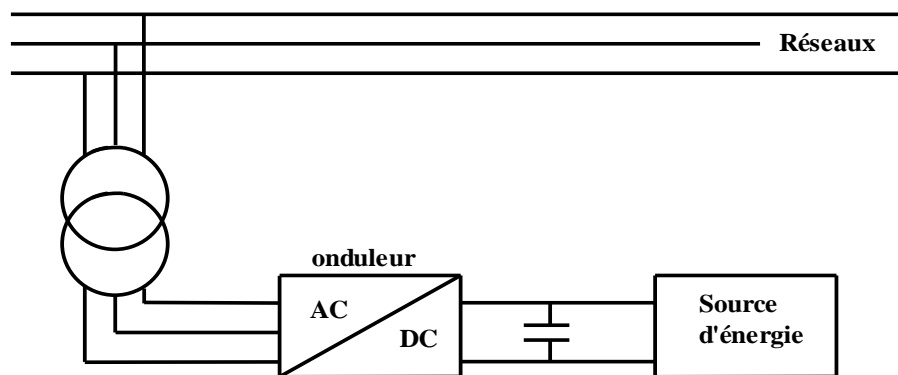


Figure 1.13: Alimentation de secours.

1.6.3 Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes

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

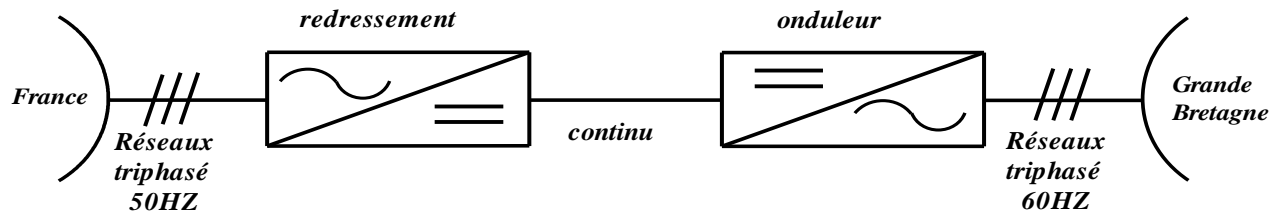


Figure 1.14: Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes.

1.6.4 Les alimentations sans interruption (ASI)

Certaines applications sensibles (secteur pétrolier, hôpitaux, serveurs informatiques...) ne peuvent supporter la moindre panne d'alimentation.

Pour réaliser une alimentation sécurisée, on a la même structure que précédemment avec des batteries sur le bus continu 'ce qui permet de continuer à fournir de l'énergie et donc une tension sinusoïdale le temps qu'un groupe électrogène prenne le relais. (R_q : onduleurs plus souvent en monophasé)

En pratique 'les onduleurs actuels (pour ASI ou variateurs) sont pilotés par des algorithmes très compliqués (contrôle vectoriel de flux) et surtout comporte des fonctionnalités annexes 'support de plusieurs protocoles de communication, pilotage par PC déporté, paramétrage différent suivant la charge ...

R_q : l'onduleur seul peut fonctionner dans les quatre quadrants (à condition de mettre en anti parallèle des diodes sur les transistors), mais souvent le bus continu est alimenté par un pont redresseur triphasé à diode qui lui n'est pas réversible en courant. [9]

1.6.5 La protection des équipements

Les onduleurs protègent des différents équipements dans différents domaines contre les perturbations.

1.6.6 Les installations photovoltaïques

Le raccordement entre les panneaux photovoltaïques et le réseau se fait à travers les onduleurs aussi ils permettent d'adapter l'énergie délivrée du panneau et l'énergie injectée au réseau.

1.7 Analyse harmonique de la tension de sortie de l'onduleur

1.7.1 Origine des harmoniques

Les harmoniques sont générées par des charges non linéaires absorbant un courant non sinusoïdal. Actuellement, les équipements à base de thyristors constituent la principale source de ces harmoniques. Ces appareils, dont les caractéristiques électriques varient avec la valeur de la tension, sont assimilables à des générateurs de courants harmoniques : appareils d'éclairage fluorescent, variateurs de vitesse, redresseurs, téléviseurs, ordinateurs, etc.[10]

1.7.2 Mode de représentation ; le spectre en fréquence

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

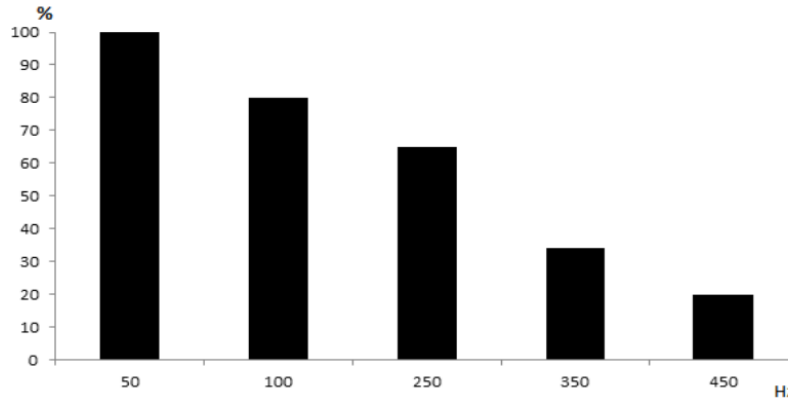


Figure 1.15: Spectre d'harmonique d'un signal électrique donné.

1.7.3 Les harmoniques mesurés en pratique

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

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

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

1.7.4 Caractérisation des perturbations harmoniques

Différentes grandeurs sont définies pour caractériser la distortion en régime déformé. Le taux global de distortion harmonique (THD) et le facteur de puissance sont les plus employés pour quantifier respectivement les perturbations harmoniques et la consommation de puissance réactive.[10]

- Le taux de distortion harmoniques.

Notre étude se limite au cas où la source de courant est sinusoidale et où la tension absorbée par la charge est entachée de composantes harmoniques. Dans ces conditions, le taux global de distortion harmonique est bien adapté pour quantifier le degré de pollution harmonique sur les réseaux électriques. Le THD s'exprime par rapport à la fréquence fondamentale et caractérise l'influence des harmoniques sur l'onde de tension déformée. Il est donné par l'expression suivante :

$$THD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n V_i^2}}{V_1} \quad (1.13)$$

Avec V_1 la valeur efficace du tension fondamental et V_i les valeurs efficaces des différentes harmoniques du tension Le domaine des fréquences qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre 100 et 2000 Hz. Soit de l'harmonique de rang 2 jusqu'à l'harmonique de rang 40. Il est à signaler aussi que l'amplitude des harmoniques décroît généralement avec la fréquence. [8]

- la serie de fourier est done par :

$$S(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(nwt) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(nwt) \quad (1.14)$$

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T S(t) dt \quad (1.15)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T S(t) \cos(nwt) dt = \frac{2}{2\pi} \int_0^{2\pi} S(\theta) \cos(n\theta) d\theta \quad (1.16)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T S(t) \sin(nwt) dt = \frac{2}{2\pi} \int_0^{2\pi} S(\theta) \sin(n\theta) d\theta \quad (1.17)$$

1.8 Techniques de commande de l'onduleur de tension triphasé

1.8.1 Commande 180°(plein onde)

Dans les variateurs de vitesse, l'onduleur de tension fonctionne presque toujours en MLI dans toute la plage des vitesses. L'onduleur fait varier non seulement la fréquence des tensions de sortie mais aussi leur valeur. Toutefois, il faut d'abord examiner le cas où l'onduleur est commandé en pleine onde, car ce fonctionnement sert de point de départ et de base de comparaison pour l'étude de fonctionnement en MLI.

Nous concéderons une charge triphasée équilibrée, et pour simplifier l'étude nous supposons que le couplage en étoile (bien que le branchement d'une charge triangle soit envisageable).

Pour cette structure, plusieurs types de commande sont possible, on a fait les études pour la commande 180°, c'est la commande la plus utilisée.

Les interrupteurs sont commandés pendant une durée correspondant à une demi période, mais avec des séquences décalées de 120° d'un bras par rapport aux autres D'où :

- A tout instant deux interrupteurs sont en état de conduire et les quatre autres sont bloqués
- Deux interrupteurs d'un même bras doivent être commandé de façon complémentaires afin de ne pas court-circuité la source de tension. On obtient donc six séquences de conduction par période.

1.8.1.1 Principe de fonctionnement

Dans ce type de commande, la génération des signaux de commande de l'onduleur est effectuée en transformant un signal sinusoïdal en un signal carré pour chaque phase selon l'algorithme suivant:

Si $\sin(\omega.t) > 0$ donc : $S(t)=1$
Si $\sin(\omega.t) < 0$ donc : $S(t)=0$
Où :

$\sin(\omega.t)$: est le signal sinusoïdal ; $S(t)$: est le signal carré résultant de la commande.

1.8.2 Commande MLI

1.8.2.1 Commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Les tensions obtenues aux bornes du récepteur (la charge) pour les onduleurs triphasés conventionnels présentent plusieurs harmoniques, il est donc nécessaire de chercher à se rapprocher d'une forme d'onde sinusoïdale. Pour ce la on fait appel à la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI). Dans ce contexte, nous savons bien qu'avec la possibilité d'avoir des transistors de puissance à un coût moindre il est devenu possible d'utiliser la technique MLI pour améliorer la forme d'onde du courant du moteur, et par la conséquence, la minimisation des harmoniques provoquant l'échauffement de la machine et les ondulations du couple. En fait l'onduleur de tension à MLI est toujours choisi pour avoir une réponse rapide et des performances élevées. Dans ce type d'onduleur, la tension redressée alimentant l'onduleur peut être fixée par l'utilisation d'un redresseur à diodes. Dans ce cas, la tension et la fréquence de sortie sont contrôlées par l'onduleur en utilisant la technique MLI. Elle consiste à adopter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie, et à former chaque alternance de la tension de sortie d'une succession de créneaux de largeurs convenables.[5] La manipulation de nombre des impulsions formant chacune des alternances d'une tension de sortie d'un onduleur à MLI présente deux avantages importantes à s'avoir:

- Repousser vers des fréquences élevées les harmoniques d'ordres inférieurs de la tension de sortie, ce que facilite le filtrage au niveau de la charge.
- Elle permet de faire varier la valeur fondamentale de la tension désirée. En effet, les deux stratégies de modulation les plus utilisées en boucle ouverte pour un onduleur de tension triphasé sont la modulation sinusoïdale et la modulation vectorielle .

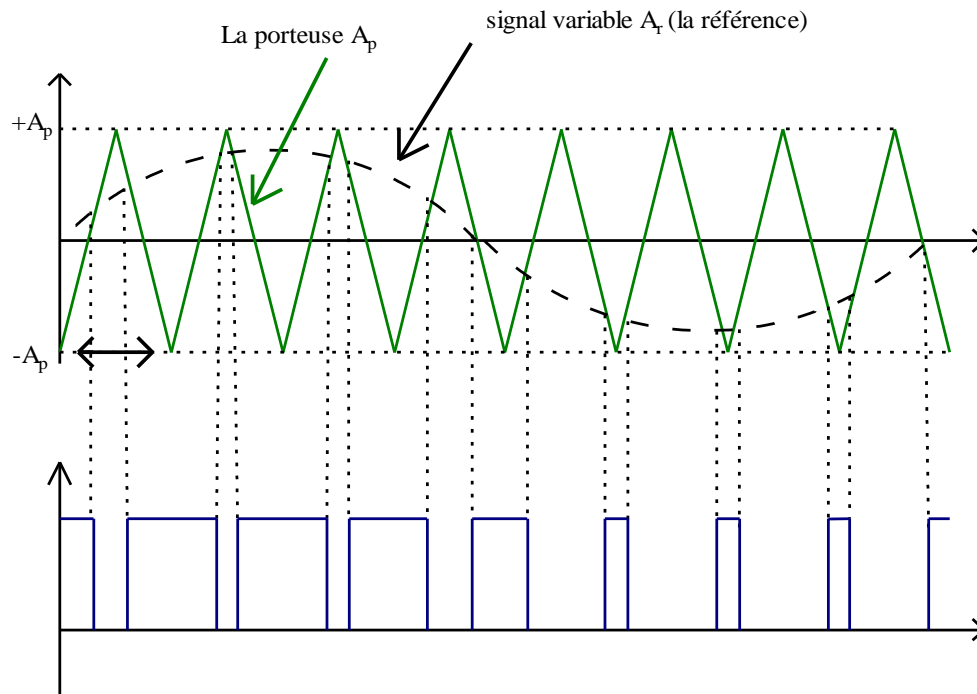


Figure 1.16: Principe de la modulation.

1.8.2.2 Principe de base de MLI

Le principe de base de la modulation de largeur d'impulsion est basé sur le découpage d'une pleine onde rectangulaire. Ainsi la tension de sortie de l'onduleur est formée par une succession de créneaux d'amplitude égale à la tension d'alimentation (continue) et de largeur variable. La technique la plus répandue pour la reproduction d'un signal MLI est de comparer un signal triangulaire appelé porteuse de haute fréquence à un signal de référence appelé modulatrice et qui constitue l'image du signal de sortie de l'onduleur, figure (1.17).[11]

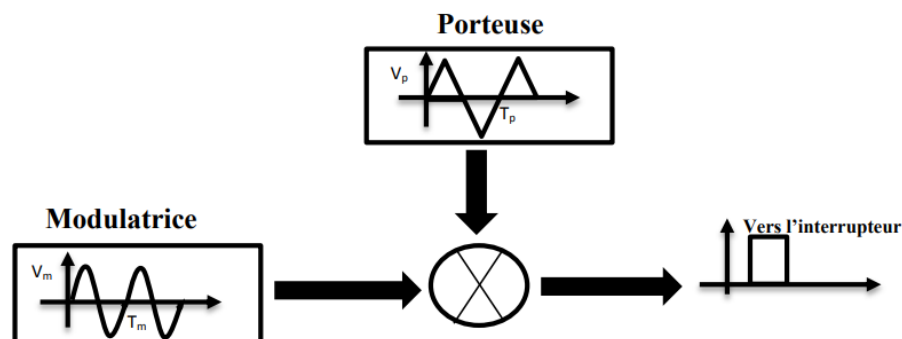


Figure 1.17: Schéma synoptique de la M.L.I.

1.8.2.3 Caractéristiques de la modulation

La technique de la MLI se caractérise par deux grandeurs :

- **Le coefficient de réglage**

qui est défini comme étant le rapport de l'amplitude de l'onde modulante à celle de l'onde porteuse. Il permet de déterminer l'amplitude du fondamental de l'onde de modulation de largeur d'impulsion :

$$r = \frac{A_r}{A_p}$$

A_r : Amplitude de la référence , A_p : Amplitude de la porteuse

- **L'indice de modulation**

Il est défini comme étant le rapport de la fréquence de l'onde porteuse à celle de l'onde modulante. [11]

$$m = \frac{f_p}{f_r}$$

f_p : La fréquence de modulation .

f_r : La fréquence de la référence .

La modulation montre que plus(m) est grand et plus la neutralisation des harmoniques est efficace, d'autre part on cherche à obtenir une valeur de (r) la plus élevée possible.[12]

- ✓ La modulation est dite synchrone si (m) est un nombre entier cela conduit à une tension de sortie(U') qui se reproduit identiquement à elle-même tout les $T = \frac{1}{f}$
- ✓ Dans certains cas la modulation est asynchrone, notamment quand à fréquence de modulation f_p , donnée, on fait varier de façon continue la fréquence de la référence.
- ✓ Pour le choix de (m) , on doit tenir compte des pertes supplémentaires pendant les commutations d'un état à l'autre Ces pertes croissent lorsque la fréquence de modulation augmente. [12]
- ✓ On ne pourra jamais fonctionner avec un rapport de réglage égal à "1", car il faut toujours laisser une durée suffisante aux intervalles de conduction et de blocage des interrupteurs d'un même bras .[12]
- ✓ Le schéma synoptique de la commande par modulation triangulaire- sinusiodale triphasé est donnée par la Figure 1.18

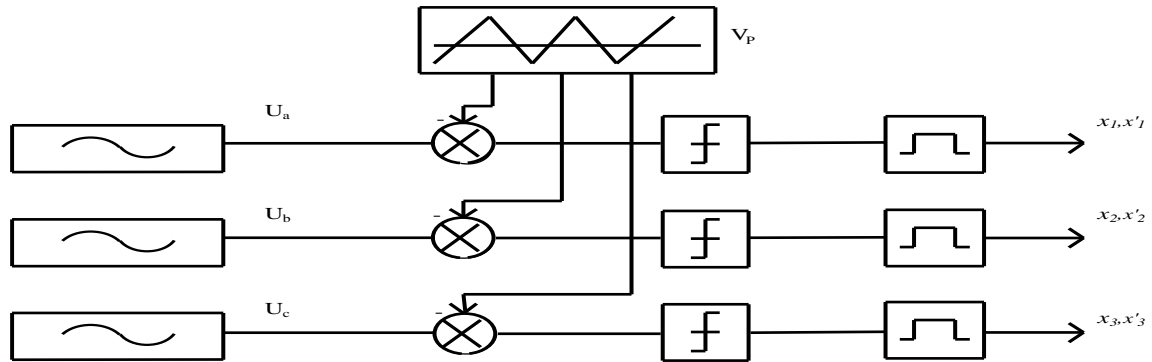


Figure 1.18: Schéma synoptique de la commande en MLI-ST (triphasé).

Un générateur d'onde délivre l'onde triangulaire aux trois phases (porteuse commune), par contre la référence est propre à chaque phase, les trois références étant déphasées de (120°) .

1.8.2.4 Types de Modulation

Il existe deux types de modulation :

- ✓ Modulation naturelle.
- ✓ Modulation régulière.

1.8.2.4.1 Modulation naturelle

Cette technique utilise le principe général de la commande MLI qui consiste à comparer directement le signal de la porteuse avec celui de la référence.

Il est important de noter que la largeur d'impulsion est proportionnelle à l'amplitude du signal modulé à l'instant ou le basculement à lieu, car ce basculement correspond à des intersections des deux ondes (porteuse et modulatrice) instantanées. Ceci a deux conséquences importantes :

- Les centres des impulsions dans le signal MLI résultant ne sont pas équidistants.
- Il n'est pas possible de définir les largeurs d'impulsions en utilisant des expressions analytiques. [13]

1.8.2.4.2 Modulation Régulière

Les techniques MLI à échantillonnage régulier dérivent de la technique triangulo-sinusoidale. elle consiste donc à comparer une porteuse triangulaire à une version discrétisée de la référence. On distingue :

- ✓ Technique à échantillonnage régulier symétrique.
- ✓ Technique à échantillonnage régulier asymétrique.
- ✓ Technique à échantillonnage régulier modifier.

1.8.2.5 Technique de production d'onde MLI

Plusieurs techniques d'obtention d'onde MLI sont utilisées pour générer le signal de contrôle nécessaire à la commande et au blocage des éléments semi-conducteurs par exemple :

Impulsions de commande pour thyristors et courant de base pour les transistors. Le plus souvent, on fait appel à la technique analogique, numérique ou en utilisant les deux au même temps.

1.8.2.5.1 Technique analogique

Cette technique est basée sur la comparaison entre une porteuse triangulaire et la référence, la comparaison est réalisée à l'aide d'un amplificateur opérationnel.

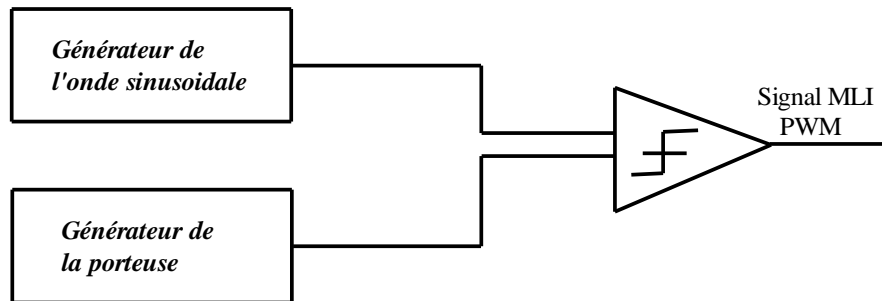


Figure 1.19: Technique analogique.

1.8.2.5.2 Technique numérique

Elle est basé sur l'utilisation des microprocesseurs qui assurent la génération des impulsions en se servant d'un programme définissant les angles d'amplitudes calculés au préalable. Cette technique a apporté une grande amélioration significative en matière de simplicité et performance du circuit de commande.

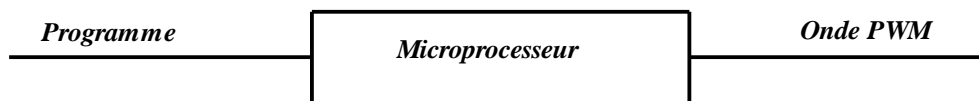


Figure 1.20: Technique numérique.

1.8.2.5.3 Technique hybride

Elle consiste à combiner les deux techniques précédentes analogique et numérique : L'onde de référence est obtenue d'une manière numérique (programmer sa fonction), par Contre l'onde porteuse est obtenue d'une manière analogique, La comparaison entre les deux signaux se fait par un comparateur analogique.

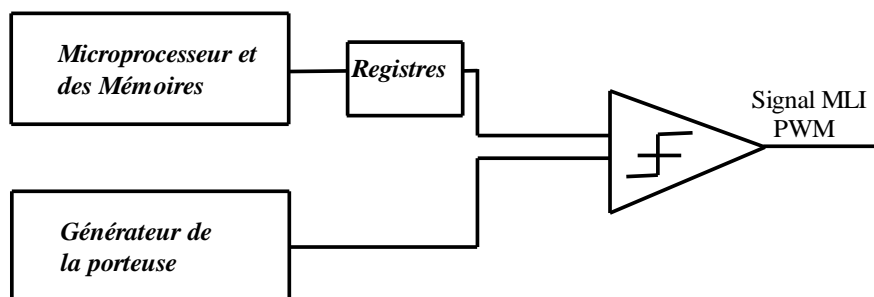


Figure 1.21: Technique hybride.

1.8.2.6 Différentes techniques de modulation de longueur d'impulsions

Plusieurs techniques de modulations ont été adoptées afin d'améliorer la qualité de la tension à la sortie de l'onduleur, parmi lesquelles on peut citer :

1.8.2.6.1 La modulation linéaire multiple

Dans cette technique on compare une porteuse triangulaire avec un signal de référence linéaire. L'onde de sortie est sous la forme d'un train d'impulsion en créneaux de largeurs égales (Figure 1.22). Si l'indice de modulation est égal à un, on obtient la modulation singulière, dans laquelle le signal de sortie est formé d'une seule impulsion par demi-période. [14]

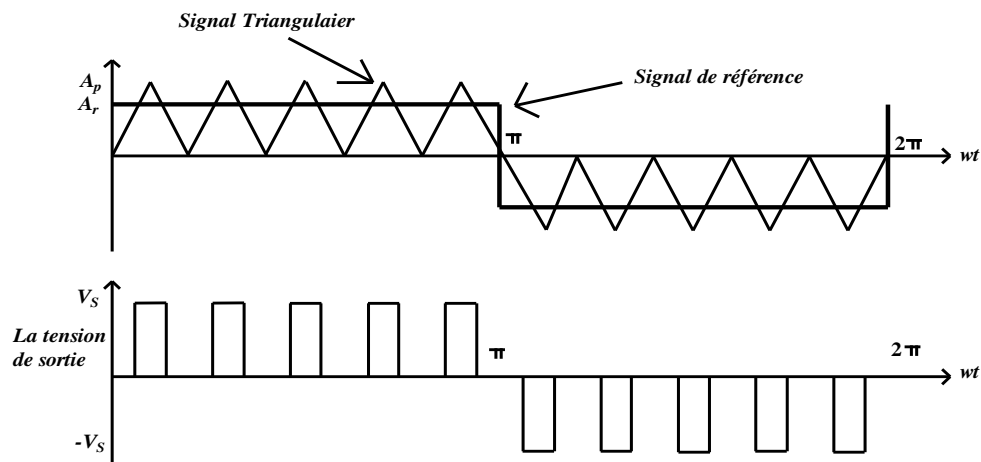


Figure 1.22: La modulation de largeur d'impulsions multiples.

1.8.2.6.2 La modulation sinusoïdale triangulaire unipolaire

Dans ce cas, le signal de référence est sinusoïdal, on obtient à la sortie de l'onduleur une onde formée d'un train d'impulsion de largeur variable (figure.1.23). Les instants de commutations sont déterminés par des points d'intersection entre la porteuse et la modulante.

La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse [15]. Ce type de MLI est la plus utilisée dans les applications industrielles, car elle s'est avérée la plus efficace pour la neutralisation des harmoniques.

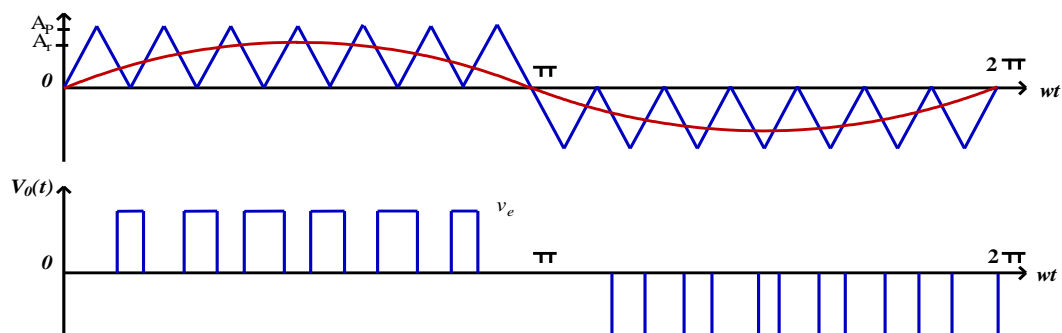


Figure 1.23: MLI sinusoïdal triangulaire unipolaire.

1.8.2.6.3 La modulation sinusoïdale partielle (ou modifiée)

Le signal de référence est toujours sinusoïdal, sauf que dans cette technique la porteuse n'est pas appliquée au milieu des alternances de la sinusoïde (Figure 1.24).

