

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

N° :



FILIERE : ELECTRONIQUE
OPTION : INSTRUMENTATION

Mémoire présenté pour l'obtention
du diplôme de Master Académique
en spécialité

Electronique des Instrumentation

Préparé par :

Abla MESSAOUDI et Aya KHALFALLAH

Intitulé :
Commande d'un onduleur de tension à trois niveaux
type NPC

Soutenu devant le jury composé de:

BENTOUMI Miloud	MCA	Université de M'sila	Président
ZORIG Abdelmalik	MCB	Université de M'sila	Rapporteur
GUCHI Amar	MCA	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2022-2023

Remerciement

Nous remercions ALLAH le tout puissant de nous avoir accordé la force, le courage et la patience pour terminer ce mémoire.

Nous remercions notre encadreur Abdelmalik zorig docteur à l'université Mohamed Boudiaf de M'sila, pour son grand aide durant la réalisation de notre travail, ces encouragements nous ont orientés vers le succès. Nous lui témoignons ici de nos sincères considérations et notre grande reconnaissance.

Nous tenons également à exprimer nos profonde gratitude aux membres du jury Messieurs BEN TOUMI Miloud et Guchi Amar, docteurs à l'université Mohamed Boudiaf de M'sila, d'avoir accepté d'évaluer notre travail et pour l'intérêt dont ils nous ont fait preuve.

Dédicace

Je dédie cet événement de ma vie à

*À la personne à qui le Tout-Puissant a mis le Paradis à ses pieds,
"ma mère bien-aimée" qu'Allah lui accorde santé et bonheur au
long de sa vie.*

*À celui qui, après Dieu, a le premier mérite de recevoir mes
sincères remerciements, "mon père bien-aimé", qu'Allah vous
accorde la longévité.*

*À mon mari qui a été et est toujours mon soutien pour terminer
ma carrière*

*À ma fille, qui a eu un grand impact en surmontant de nombreux
obstacles et difficultés*

Messaoudi Abba

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma mère qui a été à mes côtés et m'a soutenu durant toute ma vie, et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis, merci mes parents.

KHALFELLAH AYA

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I: Modélisation d'un onduleur de tension à trois niveaux de type NPC	
I. 1	Introduction 3
I. 2	Onduleur de tension triphasé 3
I. 3	Modélisation de l'onduleur à deux niveaux 5
I.3. 1	Fonction de commutation d'un onduleur à deux niveaux 5
I.3. 2	Tension de sortie d'un onduleur à deux niveaux 5
I.3. 3	Représentation vectorielle des tensions de sortie de l'onduleur à deux niveaux 7
I. 4	Modélisation de l'onduleur de tension triphasé à trois niveaux 9
I.4. 1	Etats de commutation utiles d'un bras d'onduleur à trois niveaux 9
I.4. 2	Fonction de commutation d'un onduleur à trois niveaux 10
I.4. 2	Tension de sortie d'un onduleur à trois niveaux 10
I.4. 3	Représentation vectorielle des tensions de sortie d'un onduleur à trois niveaux 12
I. 5	Modulation vectorielle de l'onduleur à trois niveaux 14
I.5. 1	Détermination du secteur contenant le vecteur de référence 14
I.5. 2	Détermination de la région contenant le vecteur de référence 15
I.5. 3	Calcul des temps d'application des vecteurs de tension à appliquer 16
I.5. 4	Distribution des vecteurs de tension et leurs temps d'application 17
I. 6	Modélisations d'un onduleur de tension à trois niveaux alimente une charge R-L via un filtre LC 18
I.6. 1	Modélisation du système dans le repère (abc) 19
I.6. 2	Modélisation du système dans le repère (α, β) 19

I. 7	Conclusion	20
Chapitre II : Commande linéaire d'un onduleur de tension triphasé à trois niveaux type NPC		
II. 1	Introduction	21
II. 2	Synthèse d'une commande linéaire pour un onduleur de tension à trois niveaux débite une charge résistive via un filtre LC	21
II.2. 1	Synthèse des régulateurs de la tension de la charge	22
II.2. 2	Synthèse du régulateur des courants de l'onduleur	23
II. 3	Résultats de simulations	24
II.3. 1	Variation de l'amplitude de la tension de référence	25
II.3. 2	Variation de la charge	27
II. 4	Conclusion	29
Chapitre III : Validation expérimentale d'une commande linéaire d'un onduleur triphasée à trois niveaux type NPC		
III. 1	Introduction	30
III. 2	Banc d'essai expérimental	30
III.2.1	Structure physique de l'onduleur de tension triphasé à trois niveaux	31
III.2.2	Carte dSPACE MicroLabBox	32
III.2.3	Carte de mesure des tensions	33
III.2.4	Alimentation bipolaire	33
III.2.5	Filtre LC	34
III. 3	Résultats expérimentaux	34
III.3.1	Validation en boucle ouvert	34
III.3.2	Validation en boucle fermée	35
III. 4	Conclusion	37
	Conclusion generale	39
	Bibliographie	41

Liste de figures

Chapitre I

Figure (I. 1): Structures d'onduleurs de tension triphasés les plus reconnus, (a) Onduleur à deux niveaux, (b) Onduleur à trois niveaux à diode flottante, (c) Onduleur à trois niveaux à capacité flottante, (d) Onduleur cinq niveaux en ponts cascades, (e) Onduleur à trois niveaux de type T. _____ 4

Figure (I. 2): Structure d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux _____ 5

Figure (I. 3): Tension de sortie d'un bras d'onduleur à deux niveaux. _____ 6

Figure (I. 4): Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur à deux niveaux. 8

Figure (I. 5): Structure d'un onduleur triphasé à type NPC _____ 9

Figure (I. 6): Différents états utiles d'un bras d'onduleur de tension à trois niveaux type NPC.
10

Figure (I. 7): Représentation vectorielle des vecteurs de tensions d'un onduleur trois niveaux type NPC. _____

Erreur ! Signet non défini.

Figure (I. 8): Régions triangle ulnaires du premier secteur _____ 15

Figure (I. 9): Distribution des temps d'application des vecteurs de tension. _____ 18

Figure (I. 10): Onduleur de tension triphasé à trois niveaux alimente une charge R-L via un filtre LC. _____

18

Chapitre II

Figure (II. 1): Structure de la commande d'un onduleur de tension à trois niveaux alimente une charge RL via un filtre LC _____ 22

Figure (II. 2): Boucle de régulation de la tension de la charge _____ 23

Figure (II. 3): Schéma de régulation des courants de l'onduleur. _____ 24

Figure (II. 4): Performances du système vis-à-vis la variation de l'amplitude de la tension de référence:(a) Tension directe de la charge avec sa référence, (b) Tension en quadrature de la charge avec sa référence, (c) Courant directe de l'onduleur NPC avec sa référence, (d) Courant en quadrature de l'onduleur NPC avec sa référence, (e) tension d'une phase de la charge avec sa référence _____ 26

Figure (II. 5): Performances du système vis-à-vis la variation de la tension de référence:(a) Tension directe de la charge avec sa référence, (b) Tension en quadrature de la charge avec sa référence, (c) Courant directe de l'onduleur NPC avec sa référence, (d) Courant en quadrature de l'onduleur NPC avec sa référence _____ 28

Chapitre III

Figure (III.1) : Photo du banc d'essai réalisé. _____ 31

Figure (III.2) : Photo de l'onduleur triphasée à trois niveaux type NPC _____ 32

Figure (III.3) : Schéma synoptique du circuit de pilotage des IGBT. _____ 32

Figure (III.4) : Photo de la carte dSPACE MicroLabBox _____ 33

Figure (III.5) : Carte de mesure (a) de tensions, (b) des courants. _____ 33

Figure (III.6) : Photo de carte d'alimentation des cartes de mesure. _____ 33

Figure (III.7) : Schéma de la commande en boucle ouverte. _____ 34

Figure (III.8) : Deux tensions simples de la charge (a) Pour indice de modulation égal à 0.3, (b) pour indice de modulation égal à 0.8. _____ 34

Figure (III.9) : Deux tensions composés de la charge (a) Pour indice de modulation égal à 0.3, (b) pour indice de modulation égal à 0.8. _____ 35

Figure (III.10) : Performances du système vis-à-vis la variation de la tension de référence : (a) Tension directe de la charge avec sa référence (b) Tension en quadrature de la charge avec sa référence (c) Courant directe de l'onduleur NPC avec sa référence (d) Courant en quadrature de l'onduleur NPC avec sa référence, (e) courants triphasé de l'onduleur. (f) Tension triphasé de la charge.. _____ 36

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau (I.1) : Vecteurs de tension de sortie d'un onduleur à deux niveaux.....8

Tableau (I.2) : Coordonnés des vecteurs de tension d'un onduleur à trois niveaux type NPC..13

Tableau (I.3) : Règles d'identification de la région contenant le vecteur de référence.....16

Chapitre II

Tableau (II.1) : Paramètres physiques du système et de contrôle25

Commande d'un onduleur de tension à trois niveaux type NPC

Résumé

Les travaux de ce mémoire sont focalisés sur la modélisation et la commande d'un onduleur de tension triphasé à trois niveaux type NPC. Ce type d'onduleur est caractérisé de sa capacité de synthétiser la tension de sortie en plusieurs niveaux ce qui permet de surmonter les contraintes de tension imposées sur les interrupteurs de puissance et de réduire davantage les harmoniques et le calibre du filtre de sortie. Dans la première partie de ce manuscrit, nous avons présenté son principe de fonctionnement, sa modélisation et la technique de modulation vectorielle à trois niveaux. Ensuite, nous avons modélisé un système composé d'un onduleur à trois niveaux connecté à un filtre LC et débite une charge résistive inductive. Dans la deuxième partie de ce manuscrit, nous avons développé, testé et validé par simulation une structure de commande permettant de contrôler le système susmentionné. Dans la dernière partie de ce manuscrit, nous avons présenté la validation expérimentale de la commande développée.

Mots clés : *Onduleur de tension triphasé à trois niveaux ; Modulation vectorielle à trois niveaux, Commande en boucle fermée ; Onduleur de tension triphasé à deux niveaux ; dSPACE.*

Introduction générale

Le développement important dans la technologie de fabrication des composants de l'électronique de puissance a grandement contribué à la croissance du marché des convertisseurs de puissance. L'électronique de puissance est désormais un élément essentiel dans plusieurs applications telles que les systèmes de production d'électricité à partir d'énergie renouvelable [15]-[16], l'entraînement des moteurs électriques [17], le filtrage de réseaux électrique [18],...etc. L'onduleur de tension à deux niveaux est souvent utilisé dans les applications susmentionnées. Dans les systèmes connectés réseau, l'onduleur de tension est chargé de satisfaire les exigences imposées par les normes internationales (facteur de puissance, taux des harmoniques,) [19] [20]. Dans les applications des moteurs électriques, l'onduleur de tension est utilisé pour régler la vitesse, le couple, ou la puissance du moteur [21], [22]. Dans les applications de filtrage de réseau, l'onduleur est chargé de compenser les harmoniques et/ou la puissance réactive qui influent sur la stabilité et la qualité d'énergie du réseau électrique [23].

Cependant, l'onduleur de tension à deux niveaux est limité en tension et nécessite un filtre de sortie relativement important [24]. Ces limitations ont conduit à l'apparition des onduleurs dite multiniveaux. Ces derniers présentent des avantages très intéressants par rapport à l'onduleur à deux niveaux notamment ils permettent de surmonter les contraintes de tension imposées sur les composants de l'électronique et d'améliorer la qualité spectrale des tensions et des courants générés [25].

Les travaux de ce mémoire sont essentiellement portés sur l'onduleur de tension triphasé à trois niveaux type NPC. Le manuscrit est structuré en trois chapitres. Dans le premier chapitre, nous avons présenté le principe de fonctionnement et la modélisation mathématique de l'onduleur de tension à trois niveaux. Cette modélisation permet d'analyser les formes d'ondes des tensions de sorties (tension simples, composées...etc.). Ensuite, nous avons présenté en détail la modulation vectorielle à trois niveaux ainsi que les étapes essentielles pour développer son algorithme. A la fin du chapitre, nous avons développé le modèle mathématique d'un système composé d'un onduleur à trois niveaux raccordé à un filtre LC et alimenté une charge résistive-inductive (RL). Ce modèle est développé dans le repère triphasé

abc, le repère biphasé, $\alpha\beta$ et le repère synchrone dq . Ce dernier est utilisé ensuite pour contrôler le système.

Dans le deuxième chapitre, nous avons développé une structure de commande permettant de contrôler le système modélisé dans le premier chapitre (onduleur à trois niveaux-filtre LC-charge RL). Cette structure de commande comporte deux boucles en cascade synthétisées dans le repère dq combinées avec la modulation vectorielle à trois niveaux. L'objectif de cette structure de commande est de piloter l'onduleur à trois niveaux pour imposer les tensions désirées aux bornes de la charge. Dans la première partie du chapitre nous avons présenté en détail le calcul de la loi de commande et la synthèse des boucles de régulation utilisées. Ensuite, nous avons vérifié les performances de cette structure de commande vis-à-vis la variation de l'amplitude de la tension de référence et la variation de la charge.

Dans le dernier chapitre, nous avons présenté une validation expérimentale de la commande synthétisée dans le deuxième chapitre. Dans un premier temps, nous avons présenté en détail le banc d'essai expérimental utilisé. Ensuite, nous avons effectué un test en boucle ouverte pour vérifier l'algorithme de la modulation vectorielle et le fonctionnement des différents composants du banc d'essai.

Dans la dernière partie du chapitre, nous avons présenté la validation de la commande en boucle fermée du système onduleur à trois niveaux- filtre LC- charge.

Chapitre I

Modélisation d'un onduleur de tension à trois niveaux de type NPC

I. 1 Introduction

Grâce aux progrès de la technologie de fabrication des interrupteurs de puissance (IGBT, Mosfet,...), les convertisseurs statiques tels que les onduleurs de tension élargissent progressivement leur champ d'application, notamment dans le domaine de filtrage actif, les systèmes de production d'énergie renouvelable et l'entraînement des moteurs électriques [1].

Un onduleur de tension est capable de générer à partir d'une tension continue, une tension alternative d'amplitude et de fréquence réglables. Dans ce chapitre, nous allons focaliser notre étude sur l'onduleur de tension triphasé à deux et à trois niveaux. Dans un premier temps, le principe de fonctionnement de ces deux onduleurs sera présenté. Ensuite, nous allons présenter en détail le principe de la modulation vectorielle à trois niveaux. Dans la dernière partie du chapitre, nous allons modéliser un système constitué d'un onduleur à trois niveaux alimente une charge RL via un filtre LC. Le modèle de ce système sera développé dans le repère triphasé abc , le repère biphasé $\alpha\beta$ et le repère synchrone dq . Ces modèles permettent d'un côté de comprendre la dynamique et les caractéristiques du système et d'élaborer une structure de commande d'un autre côté.

I. 2 Onduleur de tension triphasé

Il existe plusieurs topologies d'onduleur de tension, l'onduleur à deux niveaux (Two-level inverter), [figure. \(I\) \(a\)](#), l'onduleur à trois niveaux à diodes flottantes (Neutral-point-clamped inverter), [figure. \(I\) \(b\)](#), l'onduleur à trois niveaux à capacités flottantes (Flying capacitor inverter), [figure. \(I\) \(c\)](#), l'onduleur multiniveaux en ponts cascades (Cascaded H-Bridge inverters), [figure. \(I\) \(d\)](#) et l'onduleur type (T-type inverter), [figure. \(I\) \(e\)](#) sont les onduleurs de tension les plus utilisés et les plus populaires.

L'onduleur à deux niveaux (classique) est souvent utilisé dans la plupart des applications industrielles de moyenne tension. Cependant, dans les applications qui exigent une tension /puissance élevée, ce type d'onduleur souffre de plusieurs limitations, telles que la nécessité aux composants électroniques (IGBT, Mosft, diode) de grand calibre, de filtre volumineux, et un taux de distorsion d'harmonique (THD) très élevé [2]. Ces limitations ont conduit à l'apparition des onduleurs multiniveaux. Ces derniers sont basés sur l'idée de répartir la contrainte en tension sur plusieurs composants semi-conducteurs connectés en série, voir figure. (I).