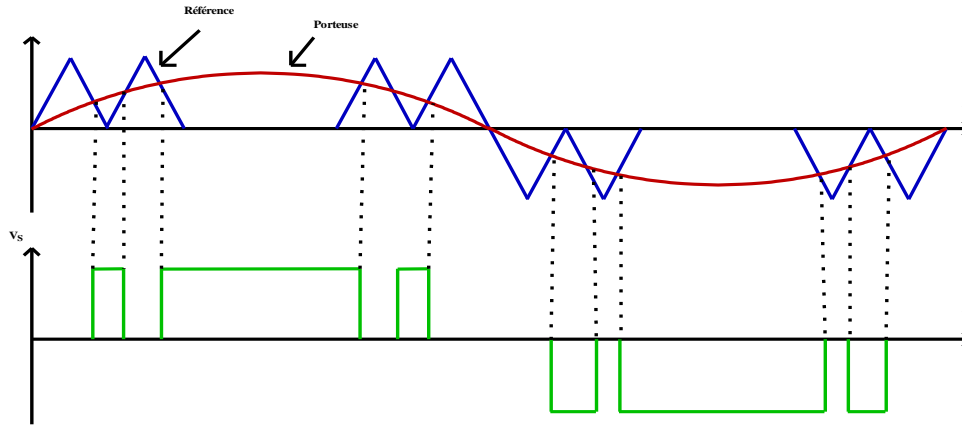


Figure 1.24: La modulation sinusoïdale modifiée.

1.8.2.6.4 La modulation sinusoïdale avec porteuse bidirectionnelle

Le principe de cette technique est le même que celui de la modulation sinusoïdale, sauf que la porteuse triangulaire est bidirectionnelle (bipolaire) (Figure.1.25).

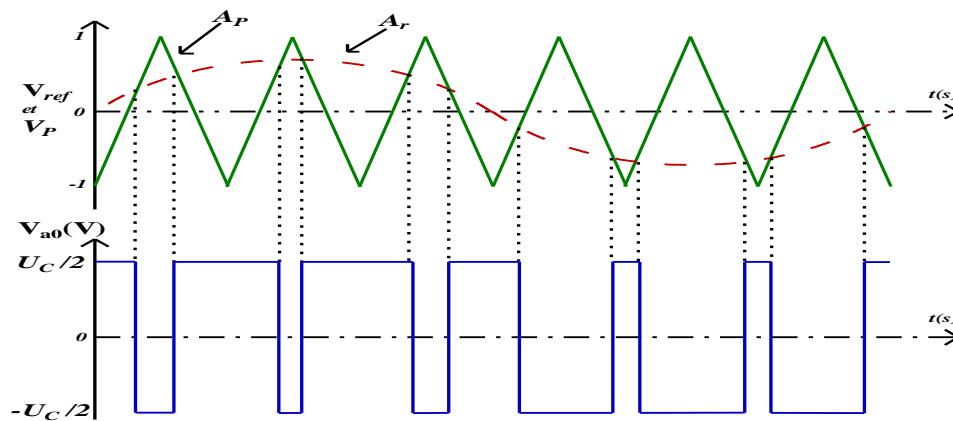


Figure 1.25: La modulation sinusoïdale avec porteuse bidirectionnelle.

○ Signaux de référence

Ce sont des signaux sinusoïdaux déphasés entre eux de 120° et sont caractérisés par l'amplitude A_r et sa fréquence f .

$$\begin{aligned}
 V_{ref a} &= A_r \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t) \\
 V_{ref b} &= A_r \cdot \sin\left(2\pi \cdot f \cdot t - \frac{2\pi}{3}\right) \\
 V_{ref c} &= A_r \cdot \sin\left(2\pi \cdot f \cdot t - \frac{4\pi}{3}\right)
 \end{aligned}
 \tag{1.18}$$

○ la porteuse

La porteuse triangulaire caractérisée par l'amplitude A_p et la fréquence f_p (figure 1.25) est calculée par :

$$V_p(t) = \begin{cases} V_p (4. f_p. t - 1) & \text{si } 0 \leq t \leq \frac{T_p}{2} \\ V_p(-4. f_p. t + 3) & \text{si } \frac{T_p}{2} \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (1.19)$$

Avec : $f_p = \frac{1}{T_p}$

Les intersections entre les tensions de références et la porteuse donnent les instants d'ouverture et de fermeture des interrupteurs.

1.8.3 La Modulation vectorielle

1.8.3.1 Le principe de la modulation vectorielle

La MLI vectorielle est la méthode récemment la mieux adaptée au contrôle des moteurs asynchrones.

Contrairement à d'autres méthodes, la MLI vectorielle ne s'appuie pas sur des calculs séparés des modulations pour chacun des bras de l'onduleur.

Cette technique de MLI suit les principes suivants.[14]

- ✓ Un vecteur tension de contrôle \vec{V}_{ref} est calculé globalement est approximé sur une période de modulation « T_m » par un vecteur tension moyen.
- ✓ Pour chaque phase réalisation d'une impulsion de largeur T centrée sur la période dont la valeur moyenne est égale à la tension de référence à l'instant d'échantillonnage.
- ✓ Tous les interrupteurs d'un même demi-pont ont un état identique au centre et aux deux extrémités de la période.

1.8.3.2 La transformation de Clarke

Pour simplifier les calculs dans la modulation vectorielle on utilise la transformation de Clarke [16], cette dernière nous permet de remplacer le système triphasé de trois tensions U'_a, U'_b, U'_c de somme nulle par un système diphasé respectant le transfert de puissance.

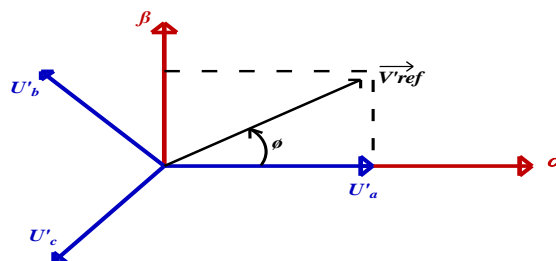


Figure 1.26: transformation de clarcke.

$$\begin{bmatrix} V'_\alpha \\ V'_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U'_a \\ U'_b \\ U'_c \end{bmatrix} \tag{1.20}$$

1.8.3.3 Les configurations possibles

Si on considère les composantes V'_α et V'_β comme les projections sur deux axes perpendiculaires d'un vecteur \vec{V}_{ref} , ce vecteur à lui tout seul suffit à caractériser le système triphasé (Figure 1.27). [13][17]

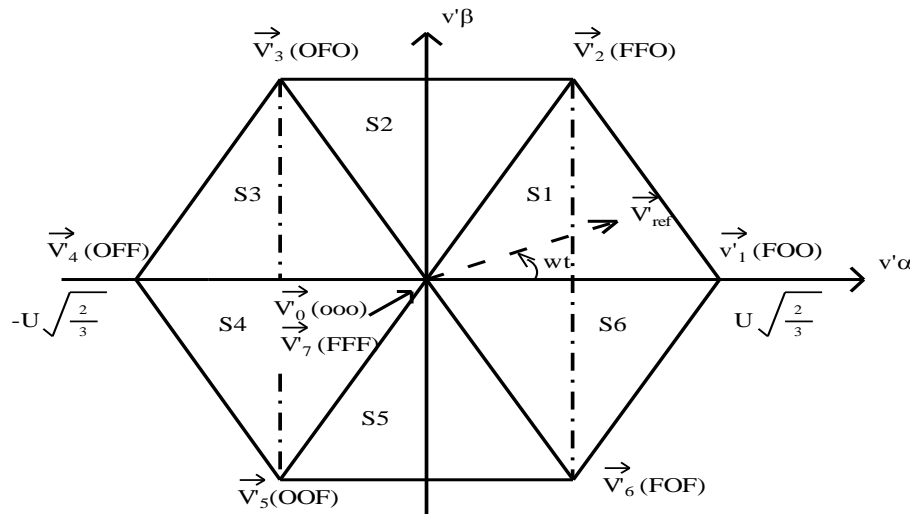


Figure 1.27: Représentation du polygone de commutation.

Les états fermé ou ouvert des interrupteurs Q_1, Q_2, Q_3 (les interrupteurs $Q_{1'}, Q_{2'}, Q_{3'}$ sont complémentaire) donnent à l'onduleur triphasé (figure 1.10). Huit configurations possibles (figure 1.10), six non nulles indiquées par $\vec{V}'_1, \vec{V}'_2, \vec{V}'_3, \vec{V}'_4, \vec{V}'_5, \vec{V}'_6$, et deux vecteurs nuls \vec{V}'_0, \vec{V}'_7 , (à côté de chaque vecteur on a indiqué l'état fermé (F) ou ouvert (O) des trois interrupteurs (Q_1, Q_2, Q_3)).

Les six vecteurs ont le même module égale à $\sqrt{2/3} U$, les extrémités de ces six vecteurs définissent les sommets d'un hexagone régulier (figure.1.10), puisque deux vecteurs font entre eux un angle

$$\alpha = \frac{\pi}{3}.$$

Les six vecteurs non nuls, délimitent six secteurs (secteur = le plan fermé entre deux vecteurs adjacents). Les Configurations possibles qui peuvent prendre les interrupteurs Q_1, Q_2, Q_3 ainsi que les valeurs des tensions V'_a, V'_b, V'_c leurs composantes de Clarke et l'indice du vecteur \vec{V}' représentatif de cet état sont indiqués dans le tableau.1.4

Tableau 1.4: Composantes de Clarke des tensions de sortie.

Q_1	Q_2	Q_3	V'_a	V'_b	V'_c	V'_α	V'_β	\vec{V}'
0	0	0	0	0	0	0	0	\vec{V}'_0
F	0	0	$\frac{2E}{3}$	$-\frac{E}{3}$	$-\frac{E}{3}$	$\frac{E}{\sqrt{6}}$	0	\vec{V}'_1
F	F	0	$\frac{E}{3}$	$\frac{E}{3}$	$-\frac{2E}{3}$	$\frac{E}{\sqrt{2}}$	$\frac{E}{\sqrt{2}}$	\vec{V}'_2
0	F	0	$-\frac{E}{3}$	$\frac{2E}{3}$	$-\frac{E}{3}$	$-\frac{E}{\sqrt{2}}$	$\frac{E}{\sqrt{2}}$	\vec{V}'_3
0	F	F	$-\frac{2E}{3}$	$\frac{E}{3}$	$\frac{E}{3}$	$-\frac{E}{\sqrt{2}}$	0	\vec{V}'_4
0	0	F	$-\frac{E}{3}$	$-\frac{E}{3}$	$\frac{2E}{3}$	$\frac{E}{\sqrt{2}}$	$-\frac{E}{\sqrt{2}}$	\vec{V}'_5
F	0	F	$\frac{E}{3}$	$-\frac{2E}{3}$	$\frac{E}{3}$	$\frac{E}{\sqrt{2}}$	$-\frac{E}{\sqrt{2}}$	\vec{V}'_6
F	F	F	0	0	0	0	0	\vec{V}'_7

1.9 Simulation de commande MLI-ST, plein onde et MLI-Vectorielle d'un onduleur à deux niveaux

1.9.1 command plein onde

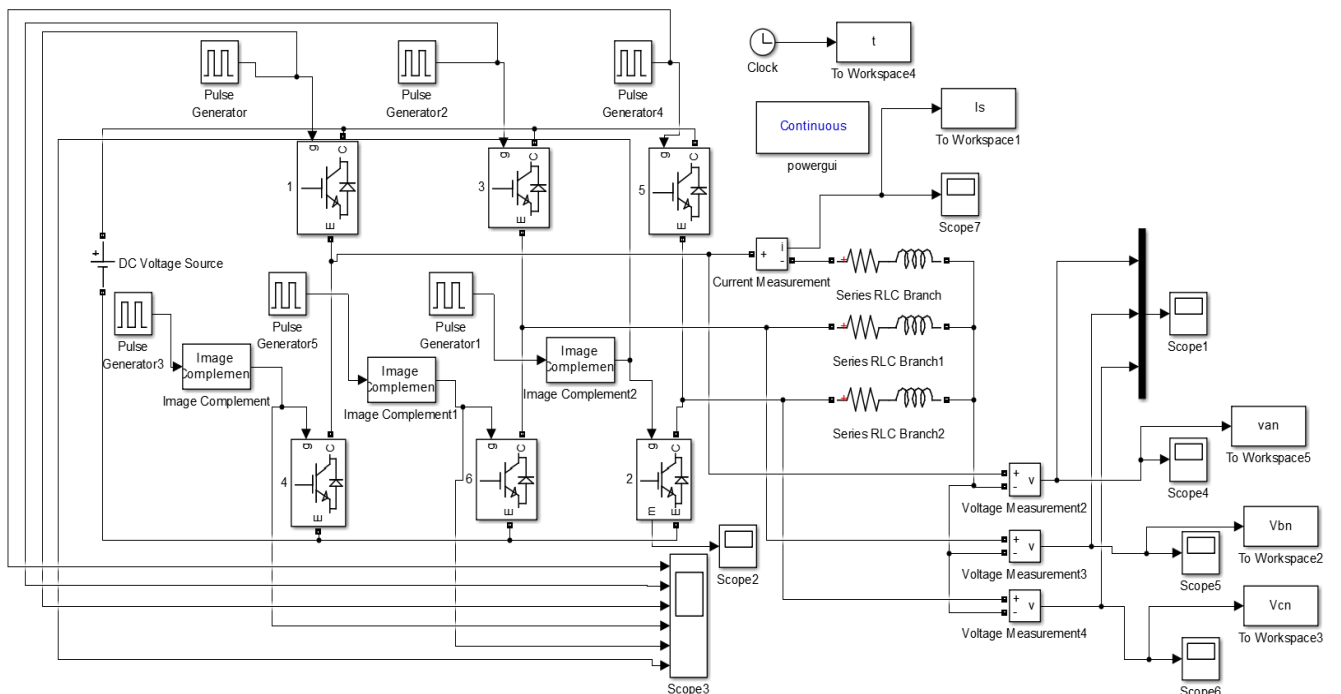
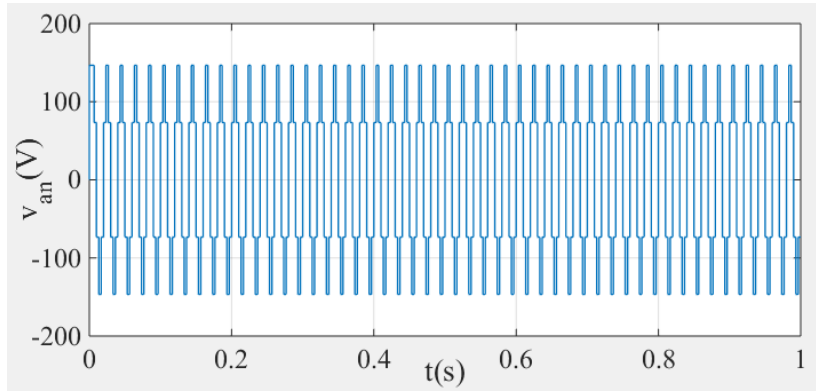


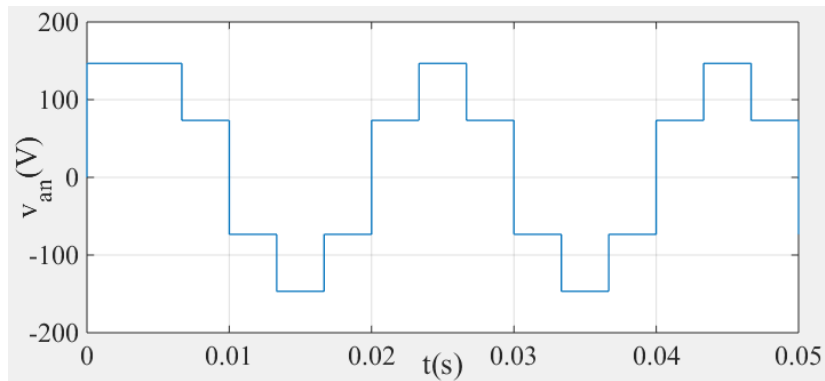
Figure 1.28: Schéma bloc de la commande à 180°(plein onde).

1.9.1.1 Résultats de simulation

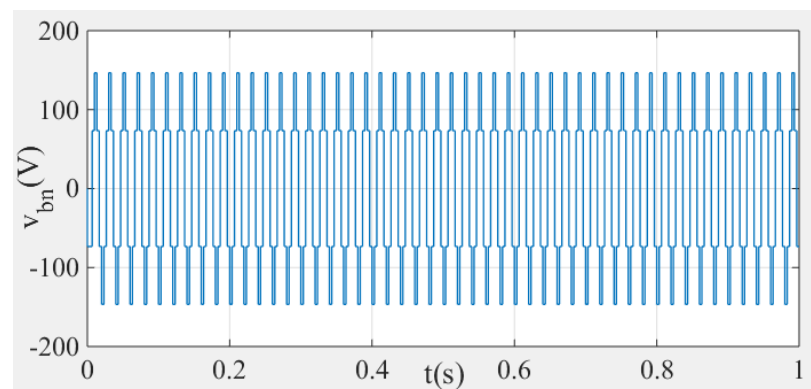
Pour charge RL ($R = 300\Omega$, $L = 80\text{ mH}$)



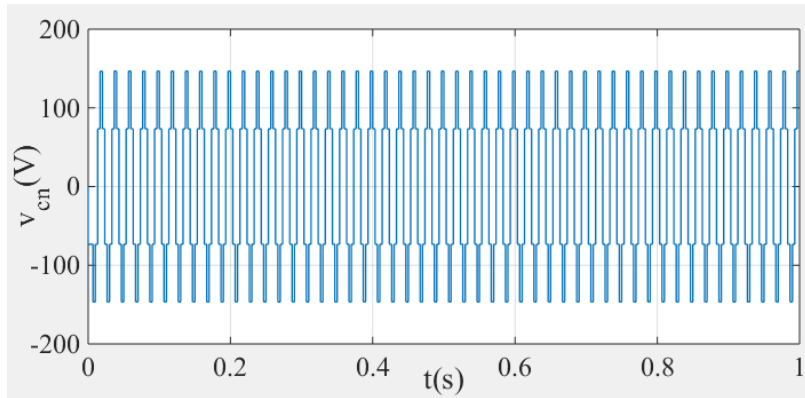
a) tension V_{an} .



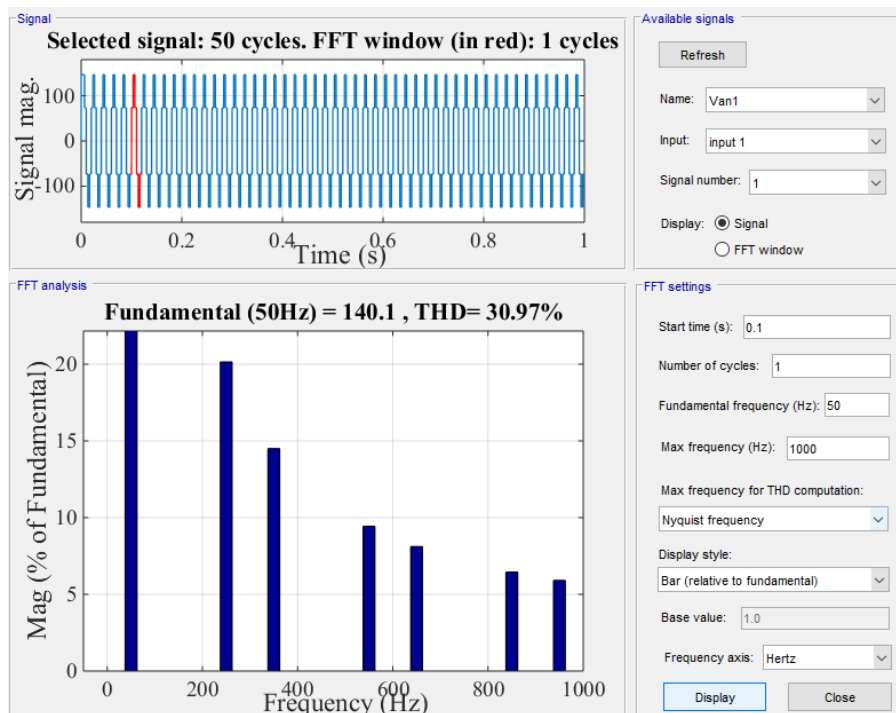
b) Zoom de la tension V_{an} .



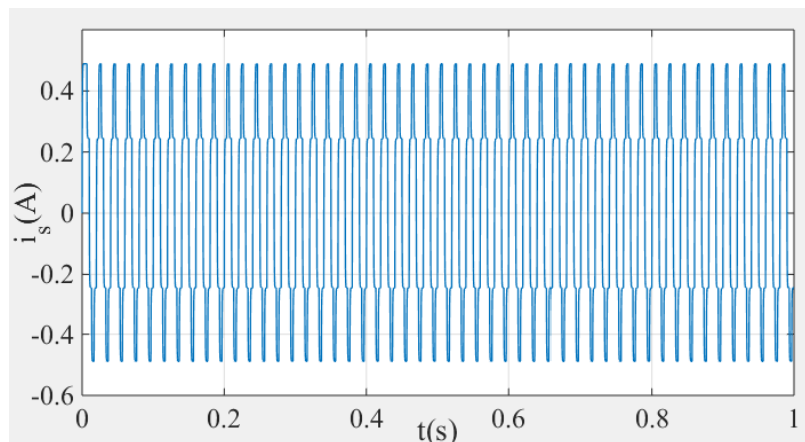
c) tension V_{bn} .



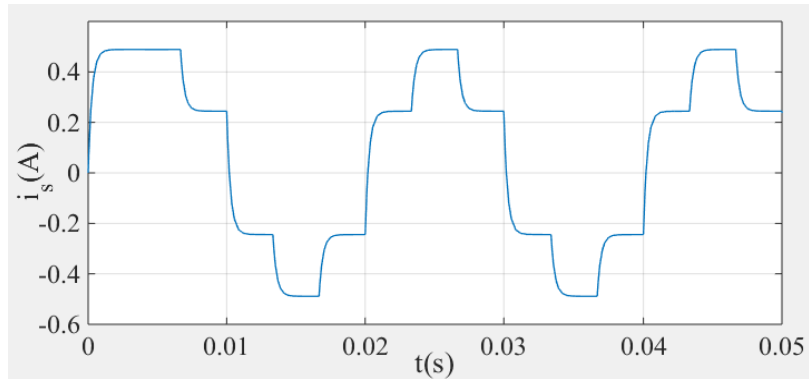
d) tension V_{cn} .



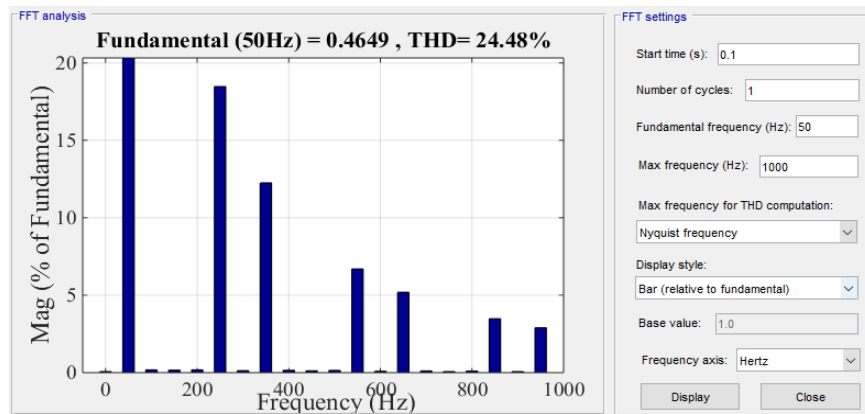
e) harmonique (THD) de tension V_{an} .



f) courant i_s .



g) zoom de courant i_s .



h) harmonique (THD) de courant i_s .

Figure 1.29: les résultats de simulation de commande plein onde charge RL.

1.9.2 commande MLI-ST

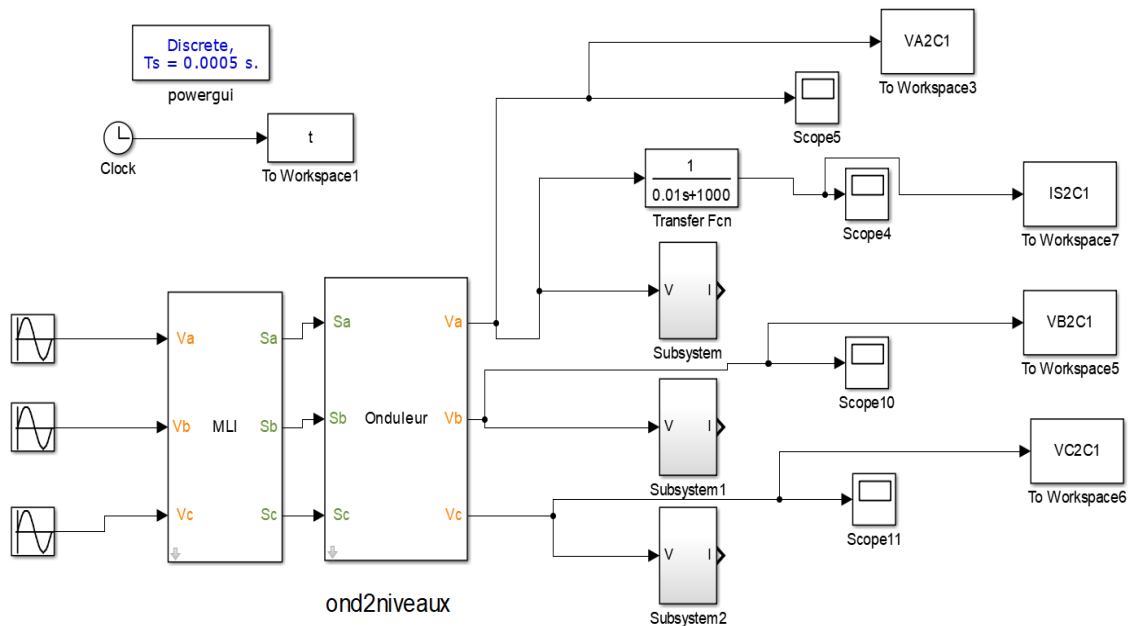
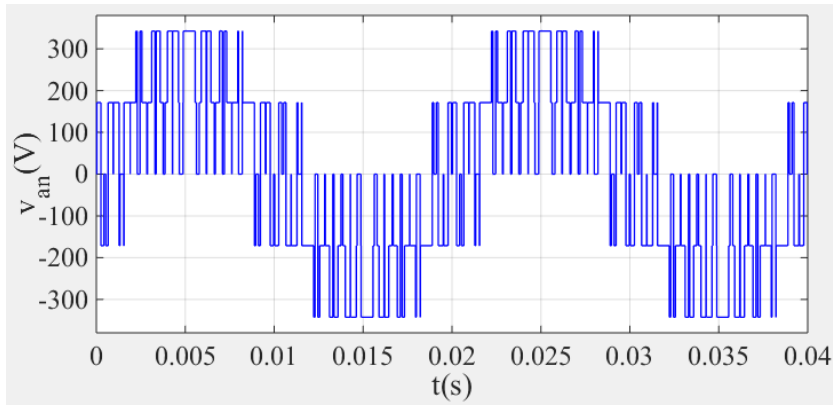


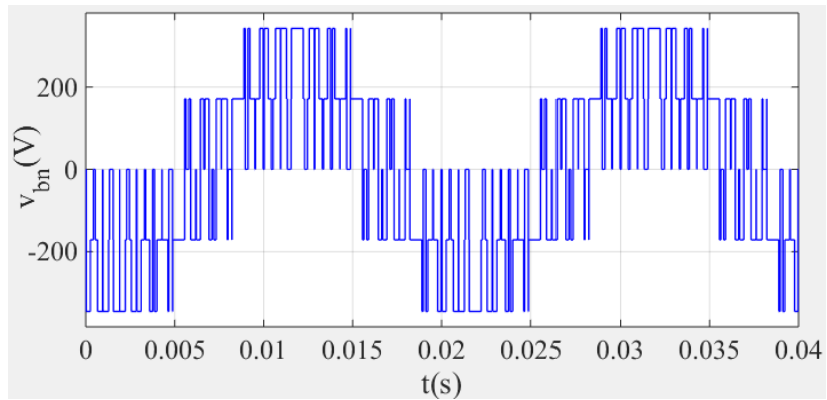
Figure 1.30: Schema bloc de la commande MLI-ST charge RL.