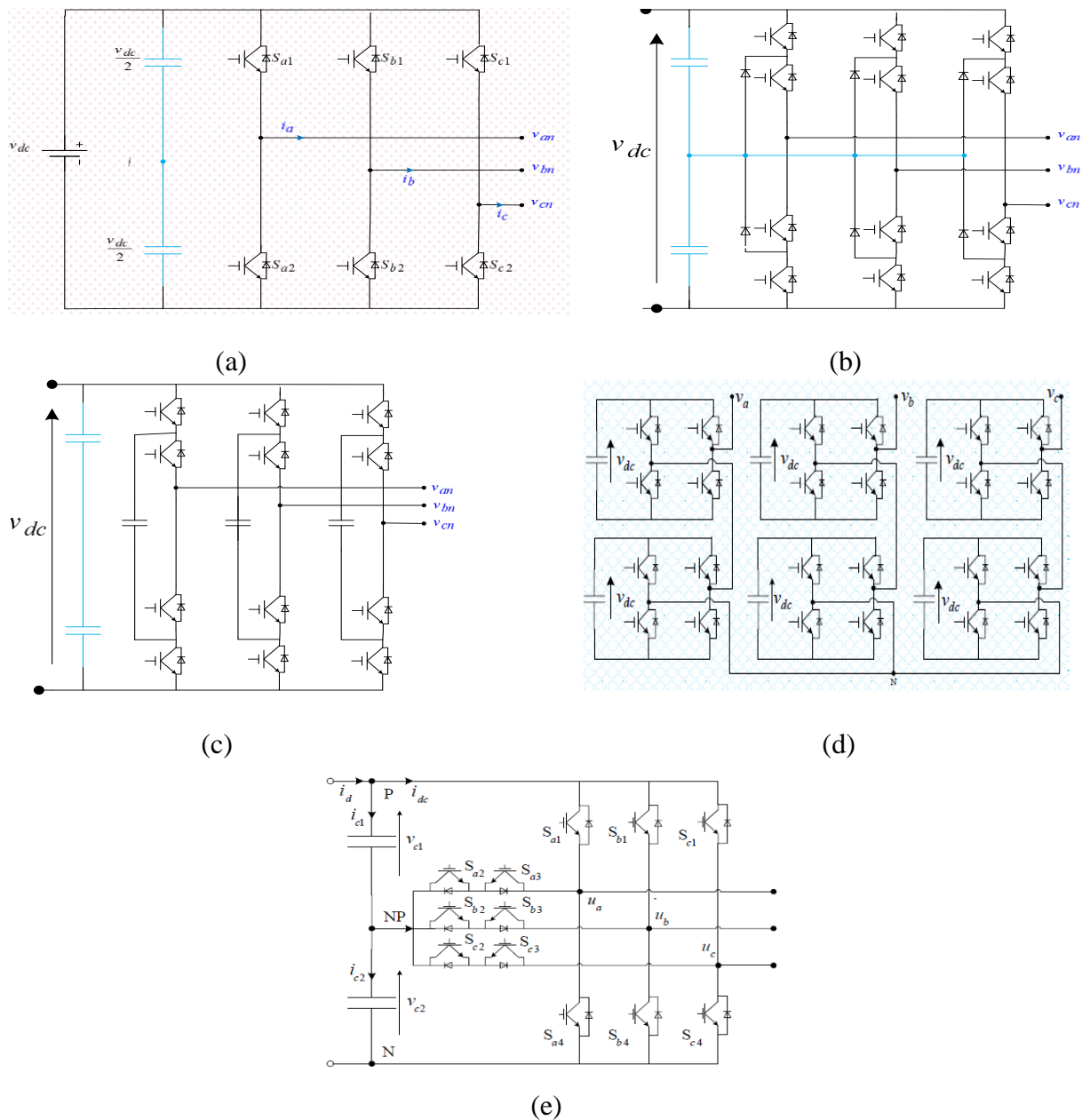


Figure (I.1) : Structures d'onduleurs de tension triphasés les plus reconnus, (a) Onduleur à deux niveaux, (b) Onduleur à trois niveaux à diode flottante, (c) Onduleur à trois niveaux à capacité flottante, (d) Onduleur cinq niveaux en ponts cascades, (e) Onduleur à trois niveaux de type T.

Les onduleurs multiniveaux sont caractérisés par leur capacité de synthétiser la tension désirée en plusieurs niveaux, ce qui permet de réduire le niveau de transition entre un niveau de tension à un autre (faible dv/dt), réduire la valeur de THD et également le calibre des composants du filtre installé à la sortie de l'onduleur.

Dans la suite, nous allons focaliser notre étude sur l'onduleur à deux et à trois niveaux type NPC.

I.3 Modélisation de l'onduleur à deux niveaux

La structure physique de l'onduleur à deux niveaux se compose d'une source de tension continue et de trois bras dont chacun se compose de deux interrupteurs bidirectionnels. Les deux interrupteurs de même bras doivent être contrôlés de façon complémentaire pour éviter de court-circuiter la source.

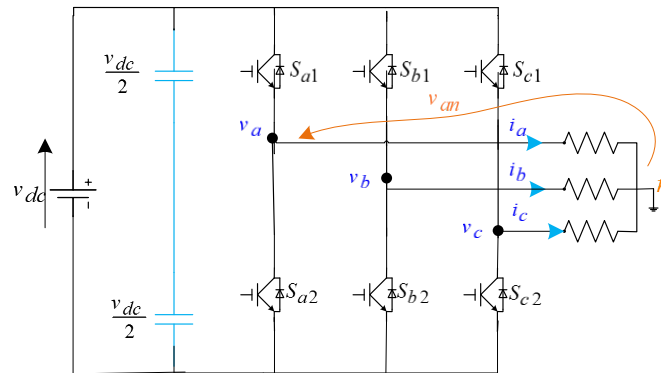


Figure (I.2) : Structure d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux

I.3.1 Fonction de commutation d'un onduleur à deux niveaux

Les commutations établies par les interrupteurs, supposés idéaux, sont décrites par une fonction de connexion comme suit :

$$\begin{cases} S_{xi} = 1 & \text{fermé} \\ S_{xi} = 0 & \text{ouvert} \end{cases} \quad x = a, b, c; \quad i = 1, 2 \quad (\text{I.1})$$

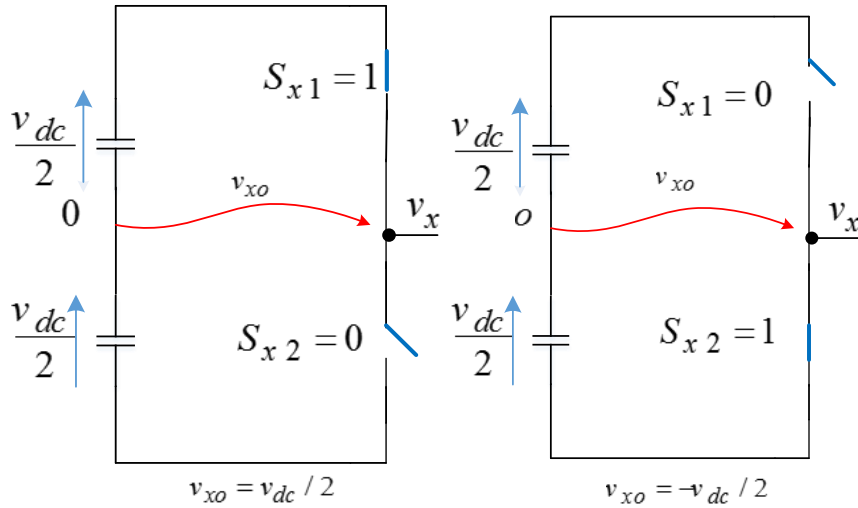
Considérant que les signaux de deux interrupteurs de même bras sont complémentaires, on peut écrire la règle de commutation suivante:

$$S_{x1} = 1 - S_{x2} \quad x = a, b, c \quad (\text{I.2})$$

I.3.2 Tension de sortie d'un onduleur à deux niveaux

Selon la fonction de commutation, la tension de sortie de chaque bras par rapport au point milieu O, v_{xo} , $x = a, b, c$ présente deux niveaux de tension, voir [figure \(I.3\)](#). Ces deux niveaux de tension sont obtenus comme suit :

$$v_{xo} = \begin{cases} \frac{v_{dc}}{2} & \text{si } S_{x1} = 1 (S_{x2} = 0) \\ -\frac{v_{dc}}{2} & \text{si } S_{x1} = 0 (S_{x2} = 1) \end{cases} \quad x = a, b, c \quad (\text{I.3})$$



Figure(I.3) Tension de sortie d'un bras d'onduleur à deux niveaux.

L'équation (I.3) peut être écrite sous la forme suivante :

$$v_{xo} = (2S_{x1} - 1) \frac{v_{dc}}{2}, \quad x = a, b, c \quad (\text{I.4})$$

Pa conséquent, les trois tensions phases-point milieu v_{ao}, v_{bo}, v_{co} sont exprimées comme suit:

$$\begin{bmatrix} v_{ao} \\ v_{bo} \\ v_{co} \end{bmatrix} = \frac{v_{dc}}{2} \begin{bmatrix} 2S_{a1} - 1 \\ 2S_{b1} - 1 \\ 2S_{c1} - 1 \end{bmatrix} \quad (\text{I.5})$$

Les tensions composées v_{ab}, v_{bc}, v_{ca} de l'onduleur sont calculées par l'expression suivante :

$$\begin{bmatrix} v_{ab} \\ v_{bc} \\ v_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{a0} - v_{b0} \\ v_{b0} - v_{c0} \\ v_{c0} - v_{a0} \end{bmatrix} = v_{dc} \begin{bmatrix} S_{a1} - S_{b1} \\ S_{b1} - S_{c1} \\ S_{c1} - S_{a1} \end{bmatrix} \quad (\text{I.6})$$

En considérant que les tensions simples représentent un système équilibré, on peut écrire la relation suivante :

$$v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = 0 \quad (\text{I.7})$$

Les tensions simples sont calculées en fonction des tensions composées comme suit :

$$\begin{cases} v_{ab} - v_{ca} = 2v_{an} - (v_{bn} + v_{cn}) \\ v_{bc} - v_{ab} = 2v_{bn} - (v_{an} + v_{cn}) \\ v_{ca} - v_{bc} = 2v_{cn} - (v_{an} + v_{bn}) \end{cases} \quad (\text{I.8})$$

En utilisant (I.7) dans (I.8) on trouve la relation suivante :

$$\begin{cases} v_{an} = \frac{1}{3}(v_{ab} - v_{ca}) \\ v_{bn} = \frac{1}{3}(v_{bc} - v_{ab}) \\ v_{cn} = \frac{1}{3}(v_{ca} - v_{bc}) \end{cases} \quad (\text{I.9})$$

Ainsi, les tensions simples peuvent être également exprimées en fonction des tensions v_{ao}, v_{bo}, v_{co} comme suit:

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} v_{ab} - v_{ca} \\ v_{bc} - v_{ab} \\ v_{ca} - v_{bc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ao} \\ v_{bo} \\ v_{co} \end{bmatrix} \quad (\text{I.10})$$

En remplaçant l'équation (I.5) dans (I.10) on trouve :

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} v_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (2S_{a1} - 1)/2 \\ (2S_{b1} - 1)/2 \\ (2S_{c1} - 1)/2 \end{bmatrix} \quad (\text{I.11})$$

Le système triphasé (I.11) peut être transformé à un système biphasé en utilisant la transformé de Clarck donné par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha} \\ v_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} \quad (\text{I.12})$$

Où, v_{α}, v_{β} représentent les tensions simples de l'onduleur dans le repère complexe ($\alpha\beta$).

I.3.3 Représentation vectorielle des tensions de sortie de l'onduleur à deux niveaux

Les trois tensions de sortie de l'onduleur v_{ao}, v_{bo}, v_{co} peuvent être représentées par un seul vecteur rotatif dans le plan biphasé $\alpha\beta$ en utilisant l'expression suivante :

$$v_s = \frac{2}{3} (v_{ao} e^{j0} + v_{bo} e^{j2\pi/3} + v_{co} e^{-j2\pi/3}) \quad (\text{I.13})$$

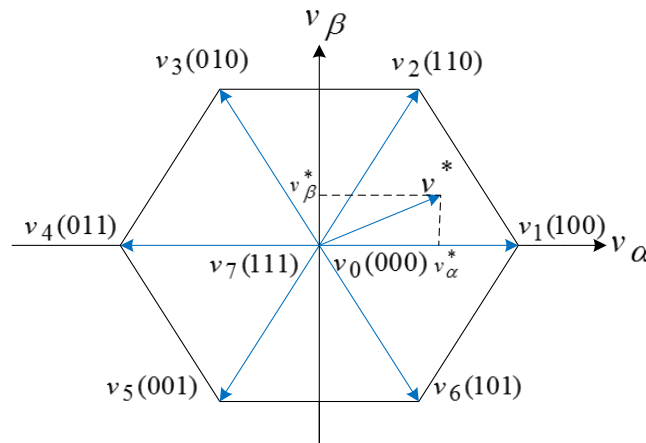
Ainsi, chaque combinaison des états de commutation S_{a1}, S_{b1}, S_{c1} , est correspond à un vecteur rotatif caractérisé par un module et un argument. Par exemple, pour $(S_{a1}, S_{b1}, S_{c1}) = (1, 1, 0)$ on trouve :

$$v_2(110) = \frac{2}{3} \left(\frac{v_{dc}}{2} e^{j0} + \frac{v_{dc}}{2} e^{j2\pi/3} - \frac{v_{dc}}{2} e^{-j2\pi/3} \right) = \frac{2}{3} \left[\frac{v_{dc}}{2} + \frac{v_{dc}}{2} \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) - \frac{v_{dc}}{2} \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right] = \frac{2v_{dc}}{3} \angle \pi/3$$

De même manière, on peut calculer les coordonnées de tous les vecteurs de tension générés par un onduleur de tension à deux niveaux. Le [tableau \(I.1\)](#) regroupe les coordonnées du vecteur correspond à chaque état de commutation.

Tableau (I.1) : Vecteurs de tension de sortie d'un onduleur à deux niveaux

v_i	S_a	S_b	S_c	v_α	v_β
v_0	0	0	0	0	0
v_1	1	0	0	$2/3 v_{dc}$	0
v_2	1	1	0	$1/3 v_{dc}$	$\sqrt{1/3} v_{dc}$
v_3	0	1	0	$-1/3 v_{dc}$	$\sqrt{1/3} v_{dc}$
v_4	0	1	1	$-2/3 v_{dc}$	0
v_5	0	0	1	$-1/3 v_{dc}$	$-\sqrt{1/3} v_{dc}$
v_6	1	0	1	$1/3 v_{dc}$	$-\sqrt{1/3} v_{dc}$
v_7	1	1	1	0	0



Figure(I.4) Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur à deux niveaux.

Les deux combinaisons (111) et (000) engendrent le même vecteur de tension (vecteur nul). La figure (I.4) montre la représentation dans le plan $\alpha\beta$ des huit vecteurs générés par l'onduleur à deux niveaux. Cette représentation est connue dans la littérature par l'hexagone de commutation [3].

I. 4 Modélisation de l'onduleur de tension triphasé à trois niveaux

La figure (I.5) représente la structure de l'onduleur à trois niveaux à diodes flottantes, appelé en anglais (Neutral Point Clamped Inverter). Il se compose de trois bras symétriques dont chacun est constitué de quatre interrupteurs bidirectionnels et de deux diodes. Les deux interrupteurs S_{x1}, S_{x2} , $x = a, b, c$ sont contrôlés de façon complémentaire respectivement avec les deux interrupteurs S_{x3}, S_{x4} , $x = a, b, c$.

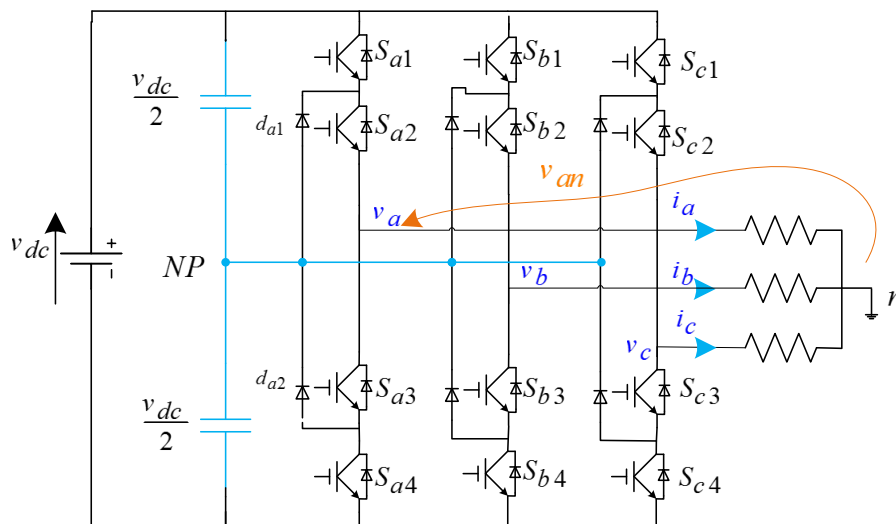


Figure (I.5) : Structure d'un onduleur triphasé à type NPC

I.4.1 États de commutation utiles d'un bras d'onduleur à trois niveaux

Pour chaque bras d'onduleur, il existe trois états de commutation utiles (2, 1, 0) qui peuvent générer des tensions de sorties différentes.

- Etat 2 : les deux interrupteurs en haut S_{x1} et S_{x2} sont fermés et les deux interrupteurs en bas S_{x3} et S_{x4} sont ouverts, voir figure (I.6) (a). La tension de sortie v_{xNP} (par rapport au point neutre NP) est égal à $\frac{v_{dc}}{2}$.

- Etat 0 : les deux interrupteurs S_{x1} et S_{x2} sont ouverts et les deux interrupteurs S_{x3} et S_{x4} sont fermés, **figure (I.6) (b)**. La tension de sortie du bras v_{xNP} dans ce cas est égal à $-\frac{v_{dc}}{2}$.
- Etat 1 : l'interrupteur S_{x1} est fermé et l'interrupteur S_{x2} est ouvert ce qui implique que S_{x3} est fermé et S_{x4} est ouvert, **figure (I.6) (c)**. La tension de sortie v_{xNP} dans ce cas est égale à 0. Dans cet état les deux diodes d_{x1}, d_{x2} sont passantes.

D'après les règles précédentes on peut écrire les relations suivantes :

$$\begin{cases} \text{Etat '2'}, (S_{x1}, S_{x2}) = (1, 1), v_{xNP} = v_{dc}/2, \\ \text{Etat '0'}, (S_{x1}, S_{x2}) = (0, 0), v_{xNP} = -v_{dc}/2, \quad x = a, b, c \\ \text{Etat '1'}, (S_{x1}, S_{x2}) = (0, 1), v_{xNP} = 0 \end{cases} \quad (\text{I.14})$$

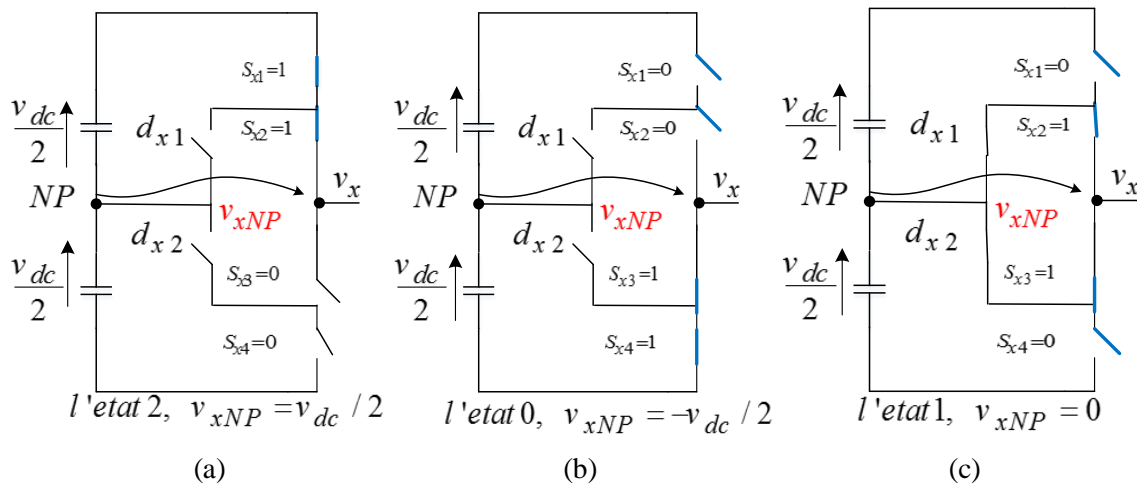


Figure (I.6) : Différents états utiles d'un bras d'onduleur de tension à trois niveaux type NPC.

I.4.2 Fonction de commutation d'un onduleur à trois niveaux

Nous définissons pour chaque état h du bras x une fonction de connexion F_x^h exprimée comme suit :

$$\begin{cases} F_x^2 = S_{x1} S_{x2} \\ F_x^1 = \bar{S}_{x1} S_{x2} \\ F_x^0 = \bar{S}_{x1} \bar{S}_{x2} \end{cases} \quad (\text{I.15})$$

I.4.3 Tension de sortie d'un onduleur à trois niveaux

La tension de sortie de chaque bras par rapport au point NP, v_{xNP} , $x = a, b, c$ est exprimée en fonction des états de commutation comme suit :

$$v_{xNP} = \begin{cases} \frac{v_{dc}}{2} & \text{si } F_x^2 = 1 \\ 0 & \text{si } F_x^1 = 1 \\ -\frac{v_{dc}}{2} & \text{si } F_x^0 = 1 \end{cases} \quad x = a, b, c \quad (\text{I.16})$$

L'équation (I.16) peut être réécrite sous la forme suivante :

$$v_{xNP} = \frac{v_{dc}}{2} (S_{a1}S_{a2} - \bar{S}_{a1}\bar{S}_{a2}) \quad (\text{I.17})$$

Ainsi, on peut écrire les tensions $v_{aNP}, v_{bNP}, v_{cNP}$ sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} v_{aNP} \\ v_{bNP} \\ v_{cNP} \end{bmatrix} = \frac{v_{dc}}{2} \begin{bmatrix} F_a^2 - F_a^0 \\ F_b^2 - F_b^0 \\ F_c^2 - F_c^0 \end{bmatrix} \quad (\text{I.18})$$

Les tensions composées v_{ab}, v_{bc}, v_{ca} peuvent être exprimées comme suit:

$$\begin{bmatrix} v_{ab} \\ v_{bc} \\ v_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{aNP} - v_{bNP} \\ v_{bNP} - v_{cNP} \\ v_{cNP} - v_{aNP} \end{bmatrix} = \frac{v_{dc}}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_a^2 - F_a^0 \\ F_b^2 - F_b^0 \\ F_c^2 - F_c^0 \end{bmatrix} \quad (\text{I.19})$$

Les tensions simples (par rapport au neutre de la charge) v_{an}, v_{bn}, v_{cn} sont exprimées en fonction des tensions simples et les tensions $v_{aNP}, v_{bNP}, v_{cNP}$ comme suit :

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} v_{ab} - v_{ca} \\ v_{bc} - v_{ab} \\ v_{ca} - v_{bc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{aNP} \\ v_{bNP} \\ v_{cNP} \end{bmatrix} \quad (\text{I.20})$$

A partir des relations (I.18) et (I.20), les tensions simples v_{an}, v_{bn}, v_{cn} peuvent être exprimées en fonction des fonctions de connexions comme suit :

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{v_{dc}}{6} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_a^2 - F_a^0 \\ F_b^2 - F_b^0 \\ F_c^2 - F_c^0 \end{bmatrix} \quad (\text{I.21})$$

Le système triphasé (I.21) peut être transformé à un système biphasé en utilisant la transformé de Clarck donné par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} \quad (\text{I.24})$$

Où, v_α, v_β représentent les tensions simples de l'onduleur à trois niveaux dans le repère complexe ($\alpha\beta$).

I.4.3 Représentation vectorielle des tensions de sortie d'un onduleur à trois niveaux

D'après l'analyse précédente, on constate que l'onduleur de tension à trois niveaux possède $3^3 = 27$ états de commutation. Chaque état de commutation peut être représenté par un vecteur rotatif dans le plan complexe en utilisant la transformation donnée précédemment dans (I.13). Par exemple, pour l'état 210, les tensions $v_{aNP}, v_{bNP}, v_{cNP}$ peuvent être représentées par le vecteur rotatif suivant :

$$v(210) = \frac{2}{3} \left(\frac{v_{dc}}{2} e^{j0} + 0 \times e^{j2\pi/3} - \frac{v_{dc}}{2} e^{-j2\pi/3} \right) = \frac{2}{3} \left(\frac{v_{dc}}{2} - \frac{v_{dc}}{2} \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right) = \frac{1}{\sqrt{3}} v_{dc} \angle \pi/6$$

De même manière, on peut calculer les coordonnées de tous les vecteurs de tension générés par un onduleur de tension à trois niveaux. Le [tableau \(I.2\)](#) regroupe les différents états de commutation et les coordonnées du vecteur correspondant.

La [figure \(I.7\)](#) illustre la représentation vectorielle des tensions correspond aux 27 états de commutation de l'onduleur à trois niveaux. Ce diagramme est divisé en 6 secteurs similaires, chaque secteur se compose de quatre zones triangulaires appelés dans ce manuscrit 'Régions'. Les vecteurs de tension d'onduleur à trois niveaux peuvent être classés selon leurs amplitudes en trois groupes :

- Trois (03) vecteurs nuls (zero vectors) correspondant aux états de commutation 000, 111 et 222. L'amplitude de ces vecteurs est nulle.
- Douze (12) petits vecteurs (small vectors) correspondants aux états de commutation 100, 211, 221, 110, 121, 010, 122, 011, 112, 001, 212, 101. L'amplitude de ces vecteurs est égale à $v_{dc}/3$.
- Six (06) vecteurs moyens (medium vectors) correspondants aux états de commutation 210-120-021-012-102-201. L'amplitude de ces vecteurs est égale à $v_{dc}/\sqrt{3}$.
- Six (06) grands vecteurs (large vectors) correspondants aux états de commutation 200,220, 020, 022, 002, 202. L'amplitude de ces vecteurs est égale à $2v_{dc}/3$.

Tableau (I.2) : coordonnées des vecteurs de tension d'un onduleur à trois niveaux type NPC

Etat de commutation	Coordonné réelle du vecteur de tension (v_α)	Coordonné complexe du vecteur de tension (v_β)
222,111,000	0	0
100,211	$v_{dc}/3$	0
200	$2v_{dc}/3$	0
210	$v_{dc}/2$	$v_{dc}/\sqrt{12}$
221,110	$v_{dc}/6$	$v_{dc}/\sqrt{12}$
220	$v_{dc}/3$	$v_{dc}/\sqrt{3}$
120	0	$v_{dc}/\sqrt{3}$
121,010	$-v_{dc}/6$	$v_{dc}/\sqrt{12}$
020	$-v_{dc}/3$	$v_{dc}/\sqrt{3}$
021	$-v_{dc}/2$	$v_{dc}/\sqrt{12}$
122,011	$-v_{dc}/3$	0
022	$-2v_{dc}/3$	0
012	$-v_{dc}/2$	$-v_{dc}/\sqrt{12}$
112,001	$-v_{dc}/6$	$-v_{dc}/\sqrt{12}$
002	$-v_{dc}/3$	$-v_{dc}/\sqrt{3}$
102	0	$-v_{dc}/\sqrt{3}$
212,101	$v_{dc}/6$	$-v_{dc}/\sqrt{12}$
202	$v_{dc}/3$	$-v_{dc}/\sqrt{3}$
201	$v_{dc}/2$	$-v_{dc}/\sqrt{12}$

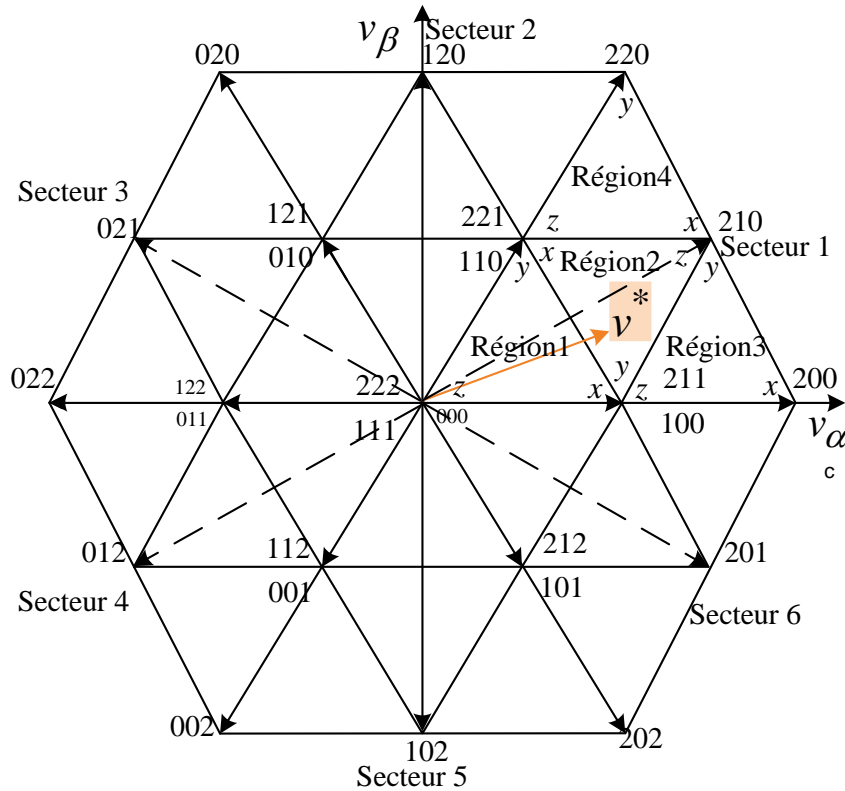


Figure (I.7): Représentation vectorielle des vecteurs de tensions d'un onduleur trois niveaux type NPC.

I. 5 Modulation vectorielle de l'onduleur à trois niveaux

La modulation vectorielle présente des avantages très intéressants par rapport à la modulation sinusoïdal-triangulaire notamment en termes du THD, les pertes par commutation et le pourcentage d'utilisation du bus continu (indice de modulation). L'algorithme de la modulation vectorielle comporte quatre étapes essentielles qui sont [4] :

- 1- Détermination du secteur qui contient le vecteur de référence.
- 2- Détermination de la région contenant le vecteur de référence.
- 3- Calcul des temps d'application des vecteurs de tension à appliquer.
- 4- Distribution des temps d'application et génération des signaux de commande.

Dans les paragraphes suivants, nous allons présenter brièvement ces quatre étapes.

I.5. 1 Détermination du secteur contenant le vecteur de référence

Le vecteur de référence v^* dans la figure (I.8), effectue une rotation dans le plan $\alpha\beta$ à une vitesse angulaire équivalente à la pulsation des trois tensions de référence (v_a^*, v_b^*, v_c^*) dans le repère triphasé (abc). L'argument du vecteur de référence est calculé comme suit :

$$\theta = \text{atan2}(v_{\beta}^* / v_{\alpha}^*) \quad (\text{I.21})$$

Où $v_{\beta}^*, v_{\alpha}^*$ représentent respectivement la projection du vecteur de référence sur les axes $\alpha\beta$, voire [figure \(I.8\)](#).