1.9.2.1 Résultats de simulation pour charge 1

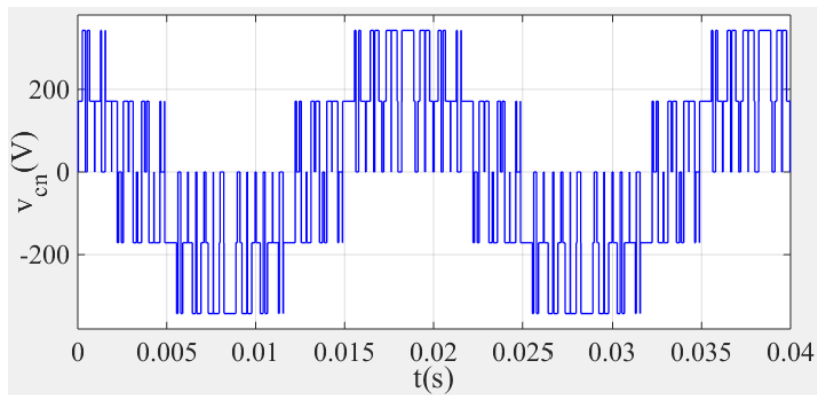
Charge 1: ($R = 1000\Omega$, $L = 10\text{ mH}$)



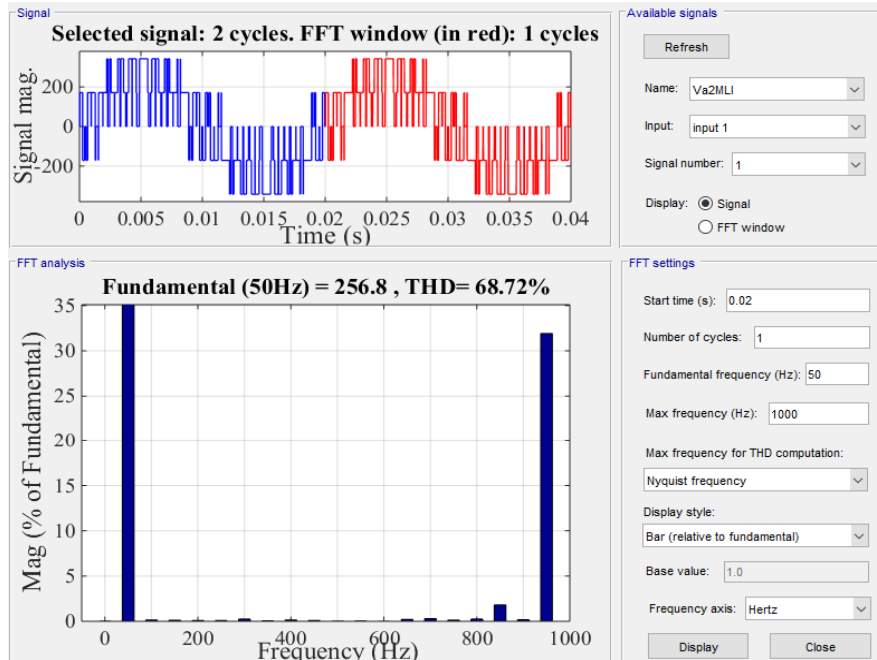
a) tension V_{an} .



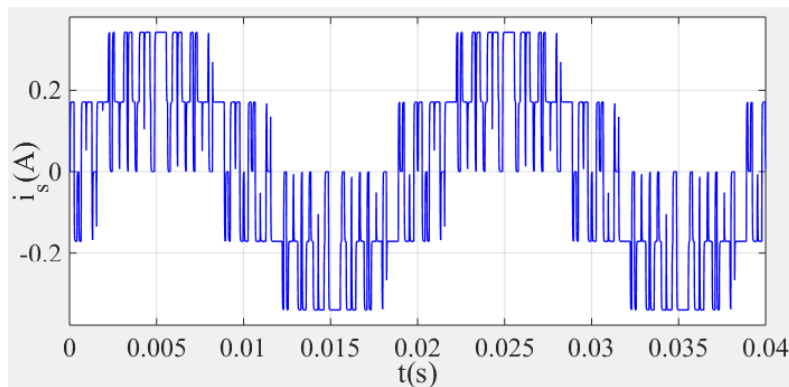
b) tension V_{bn} .



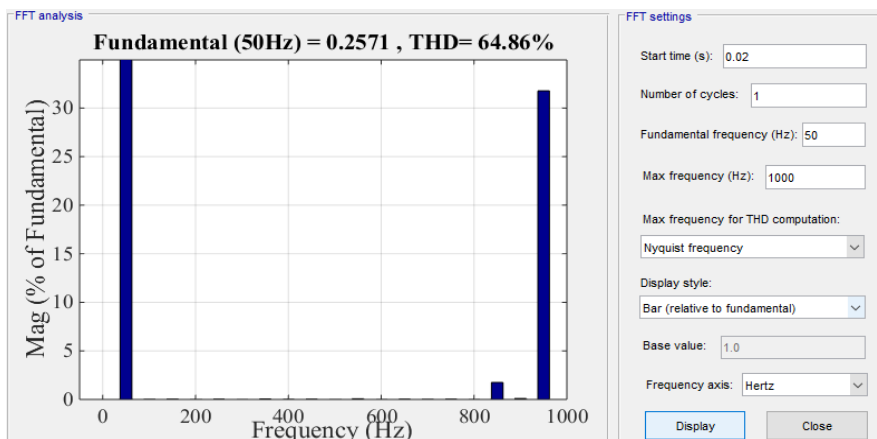
c) tension V_{cn} .



d) harmonique (THD) de tension V_{an} .



e) courant i_s .



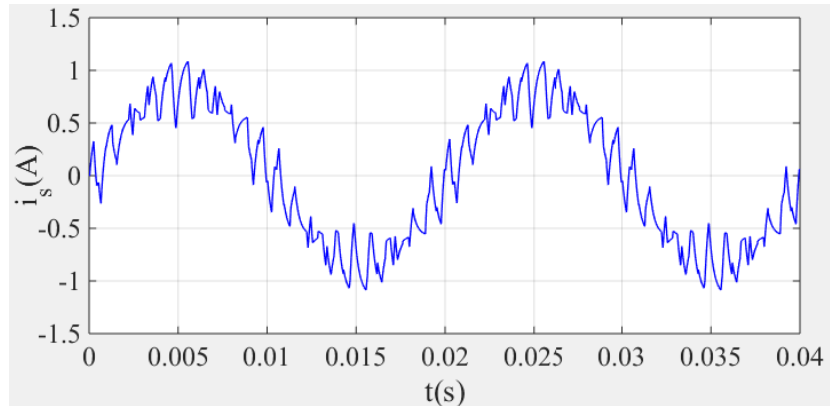
f) harmonique (THD) de courant i_s .

Figure 1.31: les résultats de simulation de commande MLI-ST charge RL (1).

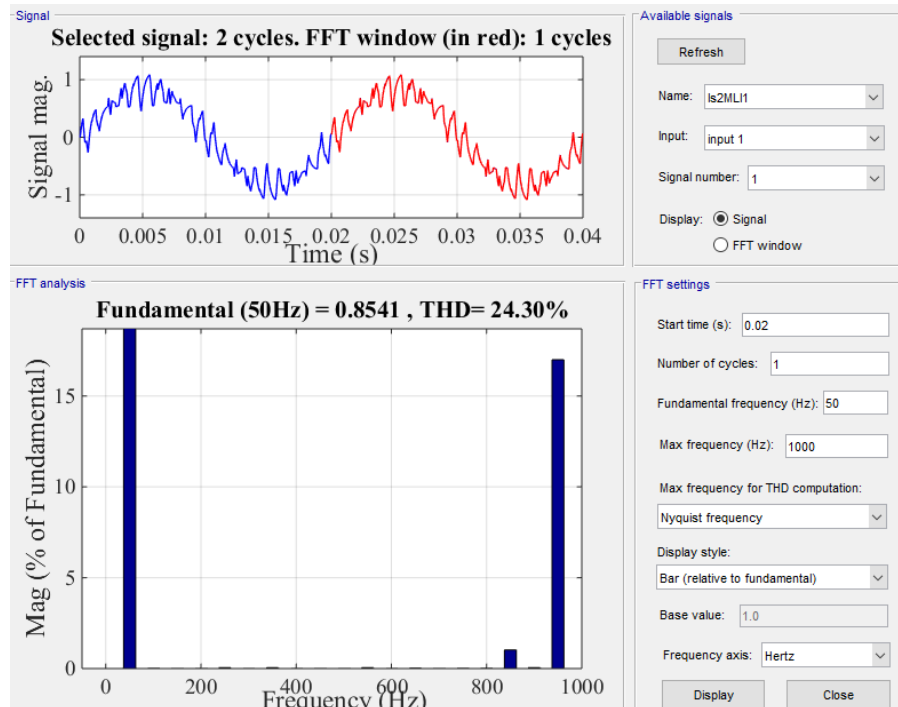
1.9.2.2 Résultats de simulation pour charge 2

Charge 2: ($R = 300\Omega$, $L = 80\text{ mH}$)

Après la simulation, nous constatons que les calculs de THD pour cette charge sont les mêmes que pour la charge 1 (la charge n'affecte pas la tension, au contraire il affecte la courant).



a) courant i_s



b) harmonique (THD) de courant i_s

Figure 1.32: les résultats de simulation de commande MLI-ST charge RL (2).

1.9.3 Commande MLI-vectorielle (SVPWM)

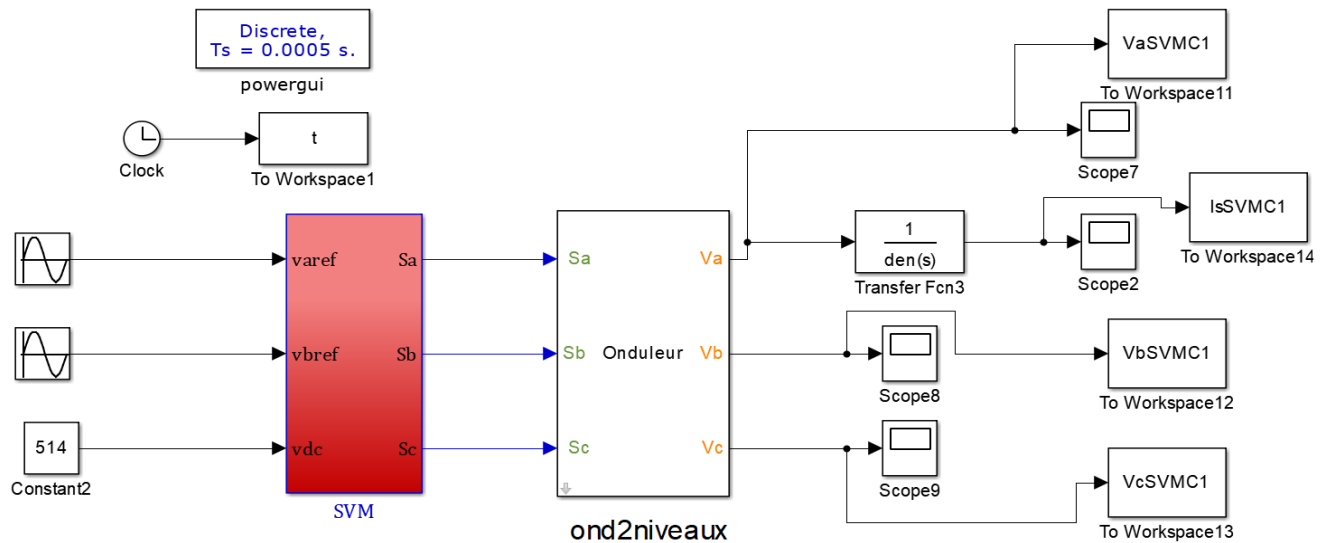
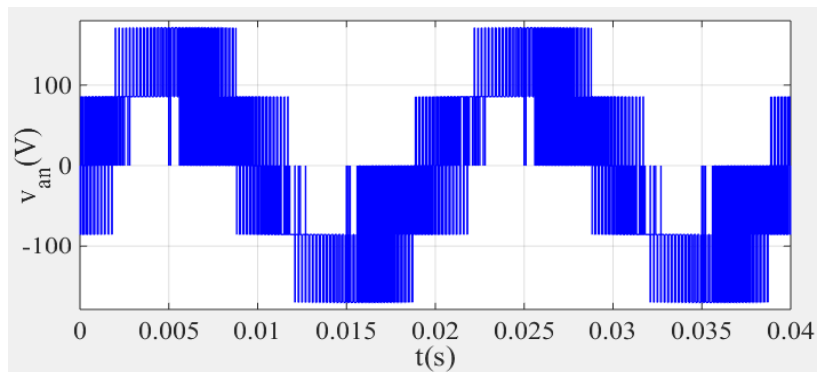


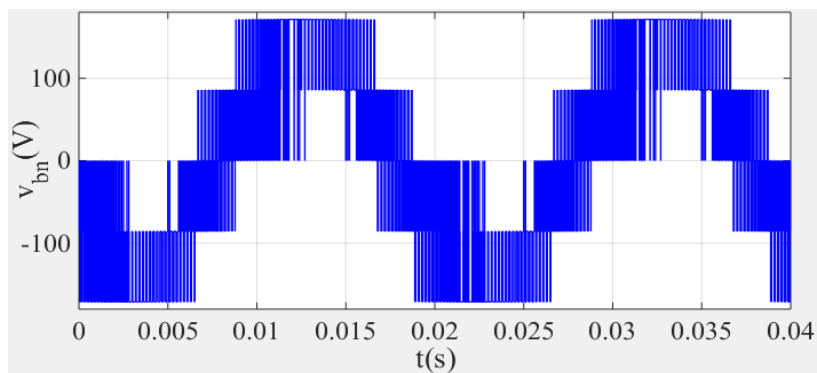
Figure 1.33: Schema bloc de la commande MLI-Vectorielle(SVM).

1.9.3.1 Résultats de simulation pour charge 1

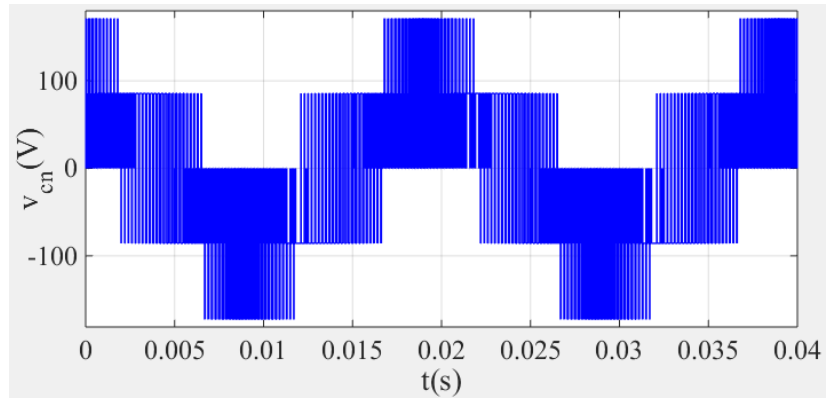
Charge 1: ($R = 1000\Omega$, $L = 10\text{ mH}$)



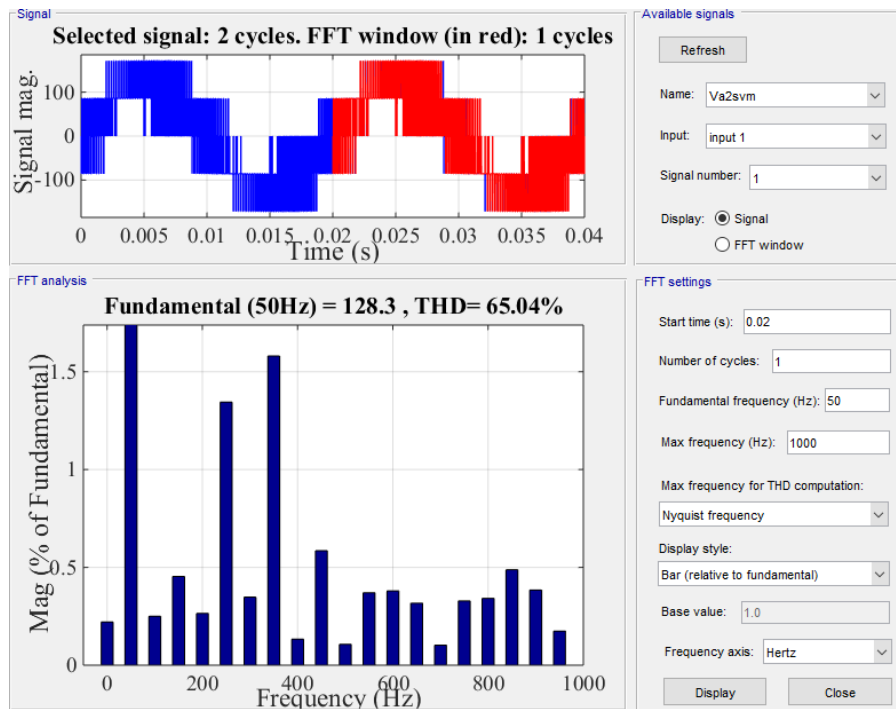
a) tension V_{an} .



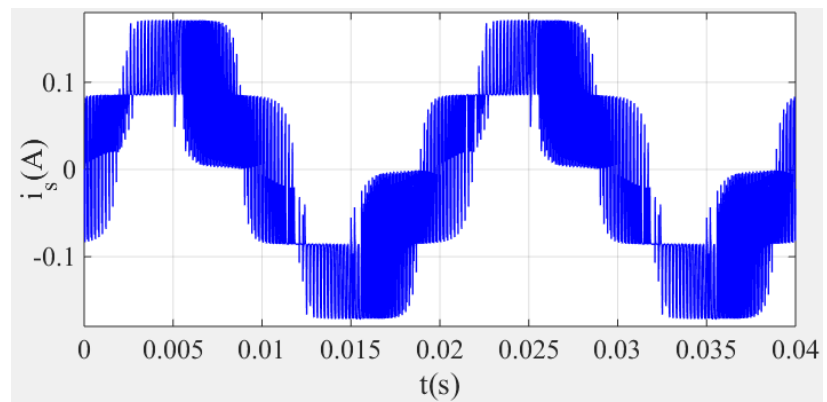
b) tension V_{bn} .



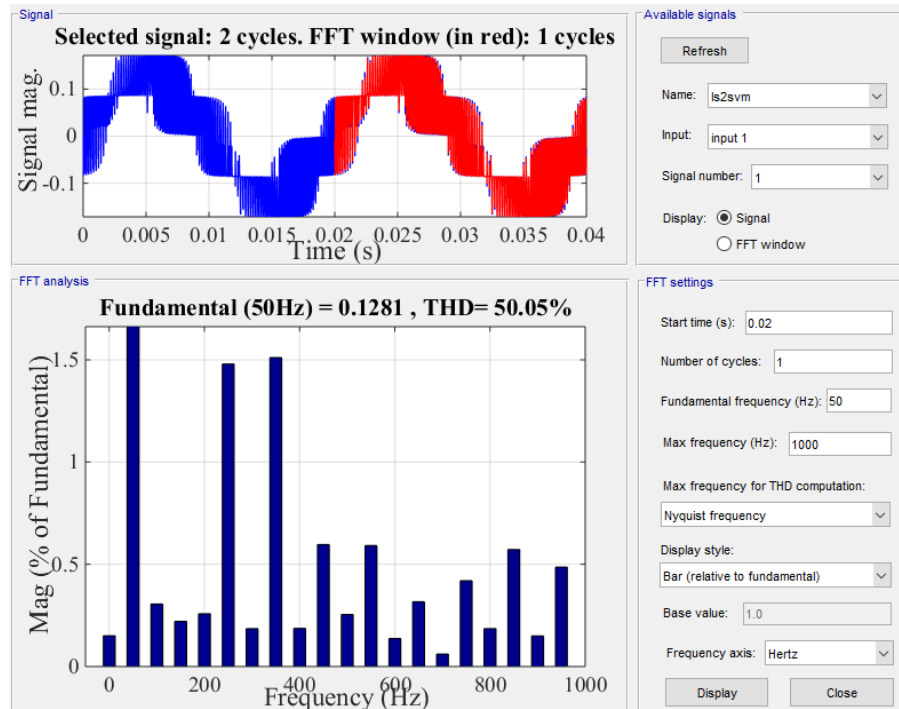
c) tension V_{cn} .



d) harmonique (THD) de tension V_{an} .



e) courant i_s .



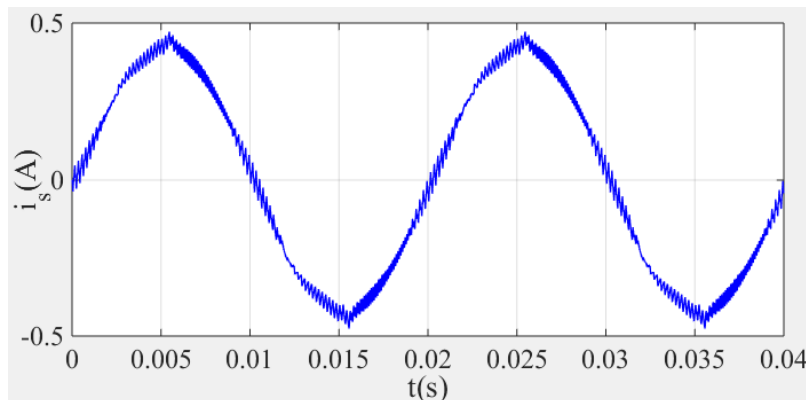
f) harmonique (THD) de courant i_s .

Figure 1.34: les résultats de simulation de commande MLI-Vectorielle SVPWM charge RL (1).

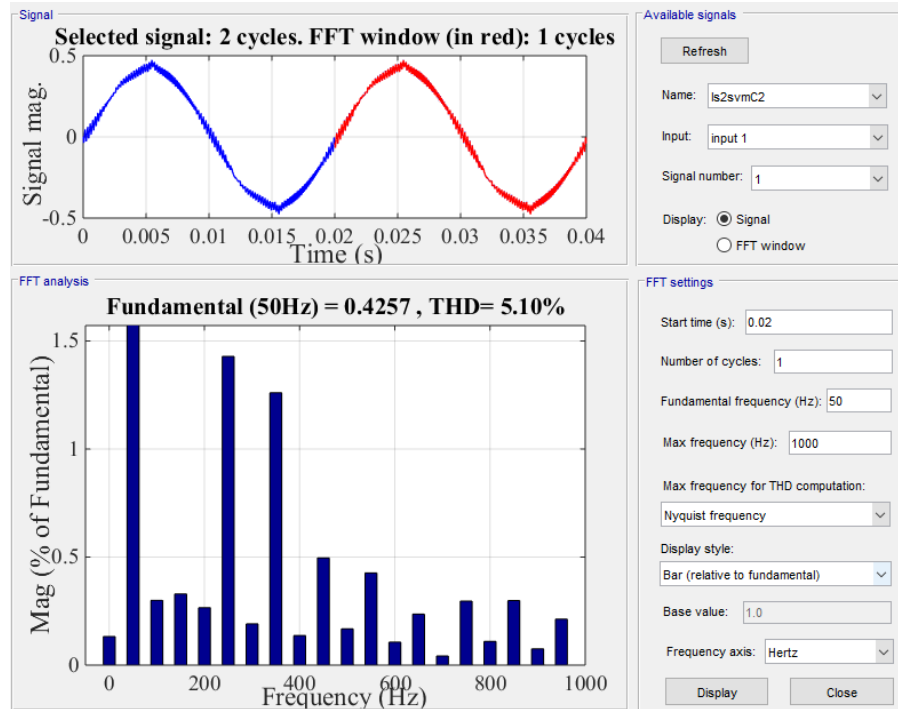
1.9.3.2 Résultats de simulation pour charge 2

Charge 2: ($R = 300\Omega$, $L = 80\text{ mH}$)

Après la simulation nous trouvons les calculs de THD de tensions elle est la même à la charge 1 .(la charge n'affecte pas la tension ,au contraire il affecte la courant).



a) courant i_s .



b) (THD) de courant i_s .

Figure 1.35 : les résultats de simulation de commande MLI-Vectorielle (SVPWM) charge RL (2).

1.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la théorie des onduleurs les plus utilisés actuellement, telle que leur constitution physique élémentaire, leurs principes de fonctionnement et principales applications.