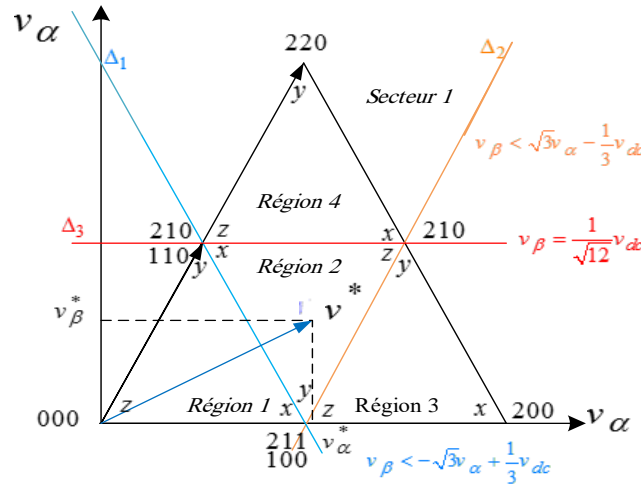


Figure (I.8): Régions triangle ulnaires du premier secteur

Le secteur qui contient le vecteur de référence peut être identifié à partir de l'argument du vecteur de référence θ comme suit

$$\text{secteur} = \begin{cases} 1 & \text{si} & 0 \leq \theta < \pi / 3 \\ 2 & \text{si} & \pi / 3 \leq \theta < 2\pi / 3 \\ 3 & \text{si} & 2\pi / 3 \leq \theta < \pi \\ 4 & \text{si} & \pi \leq \theta < 4\pi / 3 \\ 5 & \text{si} & 4\pi / 3 \leq \theta < 5\pi / 3 \\ 6 & \text{si} & 5\pi / 3 \leq \theta < 2\pi \end{cases} \quad (\text{I.22})$$

I.5.2 Détermination de la région contenant le vecteur de référence

Après avoir déterminé le secteur qui contient le vecteur de référence, l'étape suivante consiste à déterminer la région contenant le vecteur de référence. Parmi les méthodes les plus reconnues dans la littérature est la méthode de trois droites (Δ_1), (Δ_2) et (Δ_3), voir [figure \(I.8\)](#). Cette dernière consiste à comparer la composante imaginaire du vecteur de référence (v_{β}^*) avec les coordonnées des trois droites correspondants au point v_{α}^* . Le [tableau \(I.3\)](#) résume les relations mathématiques permettant de localiser le vecteur de référence.

Tableau (I.3) : Règles d'identification de la région contenant le vecteur de référence

	Région 1	Région 3	Région 4
Secteur 1	$v_{\beta}^* < -\sqrt{3}v_{\alpha}^* + \frac{1}{3}v_{dc}$	$v_{\beta}^* < \sqrt{3}v_{\alpha}^* - \frac{1}{3}v_{dc}$	$v_{\beta}^* \geq \frac{1}{\sqrt{12}}v_{dc}$
Secteur 2	$v_{\beta}^* < \frac{1}{\sqrt{12}}v_{dc}$	$v_{\beta}^* \geq -\sqrt{3}v_{\alpha}^* + \frac{1}{3}v_{dc}$	$v_{\beta}^* \geq \sqrt{3}v_{\alpha}^* + \frac{1}{3}v_{dc}$
Secteur 3	$v_{\beta}^* < \sqrt{3}v_{\alpha}^* + \frac{1}{3}v_{dc}$	$v_{\beta}^* \geq \frac{1}{\sqrt{12}}v_{dc}$	$v_{\beta}^* < -\sqrt{3}v_{\alpha}^* - \frac{1}{3}v_{dc}$
Secteur 4	$v_{\beta}^* \geq -\sqrt{3}v_{\alpha}^* - \frac{1}{3}v_{dc}$	$v_{\beta}^* \geq \sqrt{3}v_{\alpha}^* + \frac{1}{3}v_{dc}$	$v_{\beta}^* < -\frac{1}{\sqrt{12}}v_{dc}$
Secteur 5	$v_{\beta}^* \geq -\frac{1}{\sqrt{12}}v_{dc}$	$v_{\beta}^* < -\sqrt{3}v_{\alpha}^* - \frac{1}{3}v_{dc}$	$v_{\beta}^* < \sqrt{3}v_{\alpha}^* - \frac{1}{3}v_{dc}$
Secteur 6	$v_{\beta}^* \geq \sqrt{3}v_{\alpha}^* - \frac{1}{3}v_{dc}$	$v_{\beta}^* < -\frac{1}{\sqrt{12}}v_{dc}$	$v_{\beta}^* \geq -\sqrt{3}v_{\alpha}^* + \frac{1}{3}v_{dc}$

I.5.3 Calcul des temps d'application des vecteurs de tension à appliquer

Le principe de la modulation vectorielle consiste à appliquer les trois vecteurs les plus proches au vecteur de référence, i.e., les vecteurs formant cette région. Ensuite, on calcule les temps d'application de ces vecteurs qui permettent de générer le vecteur de tension de référence. Par exemples si le vecteur de tension de référence se trouve dans le secteur 1, région 2, les vecteurs à appliquer sont 210, 221, 110, 211 et 100. Les temps affectés pour ces vecteurs doivent remplir la relation suivante [5]:

$$T_h v^* = t_x v_x + t_y v_y + t_z v_z \quad (\text{I.23})$$

Où, v_x, v_y, v_z et t_x, t_y, t_z représentent respectivement les vecteurs formant la région et leurs temps d'application. T_h représente la période de commutation.

La projection de v_x, v_y, v_z et v^* sur les axes $\alpha\beta$ permet d'écrire la relation suivante :

$$T_h (v_{\alpha}^* + jv_{\beta}^*) = t_x (v_{x\alpha} + jv_{x\beta}) + t_y (v_{y\alpha} + jv_{y\beta}) + t_z (v_{z\alpha} + jv_{z\beta}) \quad (\text{I.24})$$

Où, $v_{k\alpha}, v_{k\beta}$, $k = x, y, z$ représentent respectivement les coordonnées réelles et imaginaires des trois vecteurs v_x, v_y, v_z .

L'équation (I.24) peut être écrite sous une forme matricielle comme suit :

$$T_h \begin{bmatrix} v_\alpha^* \\ v_\beta^* \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{x\alpha} & v_{y\alpha} & v_{z\alpha} \\ v_{x\beta} & v_{y\beta} & v_{z\beta} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (\text{I.25})$$

A partir de l'équation (I.25), les temps d'application t_x, t_y, t_z peuvent être calculés comme suit :

$$\begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x^\alpha & v_y^\alpha & v_z^\alpha \\ v_x^\beta & v_y^\beta & v_z^\beta \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} T_h \begin{bmatrix} v_\alpha^* \\ v_\beta^* \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{I.26})$$

I.5.4 Distribution des vecteurs de tension et leurs temps d'application

Pour minimiser les pertes par commutation et de réduire le nombre de transition (ON-OFF et OFF-ON), on applique les états de commutation dans l'ordre croissant durant la demi période puis dans l'ordre inverse dans le deuxième demi période [6]. Par exemple, si le vecteur de tension de référence est situé dans le secteur 1, région 1, la succession des états et leur temps d'application sont distribués comme illustre la figure (I.9).

Remarques :

- Lorsque le sommet de la région contient plusieurs états de commutation (comme le cas des vecteurs zéros et les vecteurs petits (appelés aussi vecteurs redondants), le temps d'application du vecteur sera partagé de façon équitable sur ces états.
- Il est possible de réduire encore le nombre de transition dans la région 1 en supprimant l'état 222 et l'état 111.

A partir de la figure (I.9), on peut calculer le rapport cyclique de chaque interrupteur de puissance comme suit :

$$d_{xi} = t_{xi} / T_h \quad x = a, b, c \quad i = 1, 2 \quad (\text{I.27})$$

Où t_{xi} représente la durée de fermeture de l'interrupteur qui peut être calculée en fonction des temps t_x, t_y, t_z , voir dans la figure (I.9).

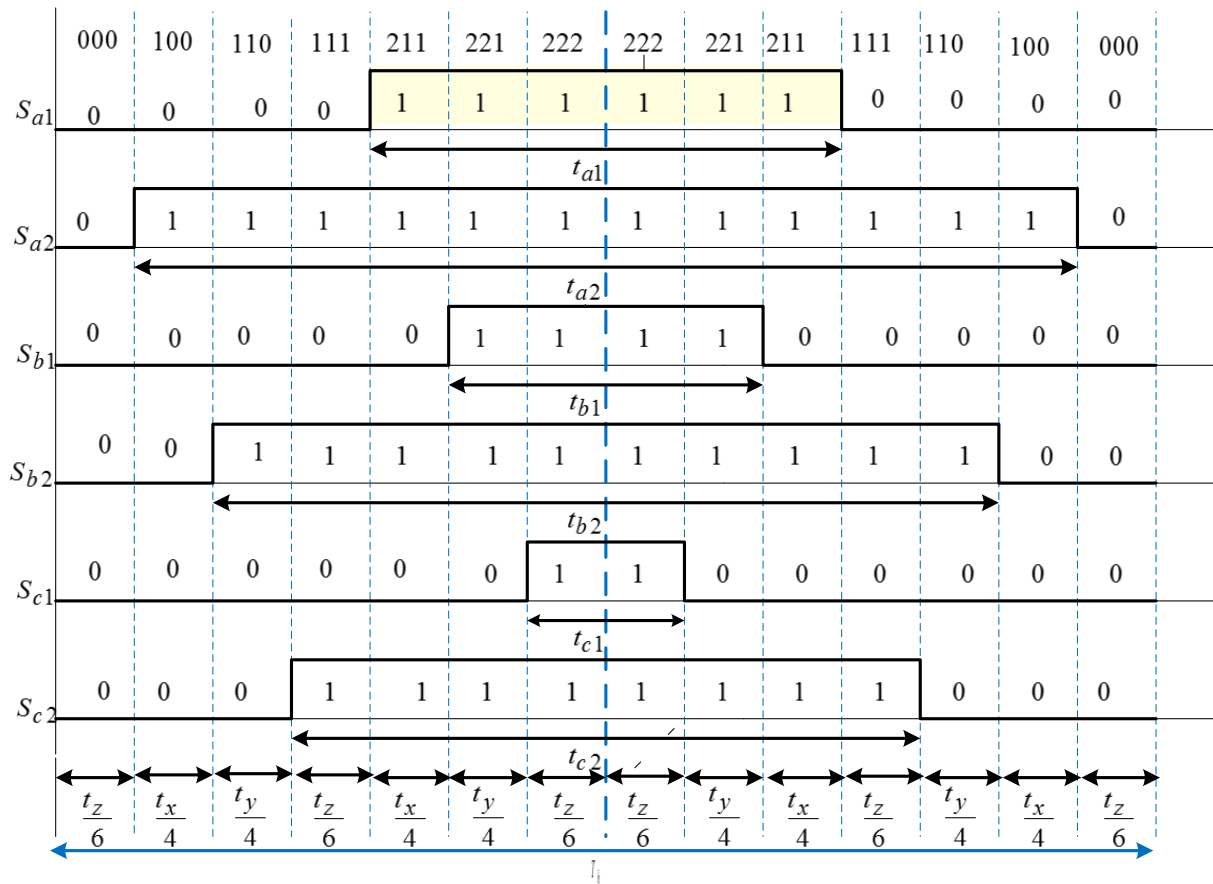


Figure (I.9) : Distribution des temps d'application des vecteurs de tension.

I. 6 Modélisations d'un onduleur de tension à trois niveaux alimente une charge R-L via un filtre LC

La figure (I.10) représente un onduleur de tension triphasé à trois niveaux alimente une charge R-L via un filtre LC. Dans les paragraphes suivants, nous allons développer le modèle mathématique de ce système dans le repère triphasé (abc) , le repère biphasé (α, β) et le repère synchrone (dq) .

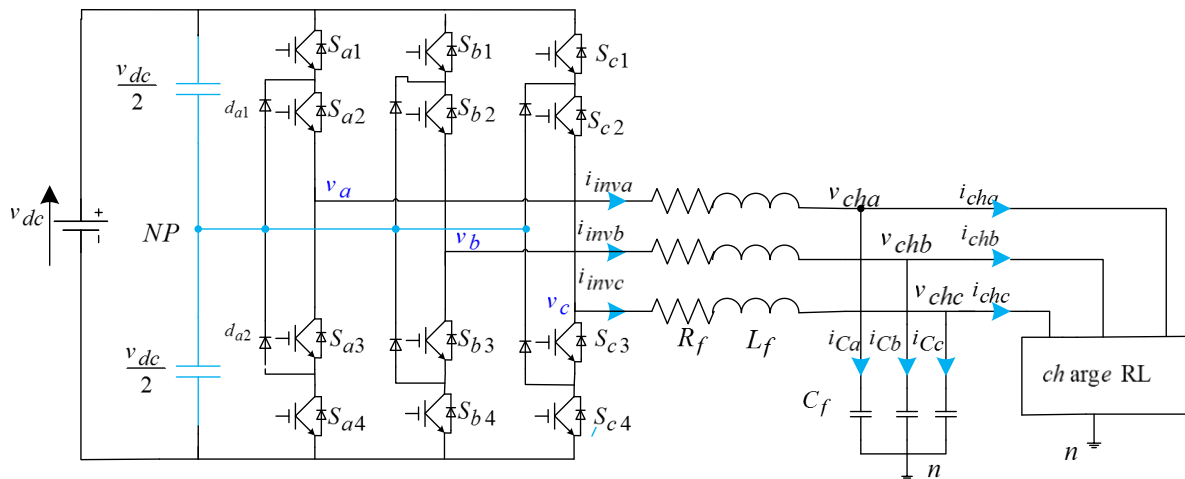


Figure (I.10) : Onduleur de tension triphasé à trois niveaux alimente une charge R-L via un filtre LC.

I.6.1 Modélisation du système dans le repère (abc)

Le modèle mathématique du système de la figure (I.10) dans le repère triphasée (abc) est obtenu en appliquant la loi de Kirchhoff comme suit :

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{inva} \\ i_{invb} \\ i_{invc} \end{bmatrix} + R_f \begin{bmatrix} i_{inva} \\ i_{invb} \\ i_{invc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{cha} \\ v_{chb} \\ v_{chc} \end{bmatrix} \quad (I.28)$$

$$C_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_{cha} \\ v_{chb} \\ v_{chc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{inva} \\ i_{invb} \\ i_{invc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{cha} \\ i_{chb} \\ i_{chc} \end{bmatrix}$$

Où, $v_{cha}, v_{chb}, v_{chc}$ et $i_{cha}, i_{chb}, i_{chc}$ représentent respectivement les tensions et les courants de la charge, v_{an}, v_{bn}, v_{cn} et $i_{inva}, i_{invb}, i_{invc}$ sont respectivement, les tensions et les courants de l'onduleur à trois niveaux. L_f, R_f représentent respectivement l'inductance du filtre et sa résistance interne. C_f représente la capacité du filtre.

I.6.2 Modélisation du système dans le repère (α, β)

Les grandeurs courants/tensions triphasés peuvent être transformées au repère $\alpha\beta$ en utilisant la transformation du Clarke comme suit :

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = T_{\alpha\beta}^{abc} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}$$

(I.29)

Où, x peut prendre les grandeurs i_{ch}, v_{ch}, i_{inv} ou v .

En appliquant la transformation (I.29), le modèle analytique de (I.28) peut être transformé à un système biphasé comme suit :

$$\begin{cases} L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{inv\alpha} \\ i_{inv\beta} \end{bmatrix} = -R_f \begin{bmatrix} i_{inv\alpha} \\ i_{inv\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{ch\alpha} \\ v_{ch\beta} \end{bmatrix} \\ C_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{inv\alpha} \\ i_{inv\beta} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{ch\alpha} \\ i_{ch\beta} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (I.30)$$

Où, $v_{ch\alpha}, v_{ch\beta}$ et $i_{ch\alpha}, i_{ch\beta}$ représentent respectivement la projection des tensions et des courants de la charge au repère $\alpha\beta$, v_α, v_β et $i_{inv\alpha}, i_{inv\beta}$ sont respectivement, les tensions et les courants de l'onduleur au repère $\alpha\beta$.