Commençant par une cellule de commutation qui représente le bloc élémentaire de tous les onduleurs. ensuite le principe de fonctionnement de l'onduleur monophasé en demi pont et en pont complet sont présentés. ensuite, nous avons focalisé notre étude sur l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux nous avons présenté en premier temps sa structure physique, son principe de fonctionnement, ainsi que une modélisation détaillé dédiée à la commande, ensuite les techniques de commande utilisées. A la fin, on a donné les résultats de simulation des commandes: MLI-ST, plein onde et MLI-Vectorielle d'un onduleur à deux niveaux alimentant une charge RL.

D'après les résultats de simulations obtenus et dans le but d'améliorer la forme de tension généré (réduire le THD). On propose l'étude et l'analyse de l'onduleur trois niveau.

Chapitre 2

Structure et Principe de fonctionnement et commande de l'onduleur NPC à Trois niveaux

2.1 Introduction

Les onduleurs de tension constituent une fonction incontournable de l'électronique de puissance. Ils sont présents dans des domaines d'application les plus variés, dont le plus connu est sans doute celui de la variation de vitesse des machines à courant alternatif. La forte évolution de cette fonction s'est appuyée, d'une part, sur le développement de composants à semi-conducteurs entièrement commandables, puissants, robustes et rapides, et d'autre part, sur l'utilisation quasi-généralisée des techniques dites de modulation de largeurs d'impulsions.

Dans les applications de fortes puissances, la structure des onduleurs à trois niveaux est plus adaptée, par rapport à la structure classique, du fait que les tensions et courants de sortie présentent un taux d'harmoniques nettement inférieur. La tension aux bornes de chaque interrupteur est divisée par deux et la fréquence de hachage est plus basse.

La génération des signaux de commande de la modulation MLI-ST se fait le plus souvent en temps réel. On détermine ainsi les instants d'ouverture et de fermeture des interrupteurs à l'aide d'une électronique de commande analogique ou numérique ou éventuellement une combinaison des deux.

Ce chapitre concerne l'étude de la modélisation de l'alimentation des charges, ainsi que les informations détaillées (structure et principe de fonctionnement) de l'onduleur de tension à trois niveaux de type NPC, afin de résumer les principes utilisés dans la topologie NPC, nous les appliquerons à un onduleur à diodes de bouclage à trois niveaux; nous construirons un modèle mathématique utilisant le concept de la fonction de connexion de l'interrupteur et du demi-bras.

Enfin nous allons présenter aussi les résultats de la simulation de commande MLI-ST de ce niveau de cet onduleur

2.2 Modélisation de l'alimentation de la charge (machine asynchrone)

Généralement la machine asynchrone est alimentée par deux convertisseurs en cascade, le convertisseur coté machine est un onduleur de tension contrôlé par la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI-ST), et le convertisseur coté réseau est un redresseur triphasé double alternance à diodes, séparés par un filtre passe bas (LC)

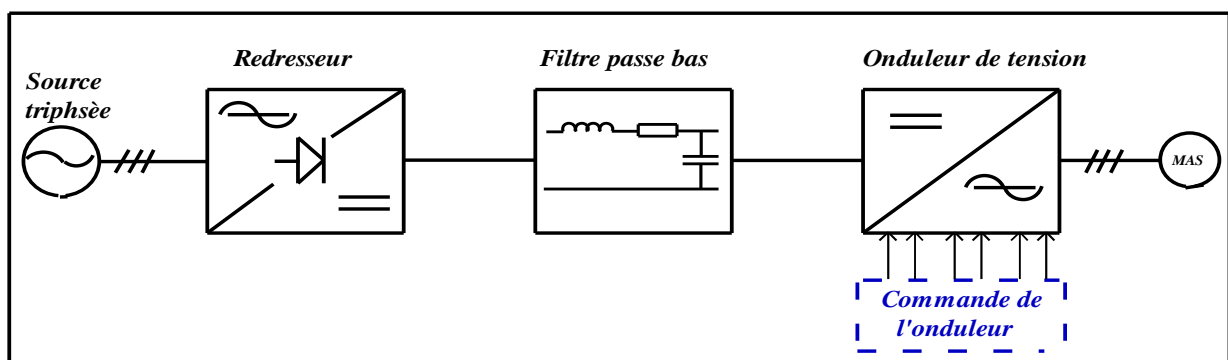


Figure 2.1: Association convertisseur – machine.

2.2.1 Modélisation de Redresseur triphasé double alternance à diodes

La conversion d'énergie comprend la transformation et le contrôle de la puissance électrique avec des composants adaptés (diodes, ou autres semi-conducteurs), et inclut aussi d'autres équipements pour la mesure et le contrôle. La conversion de puissance alternative au continue « AC/DC » est appelée redressement et l'appareil utilisé dans cette transformation est appelé redresseur [18]. On utilise le plus souvent le pont à six diodes représenté par la figure (2.2).

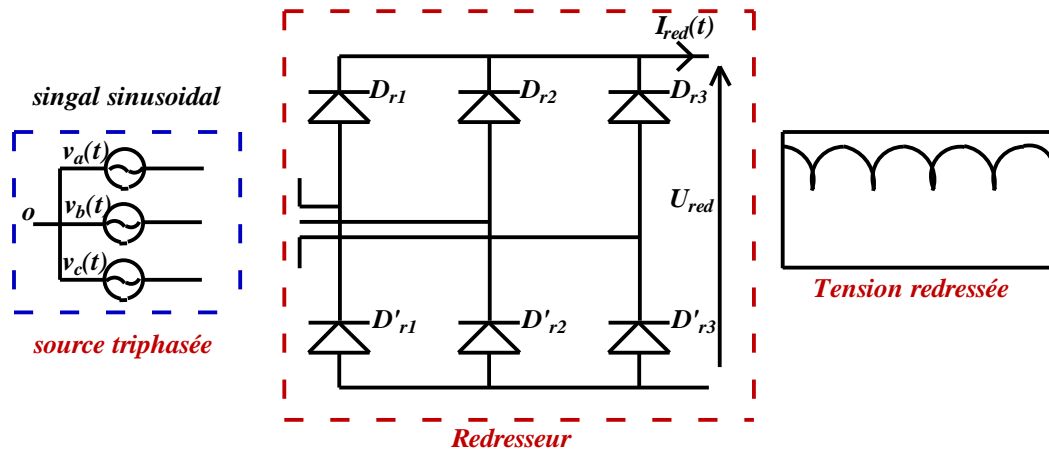


Figure 2.2: Représentation de redresseur double alternance à diodes.

Ce redresseur comporte trois diodes (D_{r1}, D_{r2}, D_{r3}) à cathode commune assurant l'aller du courant $I_{red}(t)$, et trois diodes ($D'_{r1}, D'_{r2}, D'_{r3}$) à anode commune assurant le retour du courant $I_{red}(t)$. Si on suppose que le redresseur est alimenté par un réseau triphasé équilibré de

Tension :

$$\begin{cases} V_a(t) = V_m \sin(2\pi ft) \\ V_b(t) = V_m \sin\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_c(t) = V_m \sin\left(2\pi ft - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (2.1)$$

Le pont de Graëtz à diodes triphasé alimenté par un système de tensions sinusoïdales triphasées. La séquence de conduction des diodes est définie comme suit:

$$D_i \text{ conduit si } V_i = \max(V_j); j = a, b, c ; i = a, b, c$$

$$D'_i \text{ conduit si } V'_i = \min(V_j); j = a, b, c ; i = a, b, c$$

- Et si l'effet de l'empiètement est négligé. La valeur instantanée de la tension redressée peut être exprimée par [19] [20] [21] [22]:

$$U_{red}(t) = V_i - V'_i = \max(V_j) - \min(V_j) \quad (2.2)$$

Cette tension redressée est assez ondulée, ce qui nécessite une opération de filtrage.

La tension redressée est de la forme suivant:

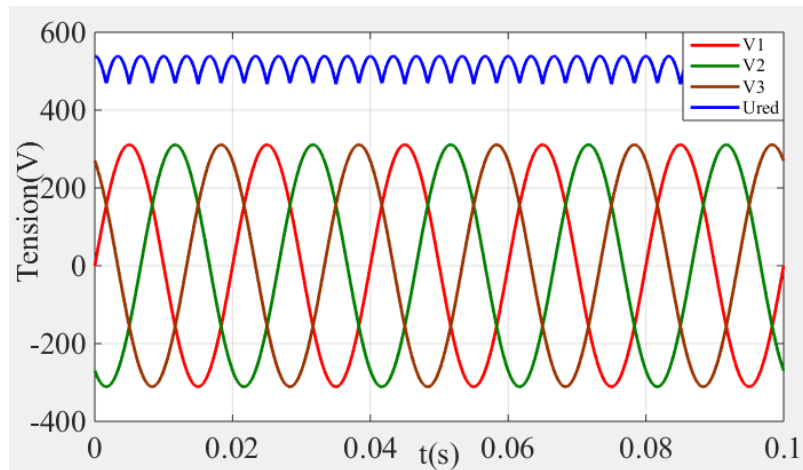


Figure 2.3: Tension redressée U_{red} .

Avec :

$D_i; D'_i$: Les diodes en conduction

V_i : La tension à l'anode de D_i

V'_i : La tension à la cathode de D'_i

La valeur moyenne de la tension redressée est donnée par : $U_{red\ moy} = \frac{3\sqrt{3}}{\Omega} V_m$

2.2.2 Modélisation de filtre passe bas(LC)

Généralement un filtre est un circuit dont le comportement dépend de la fréquence du signal d'entrée. Il permet de privilégier ou d'éliminer certaines fréquences d'un signal.

Il n'est pas un système électronique qui ne fasse appel à, au moins, un filtre. La plupart en comportent en grande quantité.

Le filtrage est une forme de traitement de signal, obtenu en envoyant le signal à travers un ensemble de circuits électroniques, qui modifient son spectre de fréquence et/ou sa phase et donc sa forme temporelle.

Le filtre passe-bas (notre choix) est un dispositif qui démontre une réponse en fréquence relativement constante (gain fixe) aux basses fréquences et un gain décroissant aux fréquences supérieures à la fréquence de coupure (f_c). La décroissance plus ou moins rapide dépend de l'ordre du filtre.

Idéalement, le filtre passe-bas aurait un gain unitaire (ou fixe) aux basses fréquences et un gain nul aux fréquences supérieures à la coupure (f_c).

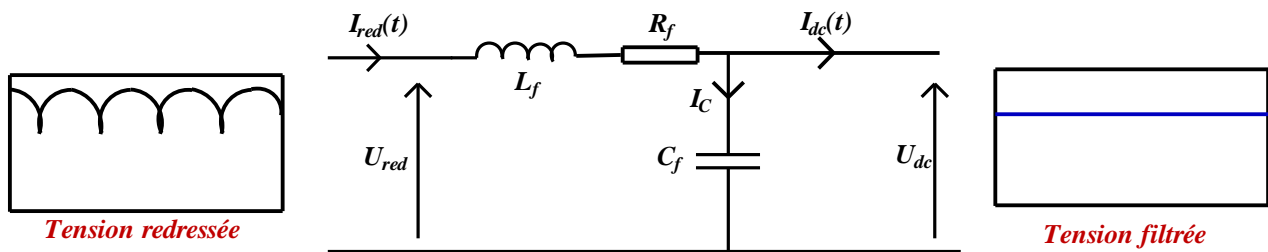


Figure 2.4: Schéma du filtre (LC).

Pour modéliser ce filtre on a les équations suivantes:

$$\begin{cases} L_f \frac{dI_{red}(t)}{dt} = U_{red} - U_{dc} - R I_{red} \\ \frac{dU_{dc}(t)}{dt} = \frac{1}{C_f} (I_{red} - I_{dc}) \end{cases} \quad (2.3)$$

Donc la fonction de transfert du filtre est donnée par la relation suivante:

$$F(s) = \frac{U_{dc}(s)}{U_{red}(s)} = \frac{1}{L_F C_F s^2 + R_F C_F s + 1} \quad (2.4)$$

Avec:

S : c'est l'indice de la transformation de Laplace. c'est un filtre de deuxième ordre avec une fréquence de coupure égale:

$$f_c = \sqrt{\frac{2}{L_F C_F} - \left(\frac{R_F}{L_F}\right)^2} \quad (2.5)$$

Pour dimensionner ce filtre, on doit tout simplement placer sa fréquence de coupure audessous de la fréquence de la première harmonique de $U_{dc}(t)$ cette condition nous permet de déterminer L_F et C_F . [23]

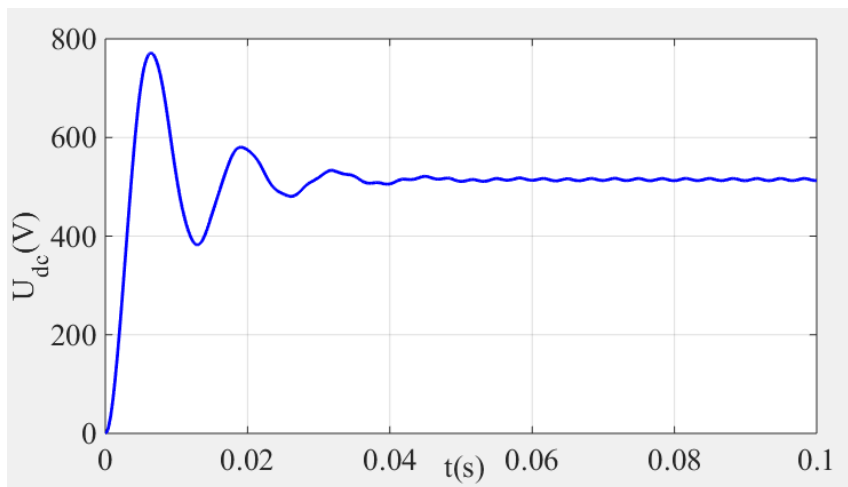


Figure 2.5: Tension filtrée.

2.2.3 Onduleur à trois niveaux de type NPC

2.2.3.1 Structure de l'onduleur à trois niveaux

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

L'onduleur triphasé à trois niveaux utilisé est constitué de trois bras et de deux sources de tension continue. Chaque bras comporte quatre interrupteurs en série et deux diodes médianes. Chaque interrupteur est composé d'un transistor et une diode montée en tête bêche.[24]

Le point milieu de chaque bras est relié à une alimentation continue, de force électromotrice (E). A l'aide d'un diviseur de tension capacitif formé par les condensateurs de filtrage C_1 et C_2 de même capacité, on obtient deux sources secondaires de tension continue délivrant chacune une demi-tension ($E/2$). Étant connectés entre eux en un point neutre noté O . Ces derniers sont identiques de manière à éviter le déséquilibre de charge ($C_1 = C_2$ c'est-à-dire $U_{C1} = U_{C2}$)

Le point o est connecté avec les deux diodes médianes (DD_{K1}, DD_{K2}) . [25][26] La figure 2.6 fournit une représentation schématique de cet onduleur.

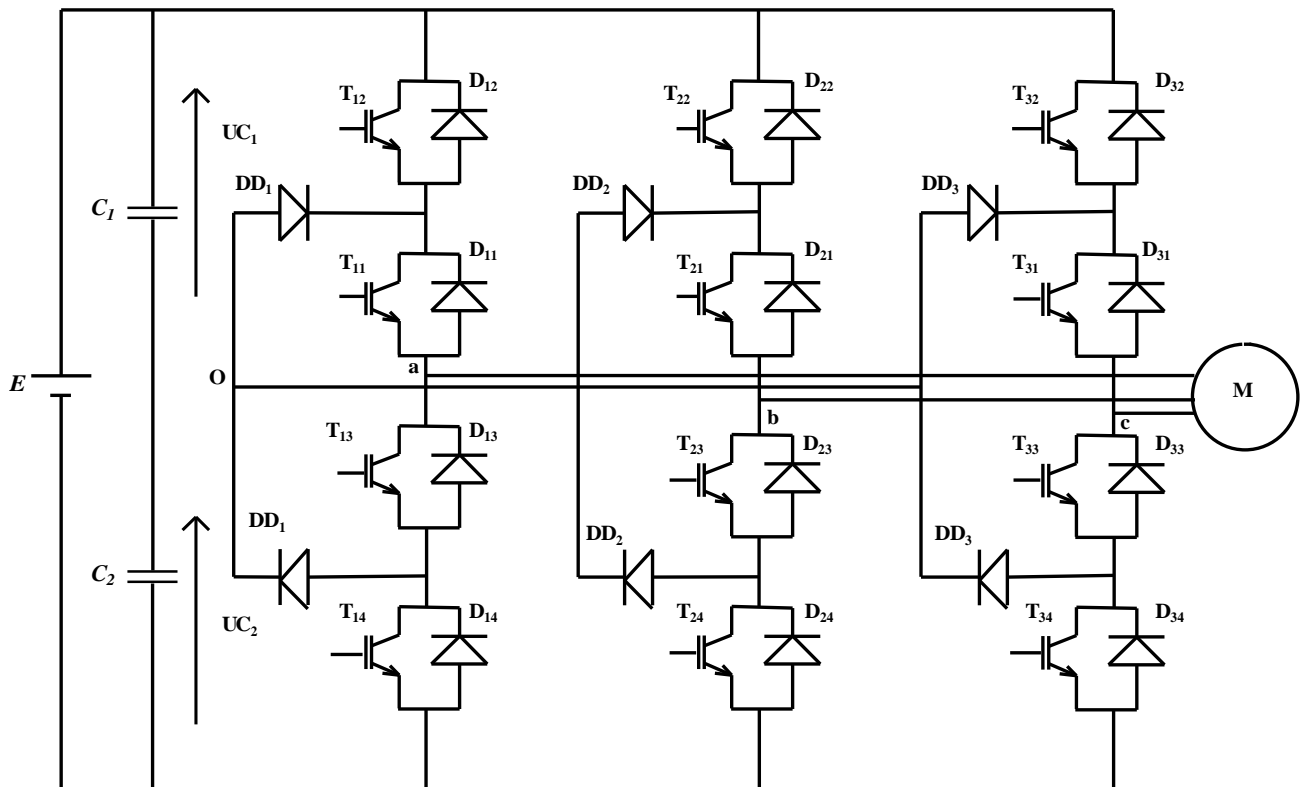


Figure 2.6: Onduleur triphasé à trois niveau.

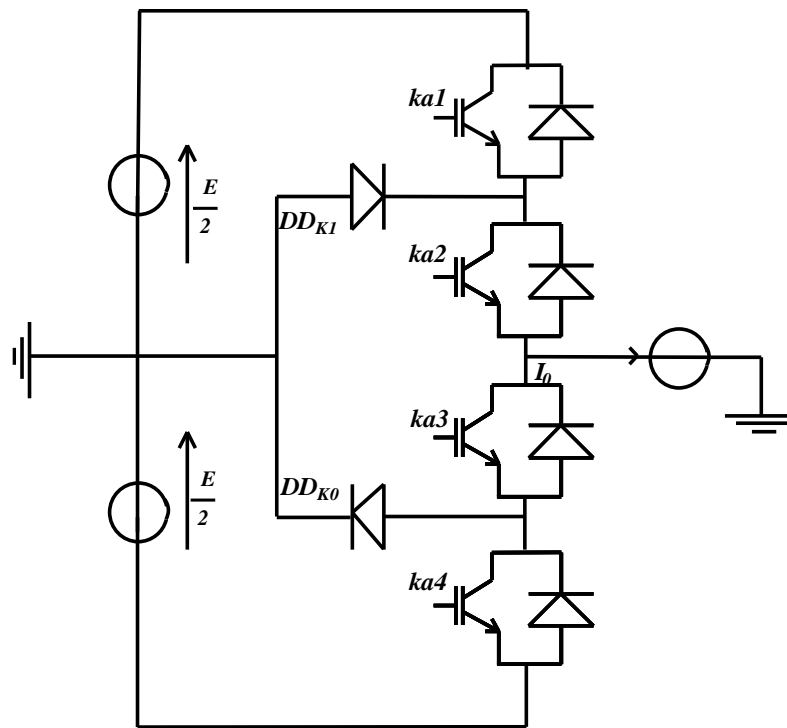


Figure 2.7: Un bras de l'onduleur à trois niveaux de type NPC.

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs dépend de :

- La commande externe B_{KS} (l'ordre d'amorçage ou de blocage du semi-conducteur Bidirectionnel T_{KS}).
- Une commande interne définie par les signes du courant du bras.
- Pour éviter la mise en conduction simultanée des quatre interrupteurs d'un seul bras, qui provoque un court circuit aux bornes des sources continues et par conséquent le risque de distorsion des condensateurs et des composants semi-conducteurs par surintensité et qui peut engendrer la distinction par surtension des interrupteurs lors d'ouvertures simultanée de ces dernier, on adopte la solution classique suivante: On doit réaliser une commande complémentaire des différents interrupteurs d'un même bras de l'onduleur.[27]

2.2.3.2 Configurations et principe fonctionnement d'un bras de l'onduleur à trois niveaux

Il faut déterminer les valeurs que peut prendre la tension simple V_{a0} entre la borne (a) de la charge et le point neutre O. Cette tension est entièrement définie par l'état (0 ou 1) des quatre interrupteurs K_{a1} , K_{a2} , K_{a3} et K_{a4} du bras.

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

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

On donne ci dessous le tableau récapitulatif (tableau 2.1) représente la tension de sortie V_{a0} d'un onduleur NPC à trois niveaux en fonction de l'état des interrupteurs, la tension au borne des interrupteurs de puissance n'excède jamais la moitié du bus d'entrée.

A la différence de l'onduleur à deux niveaux, chaque demi-bas de l'onduleur à trois niveaux utilisée non pas un interrupteur bidirectionnel mais deux, ce qui permet d'effectuer une commande décalée. [28]

❖ Première configuration {1100}

K_{a1} , K_{a2} sont passants et K_{a3} et K_{a4} sont bloqués (Figure 2.8) la valeur de tension simple V_{a0} est donnée par l'équation suivante :

$$V_{a0} = +\frac{E}{2} \quad (2.6)$$

La tension inverse aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{ka3} = V_{ka4} = +\frac{E}{2} \quad (2.7)$$

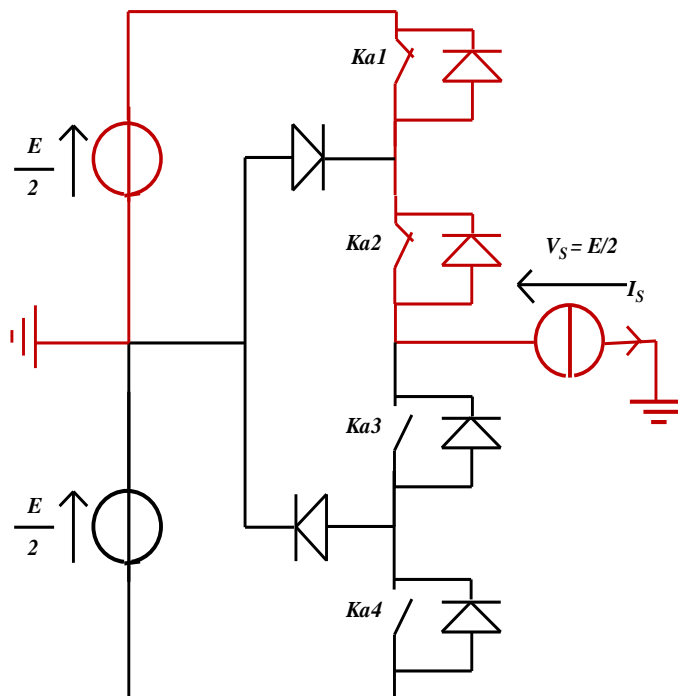


Figure 2.8: 1^{ème} configuration du 1^{er} bras.

❖ Deuxième configuration {0110}

K_{a2}, K_{a3} sont passants et K_{a1} et K_{a4} sont bloqués (Figure 2.9), le point a est relié directement au point neutre O. La tension simple V_{a0} est nulle :

$$V_{a0} = 0 \tag{2.8}$$

La tension inverse aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{ka1} = V_{ka4} = +\frac{E}{2} \tag{2.9}$$

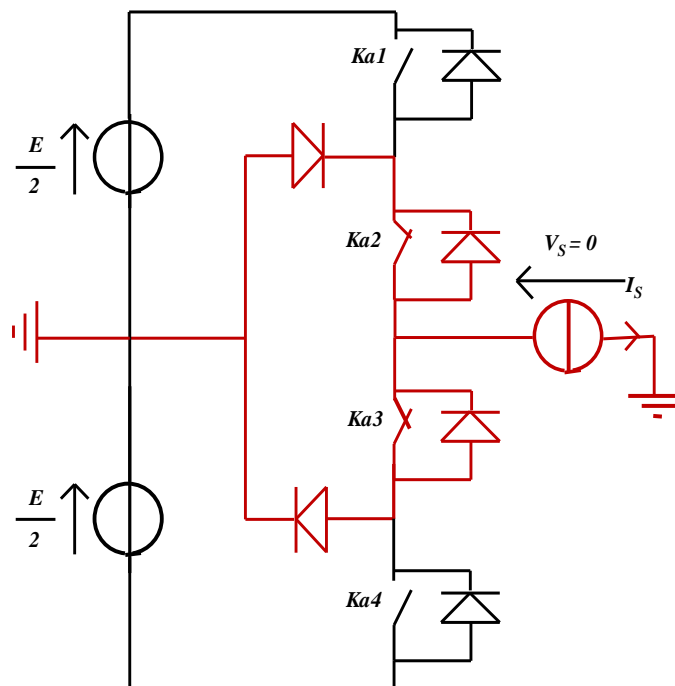


Figure 2.9: 2^{ème} configuration du 1^{er} bras.

❖ Troisième configuration {0011}

K_{a3}, K_{a4} sont passants et K_{a1} et K_{a2} sont bloqués (figure 2.10), la valeur de tension simple V_{a0} est donnée par l'équation suivante :

$$V_{a0} = -\frac{E}{2} \tag{2.10}$$

La tension inverse aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{ka1} = V_{ka2} = +\frac{E}{2} \tag{2.11}$$

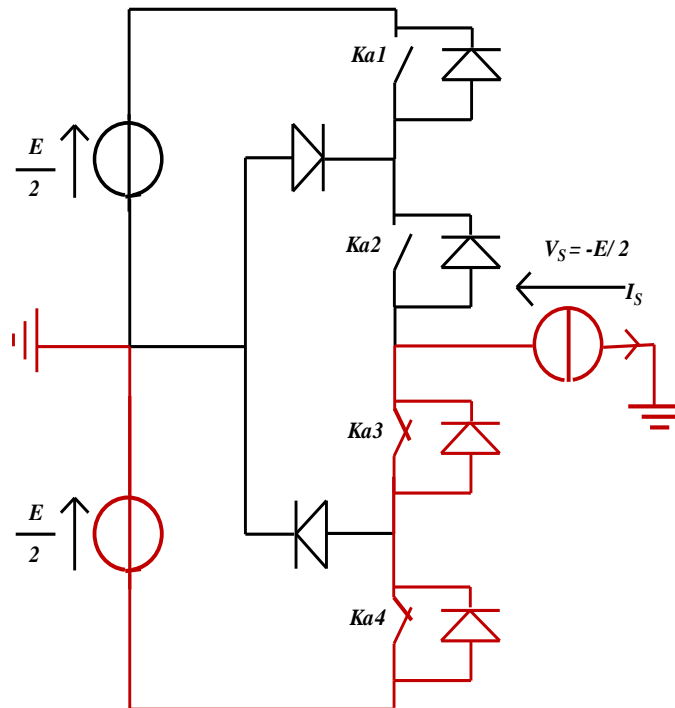


Figure 2.10: 3^{ème} configuration du 1^{er} bras.