I.6.3 Modélisation du système dans le repère dq synchrone

Le modèle (I.30) peut être transformé au repère synchrone (dq) en utilisant la transformation suivante :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = T_{dq}^{\alpha\beta} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{I.31})$$

Où, x peut prendre les grandeurs i_{ch} , v_{ch} , i_{inv} ou v ; θ est l'argument du vecteur de référence.

En utilisant la transformation (I.31) dans (I.30), on trouve le modèle du système dans le repère dq comme suit :

$$\begin{cases} L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{invd} \\ i_{invq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_f & \omega \\ -\omega & -R_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{invd} \\ i_{invq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{chd} \\ v_{chq} \end{bmatrix} \\ C_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_{chd} & \omega + v_{chq} \\ v_{chq} & \omega - v_{chd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{invd} \\ i_{invq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{chd} \\ i_{chq} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (\text{I.32})$$

Où, v_{chd}, v_{chq} et i_{chd}, i_{chq} représentent respectivement la projection des tensions et des courants de la charge dans le repère dq , v_d, v_q et i_{invd}, i_{invq} sont respectivement, les tensions et les courants de l'onduleur au repère dq , ω représente la pulsation du système.

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié la modélisation de l'onduleur de tension triphasé à deux et à trois niveaux. Dans un premier temps, nous avons présenté le principe de fonctionnement de ces onduleurs. Ensuite, nous avons présenté en détail la théorie de la modulation vectorielle à trois niveaux, telles que la localisation du vecteur de tension de référence, le calcul des temps d'application des vecteurs à utiliser pour moduler le vecteur de référence et la génération des signaux de commande.

Dans la dernière partie, nous avons développé un modèle analytique d'un système se compose d'un onduleur à trois niveaux connecté au filtre LC et alimente une charge R-L. Ce modèle est développé dans le repère (abc), le repère biphasé ($\alpha\beta$) et le repère synchrone (dq).

Dans le chapitre suivant, nous allons étudier la commande en boucle fermée du système modélisé.

Chapitre II

Commande linéaire d'un onduleur de tension triphasé à trois niveaux type NPC

II. 1 Introduction

Les onduleurs de tension sont des dispositifs plus qu'essentiels dans des nombreuses applications industrielles telles que, l'alimentation de secours, l'entraînement des machines électriques, et les systèmes de production d'énergie renouvelable connectés au réseau. La structure de commande adoptée a un impact important sur les performances et l'efficacité de l'onduleur [7]. Le choix de la stratégie de commande, le type de régulateur, la synthèse de la loi de commande sont les facteurs les plus importants pour développer une structure de contrôle efficace, fidèle et robuste.

Dans ce chapitre nous allons focaliser notre étude sur la commande linéaire d'onduleur de tension triphasé à trois niveaux type NPC. En premier temps, nous allons présenter la synthèse d'une commande linéaire pour un onduleur de tension alimente une charge R-L via un filtre LC. Cette structure est basée principalement sur les régulateurs PI et la modulation vectorielle à trois niveaux. L'objectif de cette structure de commande est de piloter l'onduleur à trois niveaux pour imposer une tension désirée aux bornes de la charge. Les performances de cette structure de commande seront testés vis-à-vis la variation de l'amplitude de la tension de référence et la variation de la charge.

II. 2 Synthèse d'une commande linéaire pour un système se compose d'un onduleur - filtre LC- charge RL

Dans cette partie, nous allons élaborer une commande permettant de contrôler un onduleur de tension à trois niveaux raccordé à un filtre LC et alimente une charge RL.

La [figure \(II.1\)](#) montre le schéma global de la commande synthétisée. Cette commande est composée de deux boucles de régulation en cascade, élaborées dans le repère dq . La première

boucle sert à contrôler la tension désirée aux bornes de la charge (v_{chd}^*, v_{chq}^*). La sortie de cette boucle permet de déterminer les courants de référence à imposer sur l'onduleur (i_{invd}^*, i_{invq}^*). La seconde boucle est élaborée pour contrôler les courants de l'onduleur (i_{invd}, i_{invq}) et les maintenir plus proches de leurs références i_{invd}^*, i_{invq}^* .

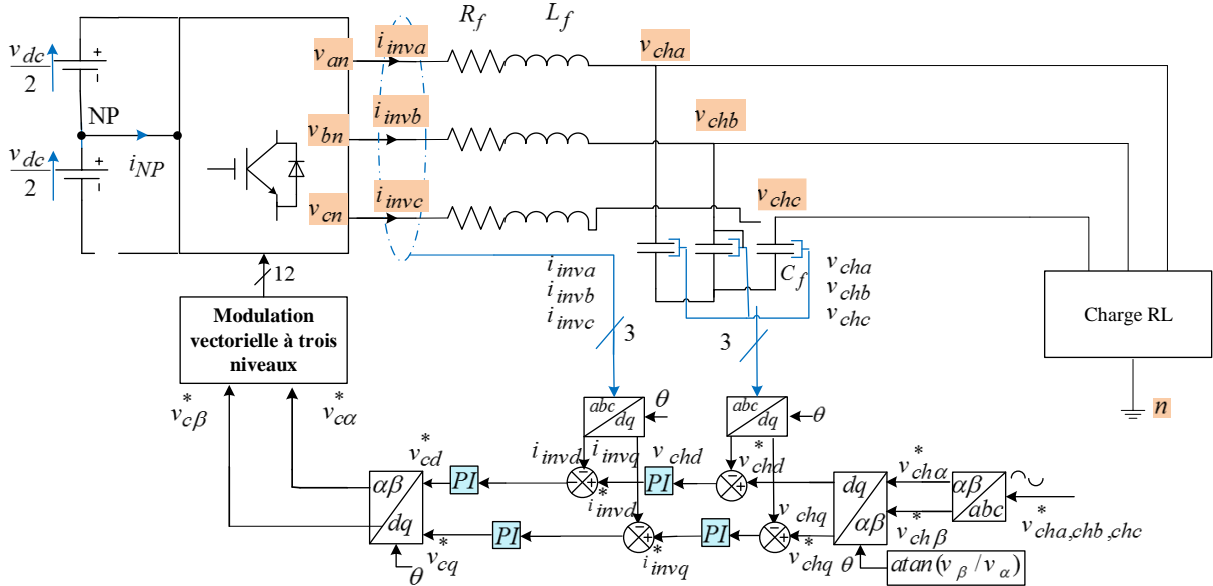


Figure (II.1): Structure de la commande d'un onduleur de tension à trois niveaux débite une charge RL via un filtre LC

II.2. 1 Synthèse des régulateurs de la tension de la charge

Afin de maintenir la tension souhaitée aux bornes de la charge, une boucle de régulation basée sur le régulateur PI est utilisée pour contrôler les tensions aux bornes des condensateurs du filtre. Comme illustre la [figure \(II.2\)](#), les sorties des régulateurs permettent de déterminer les courants de référence i_{cfd}^*, i_{cfq}^* . Ces courants seront utilisés ensuite pour calculer les courants de référence i_{invd}^*, i_{invq}^* comme suit :

$$\begin{cases} i_{invd}^* = i_{cfd}^* + i_{chd} \\ i_{invq}^* = i_{cfq}^* + i_{chq} + C_f \omega v_{chd} \end{cases} \quad (II.1)$$

Où, i_{chd} , i_{chq} représentent respectivement le courants direct et en quadrature de la charge, $\omega = 2\pi f$ représente la pulsation du système.

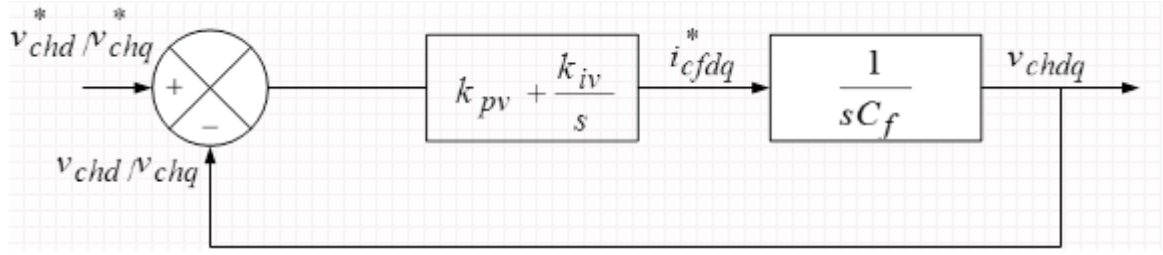


Figure (II.2) : Boucle de régulation de la tension de la charge

La fonction de transfert en boucle fermée du système de la [figure \(II.2\)](#), est calculée comme suit:

$$H_v(s) = \frac{\frac{k_{pv}}{C_f}s + \frac{k_{iv}}{C_f}}{s^2 + \frac{k_{pv}}{C_f}s + \frac{k_{iv}}{C_f}} \quad (\text{II.2})$$

Où, k_{pv}, k_{iv} représentent respectivement le gain proportionnel et intégral du régulateur.

Pour calculer k_{pv}, k_{iv} nous avons opté la méthode de placement des pôles. On désire que la fonction de transfert de [\(II.2\)](#) présente la même dynamique du système de deuxième ordre suivant :

$$F(s) = \frac{\omega_{nv}^2}{s^2 + 2\xi_v \omega_{nv} s + \omega_{nv}^2} \quad (\text{II.3})$$

Où, ξ_v , ω_{nv} représentent respectivement le facteur d'amortissement et la pulsation du système.

L'indentification de deux systèmes [\(II.2\)](#) et [\(II.3\)](#) permet de trouver le résultat suivant :

$$\begin{cases} k_{pv} = 2\xi_v \omega_{nv} C_f \\ k_{iv} = \omega_{nv}^2 C_f \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

II.2. 2 Synthèse du régulateur des courants de l'onduleur

Afin de forcer les courants d'onduleur i_{invd}, i_{invq} de suivre leurs références i_{invd}^*, i_{invq}^* , nous avons synthétisé la boucle de régulation présentée dans la [figure \(II.3\)](#).

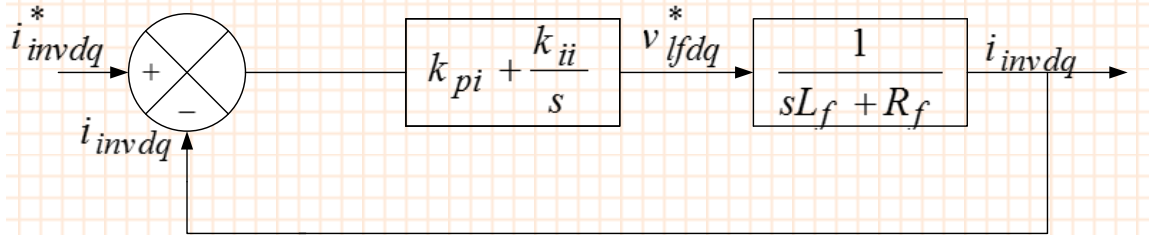


Figure (II.3) : Schéma de régulation des courants de l'onduleur.

La fonction de transfert en boucle fermée du système de la figure (II.18) s'écrit comme:

$$H_i(s) = \frac{\frac{(k_{pi}s + k_{ii})}{L_f}}{s^2 + \frac{(k_{pi}s + R_f s + k_{ii})}{L_f}} \quad (II.5)$$

Où: L_f, R_f représente respectivement l'inductance du filtre et sa résistance, k_{pi}, k_{ii} représentent respectivement le gain proportionnel et intégral du régulateur PI.

L'identification de (II.5) avec un système similaire au système (II.3) permet de trouver l'expression des gains comme suit :

$$\begin{cases} k_{pi} = 2\xi_i \omega_{ni} L_f - R_f \\ k_{ii} = L_f \omega_{ni}^2 \end{cases} \quad (II.6)$$

Où, ξ_i, ω_{ni} représentent respectivement le facteur d'amortissement et la pulsation du système désirés .

Enfin, les sorties des régulateurs v_{ifd}^*, v_{ifq}^* peuvent être utilisées pour calculer les tensions de référence de l'onduleur (v_d^*, v_q^*) comme suit :

$$\begin{cases} v_d^* = v_{ifd}^* + v_{chd} - L_f \omega i_{invq} \\ v_q^* = v_{ifq}^* + v_{chq} + L_f \omega i_{invd} \end{cases} \quad (II.7)$$

II. 3 Résultats de simulations

Afin de valider la structure de commande développée dans la section précédente, nous allons évaluer les performances du système présenté précédentes dans la figure (II.1) sous les variations suivantes :

- Variation de l'amplitude de la tension de référence ;
- Variation de la charge.

Les paramètres physiques du système et de la commande sont listés dans le [tableau \(II.1\)](#).

Tableau (II.1) : Paramètres physique du système et de control

Paramètres	Valeurs
Tension d'alimentation	$v_{dc} = 700V$
Fréquence de commutation	$f_c = 10kHz$
Capacité du condensateur du filtre	$C_f = 330\mu F$
Bobine du filtre	$L_f = 6.5mH, R_f = 0.2\Omega$
Gains des régulateurs de tension	$\xi_v = 1, \omega_{nvd} = 400 \text{ rad/s}, \omega_{nvq} = 800 \text{ rad/s}$
Gains des régulateurs des courants	$\xi_c = 1, \omega_{nid} = 2000 \text{ rad/s}, \omega_{niq} = 1200 \text{ rad/s}$
Paramètres de la charge	$50\Omega, 40mH$
Fréquence d'échantillonnage	$f_e = 50 \text{ kHz}$

II.3. 1 Variation de l'amplitude de la tension de référence

Dans ce test, nous allons vérifier les performances du système vis-à-vis la variation de l'amplitude de la tension de référence. Le scénario de la variation considéré est le suivant :

- On commence par une tension de référence triphasée d'amplitude 150 V.
- A l'instant 0.4s l'amplitude sera changée à 200V.
- A l'instant 0.8s l'amplitude sera diminuée à 100 V.

Les résultats de simulation obtenus sont présentés dans la [figure \(II.4\)](#).

Selon les [figures \(II.4\) \(a\)](#) et [\(II.4\) \(b\)](#), on constate que la tension directe et en quadrature de charge suivent parfaitement leurs références. De plus les variations de tension de référence n'influe pas sur la poursuite ce qui démontre la bonne synthèse des régulateurs utilisés.

[La figure \(II.4\) \(c\)](#) et [\(II.4\) \(d\)](#) présentent respectivement le courant direct et en quadrature de l'onduleur à trois niveaux. D'après ces figures, on constate que les courant de l'onduleur est bien superposés sur leurs références (i_{nvd}^*, i_{nvq}^*), ce qui valide également la synthèse de la commande et le calcul des gains des régulateurs.

[La figure \(II.4\) \(e\)](#) présente la tension d'une phase de la charge avec sa référence (dans le repère abc). D'après cette figure, on constate que l'onduleur à trois niveaux réagit bien avec

les variations de la tension de référence ce qui confirme en plus les performances analysés dans le repère dq.