Tableau 2.1: Table de commutation du convertisseur NPC 3 niveaux.

Etat des interrupteurs				Tension de sortie V_{a0}
K_{a1}	K_{a2}	K_{a3}	K_{a4}	
1	1	0	0	$E/2$
0	1	1	0	0
0	0	1	1	$-E/2$

Pour visualiser l'enchaînement des configurations décrites ci-dessus, la figure 2.11 représente les signaux de commande de chaque interrupteur, ainsi que la forme d'onde de la tension de sortie V_{a0} .

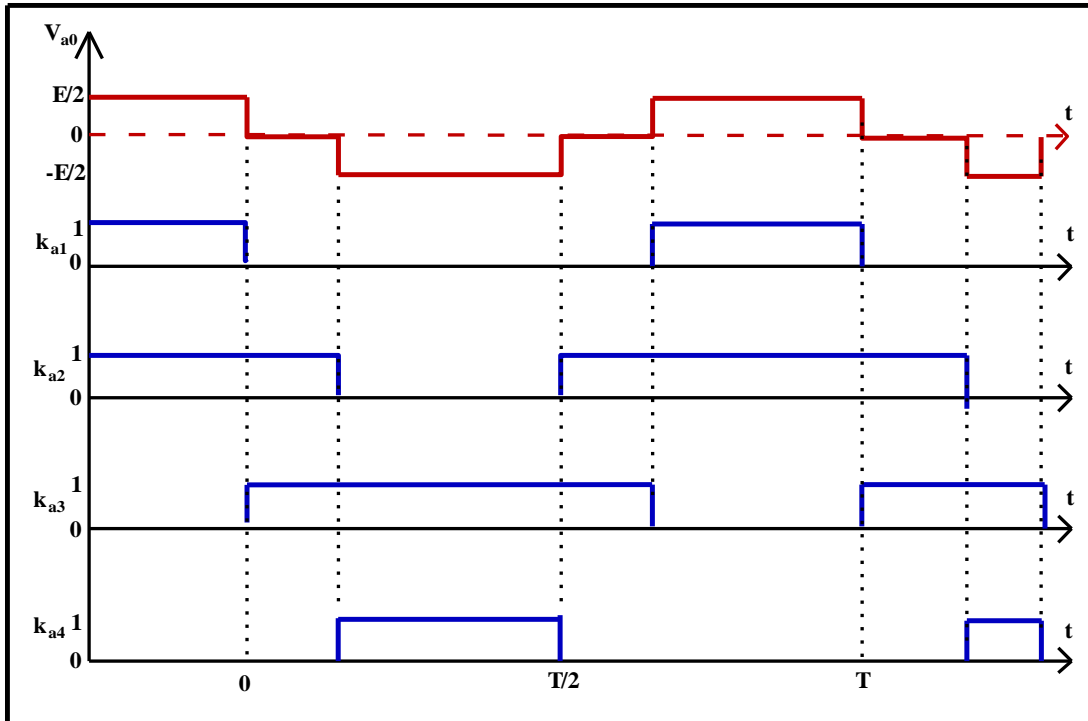


Figure 2.11: Forme d'onde de la tension de sortie d'un bras d'onduleur à trois niveaux de type NPC.

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

Donc, la tendance vers l'augmentation du nombre de niveaux est dictée par le besoin de tensions plus élevées pour les applications de forte puissance. ainsi que, plus le nombre de niveaux augmente, la tension de sortie en forme d'escalier possède plusieurs paliers. ceci permet de mieux s'approcher des sinusoïdes.

2.2.4 Modèle de la commande de l'onduleur à trois niveaux de type NPC

2.2.4.1 Commandabilité des convertisseurs statiques

Un convertisseur statique est dit en mode commandable, si les transistors entre différentes Configurations dépendent uniquement de la commande externe et non plus des commandes internes. Nous supposons dans la suite que cette condition est toujours vérifiée. Dans ces conditions, on peut définir la notion de fonction de connexion. [29]

2.2.4.2 Commande complémentaire

Pour éviter le court-circuit des sources de tension par conduction de plusieurs interrupteurs, et pour que le convertisseur soit totalement commandable, on adopte une commande complémentaire.

Pour un bras K de l'onduleur triphasé à trois niveaux, et en mode commandable, on définit les trois commandes complémentaires comme suit [27]:

$$\begin{cases} B_{K1} = \overline{B_{K2}} \\ B_{K3} = \overline{B_{K4}} \end{cases} \quad \begin{cases} B_{K1} = \overline{B_{K3}} \\ B_{K2} = \overline{B_{K4}} \end{cases} \quad \begin{cases} B_{K1} = \overline{B_{K4}} \\ B_{K2} = \overline{B_{K3}} \end{cases} \quad (2.12)$$

1) Commande N° 1

Soit la commande complémentaire suivante $\begin{cases} B_{K1} = \overline{B_{K2}} \\ B_{K3} = \overline{B_{K4}} \end{cases}$

B_{KS} : Commande du transistor T_{KS} du bras K

Tableau 2.2: La table logique correspondante à cette commande est définie comme suit :

B_{K1}	B_{K2}	B_{K3}	B_{K4}	Tension de sortie du bras K (V_{a0})
Off	On	Off	On	Inconnue (dépend de la charge)
Off	On	On	Off	V=0 ou I=0 (inconnue)
On	Off	Off	On	V=0 ou I=0 (inconnue)
On	Off	On	Off	V=0

Cette commande rend le système pratiquement incommandable.

2) Commande N°2

Soit la commande complémentaire suivante $\begin{cases} B_{K1} = \overline{B_{K3}} \\ B_{K2} = \overline{B_{K4}} \end{cases}$

Tableau 2.3: La table logique correspondante à cette commande est définie comme suit:

B_{K1}	B_{K2}	B_{K3}	B_{K4}	V_{a0}
Off	Off	On	On	$-U_{c2} = -E/2$
Off	On	On	Off	(inconnue)
On	Off	Off	On	(inconnue)
On	On	Off	Off	$U_{c1} = E/2$

La commande dans ce cas n'est possible qu'à deux niveaux.

3) Commande N°3

Soit la commande complémentaire suivante $\begin{cases} B_{K1} = \overline{B_{K4}} \\ B_{K2} = \overline{B_{K3}} \end{cases}$

Tableau 2.4: La table logique correspondante à cette commande est définie comme suit :

B_{K1}	B_{K2}	B_{K3}	B_{K4}	V_{a0}
Off	Off	On	On	$-U_{c2} = E/2$
Off	On	Off	On	(inconnue)
On	Off	On	Off	$V=0$
On	On	Off	Off	$U_{c1} = E/2$

Cette commande complémentaire rend le système totalement commandable à trois niveaux

La commande N°3 est la seule qui permet d'exploiter les trois niveaux de tension de sortie possible pour un bras ($U_{c1}, 0, -U_{c2}$), avec $U_{c1} = U_{c2} = \frac{E}{2}$

C'est cette commande qui va être adoptée pour la modélisation de l'onduleur à trois niveaux.

2.2.5 Fonctions de connexion

La fonction de connexion F_{KS} traduit l'état ouvert ou fermé de l'interrupteur TD_{KS} . Chaque interrupteur K_{KS} ($K \in (1, 2, 3), S \in (1, 2, 3)$), supposé idéal introduit une fonction de connexion F_{KS} .

$$F_{KS} = \begin{cases} 1 & \text{Si l'interrupteur } K_{KS} \text{ est fermé} \\ 0 & \text{Si l'interrupteur } K_{KS} \text{ est ouvert} \end{cases}$$

1) Relation entre les fonctions de connexion

Ainsi les fonctions de connexion des interrupteurs du bras K sont liées par les relations suivantes :

$$\begin{cases} F_{K1} = 1 - F_{K4} \\ F_{K2} = 1 - F_{K3} \end{cases} \quad (2.13)$$

2) Relation entre les fonctions des demi-bras

On définit la fonction de connexion du demi-bras qu'on notera F_{KM}^b avec K : numéro du bras, M = 1 pour le demi-bras du haut et M = 0 pour le demi-bras du bas.

Pour un bras K, les fonctions de connexions des demi-bras s'expriment au moyen des fonctions de connexion des interrupteurs comme suit :

$$\begin{cases} F_{K1}^b = F_{K1} \cdot F_{K2} \\ F_{K0}^b = F_{K4} \cdot F_{K3} \end{cases} \quad (2.14)$$

F_{K1}^b est associé au demi-bras du haut (la paire (K_{K1}, K_{K2})).

F_{K0}^b est associé au demi-bras du bas (la paire (K_{K3}, K_{K4})).

2.2.6 Modélisation des valeurs instantanées

Cette modélisation sera effectuée en considérant l'association de l'onduleur de tension triphasé avec une charge triphasé équilibrée.

- ✓ Tension simple aux bornes de chaque phase de la charge : V_a, V_b, V_c ;
- ✓ Tension entre le point milieu « i » de chaque bras de l'onduleur et le point neutre « o » de l'alimentation continue de l'onduleur : V_{ao}, V_{bo}, V_{co}
- ✓ Charge triphasée équilibrée couplée en étoile.

a) Les potentiels V_{io}

Les potentiels des nœuds A, B, C de l'onduleur triphasé à trois niveaux par rapport au point milieu M, s'expriment comme suit :

$$\begin{cases} V_{ao} = F_{11} \cdot F_{12} \cdot U_{C1} - F_{13} \cdot F_{14} \cdot U_{C2} = (F_{11} \cdot F_{12} - F_{13} \cdot F_{14}) \cdot E/2 \\ V_{bo} = F_{21} \cdot F_{22} \cdot U_{C1} - F_{23} \cdot F_{24} \cdot U_{C2} = (F_{21} \cdot F_{22} - F_{23} \cdot F_{24}) \cdot E/2 \\ V_{co} = F_{31} \cdot F_{32} \cdot U_{C1} - F_{33} \cdot F_{34} \cdot U_{C2} = (F_{31} \cdot F_{32} - F_{33} \cdot F_{34}) \cdot E/2 \end{cases} \quad (2.15)$$

Pour l'onduleur triphasé à trois niveaux, les fonctions de connexions des demi-bras sont définies selon les relations suivantes :

$$\begin{cases} F_{11}^b = F_{11} \cdot F_{12} & F_{21}^b = F_{21} \cdot F_{22} & F_{31}^b = F_{31} \cdot F_{32} \\ F_{10}^b = F_{13} \cdot F_{14} & F_{20}^b = F_{23} \cdot F_{24} & F_{30}^b = F_{33} \cdot F_{34} \end{cases} \quad (2.16)$$

La forme matricielle obtenue révèle que l'onduleur à trois niveaux est équivalent à une mise en série de deux onduleurs à deux niveaux de plus si on suppose que: $U_{C1} = U_{C2} = E/2$

(E: tension continu délivrée par l'étage continu), on aboutit à:

En traduisant ces fonctions de connexions des demis bras dans le système (2.15) on aboutit à :

$$\begin{cases} V_{ao} = F_{11}^b \cdot U_{C1} - F_{10}^b \cdot U_{C2} = (F_{11}^b - F_{10}^b) \cdot E/2 \\ V_{bo} = F_{21}^b \cdot U_{C1} - F_{20}^b \cdot U_{C2} = (F_{21}^b - F_{20}^b) \cdot E/2 \\ V_{co} = F_{31}^b \cdot U_{C1} - F_{30}^b \cdot U_{C2} = (F_{31}^b - F_{30}^b) \cdot E/2 \end{cases} \quad (2.17)$$

Ou la forme matricielle:

$$\begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11}^b - F_{10}^b \\ F_{21}^b - F_{20}^b \\ F_{31}^b - F_{30}^b \end{bmatrix} U_C \quad (2.18)$$

b) Tensions de sorties

Le système d'équation (2.17) nous permet d'avoir les tensions de sortie de l'onduleur à trois niveaux qui s'expriment en fonction des deux tensions d'entrées U_{C1} et U_{C2}

On peut considérer l'onduleur à trois niveaux comme étant l'association en série de deux onduleurs à deux niveaux et chaque bras de l'un de ces onduleurs sera un demi-bras de l'onduleur à trois niveaux.

Dans ces conditions, nous pourrions définir le modèle liant les fonctions des demi-bras et les tensions aux bornes de la charge V_A, V_B, V_C .

c) Tensions composées

Les différentes tensions composées de l'onduleur triphasé à trois niveaux s'expriment à l'aide des fonctions de connexions des interrupteurs comme suit :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} - V_{bo} = (F_{11} \cdot F_{12} - F_{21} \cdot F_{22}) \cdot U_{C1} - (F_{13} \cdot F_{14} - F_{23} \cdot F_{24}) \cdot U_{C2} \\ V_{bc} = V_{bo} - V_{co} = (F_{21} \cdot F_{22} - F_{31} \cdot F_{32}) \cdot U_{C1} - (F_{23} \cdot F_{24} - F_{33} \cdot F_{34}) \cdot U_{C2} \\ V_{ca} = V_{co} - V_{ao} = (F_{31} \cdot F_{32} - F_{11} \cdot F_{12}) \cdot U_{C1} - (F_{33} \cdot F_{34} - F_{13} \cdot F_{14}) \cdot U_{C2} \end{cases} \quad (2.19)$$

Dans le cas où $U_{C1} = U_{C2} = \frac{E}{2}$ le système (2.19) devient :

$$\begin{cases} V_{ab} = [(F_{11} \cdot F_{12} - F_{21} \cdot F_{22}) - (F_{13} \cdot F_{14} - F_{23} \cdot F_{24})] \cdot \frac{E}{2} \\ V_{bc} = [(F_{21} \cdot F_{22} - F_{31} \cdot F_{32}) - (F_{23} \cdot F_{24} - F_{33} \cdot F_{34})] \cdot \frac{E}{2} \\ V_{ca} = [(F_{31} \cdot F_{32} - F_{11} \cdot F_{12}) - (F_{33} \cdot F_{34} - F_{13} \cdot F_{14})] \cdot \frac{E}{2} \end{cases} \quad (2.20)$$

Les différentes tensions composées de l'onduleur triphasé à trois niveaux s'expriment à l'aide des fonctions des demi-bras comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} U_{C1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} U_{C2} \right\} \quad (2.21)$$

Dans le cas où $U_{C1} = U_{C2}$, cette relation se réduit à :

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11}^b - F_{10}^b \\ F_{21}^b - F_{20}^b \\ F_{31}^b - F_{30}^b \end{bmatrix} \cdot \frac{E}{2} \quad (2.22)$$

d) Tensions simples

Les tensions simples de sorties de l'onduleur se déduisent en fonction des potentiels des neuds par rapport au point milieu par la relation suivante :

$$V_a + V_b + V_c = 0 \quad (2.23)$$

$$\begin{cases} V_a = (2V_{ao} - V_{bo} - V_{co})/3 \\ V_b = (-V_{ao} + 2V_{bo} - V_{co})/3 \\ V_c = (-V_{ao} - V_{bo} + 2V_{co})/3 \end{cases} \quad (2.24)$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11}^b - F_{10}^b \\ F_{21}^b - F_{20}^b \\ F_{31}^b - F_{30}^b \end{bmatrix} \cdot \frac{E}{2} \quad (2.25)$$

e) Courants d'entrée

En utilisant les fonctions de connexion des interrupteurs pour trouver des courants d'entrée continus (I_{d1}, I_{d2}, I_{d0}) de l'onduleur à trois niveaux en fonctions des courants alternatifs de la charge

I_a, I_b, I_c s'expriment comme suit :

$$\begin{cases} I_{d1} = F_{11} \cdot F_{12} \cdot I_a + F_{21} \cdot F_{22} \cdot I_b + F_{31} \cdot F_{32} \cdot I_c \\ I_{d2} = F_{11} \cdot F_{12} \cdot I_a + F_{23} \cdot F_{24} \cdot I_b + F_{33} \cdot F_{34} \cdot I_c \\ I_{d0} = F_{12} \cdot F_{13} \cdot I_a + F_{22} \cdot F_{23} \cdot I_b + F_{32} \cdot F_{33} \cdot I_c \end{cases} \quad (2.26)$$

Le système (2.26) devient en remplaçant les fonctions de connexion des interrupteurs par les fonctions de connexion de demi-bras :

$$\begin{cases} I_{d1} = F_{11}^b \cdot I_a + F_{21}^b \cdot I_b + F_{31}^b \cdot I_c \\ I_{d2} = F_{10}^b \cdot I_a + F_{20}^b \cdot I_b + F_{30}^b \cdot I_c \end{cases} \quad (2.27)$$

Le courant I_{d0} s'exprime en fonction des courants d'entrées (I_{d1}, I_{d2}) et des courants de charges I_a, I_b, I_c par la relation :

$$I_{d0} + I_{d1} + I_{d2} = I_a + I_b + I_c \quad (2.28)$$

Si on remplace les courants continus (I_{d1} et I_{d2}) par leurs expressions relatives, on obtient:

$$I_{d0} = (I_a + I_b + I_c) - (F_{11}^b \cdot F_{10}^b)I_a - (F_{21}^b \cdot F_{20}^b)I_b - (F_{31}^b \cdot F_{30}^b)I_c \quad (2.29)$$

On aboutit à la forme matricielle suivante:

$$\begin{bmatrix} I_{d1} \\ I_{d2} \\ I_{d0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11}^b & F_{21}^b & F_{31}^b \\ F_{10}^b & F_{20}^b & F_{30}^b \\ 1 - F_{11}^b - F_{10}^b & 1 - F_{21}^b - F_{20}^b & 1 - F_{31}^b - F_{30}^b \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

f) Matrice de conversion simple [N(t)]

Si on choisi comme variables d'états pour l'ensemble, sources de tension continues, onduleur de tension à trois niveaux et charge triphasée à caractère inductive, le vecteur d'état suivant :

$$X = [U_{C1} U_{C2} I_a I_b I_c]^t \quad (2.31)$$

Et comme variables d'internes, le vecteur suivant :

$$U_{sim} = [V_a V_b V_c I_{d1} I_{d2} I_{d0}]^t \quad (2.32)$$

On, obtient la matrice de conversion simple $[N(t)]$, définie par la relation :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ I_{d1} \\ I_{d2} \\ I_{d0} \end{bmatrix} = [N(t)] \begin{bmatrix} U_{C1} \\ U_{C2} \\ I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Avec l'introduction des expressions des tensions simples (2.17), on définit la matrice de conversion simple :

$$[N(t)] = \begin{bmatrix} \left(\frac{2F_{11}^b - F_{21}^b - F_{31}^b}{3}\right) & -\left(\frac{2F_{10}^b - F_{20}^b - F_{30}^b}{3}\right) & 0 & 0 & 0 \\ \left(\frac{2F_{21}^b - F_{11}^b - F_{31}^b}{3}\right) & -\left(\frac{2F_{20}^b - F_{10}^b - F_{30}^b}{3}\right) & 0 & 0 & 0 \\ \left(\frac{2F_{31}^b - F_{21}^b - F_{11}^b}{3}\right) & \left(\frac{2F_{30}^b - F_{20}^b - F_{10}^b}{3}\right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_{11}^b & F_{21}^b & F_{31}^b \\ 0 & 0 & F_{10}^b & F_{20}^b & F_{30}^b \\ 0 & 0 & (1 - F_{11}^b - F_{10}^b) & (1 - F_{21}^b - F_{20}^b) & (1 - F_{31}^b - F_{30}^b) \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

g) Matrice de conversion composée $[M(t)]$

Si on utilise les tensions composées, le vecteur d'entrée devient :

$$U_{com} = [V_{ab} V_{bc} V_{ca} I_{d1} I_{d2} I_{d0}]^t \quad (2.35)$$

On obtient, la matrice de conversion composée $[M(t)]$:

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \\ I_{d1} \\ I_{d2} \\ I_{d0} \end{bmatrix} = [M(t)] \begin{bmatrix} U_{C1} \\ U_{C2} \\ I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

Avec l'introduction des expressions des tensions composées (2.22), on définit la matrice de conversion composée :

$$[M(t)] = \begin{bmatrix} (F_{11}^b - F_{21}^b) & -(F_{10}^b - F_{20}^b) & 0 & 0 & 0 \\ (F_{21}^b - F_{31}^b) & -(F_{20}^b - F_{30}^b) & 0 & 0 & 0 \\ (F_{31}^b - F_{11}^b) & -(F_{30}^b - F_{10}^b) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_{11}^b & F_{21}^b & F_{31}^b \\ 0 & 0 & F_{10}^b & F_{20}^b & F_{30}^b \\ 0 & 0 & (1 - F_{11}^b - F_{10}^b) & (1 - F_{21}^b - F_{20}^b) & (1 - F_{31}^b - F_{30}^b) \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

2.3 Simulation de commande MLI-ST d'un onduleur à Trois niveaux

2.3.1 Commande MLI-ST (charge RL)

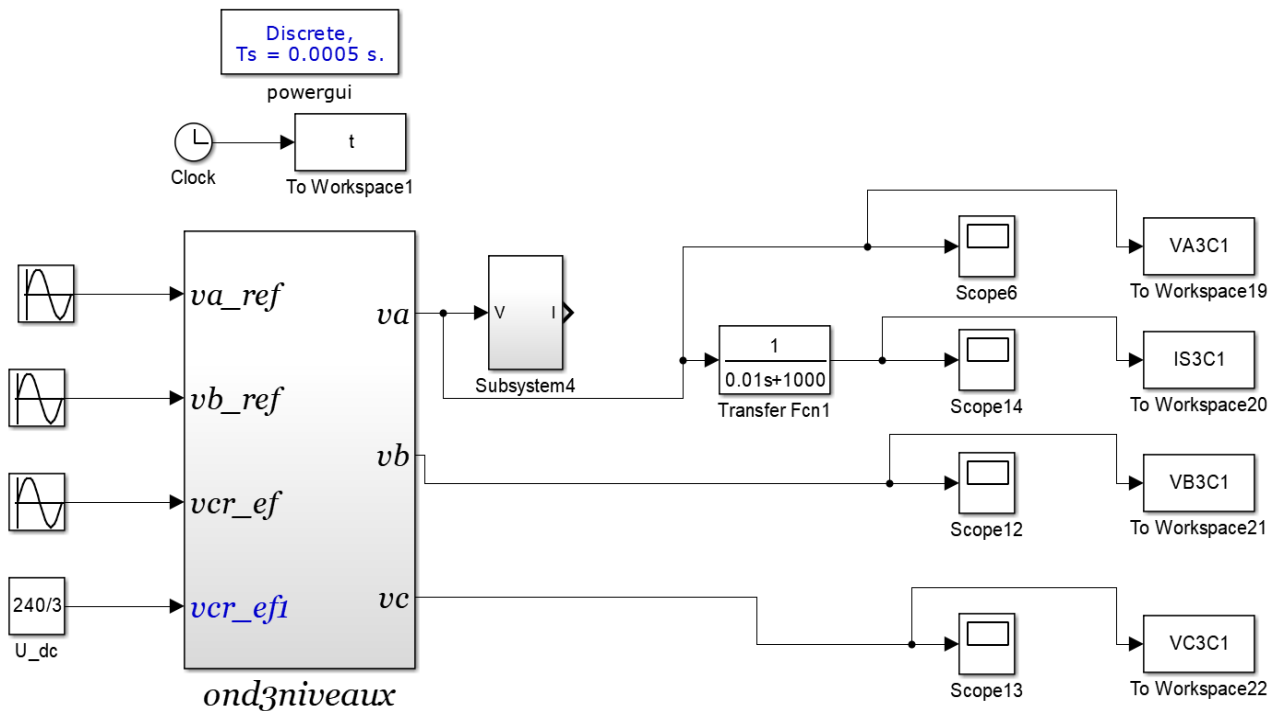
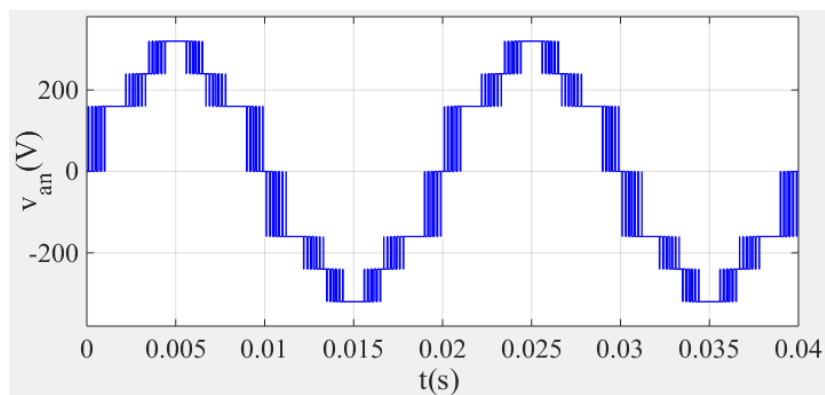
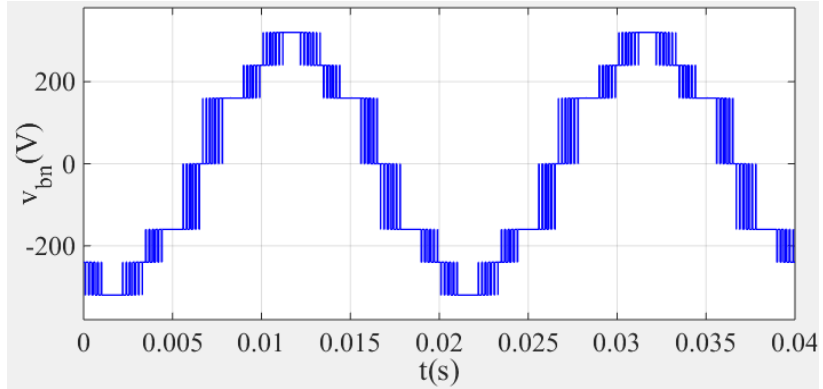


Figure 2.12: Schema bloc de la commande MLI-ST d'un onduleur 3 N charge RL.