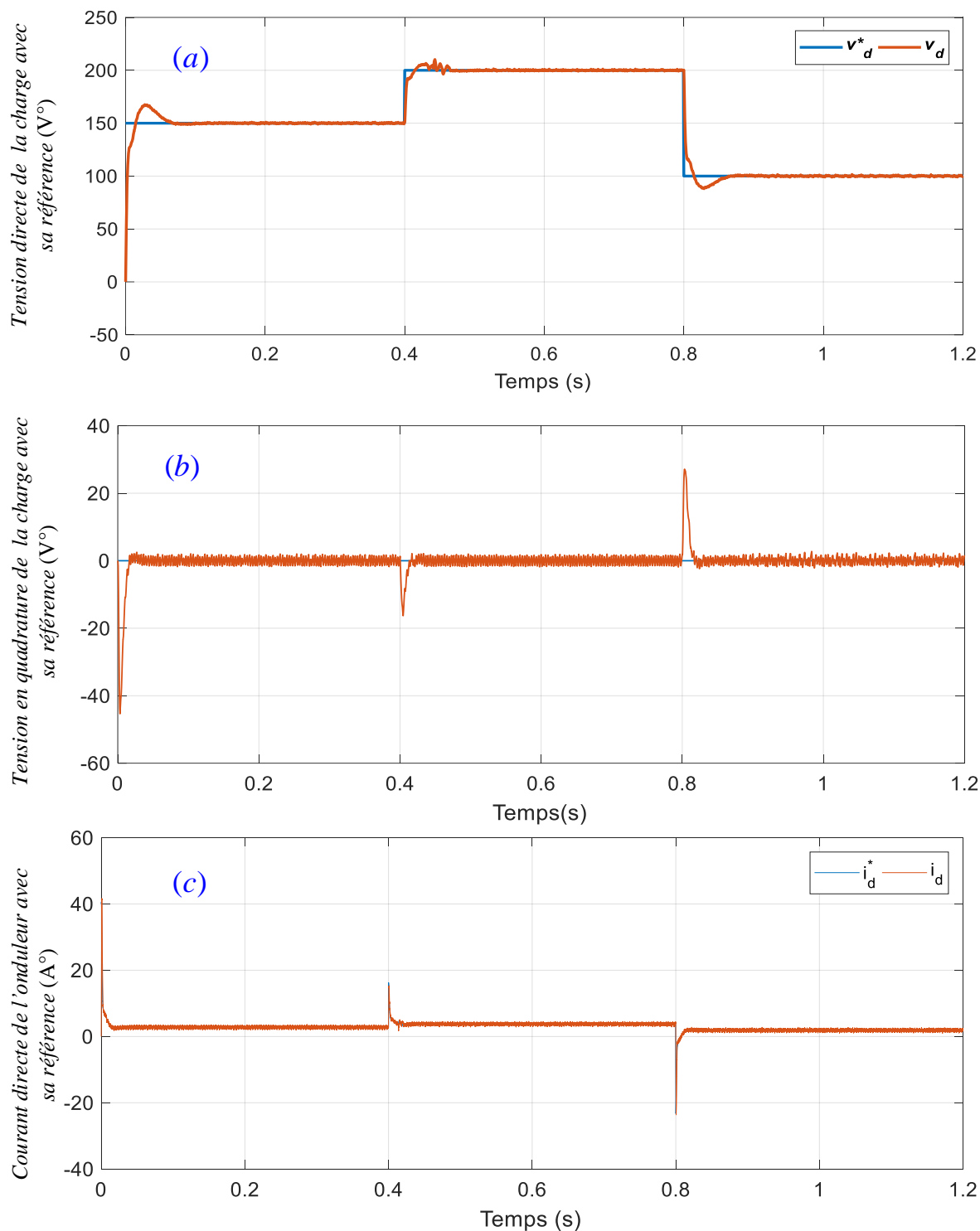


Figure (II.4) : Performances du système vis-à-vis la variation de l'amplitude de la tension de référence: (a) Tension directe de la charge avec sa référence, (b) Tension en quadratique de la charge avec sa référence, (c) Courant directe de l'onduleur NPC avec sa référence, (d) Courant en quadratique de l'onduleur NPC avec sa référence, (e) tension d'une phase de la charge avec sa référence.

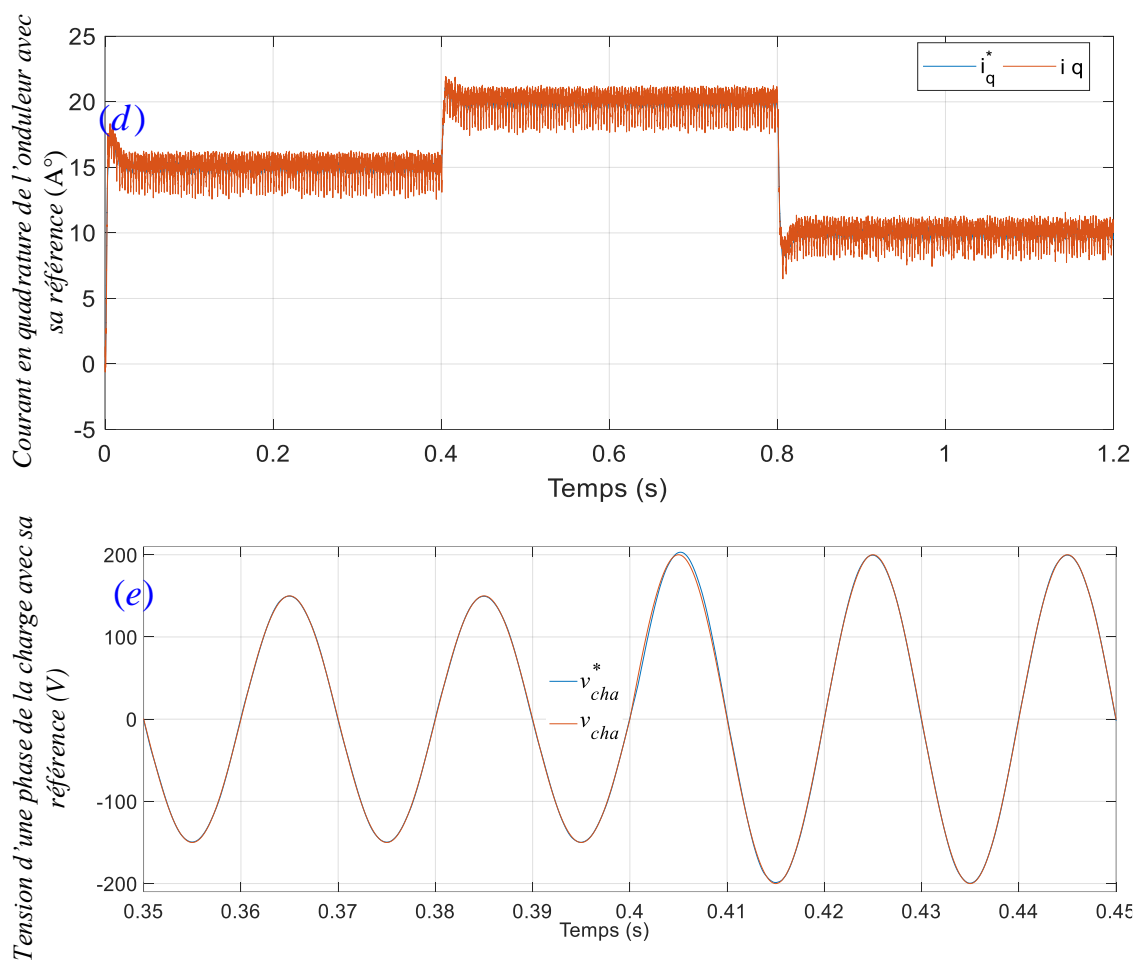


Figure (II.4) (suite) : Performances du système vis-à-vis la variation de l'amplitude de la tension de référence: (a) Tension directe de la charge avec sa référence, (d) Courant en quadrature de l'onduleur NPC avec sa référence, (e) tension d'une phase de la charge avec sa référence

II.3. 2 Variation de la charge

Dans ce test, nous allons vérifier les performances du système de figure (II.1) vis-à-vis une variation de la charge dont les paramètres sont listés dans le Tableau (II.1). La structure de commande utilisée est la même présentée dans la figure (II.2).

Le scénario de la variation de la charge est le suivant :

- [0s , 0.4s] Une seule charge est connectée ($R_{ch} = 50\Omega$).
- [0.4s , 0.8] Une charge supplémentaire est connectée au système ($R_{ch} = 50\Omega + 25\Omega$).

Les résultats de simulation obtenus sont présentés dans la figure (II.5).

La figure (II.5) (a) et (II.5) (a) représentent respectivement la tension directe et en quadrature de la charge avec sa référence. D'après cette figure, on constate que les tensions de la charge sont bien réglées sur leurs références même avec les variations de la charge considérées.

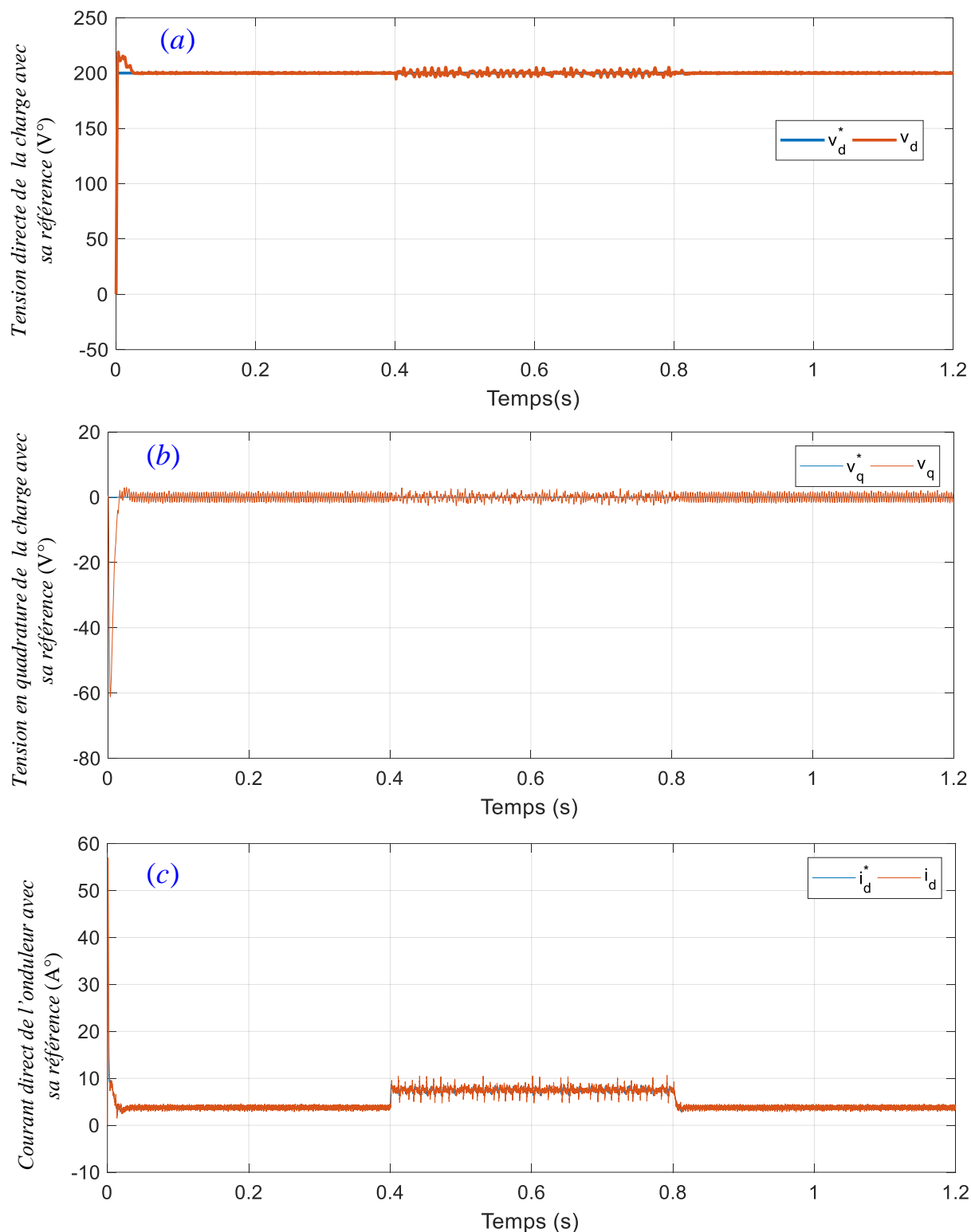


Figure (II.5) : Performances du système vis-à-vis la variation de la tension de référence: (a) Tension directe de la charge avec sa référence, (b) Tension en quadrature de la charge avec sa référence, (c) Courant direct de l'onduleur NPC avec sa référence, (d) Courant en quadrature de l'onduleur NPC avec sa référence.

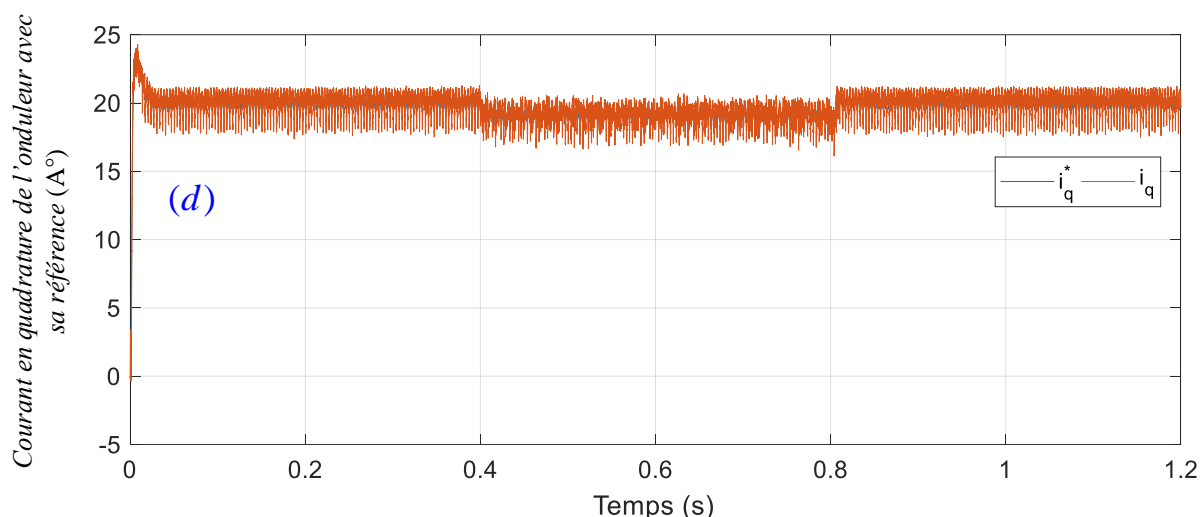


Figure (II.5) (suite) : Performances du système vis-à-vis la variation de la tension de référence (d)
Courant en quadrature de l'onduleur NPC avec sa référence.

La figure (II.5) (c) et (II.5) (d) représentent respectivement le courant direct et en quadrature de l'onduleur à trois niveaux avec leurs références. D'après ces figures, on constate que la connexion et la déconnexion de la charge supplémentaire traduit par un appel du courant et par conséquent un supplément de puissance est absorbé de la source. D'un autre côté, on constate que leurs courants de l'onduleur suivent bien leurs références même avec la variation de la charge ce qui confirme l'efficacité de la commande synthétisée.

II. 4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la commande linéaire d'un onduleur de tension à trois niveaux type NPC. Nous avons développé une structure de commande pour un onduleur NPC alimente une charge RL via un filtre LC. L'objectif de cette structure de commande est d'imposer la tension désirée aux bornes de la charge. Pour vérifier l'efficacité de la commande développée, nous avons procédé aux variations de l'amplitude de la tension de référence et de la charge. Les résultats de simulation obtenus ont montré une excellente poursuite de la tension désirée aux bornes de la charge.

Dans le chapitre suivant nous allons présenter l'implémentation pratique de la structure de commande développée.

Chapitre III:

Validation expérimentale d'une commande linéaire d'un onduleur triphasé à trois niveaux type NPC

III. 1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter la validation expérimentale de la structure de commande développée dans le chapitre précédent de ce mémoire. En rappelant que cette dernière est composée de deux boucles en cascade synthétisée dans le repère dq ; son objectif est de contrôler les tensions désirées aux bornes de la charge.

Dans la première partie de ce chapitre, nous allons présenter les différents composants du banc d'essai expérimental utilisé pour la validation tels que la structure de l'onduleur à trois niveaux, la carte de pilotage des interrupteurs de puissance, les cartes de mesures...etc. Dans la seconde partie de ce chapitre, nous allons présenter et commenter les résultats expérimentaux obtenus.

III. 2 Banc d'essai expérimental

Le banc d'essai utilisé pour la validation est montré dans la [figure \(III.1\)](#). Il comporte un onduleur de tension triphasé à trois niveaux type NPC, cartes de mesures, filtre LC, charge résistive, carte de commande dSPACE MicroLabBox et alimentation continue de puissance 1.6 kW. Les paramètres essentiels de ce dernier sont regroupés dans [tableau \(III.1\)](#).