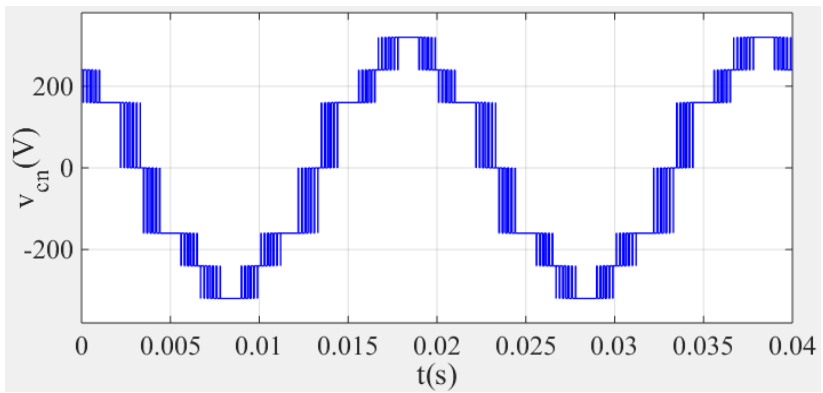
2.3.1.1 Résultats de simulation pour charge 1 ($R = 1000\Omega$, $L = 10\text{ mH}$)



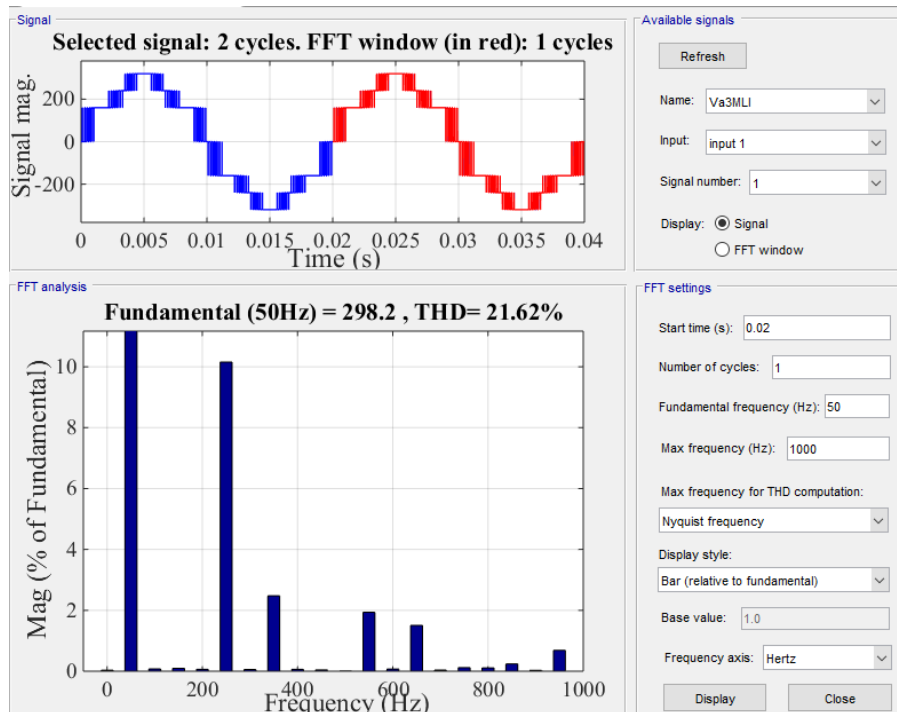
a) tension V_{an} .



b) tension V_{bn} .



c) tension V_{cn} .



d) harmonique (THD) de tension V_{an} .

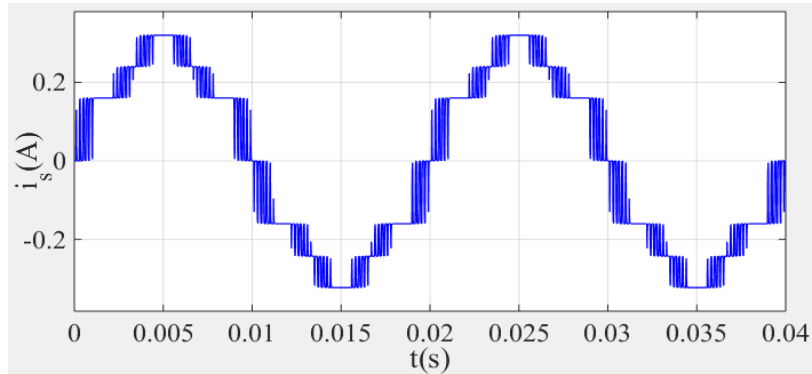
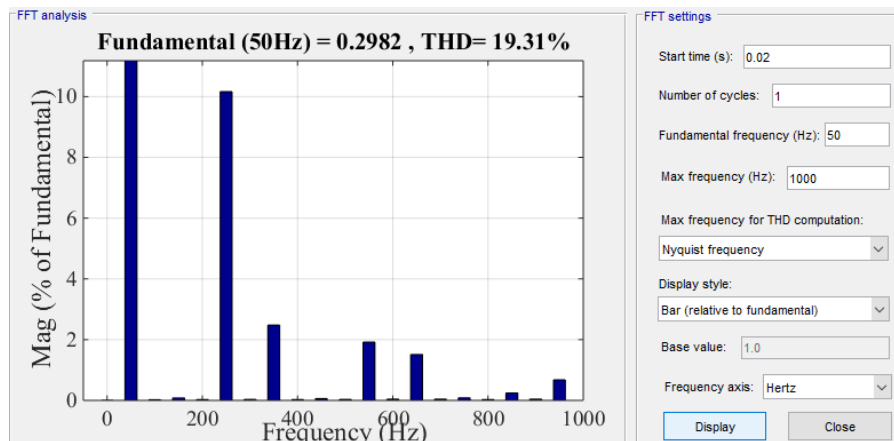
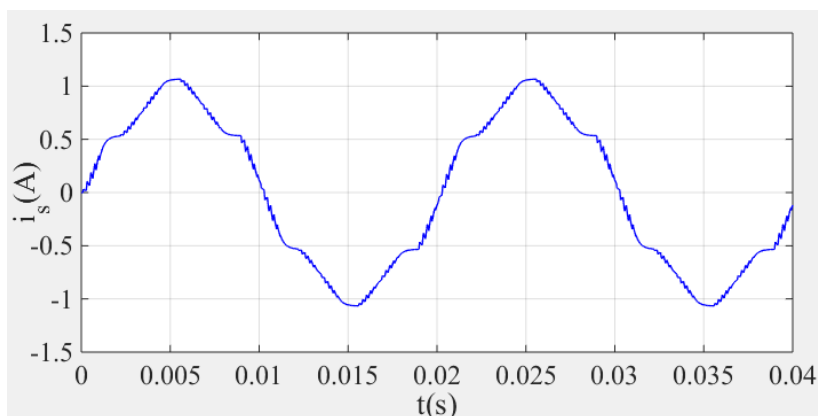
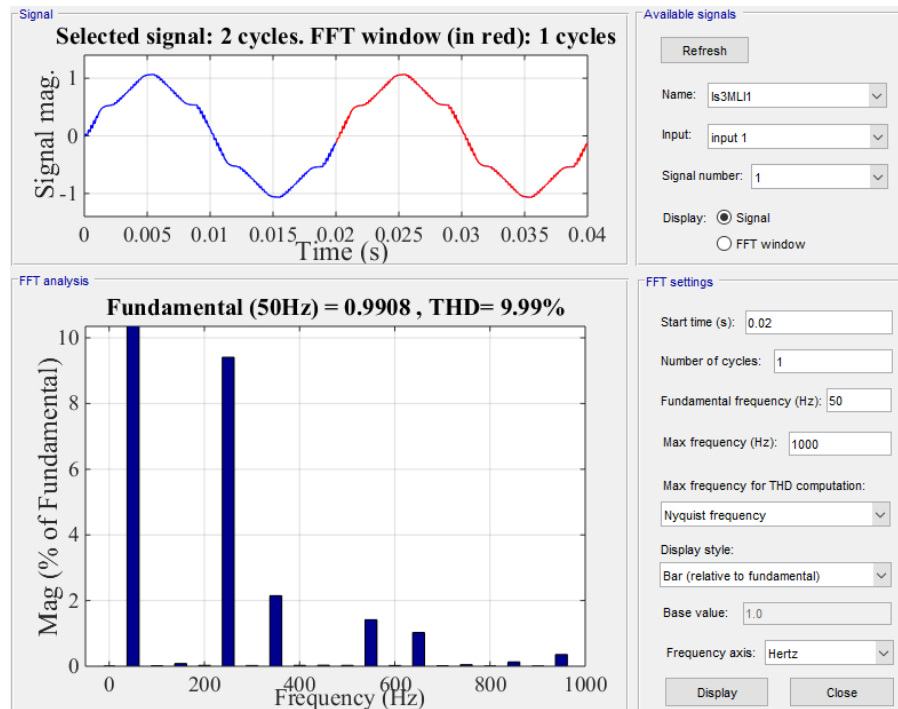
e) courant i_s .f) harmonique (THD) de courant i_s .

Figure 2.13: les résultats de simulation de commande MLI-ST charge RL (1).

2.3.1.2 Résultats de simulation pour charge 2 ($R = 300\Omega$, $L = 80\text{ mH}$)

Après la simulation nous trouvons les calculs de THD de tensions elle est la même à la charge 1. (la charge n'affecte pas la tension, au contraire il affecte la courant).

a) courant i_s .



b) harmonique (THD) de courant i_s .

Figure 2.14: les résultats de simulation de commande MLI-ST charge RL (2).

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons focalisé notre étude sur l'onduleur de tension triphasé à trois niveaux type NPC nous avons présenté en premier temps sa structure physique, sa configurations et son principe fonctionnement. ensuite, nous avons présenté le modèle de la commande et à la fin nous avons donné les résultats de simulation de la commande MLI-ST avec deux charges.

Les résultats de simulation montre que la forme de la tension est améliorée, le THD est réduit . pour plus d'amélioration de la forme de tension généré par l'onduleur, le chapitre suivante sera consacrée à l'étude et la simulation de l'onduleur cinq niveau.

Chapitre 3

Structure et Principe de fonctionnement et commande de l'onduleur NPC à cinq niveaux

3.1 Introduction

Avec le développement de l'électronique de puissance et de composante semi-conducteurs, ainsi que la structure des onduleurs multi-niveaux, que représentent des domaines de recherches importants, nous cherchons à obtenir une sortie mieux définie, c'est-à-dire présentant un contenu harmonique réduit. Il existe plusieurs topologies pour la conversion à plusieurs niveaux. La première topologie a été proposée à l'origine par A.Nabac en 1981 pour générer plusieurs niveaux de tension.

Dans ce chapitre, nous allons étudier en détail l'onduleur de tension à cinq niveaux de type NPC (structure et principe de fonctionnement), nous allons établir le modèle mathématique, en utilisant la notion de fonctions de connexion des interrupteurs et des demi-bras.

Enfin, nous allons étudier aussi la simulation de commande MLI-ST charge RL de c'est niveau (cinq niveau).

3.2 Onduleur à cinq niveaux de type NPC

3.2.1 Structure de l'onduleur à cinq niveaux

L'onduleur triphasé à cinq niveaux étudié est constitué de trois bras et quatre sources de tension continue. Chaque bras comporte huit interrupteurs, plus deux diodes. Chaque interrupteur est composé d'un transistor et une diode montés en tête bêche. La figure 3.1 donne une représentation schématique d'un bras de cet onduleur.[30]

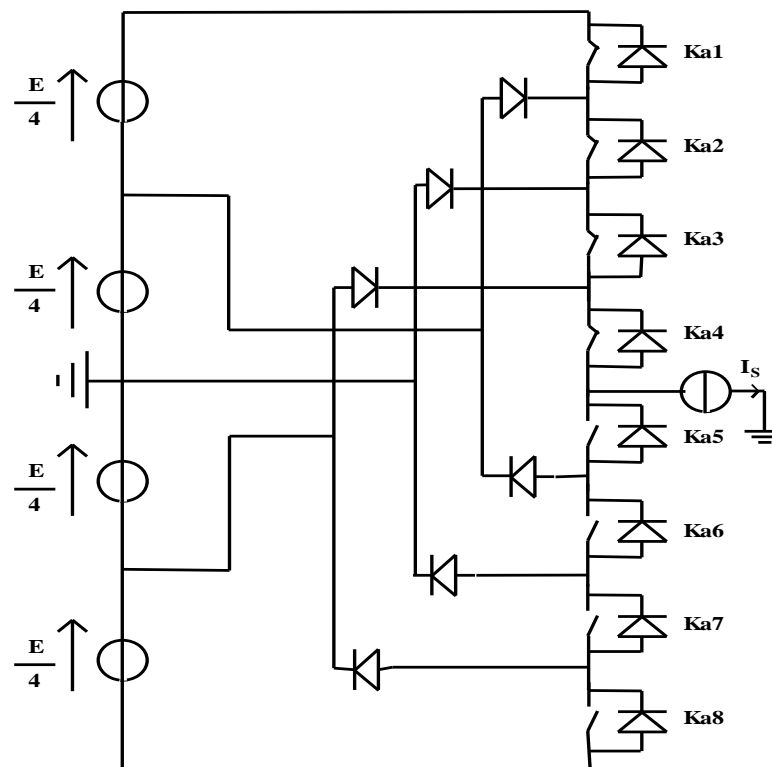


Figure 3.1: Bras d'un onduleur NPC à cinq niveaux.

3.2.2 Différentes configurations d'un bras de l'onduleur NPC à cinq niveaux

Une analyse topologique d'un bras montre cinq configurations possibles, pour définir les séquences de fonctionnements de cet onduleur, définissant d'abord les différents états que peut prendre la tension simple (la tension entre le bras de l'onduleur et le point milieu fictif), par exemple. La tension simple V_{a0} est définie par l'état de huit quadruplet qui peuvent être transistor, un GTO ou bien un IGBT ou autre avec une diode en antiparallèle. Les états possibles d'un seul bras d'interrupteurs est de $2^5 = 32$ états que l'on peut représenter par un quadruplet de 0 et 1. Seules les cinq états suivantes sont possibles. [30]

❖ Première configuration {11110000}

K_{a1}, K_{a2}, K_{a3} et K_{a4} sont passants et K_{a5}, K_{a6}, K_{a7} et K_{a8} sont bloqués (figure 3.2), la valeur de tension simple V_{a0} est donnée par l'équation suivante :

$$V_{a0} = +\frac{E}{2} \tag{3.1}$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{Ka5} = V_{Ka6} = V_{Ka7} = V_{Ka8} = +\frac{E}{4} \tag{3.2}$$

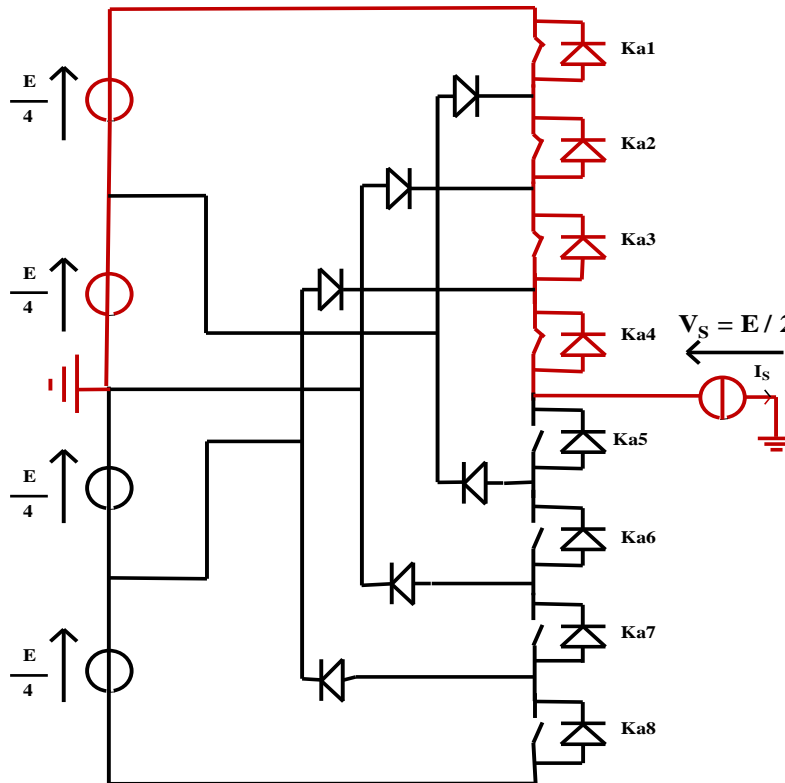


Figure 3.2: 1^{ère} configuration du 1^{er} bras.

❖ Deuxième configuration {01111000}

K_{a2} , K_{a3} , K_{a4} et K_{a5} sont passants et K_{a6} , K_{a7} , K_{a8} et K_{a1} sont bloqués (figure 3.3), la valeur de tension simple V_{a0} est donnée par l'équation suivante :

$$V_{a0} = +\frac{E}{4} \tag{3.3}$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{Ka1} = V_{Ka6} = V_{Ka7} = V_{Ka8} = +\frac{E}{4} \tag{3.4}$$

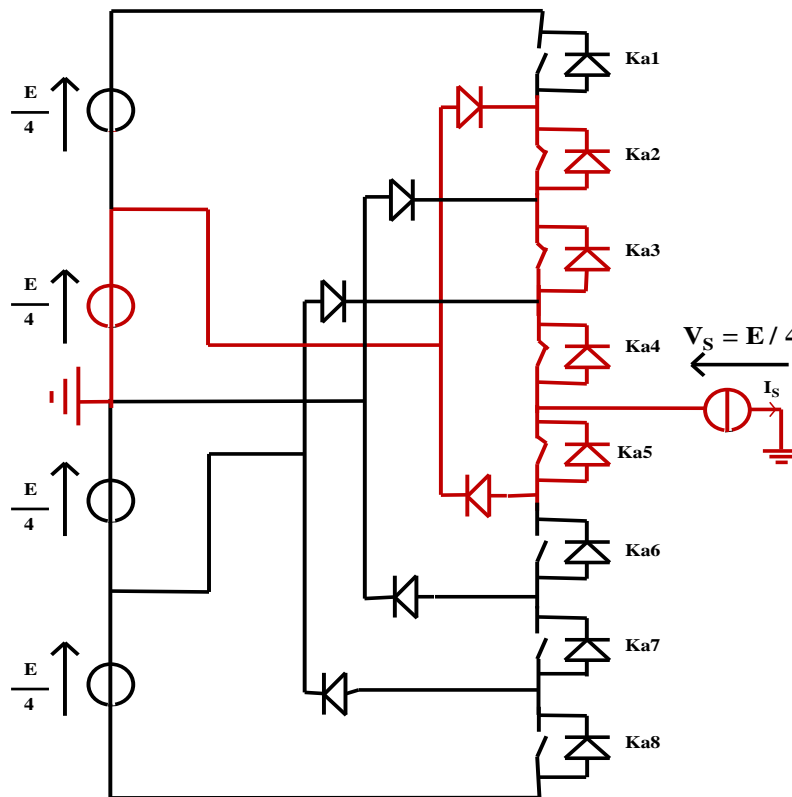


Figure 3.3: 2^{ème} configuration du 1^{er} bras.

❖ troisième configuration {00111100}

K_{a3} , K_{a4} , K_{a5} et K_{a6} sont passants et K_{a7} , K_{a8} , K_{a1} et K_{a2} sont bloqués (figure 3.4), la valeur de tension simple V_{a0} est donnée par l'équation suivante :

$$V_{a0} = 0 \tag{3.5}$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{Ka1} = V_{Ka2} = V_{Ka7} = V_{Ka8} = +\frac{E}{4} \tag{3.6}$$

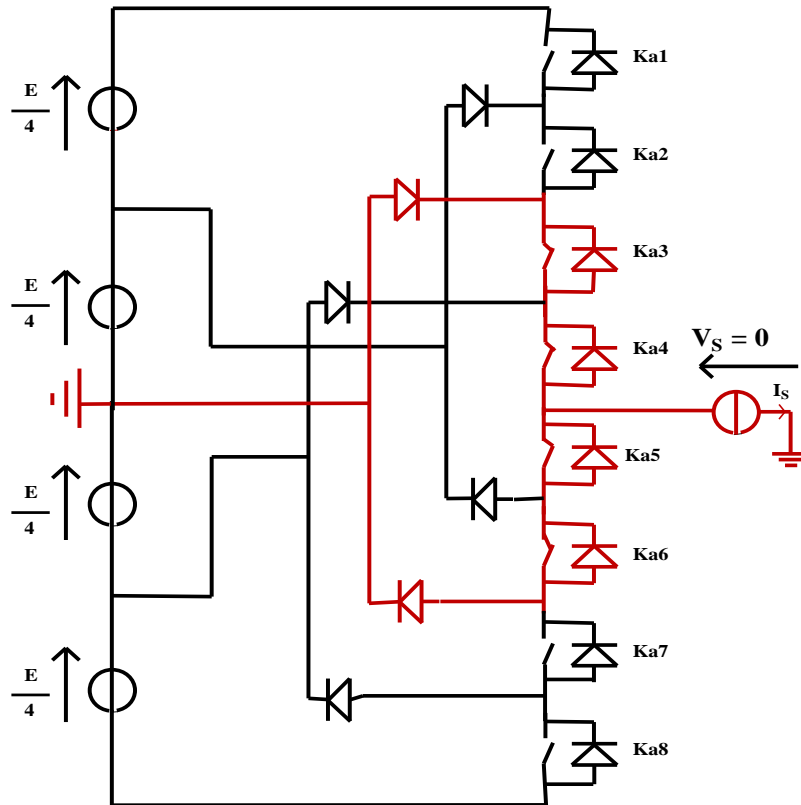


Figure 3.4: 3^{ème} configuration du 1^{er} bras.

❖ quatrième configuration {00011110}

K_{a4} , K_{a5} , K_{a6} et K_{a7} sont passants et K_{a8} , K_{a1} , K_{a2} et K_{a3} sont bloqués (figure 3.5), la valeur de tension simple V_{a0} est donnée par l'équation suivante :

$$V_{a0} = -\frac{E}{4} \tag{3.7}$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{Ka1} = V_{Ka2} = V_{Ka3} = V_{Ka8} = +\frac{E}{4} \tag{3.8}$$

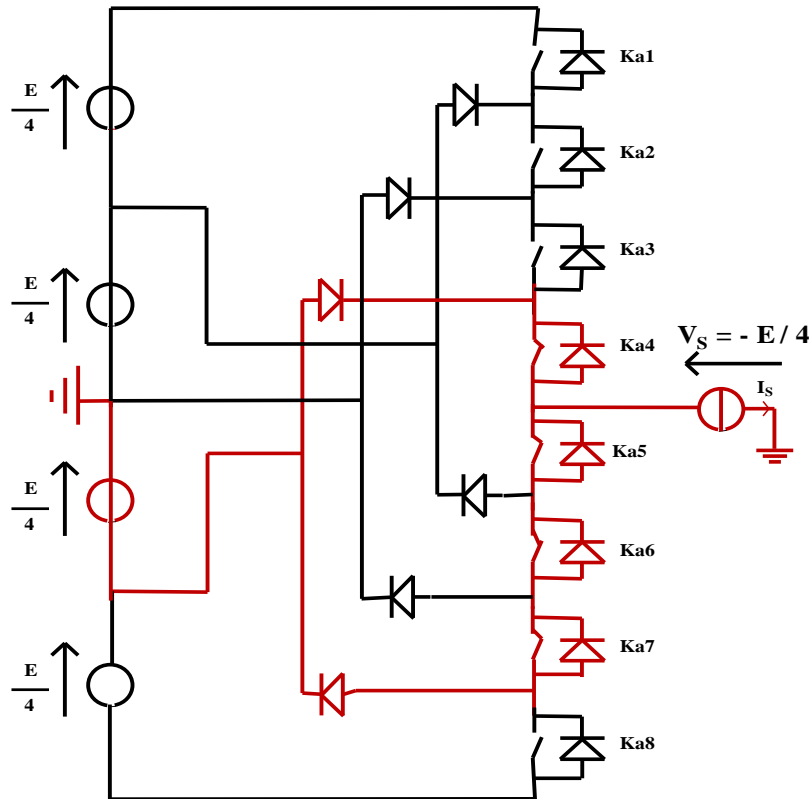


Figure 3.5: 4^{ème} configuration du 1^{er} bras.

❖ Cinquième configuration {00001111}

K_{a5} , K_{a6} , K_{a7} et K_{a8} sont passants et K_{a1} , K_{a2} , K_{a3} et K_{a4} sont bloqués (figure 3.6), la valeur de tension simple V_{a0} est donnée par l'équation suivante :

$$V_{a0} = -\frac{E}{2} \tag{3.9}$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{Ka1} = V_{Ka2} = V_{Ka3} = V_{Ka4} = +\frac{E}{4} \tag{3.10}$$

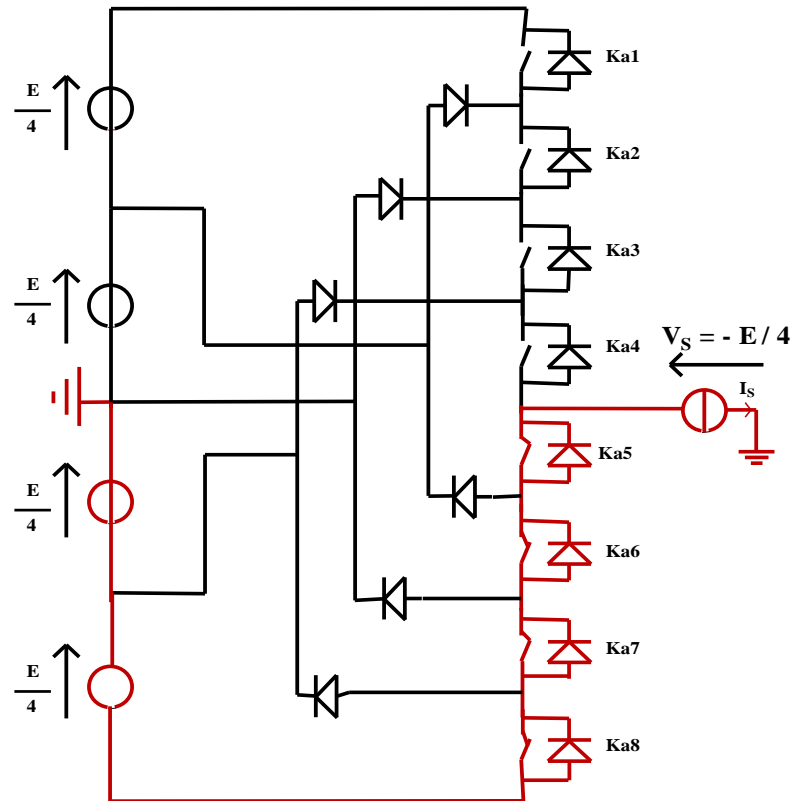


Figure 3.6: 5^{ème} configuration du 1^{er} bras.