Dans les paragraphes suivants nous présenterons brièvement les différents composants qui composent ce banc d'essai.

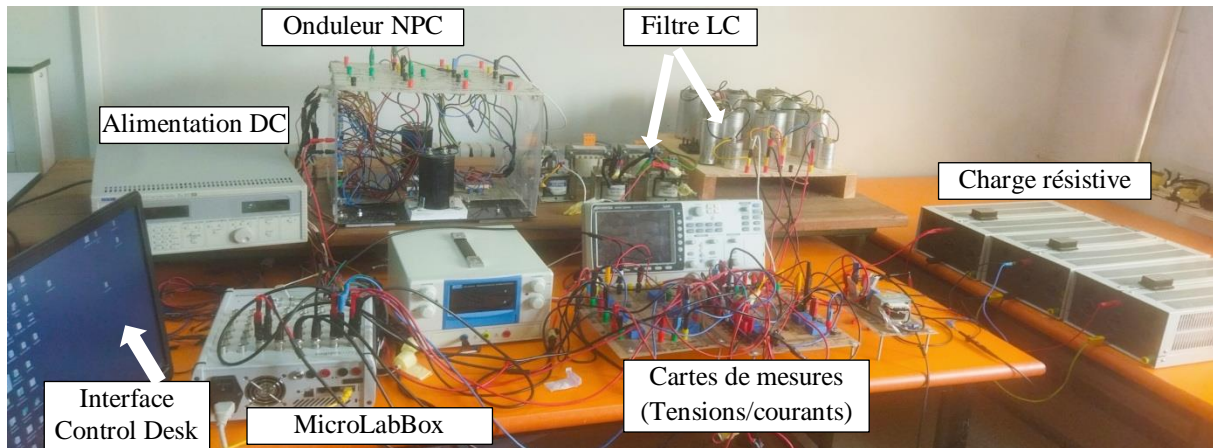


Figure (III.1) : Photo du banc d'essai.

Tableau (III.1): Paramètres du banc d'essai expérimental

Alimentation DC de l'onduleur	$v_{dc} = 60V$
Fréquence de commutation	$f_c = 5 \text{ kHz}$
Résistance de la charge	$R_{ch} = 5\Omega$
Filtre LC	$C_f = 275\mu F, L_f = 2 \text{ mH}$

III.2.1 Structure physique de l'onduleur de tension triphasé à trois niveaux

La [figure \(III.2\)](#) montre une photo de l'onduleur utilisé pour la validation. Il est conçu à base de trois modules SK20MLI066 [8] dont chacun comporte tous les éléments d'un bras (c.à.d. quatre IGBT + deux diodes). Les deux condensateurs d'entrée sont de capacité 3000 uF. Le circuit de pilotage, voir [figure \(III.3\)](#), est réalisé à base de driver HCP3120 [9] et l'alimentation isolée NMH1215DC [10], sa fonction consiste à adapter les niveaux de tension et de courants nécessaires pour la commutation des IGBT.

Remarque

Dans le schéma de la [figure \(III.3\)](#):

- la résistance R_1 est utilisée pour limiter le courant traversant la LED du driver i_{led} .
- la résistance R_2 est utilisée pour limiter le courant parcourant la gâchette i_g .

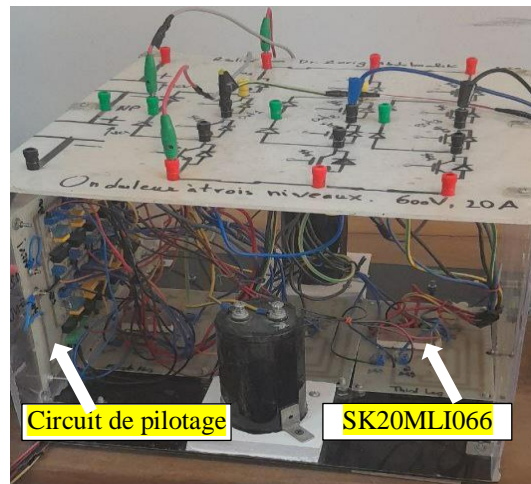


Figure (III.2) : Photo de l'onduleur triphasé à trois niveaux type NPC.

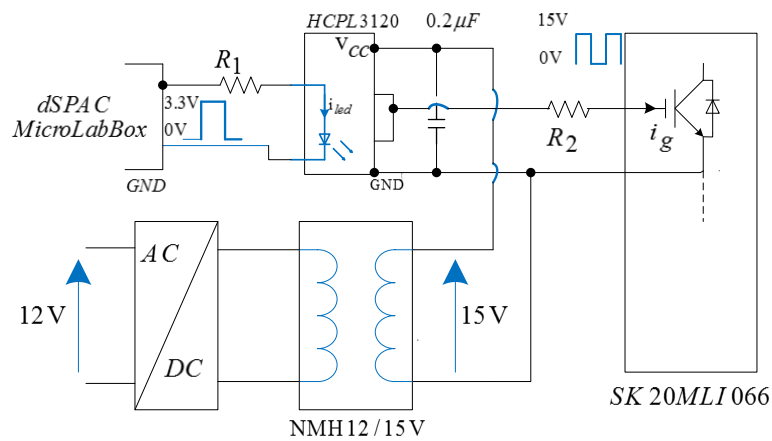


Figure (III.3) : Schéma synoptique du circuit de pilotage des IGBT.

III.2.2 Carte dSPACE MicroLabBox

La carte MicroLabBox [11] présentée dans la figure (IV.4) permet de configurer des applications de contrôle, de test et/ou de mesure. Elle dispose d'un processeur temps réel dual core de 2 GHz (PowerPC QorIQ P5020 Freescale) capable d'atteindre, selon l'application, des cycles rapides en boucle fermée de moins de 15 μ s. Pour les applications de commande extrêmement rapides, le FPGA intégré peut être utilisé pour les calculs à très grande vitesse. La technologie FPGA permet le traitement, exact, parallèle et rapide des E/S. La MicroLabBox inclut également plus de 100 interfaces d'E/S très diverses de type analogique, numérique. Elle comporte aussi des interfaces spécialisées telles que le convertisseur analogiques/numériques, Ethernet et des encodeurs de position.

Dans notre travail, la carte dSPACE sert à acquérir les mesures des courants et de tensions nécessaires via les convertisseurs analogiques/numériques, exécuter l'algorithme de la

commande en temps réel, générer les signaux de commande (PWM) nécessaires pour les convertisseurs de puissance et enregistrer également les résultats expérimentaux sous forme de fichiers '.mat'



Figure (III.4) : Photo de la carte dSPACE MicroLabBox

III.2.3 Carte de mesure

Les tensions et les courants nécessaires pour la commande sont mesurés en utilisant des cartes disponibles au laboratoire. Ces cartes sont réalisées à base du capteur de tension LV25-P [12] et le capteur du courant LA-25NP [13]. Le détail de la réalisation de ces cartes est donné dans [14]. La figure (III.5) montre des photos des cartes de mesures utilisées.

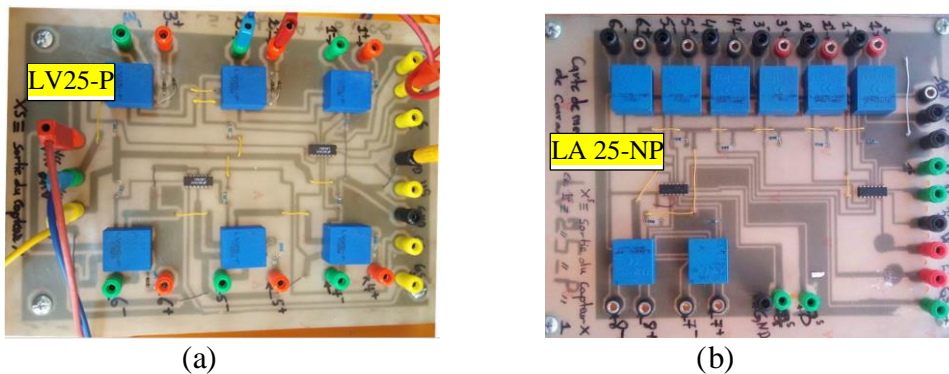


Figure (III.5) : Carte de mesure (a) de tensions, (b) des courants.

III.2.4 Alimentation bipolaire

Afin d'alimenter les cartes de mesure, une alimentation bipolaire de $\pm 15V$ est utilisée. La figure (III.6) présente une photo de cette alimentation.



Figure (III.6) : Photo de carte d'alimentation des cartes de mesure.

III.2.5 Filtre LC

Le filtre LC dans la figure (III.1) est composé de trois inductances de 2 mH et de trois condensateurs non polarisés de capacité de $275\mu F$.

III. 3 Résultats expérimentaux

Dans cette section, nous allons présenter les résultats expérimentaux de la commande en boucle ouverte et en boucle fermée d'un système composé d'un onduleur de tension triphasé à trois niveaux alimente une charge résistive via un filtre LC.

III.3.1 Validation en boucle ouvert

L'objectif de ce test est de vérifier le fonctionnement de la structure de l'onduleur, le circuit de pilotage des IGBT, le filtre LC et notamment l'algorithme de la modulation vectorielle développé. Comme montre le schéma de la figure (III.7), la modulation vectorielle reçoit directement les tensions de référence $v_{\alpha}^*, v_{\beta}^*$ et envoi à l'onduleur les impulsions de commande appropriées.

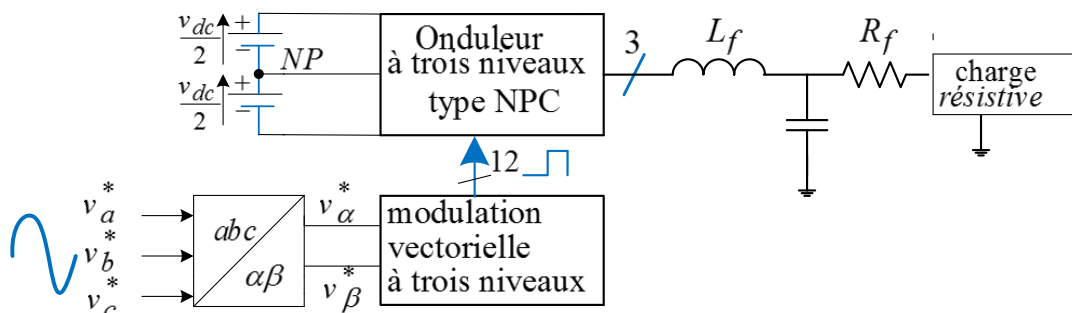


Figure (III.7) : Schéma de la commande en boucle ouverte.

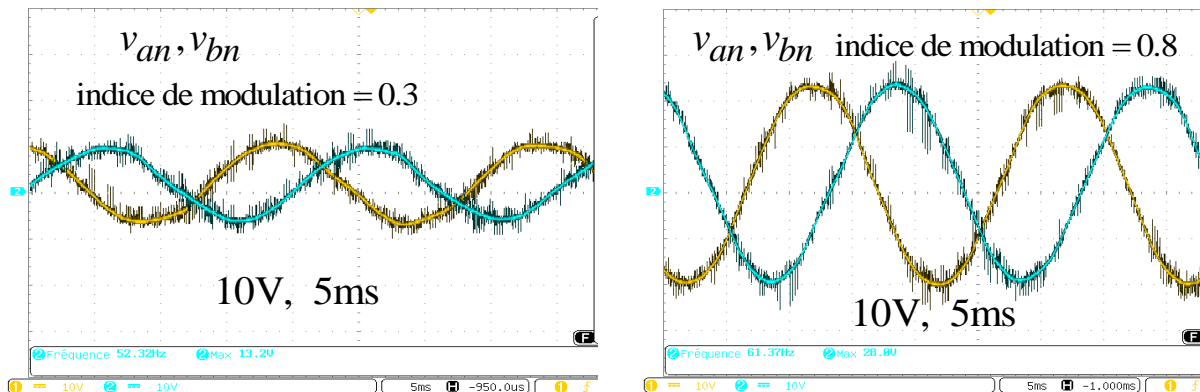


Figure (III.8) : Deux tensions simples de la charge (a) Pour indice de modulation égal à 0.3, (b) pour indice de modulation égal à 0.8.

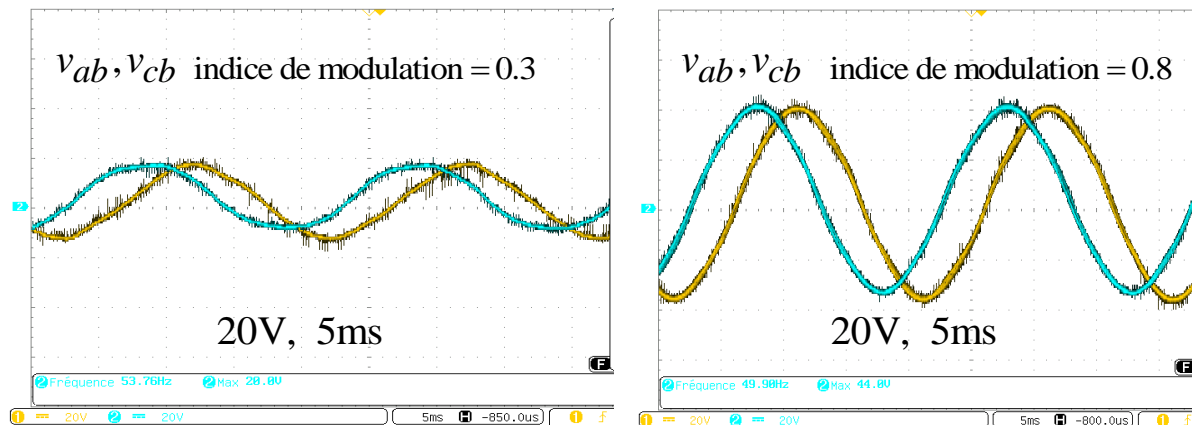


Figure (III.9) : Deux tensions composées de la charge (a) Pour indice de modulation égal à 0.3, (b) pour indice de modulation égal à 0.8.

La figure(III.8) montre deux tensions simples de la charge pour une faible /grande valeur d'indice de modulation. D'après cette figure, on constate que l'onduleur fournit des tensions sinusoïdales de amplitude et fréquence correspond au celles des tensions de référence.

La figure(III.9) montre deux tensions composées de la charge pour deux valeurs d'indice de modulation. D'après cette figure, on constate que les courbes sont également sinusoïdales et l'onduleur régit bien avec la variation de l'indice de modulation.

Ces résultats valident d'un côté l'algorithme de la modulation vectorielle et le bon fonctionnement des composants du banc d'essai d'un autre côté.

III.3.2 Validation en boucle fermée

La structure de commande utilisée est similaire à celle présentée dans la figure (II.1), voir chapitre II. Les gains des régulateurs PI sont listés dans le tableau (III.1). Pour évaluer les performances de la commande, nous avons procédé à une variation de l'amplitude de la tension de référence. La figure (III.10) montre les résultats expérimentaux obtenus.