Voici le tableau suivant qui montre les différentes tension de sortie V_{a0} et l'états des interrupteurs d'un onduleur a cinq niveau :

Etat des interrupteurs								Tension de sortie V_{a0}
K_{a1}	K_{a2}	K_{a3}	K_{a4}	K_{a5}	K_{a6}	K_{a7}	K_{a8}	
1	1	1	1	0	0	0	0	$E/2$
0	1	1	1	1	0	0	0	$E/4$
0	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	0	$-E/4$
0	0	0	0	1	1	1	1	$-E/2$

Tableau 3.1: Table de commutation de l'onduleur NPC à 5 niveaux.

La (Figure 3.7) représente les signaux de commande de chaque interrupteur, ainsi que la forme d'onde de la tension de sortie V_{a0} .

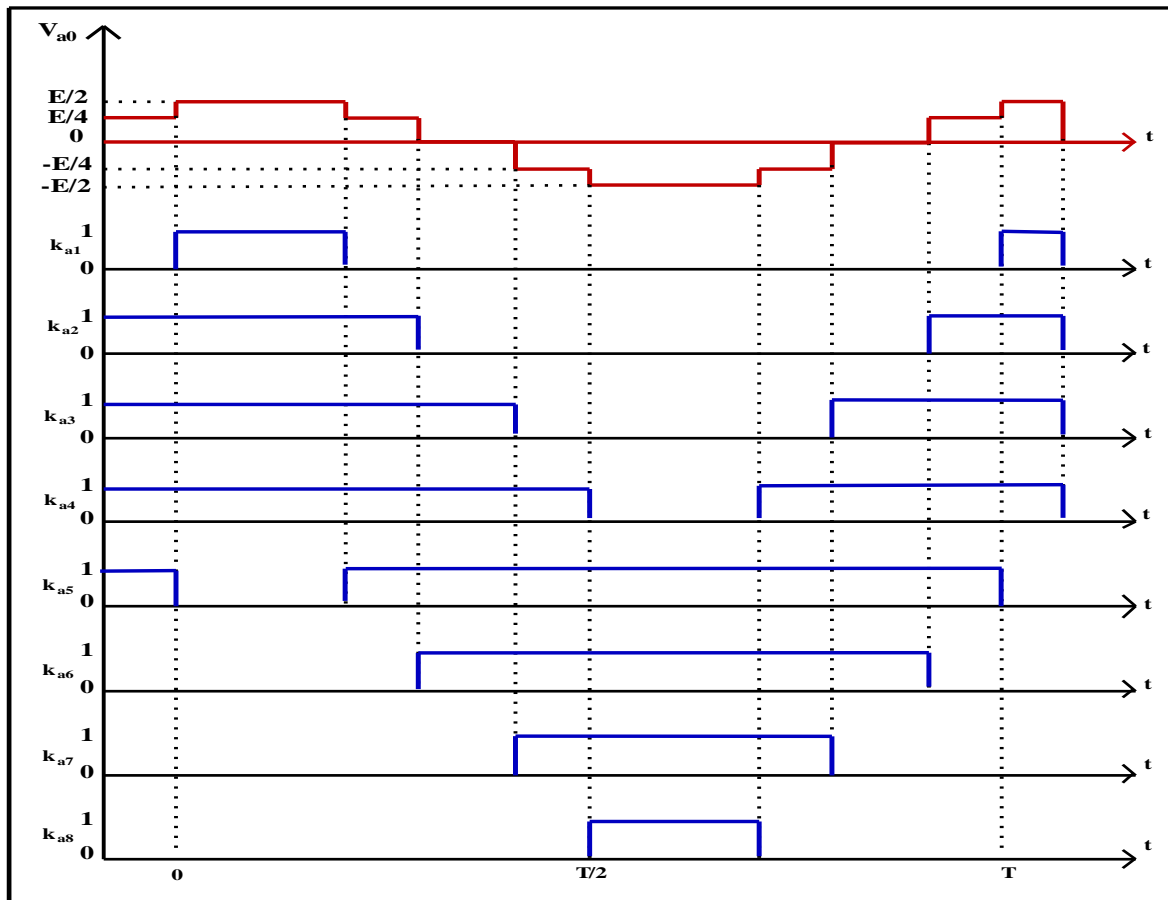


Figure 3.7: les signaux de commande de chaque interrupteur et la forme d'onde de la tension de sortie V_{a0} . [31]

3.2.3 Modélisation de l'onduleur triphasé à cinq niveaux à structure NPC. [32]

Les interrupteurs étant considérés comme parfait, le modèle de l'onduleur multi-niveau que nous avons choisi est à base d'équations mathématiques et logiques traduisant son Fonctionnement selon les chronogrammes de conduction des interrupteurs. Il constitue donc l'image même de sa commande, c'est pour cela que nous nous contentons dans cette section Du modèle de commande illustré par les signaux logiques de conduction des interrupteurs (Tableau 3.1. et Figure 3.7).

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

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{a1} = \overline{K_{a5}} \\ K_{a2} = \overline{K_{a4}} \\ K_{a3} = \overline{K_{a6}} \\ K_{a7} = K_{a1}K_{a2}\overline{K_{a3}} \\ K_{a1} = K_{a4}K_{a5}\overline{K_{a6}} \end{array} \right. \quad (3.11)$$

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

$$K_{as} = 1 \text{ Si } T_{ks} \text{ est fermée}$$

Ou

$$K_{as} = 0 \text{ Si } T_{ks} \text{ est ouvert.}$$

3.2.4 Expressions des tensions V_{an} , V_{bn} , V_{cn} en fonction des tensions V_{a0} , V_{b0} , V_{c0}

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

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (3.12)$$

En outre en appliquant la loi des mailles nous obtenons :

$$\begin{cases} V_{a0} = V_{an} + V_{n0} \\ V_{b0} = V_{bn} + V_{n0} \\ V_{c0} = V_{cn} + V_{n0} \end{cases} \quad (3.13)$$

(3.12)et (3.13) donnent :

$$V_{n0} = -\frac{1}{3}(V_{an} + V_{bn} + V_{cn}) \quad (3.14)$$

Finalement de (3.12) et (3.14) nous tirons :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & -2 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

3.3 Modélisation en vue de la commande d'onduleur cinq niveaux NPC

3.3.1 Fonction de connexion des interrupteurs

On associe une fonction F_{KS} à chaque interrupteur, qui décrit son état fermé ou ouvert, tel que [33][34] :

$$F_{KS} = \begin{cases} 1 & \text{Si l'interrupteur } K_{KS} \text{ est fermé} \\ 0 & \text{Si l'interrupteur } K_{KS} \text{ est ouvert} \end{cases} \quad (3.16)$$

3.3.2 Commande complémentaire

En utilisant la commande complémentaire (3.11), les fonctions de connexion des interrupteurs du bras k sont liées par les relations suivantes :

$$\begin{cases} F_{K1} = 1 - F_{K5} \\ F_{K2} = 1 - F_{K4} \\ F_{K3} = 1 - F_{K6} \\ F_{K7} = F_{K1}F_{K2}\overline{F_{K3}} \\ F_{K8} = F_{K4}F_{K5}\overline{F_{K6}} \end{cases} \quad (3.17)$$

3.3.3 Fonction de connexion du demi-bras

On définit pour l'onduleur à cinq niveaux une fonction logique de connexion du demi-bras notée F_{KM}^b tel que [35][36] :

k Indice du bras ($k = 1, 2, 3$).

$$M = \begin{cases} 0 & \text{pour le demi-bras du bas} \\ 1 & \text{pour le demi-bras du haut} \end{cases} \quad (3.18)$$

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

$$\begin{cases} F_{11}^b = F_{11}F_{12}F_{13} \\ F_{10}^b = F_{14}F_{15}F_{16} \end{cases} \begin{cases} F_{21}^b = F_{21}F_{22}F_{23} \\ F_{20}^b = F_{24}F_{25}F_{26} \end{cases} \begin{cases} F_{31}^b = F_{31}F_{32}F_{33} \\ F_{30}^b = F_{34}F_{35}F_{36} \end{cases} \quad (3.19)$$

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

$$\begin{cases} F_{K7}^b = F_{K1}F_{K2}(1 - F_{K3}) \\ F_{K8}^b = F_{K4}F_{K5}(1 - F_{K6}) \end{cases} \quad (3.20)$$

3.3.4 Modélisation aux valeurs instantanées

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

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

- ✓ Les tensions d'entrée de l'onduleur sont supposées parfaites. Veux dire que ; quel que soit le courant i_k émis par cette alimentation, la tension à ses bornes reste constante ($U_{C1} = U_{C2} = U_{C3} = U_{C4} = E/4$).
- ✓ Le convertisseur est contrôlable c'est-à-dire que les transitions entre les différentes configurations dépendent que du contrôle externe B_{Ki} .
- ✓ La chute de tension aux bornes des semi-conducteurs est négligeable devant U_{Cj} ($j=1, 2, 3,4$).
- ✓ La charge est triphasée équilibrée, couplée on étoile avec le neutre isolé. D'ou :

$$\begin{cases} i_A + i_B + i_C = 0 \\ V_A + V_B + V_C = 0 \end{cases} \quad (3.21)$$

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

$$\begin{cases} V_{AM} = F_{11}F_{12}(1 - F_{13})U_{C1} + F_{11}F_{12}F_{13}(U_{C1} + U_{C2}) - F_{14}F_{15}(1 - F_{16})U_{C3} - F_{14}F_{15}F_{16}(U_{C3} + U_{C4}) \\ V_{BM} = F_{21}F_{22}(1 - F_{23})U_{C1} + F_{21}F_{22}F_{23}(U_{C1} + U_{C2}) - F_{24}F_{25}(1 - F_{26})U_{C3} - F_{24}F_{25}F_{26}(U_{C3} + U_{C4}) \\ V_{CM} = F_{31}F_{32}(1 - F_{33})U_{C1} + F_{31}F_{32}F_{33}(U_{C1} + U_{C2}) - F_{34}F_{35}(1 - F_{36})U_{C3} - F_{34}F_{35}F_{36}(U_{C3} + U_{C4}) \end{cases} \quad (3.22)$$

Pour les tensions simples on a :

$$\begin{cases} V_A = V_{AN} = V_{AM} - V_{NM} \\ V_B = V_{BN} = V_{BM} - V_{NM} \\ V_C = V_{CN} = V_{CM} - V_{NM} \end{cases} \quad (3.23)$$

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

$$V_{AM} + V_{BM} + V_{CM} = V_A + V_B + V_C + 3V_{NM} \quad (3.24)$$

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

$$V_{NM} = \frac{1}{3}(V_{AM} + V_{BM} + V_{CM}) \quad (3.25)$$

À partir des équations (3.23) et (3.24) on a :

$$\begin{cases} V_A = V_{AM} - \frac{1}{3}(V_{AM} + V_{BM} + V_{CM}) = \frac{1}{3}(2V_{AM} - V_{BM} - V_{CM}) \\ V_B = V_{BM} - \frac{1}{3}(V_{AM} + V_{BM} + V_{CM}) = \frac{1}{3}(-V_{AM} + 2V_{BM} - V_{CM}) \\ V_C = V_{CM} - \frac{1}{3}(V_{AM} + V_{BM} + V_{CM}) = \frac{1}{3}(-V_{AM} - V_{BM} + 2V_{CM}) \end{cases} \quad (3.26)$$

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

$$\begin{bmatrix} V_{AM} \\ V_{BM} \\ V_{CM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{17} + F_{11}^b \\ F_{27} + F_{21}^b \\ F_{37} + F_{31}^b \end{bmatrix} U_{C1} + \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} U_{C2} - \begin{bmatrix} F_{18} + F_{10}^b \\ F_{28} + F_{20}^b \\ F_{38} + F_{30}^b \end{bmatrix} U_{C3} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} U_{C4} \quad (3.27)$$

D'après l'équation (3.27), on peut déduire que l'onduleur à cinq niveaux est une mise en série de quatre onduleurs à deux niveaux ou de deux onduleurs à trois niveaux.

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

$$\begin{bmatrix} V_{AM} \\ V_{BM} \\ V_{CM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{17} + 2F_{11}^b - F_{18} - 2F_{10}^b \\ F_{27} + 2F_{21}^b - F_{28} - 2F_{20}^b \\ F_{37} + 2F_{31}^b - F_{38} - 2F_{30}^b \end{bmatrix} U_C \quad (3.28)$$

Les tensions composées s'expriment comme suit :

$$\begin{cases} U_{AB} = V_{AM} - V_{BM} \\ U_{BC} = V_{BM} - V_{CM} \\ U_{CA} = V_{CM} - V_{AM} \end{cases} \quad (3.29)$$

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

$$\begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{17} + 2F_{11}^b - F_{18} - 2F_{10}^b \\ F_{27} + 2F_{21}^b - F_{28} - 2F_{20}^b \\ F_{37} + 2F_{31}^b - F_{38} - 2F_{30}^b \end{bmatrix} U_C \quad (3.30)$$

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

$$\begin{cases} V_{AN} = V_A = \frac{1}{3}(U_{AB} - U_{CA}) \\ V_{BN} = V_B = \frac{1}{3}(U_{BC} - U_{AB}) \\ V_{CN} = V_C = \frac{1}{3}(U_{CA} - U_{BC}) \end{cases} \quad (3.31)$$

Et donc, en fonctions de connexions sous la forme :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{17} + 2F_{11}^b - F_{18} - 2F_{10}^b \\ F_{27} + 2F_{21}^b - F_{28} - 2F_{20}^b \\ F_{37} + 2F_{31}^b - F_{38} - 2F_{30}^b \end{bmatrix} U_C \quad (3.32)$$

Les courants d'entrée i_{d1} , i_{d2} , i_{d3} , i_{d4} , i_{d0} de l'onduleur à cinq niveaux sont liés aux courants i_1 , i_2 , i_3 de la charge par les expressions qui suivent :

$$\begin{cases} i_{d1} = F_{17}i_1 + F_{27}i_2 + F_{37}i_3 \\ i_{d2} = F_{11}^b i_1 + F_{21}^b i_2 + F_{31}^b i_3 \\ i_{d3} = F_{18}i_1 + F_{28}i_2 + F_{38}i_3 \\ i_{d4} = F_{10}^b i_1 + F_{20}^b i_2 + F_{30}^b i_3 \end{cases} \quad (3.33)$$

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

$$i_{d0} = [1 - (F_{17} + F_{18} + F_{11}^b + F_{10}^b) \cdot i_1] + [1 - (F_{27} + F_{28} + F_{21}^b + F_{20}^b) \cdot i_2] + [1 - (F_{37} + F_{38} + F_{31}^b + F_{30}^b) \cdot i_3] \quad (3.34)$$

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

$$[U_{C1}U_{C2}U_{C3}U_{C4}i_1i_2i_3]^t \quad (3.35)$$

Et ces entrées internes sont :

$$[V_A V_B V_C i_{d1} i_{d2} i_{d3} i_{d4} i_{d0}]^t \quad (3.36)$$

3.4 Simulation de commande MLI-ST d'un onduleur à cinq niveaux

3.4.1 commande MLI-ST charge (RL)

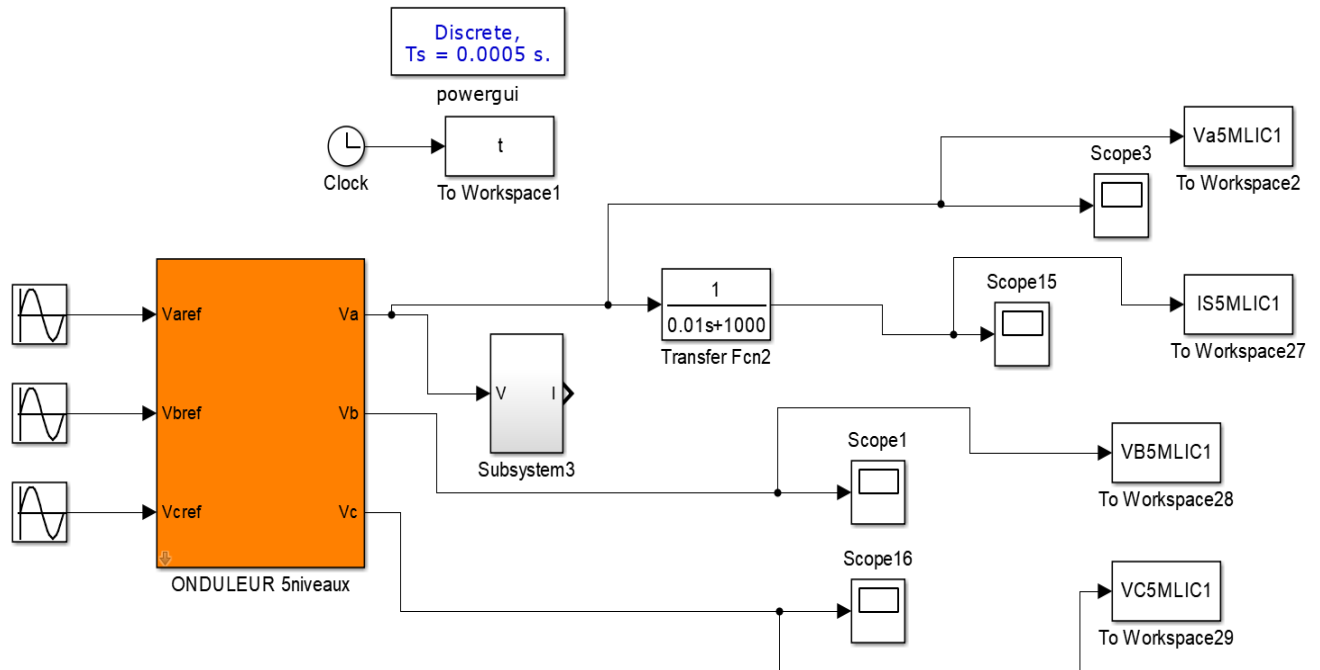
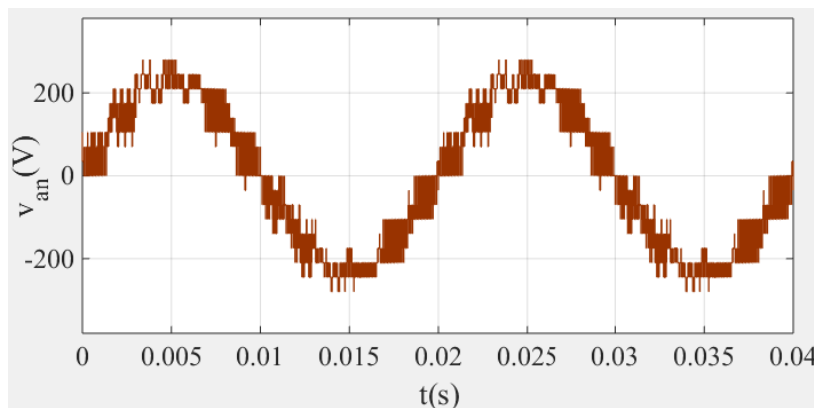


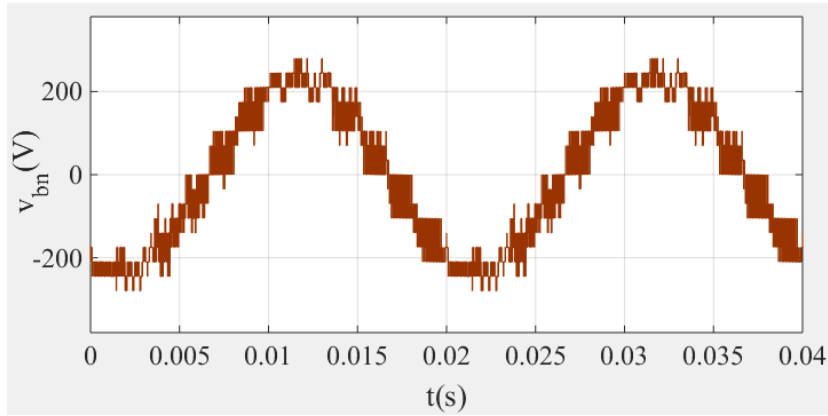
Figure 3.8: Schema bloc de la commande MLI-ST d'un onduleur 5 N charge RL.

3.4.1.1 Résultats de simulation pour charge 1

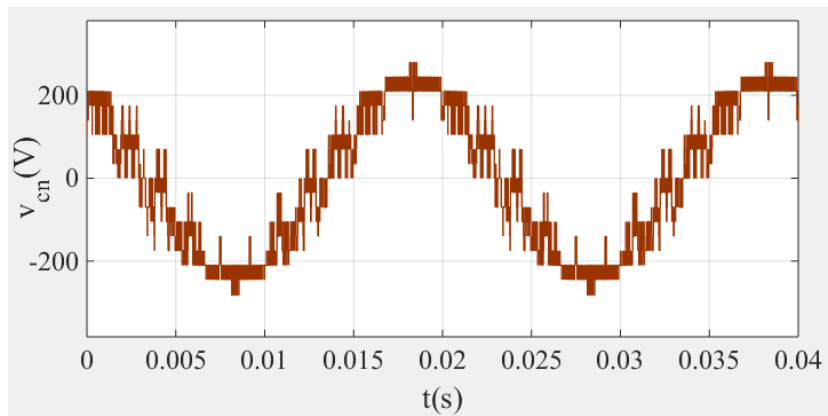
charge 1: ($R = 1000\Omega$, $L = 10\text{ mH}$)



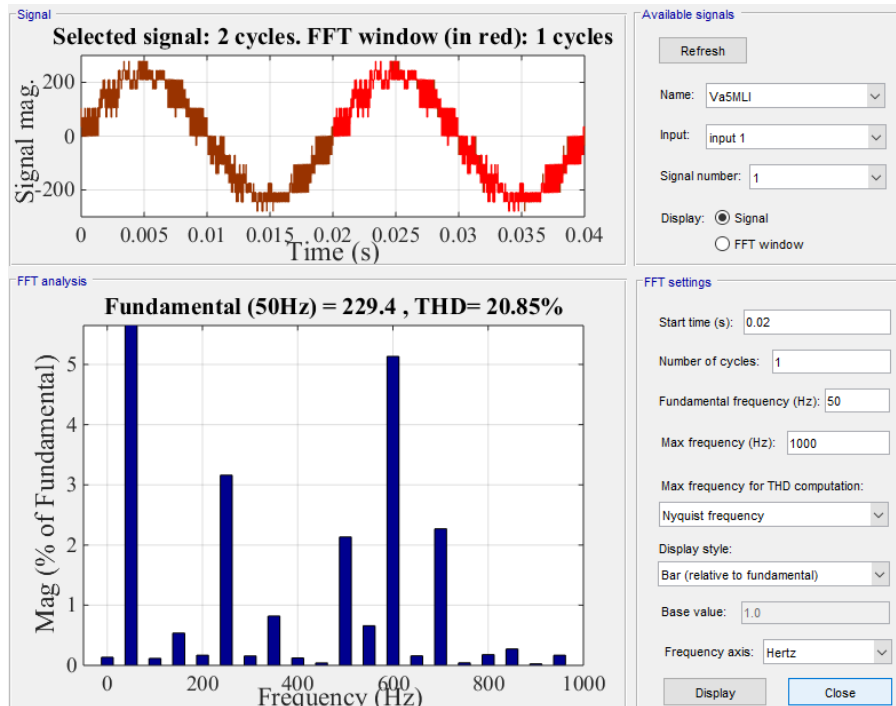
a) tension V_{an} .



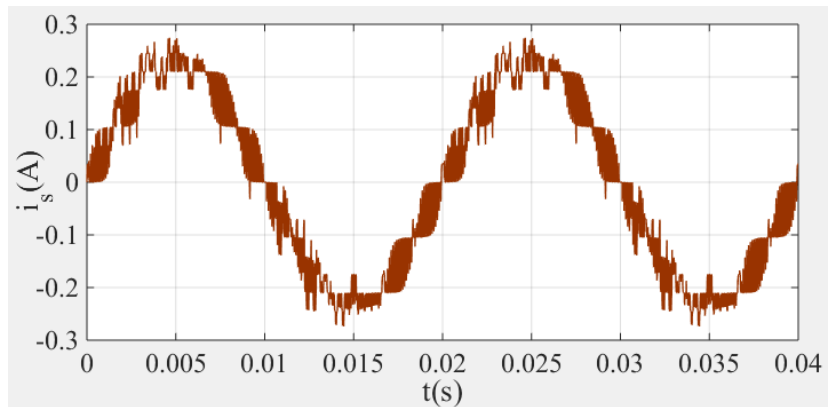
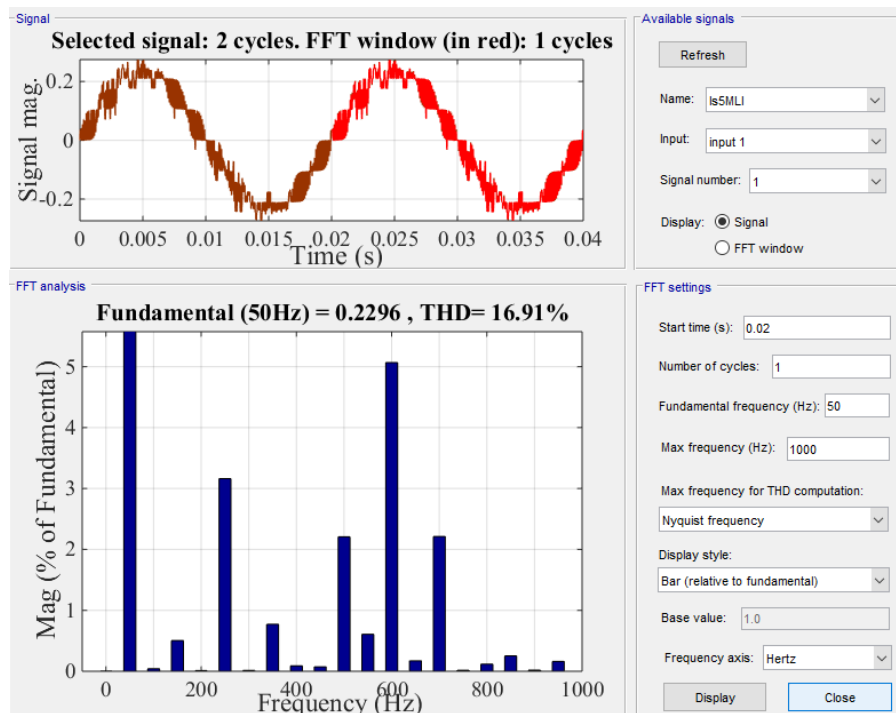
b) tension V_{bn} .



c) tension V_{cn} .



d) harmonique (THD) de tension V_{an} .

e) courant i_s .f) harmonique (THD) de courant i_s .**Figure 3.9:** les résultats de simulation de commande MLI-ST charge RL (1).