Tableau (III.2): Paramètres du banc d'essai expérimental

Gain du régulateur de tension	$\omega_{nvd} = 200 \text{ rad/s}$, $\omega_{mvq} = 800 \text{ rad/s}$, $\xi=1$
Gain du régulateur de courant	$\omega_{nid} = 1900 \text{ rad/s}$, $\omega_{niq} = 1200 \text{ rad/s}$, $\xi=1$

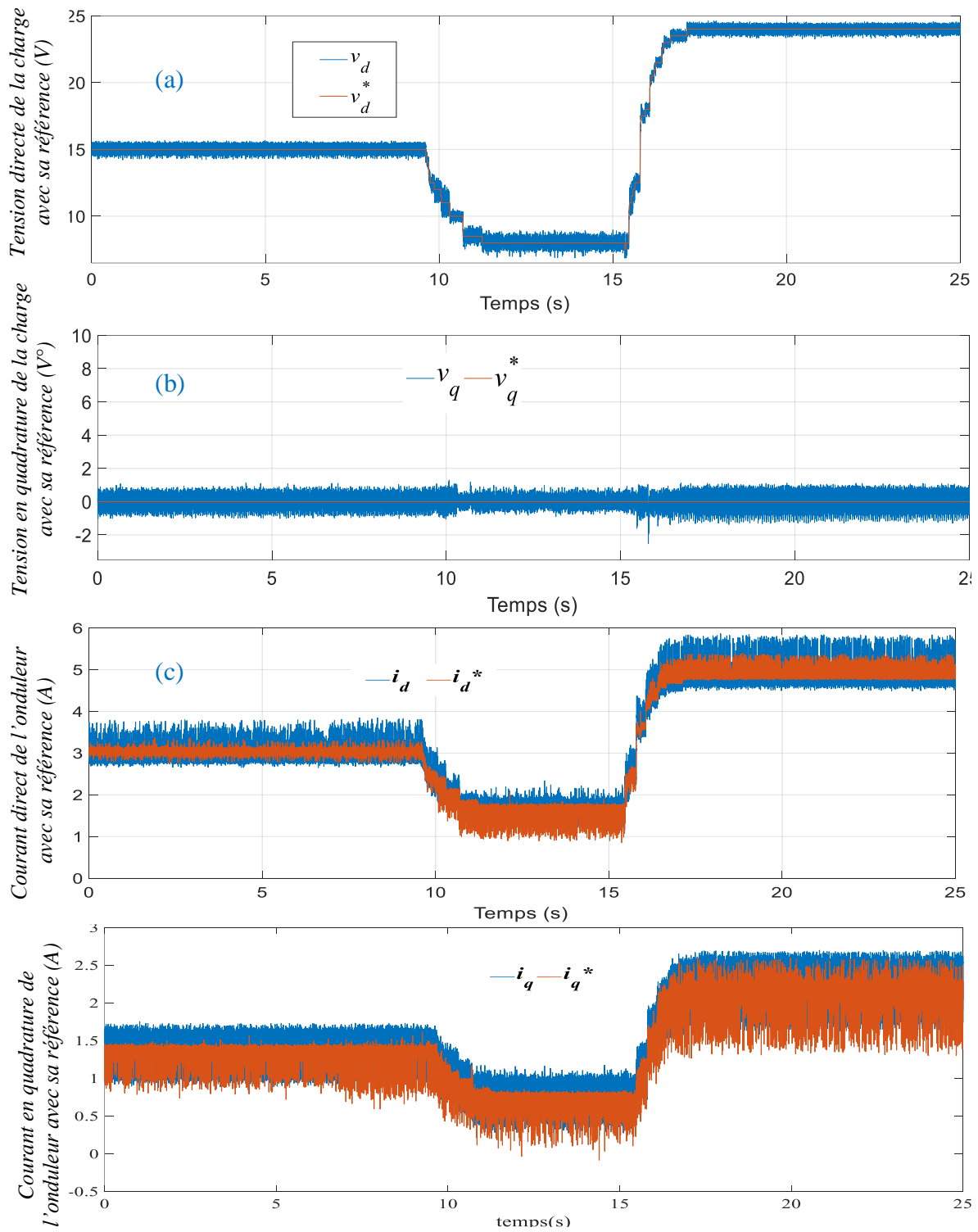


Figure (III.10) : Performances du système vis-à-vis la variation de la tension de référence : (a) Tension directe de la charge avec sa référence (b) Tension en quadrature de la charge avec sa référence (c) Courant directe de l'onduleur NPC avec sa référence (d) Courant en quadrature de l'onduleur NPC avec sa référence, (e) courants triphasé de l'onduleur. (f) Tension triphasé de la charge.

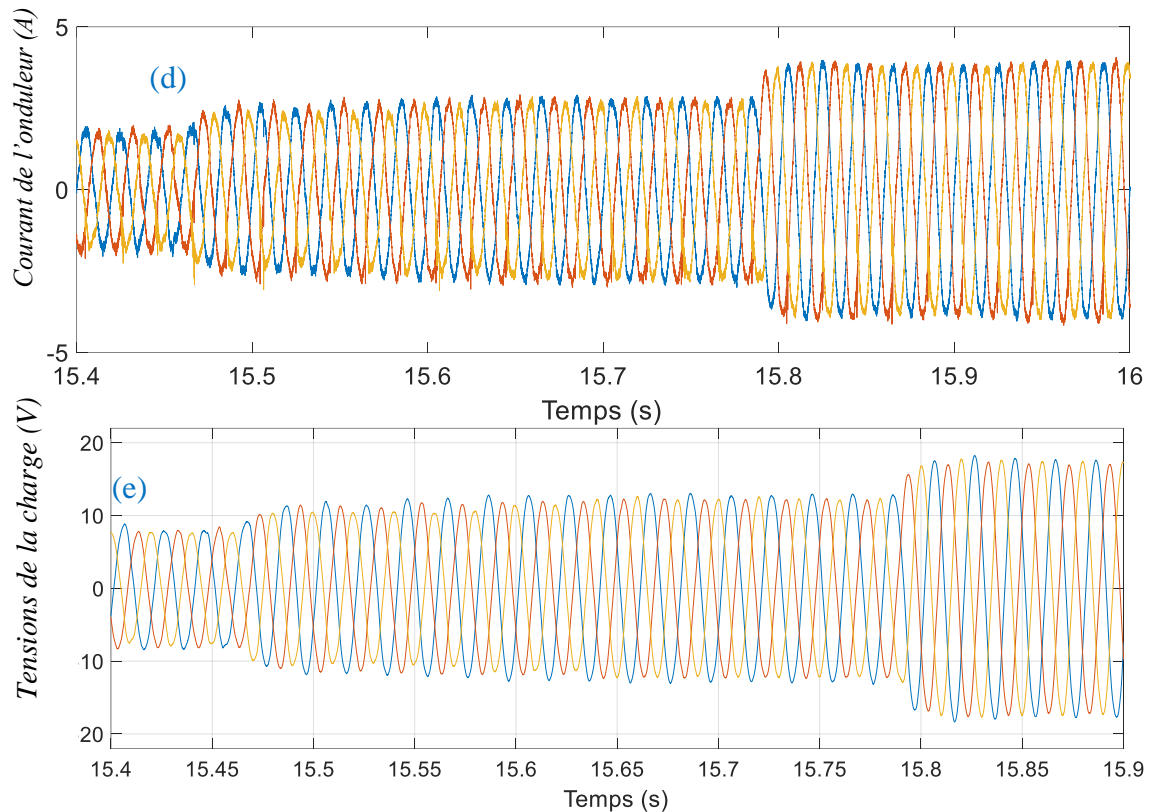


Figure (III.10) (suite): Performances du système vis-à-vis la variation de la tension de référence : (e) courants triphasé de l'onduleur (f) Tension triphasé de la charge.

Les figures (III.10)(a) et (III.10)(b) représentent respectivement les allures de la tension directe et en quadrature de la charge avec leurs consignes. D'après ces figures, on constate une bonne poursuite est obtenue même avec les variations brusques de l'amplitude de la tension de référence ce qui valide la synthèse des régulateurs.

La figure (III.10)(c) et (III.13)(d) présentent respectivement le courant direct et en quadrature de l'onduleur à trois niveaux avec leurs consignes. D'après ces figures, on constate que les courants de l'onduleur sont bien superposés sur leurs références.

D'après les figure (III.10)(e) on constate que les courant des phases de l'onduleur sont sinusoïdaux, symétriques et équilibrés ce qui confirme le bon performance obtenu dans le repère dq .

D'après les figure (III.10)(f) les tensions imposées sur la charge sont sinusoïdales équilibrées ce qui valide la structure de commande synthétisée.

III. 4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une validation expérimentale d'une commande en boucle ouverte et en boucle fermée d'un onduleur de tension triphasé à trois niveaux alimente une charge via un filtre LC. Dans un premier temps, nous avons présenté le ban d'essai

expérimental utilisé. Ensuite, nous avons procédé à un test en boucle ouverte, les résultats expérimentaux obtenus ont validé l'algorithme de la modulation vectorielle et le bon fonctionnement des composants constituant le banc d'essai. Dans la dernière partie du chapitre, nous avons présenté la validation de la commande en boucle fermée du système. Les résultats expérimentaux montrent une bonne performance vis à vis la variation de l'amplitude de la tension de référence.

Conclusion générale

Les travaux de ce mémoire sont essentiellement focalisés sur l'onduleur de tension triphasé à trois niveaux type NPC. Ce dernier présente des avantages très intéressants par rapport à l'onduleur à deux niveaux notamment en termes de puissance et la qualité spectrale des tensions et des courants générés.

Le manuscrit est structuré en trois chapitres. Dans le premier chapitre, nous avons présenté le principe de fonctionnement, et la modélisation mathématique de l'onduleur à trois niveaux, cette modélisation a permis d'analyser les formes d'ondes de ces tensions de sorties (tension simples, composées...etc.). Ensuite, nous avons présenté en détail la modulation vectorielle à trois niveaux et les étapes essentielles pour développer son algorithme. Dans la fin du chapitre, nous avons développé le modèle mathématique d'un système composé d'un onduleur à trois niveaux raccordé à un filtre LC et alimenté une charge résistive-inductive (RL). Ce modèle est développé dans le repère triphasé abc , le repère biphasé, $\alpha\beta$ et le repère synchrone dq . Ce dernier est utilisé ensuite pour contrôler le système.

Dans le deuxième chapitre, nous avons développé une structure de commande permettant de contrôler le système modélisé dans le premier chapitre (onduleur à trois niveaux-filtre LC-charge RL). Cette structure de commande comporte deux boucles en cascade synthétisées dans le repère dq combinées avec la modulation vectorielle. Cette structure de commande est capable de piloter l'onduleur à trois niveaux pour imposer les tensions désirées aux bornes de la charge. Dans la première partie du chapitre nous avons présenté en détail le calcul de la loi de commande et la synthèse des boucles de régulation utilisées. Ensuite, nous avons vérifié les performances de cette structure de commande vis-à-vis la variation de l'amplitude de la tension de référence et la variation de la charge. Les résultats de simulations obtenus ont confirmé une excellente performance notamment en termes de la poursuite des consignes.

Dans le dernier chapitre, nous avons présenté la validation expérimentale de la structure de commande synthétisée dans le deuxième chapitre. Dans un premier temps, nous avons présenté en détail le banc d'essai expérimental utilisé. Ensuite, nous avons présenté et commenté les résultats expérimentaux de la commande en boucle ouverte, les résultats

obtenus ont validé le développement de l'algorithme de la modulation vectorielle et le fonctionnement des différents composants du banc d'essai.

Dans la dernière partie du chapitre, nous avons présenté la validation de la commande en boucle fermée du système. Les résultats expérimentaux ont montré une excellente performance en termes de la poursuite de l'amplitude de la tension de référence.

Le perspectif du ce travail consiste à étudier le problème de déséquilibre des tensions des condensateurs d'entrée. Ce problème se manifeste lorsque le point milieu est créé par un diviseur capacitif.

Bibliographie

- [1] OUANANE Sara et NECHE Imane, "Validation pratique d'une commande linéaire d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux" Mémoire de Master, Université de M'sila, 2020.
- [2] Abdelmalek ZORIG, " Commande non linéaires d'une source décentralisée photovoltaïque à base de convertisseur de puissance entrelacés et parallèles, " Thèse de Doctorat, Université Amar Telidji Laghouat, 2017.
- [3] Bouzidi Ali et Bouchare Mohammed, " Commande par mode glissante floue d'un D-STATCOM multiniveaux," Mémoire de Master, Université de M'sila, 2011.
- [4] Djaafer LALILI, "MLI vectorielle et commande non linéaire du bus Continu des onduleurs multiniveaux, application à la conduite de la machine asynchrone," Thèse de Doctorat, Université de Jijel, 2009.
- [5] Choayb DJEDILI et Feteh ZIANE, "Modélisation et commande d'un DSTATCOM à base d'un convertisseur multiniveaux," Université de M'sila, 2019.
- [6] LAKEHAL Bilel, "Modélisation et commande d'un onduleur triphasé à structure multiniveaux" Mémoire de Master, Université de....., 2015.
- [7] ABDELAZIZ Saad, "Commande et implémentation d'un onduleur de tension triphasé", Université de M'sila, 2019.
- [8] Fiche technique du module SK20MLI066, fournie par le fabricant (société Semikrone)
<https://www.semikron.com/>.
- [9] Fiche technique de driver HCP3120.
- [10] Fiche technique NMH1215DC.
- [11] Site web de la société dSPACE www.dspace.com.
- [12] Fiche technique du capture de tension "LV25-P", fournie par le fabricant, site web : www.lem.com.
- [13] Fiche technique du capture du courant "LEM-LA 25-NP, fournie par le fabricant, site web : www.lem.com.

- [14] ABDELLI Imane et BENCHOUIKH Fedoua Oumsaad, "Commande en boucle fermée d'un convertisseur DC-DC en cascade avec un onduleur de tension triphasé", Mémoire de Master, Université de M'sila, 2022.
- [15] BOUKAROURA Abdelkader, "Modélisation et diagnostic d'un onduleur triphasé par l'approche bond Graph", Mémoire de Master, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2009.
- [16] OKBAOUI Sidiali et CHAIN Moncef, "Réalisation et commande d'un onduleur triphasé à deux niveaux", Mémoire de Master, Université Amar Telidji Laghouat, 2019.
- [17] Benfeda Rachid et Amrane Boussad et Chaouche Aziz, "Etude de la protection électrique des moteurs asynchrones triphasés", Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012.
- [18] Omar Bouhali, "Contribution des convertisseurs multiniveaux au raccordement de la production d'origine éoliennes sur un réseau électrique", Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, 2017.
- [19] Jean-Michel VINASSA, "Intégration et commande d'un système de stockage hybride dans un micro réseau utilisant un convertisseur NPC à trois niveaux", Thèse de Doctorat, Ecole doctorale des sciences physiques et de l'ingénierie, 2012.
- [20] Rabia GUEDOUANI, "Etude et commande des différentes cascades redresseurs de tension triphasé MLI - onduleur de tension à cinq niveaux, application à la conduite de la machine asynchrone de forte puissance", Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, 2009.
- [21] Maryam Saedifard, "Space vector modulation of multi-level and multi-module converters for high power applications", Thèse de Doctorat, University of Toronto, 2008.
- [22] Nikola Celanovic, "Space vector modulation and control of multilevel converters", Thèse de Doctorat, Université de Virginia, 2000.
- [23] BOUKADOUM Aziz, "Contribution à l'analyse et la réduction de la pollution harmonique dans le réseau électrique", Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar de Annaba, 2007.
- [24] BOUTARBOUCHA Housssem Eddine, "Topologie d'onduleurs multiniveaux et stratégie de commande (Application aux Systèmes photovoltaïques) ", Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar- Annaba, 2021.
- [25] Arnaud VIDET, "Variateur de vitesse à impact électromagnétique réduit : onduleur multiniveaux et nouvelles stratégies de modulation", Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2008.

Commande d'un onduleur de tension à trois niveaux type NPC

Résumé

Les travaux de ce mémoire sont focalisés sur la modélisation et la commande d'un onduleur de tension triphasé à trois niveaux type NPC. Ce type d'onduleur est caractérisé de sa capacité de synthétiser la tension de sortie en plusieurs niveaux ce qui permet de surmonter les contraintes de tension imposées sur les interrupteurs de puissance et de réduire davantage les harmoniques et le calibre du filtre de sortie. Dans la première partie de ce manuscrit, nous avons présenté son principe de fonctionnement, sa modélisation et la technique de modulation vectorielle à trois niveaux. Ensuite, nous avons modélisé un système composé d'un onduleur à trois niveaux connecté à un filtre LC et débite une charge résistive inductive. Dans la deuxième partie de ce manuscrit, nous avons développé, testé et validé par simulation une structure de commande permettant de contrôler le système susmentionné. Dans la dernière partie de ce manuscrit, nous avons présenté la validation expérimentale de la commande développée.

Mots clés : *Onduleur de tension triphasé à trois niveaux ; Modulation vectorielle à trois niveaux, Commande en boucle fermée ; Onduleur de tension triphasé à deux niveaux ; dSPACE.*