3.4.1.2 Résultats de simulation pour charge 2

Charge2: ($R = 300\Omega$, $L = 80\text{ mH}$)

Après la simulation nous voyons ces tensions V_{an} , V_{bn} et V_{cn} dans ce charge (2) elle est la même à la charge 1 (la même forme), et la même harmonique (THD)

De là, nous concluons que la charge n'affecte pas les tensions de sortie d'un onduleur.

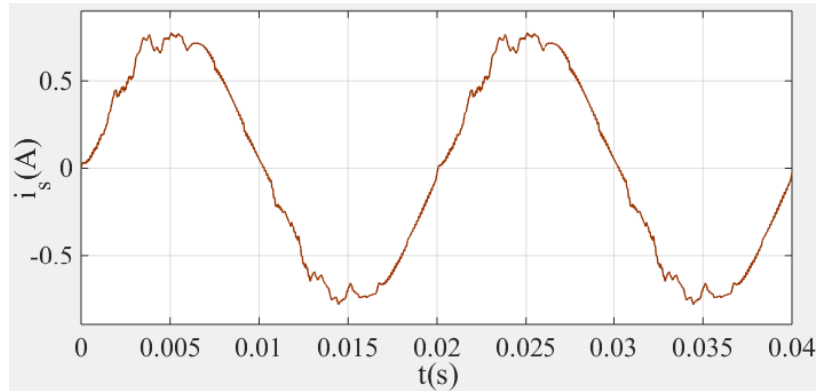
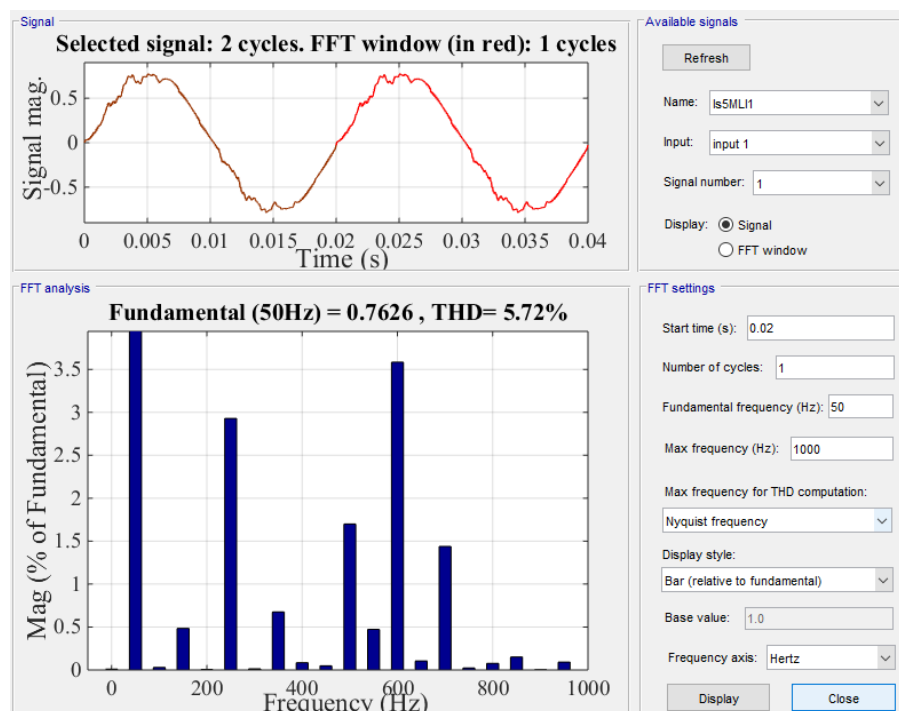
a) courant i_s .b) harmonique (THD) de courant i_s .

Figure 3.10: les résultats de simulation de commande MLI-ST charge RL (2).

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre , nous avons présenté une étude détaillée de l'onduleur à cinq niveaux type NPC.nous avons présenté en premier temps sa structure physique, sa configurations et son principe fonctionnement. ensuite, nous avons présenté le modèle de la commande. Finalement, nous avons donné les résultats de simulation de commande MLI-ST avec deux charge.

Le chapitre suivant sera consacré à l'étude comparative entre les résultats de simulation obtenus dans les chapitres précédentes.

Chapitre 4

Etude comparative

4.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons étudier la comparasion entre les résultats que nous obtenus à travers notre simulation.dans une premier temps nous comparsions entre deux charge (1 et 2) en commande MLI-ST en termes de valeur THD de courant et tension dans chaque onduleur (2 niveaux, 3 niveaux et 5 niveaux).ensuite,nous étudier la comparsions tous les niveaux de contrôle MLI-ST.enfin nous étudier comparons entre le contrôle MLI-ST et MLI-Vectorielle d'un onduleur à deux niveaux , et puis on généralise à tous les niveaux.

4.2 Les résultats des commandes

4.2.1 résultats de commande MLI-ST

Tableau 4.1: la valeur des harmoniques(THD) des tensions et des courants d'un onduleur à deux niveaux , trois niveaux et cinq niveaux de type NPC ,pour la charge 1 .

($R = 1000\Omega$, $L = 10\text{ mH}$)

Niveaux	2 Niveaux	3 Niveaux	5 Niveaux
THD de tension(%)	68,72	21,62	20,85
THD de courant(%)	64,86	19,31	16,91

Tableau 4.2: la valeur des harmoniques(THD) des tensions et des courants d'un onduleur à deux niveaux , trois niveaux et cinq niveaux de type NPC ,pour la charge 2 .

($R = 300\Omega$, $L = 80\text{ mH}$)

Niveaux	2 Niveaux	3 Niveaux	5 Niveaux
THD de tension(%)	68,72	21,62	20,85
THD de courant(%)	24,30	9,99	5,72

4.2.2 Résultats de commande MLI-Vectorielle (SVPWM)

Tableau 4.3: représente la valeur des harmoniques des tensions de sortie d'un onduleur deux niveaux, de type NPC et THD des courants d'un commande SVPWM, pour charge 1 et 2.

Charge 1: ($R = 1000\Omega$, $L = 10\text{ mH}$)

Charge 2: ($R = 300\Omega$, $L = 80\text{ mH}$)

Charge	Charge 1	Charge 2
Niveaux	2 Niveaux	2 Niveaux
THD de tension(%)	65,04	65,04
THD de courant(%)	50,05	5,10

4.3 Comparaisons des résultats des commandes

4.3.1 Comparaison entre deux charge (1 et 2) en commande MLI-ST

Charge 1: ($R = 1000\Omega$, $L = 10\text{ mH}$)

Charge 2: ($R = 300\Omega$, $L = 80\text{ mH}$)

Tableau 4.4: représente une comparaison entre deux charge à tous les niveaux par le THD de courant et tension.

Commande	MLI-ST					
	Charge 1			Charge 2		
Charge						
Niveaux	2N	3N	5N	2N	3N	5N
THD de tension(%)	68,72	21,62	20,85	68,72	21,62	20,85
THD de courant(%)	64,86	19,31	16,91	24,30	9,99	5,72

Le Tableau. 4.4 présenté ci-dessus, illustre les résultats obtenus pour les trois topologies d'onduleur à deux niveaux, à trois niveaux et à cinq niveaux par deux charge différent. Dans le cadre de la MLI Sinusoïdale.

On remarque que, lorsqu'on augmente la valeur de charge ($L \uparrow, R \downarrow$), le THD de courant se diminue c-à-d, la forme du courant proche à la sinusoïde, et le THD de tension reste le même c-à-d, la forme du tension lui même dans les charges 1 et 2.

Interprétation des résultats

Nous concluons que la charge affecte le courant et n'affecte pas la tension, c'est à cause de l'inductance (filtrage de courant).

4.3.2 Comparaison entre les niveaux par une charge (2) en commande MLI-ST

(Charge 2: ($R = 300\Omega, L = 80\text{ mH}$))

Tableau 4.5: montre la comparaison entre l'onduleur NPC à deux niveaux, 3 niveaux et cinq niveaux par la commande MLI-ST.

Commande	MLI-ST		
Niveaux	2N	3N	5N
THD de tension(%)	68,72	21,62	20,85
THD de courant(%)	24,30	9,99	5,72

Le Tableau.4.5 présenté ci-dessus, illustre les résultats obtenus pour les trois topologies d'onduleur à deux niveaux, à trois niveaux et à cinq niveaux. Dans le cadre de la MLI-ST.

On remarque que, lorsqu'on augmente le nombre de niveaux de l'onduleur, le THD de tension et courant se diminue c.-à-d., la forme du courant proche à la sinusoïde. donc l'onduleur NPC à cinq niveaux donne une meilleure THD de tension et courant.

4.3.2 Comparaison entre deux charge (1 et 2) en commande MLI-Vectorielle

Tableau 4.6: représente une comparaison entre deux charge d'un onduleur à deux niveaux par le THD de courant et tension en commande MLI-Vectorielle.

Commande	MLI-Vectorielle	
Charge	Charge 1	Charge 2
Niveaux	2 Niveaux	2 Niveaux
THD de tension(%)	65,04	65,04
THD de courant(%)	50,05	5,10

Le Tableau. 4.6 présenté ci-dessus, illustre les résultats obtenus pour onduleur à deux niveaux, par deux charge différent. Dans le cadre de la MLI-Vectorielle.

On remarque que, lorsqu'on augmente la valeur de charge ($L \uparrow, R \downarrow$), le THD de courant se diminuait c-à-d, la forme du courant proche à la sinusoïde, et le THD de tension rester le même c-à-d, la forme du tension lui même dans les charges 1 et 2 .

Interprétation des résultats:

Nous concluons que la charge affecte le courant et n'affecte pas la tension , c'est à cause de l'inductance (filtrage de courant).

4.4 Comparaison entre deux techniques de commande (MLI-ST et MLI-Vectorielle)

Le tableau ci-dessous montre les résultats de THD obtenues par les différentes techniques de commande:

Le **Tableau.4.7** montre la comparaison entre deux techniques de commande d'un onduleur NPC à deux niveaux les résultats pour charge 2 ($R = 300\Omega, L = 80\text{ mH}$)

Commande	<i>MLI-ST</i>	<i>MLI-Vectorielle</i>
Niveaux	2 Niveaux	2 Niveaux
THD de tension(%)	68,72	65,04
THD de courant(%)	24,30	5,10

Tableau 4.7:présenté ci-dessus, illustre les résultats obtenus pour onduleur à deux niveaux, par deux technique different MLI et MLI-Vectorielle.

Nous remarquons à partir du Tableau.4.7.la techniques de commande MLI-Vectorielle est la meilleur par rapport à commande MLI-ST.

Par ce que la THD de courant et tension d'un commande MLI-Vectorielle moins que ceux de commande MLI(la THD de courant en MLIV moins que THD de courant en la commande MLI-ST) c-à-d, la forme du courant proche à la sinusoïde en MLI-V par rapport à la commande MLI-ST.

A traves cette étude comparative (Comparaison entre deux techniques de commande (MLI-ST et MLI-Vectorielle) d'un onduleur à deux niveaux), en le faisant circuler sur le onduleur à trois niveaux et cinq niveaux .

Nous concluons que la commande MLI-Vectorielle est la meilleur par rapport à celle de la commande MLI-ST.

4.5 Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons comparé entre deux charge différentes dans chaque onduleur et on a comparé entre les niveaux d'onduleur en termes de valeur THD de courant et de tension avec deux techniques de commande (MLI-ST et MLI-Vectorielle).

On remarque que , lorsqu'on augmente l'inductance de la charge ,le THD de courant se diminuait c'est à cause de l'inductance (filtrage de courant), et aussi lorsque le nombre de niveaux augment le THD diminue c-à-d,l'onduleur NPC à cinq niveaux donne une meilleure THD de tension et de courant par rapport aux onduleurs à deux niveaux et à trois niveaux. on remarque aussi que la qualité de l'onde de tension à la sortie d'un onduleur de type NPC commandé par la MLI vectorielle est la meilleure par rapport à celle de la commande MLI-ST.

Conclusion Générale

Conclusion générale

L'utilisation des convertisseurs statiques dans l'industrie est devenue un champ extrêmement vaste, car les équipements industriels utilisent de plus en plus d'entraînement à vitesse variable. Les onduleurs de tension sont largement utilisés pour la commande des moteurs asynchrones.

Il est nécessaire d'établir la stratégie de commande de ces onduleurs de façon à générer une tension et courant plus proche de la forme sinusoïdale. Pour cela différentes stratégies de modulation de largeurs d'impulsions ont été élaborées pour les onduleurs à deux et à trois niveaux et N niveaux dont la plus courante est la stratégie MLI vectorielle et 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.

Le travail réalisé dans ce mémoire a été consacré à l'étude d'une structure et principe fonctionnement de l'onduleur triphasé à deux niveaux et trois niveaux et cinq niveaux de type NPC, et connaissant les changements de THD de courant et tension par le changement de la charge et du mode de contrôle.

Dans ce travail, nous avons présenté la simulation de trois techniques de modulation à savoir : la commande pleine onde, MLI-ST et MLI vectorielle.

Nous avons mis la modulation dans le premier chapitre la théorie sur les onduleurs sa fonctionnement, leurs principales applications, avec le détaillée de l'onduleur à deux niveaux et les techniques de commande de l'onduleur de tension triphasé, à la fin nous avons donné les résultats de simulation de commande MLI-ST, pleine onde et MLI-Vectorielle d'un onduleur à deux niveaux.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté le modèle de fonctionnement de l'onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC et modèle de la commande et les fonctions de connexion. et nous avons donné les résultats de simulation de commande MLI-ST avec deux charges.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté le modèle de fonctionnement de l'onduleur triphasé à cinq niveaux à structure NPC, et modèle de la commande et les fonctions de connexion. et nous avons présenté les résultats de simulation de commande MLI-ST avec deux charges pour l'onduleur à cinq niveaux.

Dans le quatrième chapitre, nous avons présenté la comparaison entre les trois niveaux (2N,3N et 5N), et une comparaison entre la commande MLI-ST et MLI-Vectorielle à travers les résultats de THD, nous disons que la charge affecte le courant et n'affecte pas la tension, c'est à cause de l'inductance (filtrage de courant).

CONCLUSION GÉNÉRALE

Et on remarque que l'onduleur à cinq niveaux est le meilleur par rapport à l'onduleur à deux niveaux et à trois niveaux, ainsi que la commande MLI-Vectorielle est la meilleure par rapport à la commande MLI-ST.

Perspectives :

- Etude et analyse des onduleurs à sept niveaux et neuf niveaux ;
- Commande d'une machine asynchrone par les onduleurs présentés dans ce mémoire et de faire comparer en leurs performances ;
- Etude le fonctionnement des onduleurs en régime dégradé (perte d'une commande d'un transistor défaillance d'un diode ou d'un transistor) .

ANNEXE

Paramètres de la simulation

Résistance pour charge 1	$R_1 = 1000\Omega$
Inductance pour charge 1	$L_1 = 10\text{ mH}$
Résistance pour charge 2	$R_2 = 300\Omega$
Inductance pour charge 2	$L_2 = 80\text{ mH}$
La tension continue	$U_{dc} = 235V$
La fréquence	$f = 50\text{HZ}$
Coefficient de réglage	$r = 0,8$
Indice de modulation	$m = 50$
Période de la porteuse	$T_p = 0.0004s$
Amplitude de la porteuse	$V_{Pm} = 117,5V$
Amplitude de la référence	$V_m = 94V$

paramètres du redresuer et filtre

Amplitude	$V = 311V$
Inductance	$L_f = 0.08\text{ H}$
Résistance	$R_f = 17\Omega$
Condensateur	$C_f = 50\mu F$

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Sofiane Lallam**, “Etude et réalisation d’un onduleur de tension monophasés multi niveaux”, mémoire d’ingénieur d’état. Ecole militaire polytechnique.2007.
- [2] **C. Cabal**, “Optimisation énergétique de l’étage d’adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque”, Thèse de Doctorat, Université Toulouse III- Paul Sabatier, Toulouse,2008.
- [3] **ELFERD Hamza et ZEGAAR Mourada**, “fonctionnement en mode d’égrade d’un onduleur multi niveaux application au filtre actif parallèle”, mémoire d’ingénieur d’état.universite mohamed boudiaf - M’sila,2016 /2017.
- [4] **Mr BENAOUICHA Mounir et Mr GUERROUT Youcef**, “Réalisation d’un onduleur de tension commande par la carte Dspace 1104”, mémoire d’ingénieur .Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2014/2015.
- [5] **BOUKAROURA Abdelkader**, “Modélisationet Diagnostic d’un Onduleur Triphasé par l’Approche BondGraph”,Mémoire Présenté pour l’obtention du Diplome de Magister en electrotechniques,Option :Réseaux electriques,universite ferhat abbas de setif ,2009.
- [6] **L. Lasne, Electronique de puissance - Cours**, études de cas et exercices corrigés, 2e Edition. Paris: DUNOD, 2015.
- [7] **S. Guy, B. Robert, L. Francis**, Les convertisseurs de l’électronique de puissance la Conversion alternatif (volume 4). Edition tec-doc, 1995
- [8] **T. Wildi : Electrotechnique**, 3eme édition, éditions de Boeck université (1999).
- [9] **Application ASI** , “onduleur de tension description”, www.wikipédia.com.
- [10] **OULD ABDESLAM Djaffar**, “Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension”, Thèse de Doctorat, Universite de Haute-Alsace,2005.
- [11] **Mr : A. Haddoun**, “Modélisation et commande d’un onduleur MLI” Mémoire de fin d’études En vue de l’obtention du Diplôme de Master en Systèmes Electriques et Automatique (SEA) Universite Larbi Ben M’hidi Oum El-Bouaghi,2008/2009
- [12] **BERREZZEK Farid**. “Etude des Différentes Techniques de Commande des Onduleurs à MLI Associés à une Machine Asynchrone”. mémoire d’ingénieur d’état. Universite de Annaba-Badji Mokhtar, 2006.
- [13] **BOUAKAZ OUAHID**, “Etude des Différentes Techniques de Commande des Onduleurs à MLI Associés à une Machine Asynchrone”, Mémoire de magister,Universite badji mokhtar de annaba, 2006.
- [14] **Ch.Krishna kantha, P.Deepthi Sree**, “Analysis, Simulation end Comparison of Various Multilevel Inverters Using Different.PWM Strategies,” IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering, Vol. 9, no. 2, PP 54-65, 2014.
- [15] **Ahmet M.Hava Russel j kerkman**, “thomas A.lipo Carrier-based PWM-VSI overmodulation strategies : Analysis, and design IEEE transactions on power electronics” vol .13, NO, 4 July 1998

- [16] **Rakesh parekh**, “VF control of 3-Phase induction Motor Using Space Vector Modulation” Microchip technology Inc 2005.
- [17] **Guy seguier, francis labrique, Robert Baussiere**, “Les convertisseurs de l'électronique de puissance”, « Volume 4».2017.
- [18] **S. L. Capitaneanu, M. Fadel, J. Faucher, A. Aleida**, “Graphical and algebraic synthesis for PWM methods”, Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique Industrielle, ENSEEIHT/INP Toulouse, EPE Journal Vol.11 N°. 03, Août 2001.
- [19] **L. Huber, D. Borojevic**, “Space vector modulated three phase to three phase matrix converter with input power factor correction”, IEEE Trans. on industry applications, vol. 31, no. 6 ,nov/dec 1995.
- [20] **Y. Amara**, “Contribution à la Conception et à la Commande des Machines Synchrones à Double Excitation Application au Véhicule Hybride”, Thèse de Doctorat de l'Université Paris XI, France, Décembre 2001.
- [21] **F. Labrique, G. Seguier et R. Bausier**, “Les convertisseurs de l'électronique de puissance”, Volume 4 : La conversion continu – Alternatif , Lavoisier, 1995.
- [22] **P. S. Bastiani**, “Stratégies de commande minimisant les pertes d'un ensemble convertisseur - machine alternative : Application à la traction électrique”, Thèse de Doctorat se l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, Février 2001.
- [23] **K. Kouzi**, “Commande vectorielle d'un moteur à induction sans capteur vitesse par un réglage PI - Flou à gains - Flous adaptés associé à un observateur d'état par modes de glissement”, Thèse de magister, Université Batna, Sep 2002.
- [24] **Siriroj Sirisukprasert**, “Optimized Harmonic Stepped-Waveform for Multilevel Inverter”, Thesis for the Degree of Master of Science in Electrical Engineering, Virginia Polytechnic Institute, September 1999.
- [25] **B. K. Bose**, “Power Electronics and AC Drives”, Edition Practice Hall, 1986.
- [26] **L. M. Tolbert**, “Multilivel converters for Large Electric Drives”, IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 35,pp. 36-44, January/February 1999.
- [27] **Houria Ben Zemammouch** , “Application de la MLI Vectorielle aux Onduleurs Multi niveaux à base de GTO et d'IGBT”, Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar Annaba.2010.
- [28] **Kelaiaia Mounia Samira**, “Amélioration de la Qualité d'Energie Délivrée Par Un Onduleur Multiniveaux Alimentant Une Machine Asynchrone A Cage”, Thèse De Doctorat, Département d'Electrotechnique, 2007.
- [29] **J. P. Caron, J. P. Hautier**, “Convertisseurs Statiques- Méthodologie Causale de Modélisation et de Commande”, Editions Technip, Paris 1999.
- [30] **BOUAKAZ OUAHID**, “Contribution à l'Analyse des Onduleurs Multiniveaux Fonctionnement Symétrique et asymétrique ”, Mémoire d'ingénieur d'état, Département d'électrotechnique, université de Batna, 2005.
- [31] **BRIGHEN Haroun et HALAIMIA Safouane**, “Etude et analyse de la commande des onduleurs Multi-niveaux par MLI sinusoïdale”, 2015-2016.

- [32] **Mr:LAKEHAL Bilel**, Mémoire de fin d'étude intitulé "Modélisation et commande d'un onduleur triphasé à structure multi-niveaux", Promotion 2014-2015.
- [33] **Lourci N** : "Contribution à l'étude et la commande d'un onduleur à cinq niveaux à diodes flottantes. Application à la conduite d'une machine asynchrone triphasée". Thèse de magister, ENP, Alger 2000.
- [34] **Djaafer LALILI**, "MLI-Vectorielle et commande non linéaire du bus continu des onduleurs multiniveaux. application à la conduite de la machine asynchrone", Ecole nationale polytechnique 1996.
- [35] **F.MERRAHI**, "Alimentation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation (Application à l'énergie éolienne)", Mémoire de magister, 2007.
- [36] **A.TALHA**, "Etude de différentes cascade de l'onduleur a sept niveaux à structure NPC. application à la conduite d'une machine synchrone à aimant permanents", thèse doctorat 2004.

RESUME Abstract ملخص

Résumé

Ce travail présente une comparaison entre trois structures d'onduleurs triphasés ; un l'onduleur NPC à deux niveaux (Neutral Point Clamped), un onduleur à trois niveaux et un onduleur à cinq niveaux. La comparaison est basée sur l'évaluation de la distorsion harmonique totale (THD) des trois onduleurs contrôlés par la stratégie de contrôle de modulation de largeur d'impulsions (MLI-ST), et MLI-Vectorielle (MLI-V) de l'onduleur à deux niveaux, cette commande (MLI-V) est généralisée aux onduleur à trois et cinq niveaux.

Tous les onduleurs sont modélisés et simulés à l'aide du logiciel Matlab (Simulink-SimPowerSystems), des résultats de simulation numérique sont présentés et commentés.

Mots clés : Onduleur multiniveaux, modulation de la largeur d'impulsion MLI-ST, harmonique, l'onduleur NPC à deux niveaux (Neutral Point Clamped), distorsion d'harmonique totale (THD).

Abstract

This work presents the comparison between three structures of three-phase inverters; two-level NPC inverter (Neutral Point Clamped); three-level inverter and five-level inverter. The comparison is based on the evaluation of the total harmonic distortion THD for the two inverters controlled by the pulse width modulation (PWM) end (SVM) for the two-level inverter, this control (SVM) is generalized for the three-level and five-level inverter.

All inverters are modeled and simulated using the Matlab-Simulink-SimPowerSystems, results simulation are presented and commented.

Key words: multi-levels inverters, PWM: Pulse Width Modulation, harmonics, inverter structure NPC (Neutral Point Clamped), total harmonic distortion.

ملخص

يتناول هذا العمل المقارنة بين ثلاثة أنواع من الموجات الثلاثية الطور مستوى 2 و مستوى 3 و مستوى 5. تستند هذه المقارنة على تقييم نسبة انخفاض معدل التشويه التوافقي (THD) للمحولات الثلاثية التي يتم التحكم فيها بواسطة إستراتيجية التحكم في تعديل عرض النبضة (MLI-ST), والتحكم (MLI-V) بالنسبة للعاكس ذو المستويان و الذي هو معمم على العاكس 3 و 5 مستويات.

جميع الموجات تمت نمذجتهم و محاكاتهم باستعمال برنامج الماطلاب. نتائج المحاكاة عرضت ونوقشت