

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

FACULTE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT ELECTRONIQUE
N° :



DOMAINE : SCIENCE ET
TECHNOLOGIE
FILIERE : ELECTRONIQUE
OPTION : SYSTEMES EMBARQUES

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par: ABDELAZIZ Saad

Intitulé

**Commande et implémentation d'un Onduleur
De tension triphasé**

Soutenu devant le jury composé de:

Dr. BENTOUMI.M	Université de m'sila	Président
Dr. ZORIG.A	Université de m'sila	Rapporteur
Dr. MEZAACHE.A	Université de m'sila	Examineur

Année universitaire : 2018/2019

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail à mes chers parents, qui m'ont encouragé, aidé et soutenu, pour qu'enfin je puisse réussir ce projet de fin d'études. Comme je le dédie à :

- Mes frères : abd elkader, samir, fares et A.RAHIM, et ma soeur : aicha.

- Mes amis intimes messaoud, djaber, Salim, berra, rachid, aymen, abd elkader, boucetta.....

- Toute la promotion de l'année 2019 de l'université de M'sila, et tous ceux qui connaissent Saad soit à l'intérieur du pays ou à l'extérieur.

Abd elaziz Saad

REMERCIEMENT

Nous remercions Dieu, le tout puissant, pour nous avoir donné, le courage, la patience, la volonté et la force nécessaires, pour affronter toutes les difficultés et les obstacles, qui se sont hissés au travers de notre chemin, durant toutes nos années d'études.

Nous exprimons nos remerciements à notre prometteur Monsieur ZORIG ABDELMALIK pour l'assistance qu'il nous a témoignée tout au long de ce travail, qu'il trouve ici l'expression de notre gratitude pour ses conseils.

Nos remerciements les plus sincères sont adressés à nos enseignants, qui ont contribué durant nos études à l'université de m'sila et spécialement les enseignants du département d'électronique. Surtout les gens de laboratoire .

Sans oublier tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin.

Table des matières

Introduction générale	1
------------------------------	----------

Chapitre I

Modélisation de l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux

I.1. Introduction	3
I.2. Définition de l'onduleur de tension	4
I.3. Classification des onduleurs	4
I.3.1 Classification selon le nombre de phases	4
I.3.1.1 Onduleur monophasé	4
I.3.1.1.1 Onduleur avec transformateur à point milieu	4
I.3.1.1.2 Onduleur en demi-pont	5
I.3.1.1.3 Onduleur en pont	5
I.3.1.2 les onduleurs triphasés	6
I.3.2 Classification selon la nature de la source d'entrée	6
I.3.3 Classification selon la nature des interrupteurs de puissance	7
I.3.4 Classification selon les Nombres des niveaux de tension de sortie	7
I.4. Modélisation de l'onduleur triphasé à deux niveaux	8
I.4.1 Structure de base d'un onduleur triphasé à deux niveaux	8
I.4.2. Fonction de commutation	9
I.4.3 Tension de sortie	9
I.5. Modélisations d'un onduleur triphasé à deux niveaux avec filtre LC	11
I.5.1 Modélisation du système (onduleur +filtre LC+charge) dans le repère abc	11
I.5.2 Modélisation du système (onduleur+filtre LC+charge) dans le repère $\alpha\beta$	12
I.5.3 Modélisation du système (onduleur +filtre LC+charge) dans le repère dq	12

I.6	Conclusion	13
-----	------------	----

Chapitre II

Commande linéaire d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux

II.1.	Introduction	14
II.2.	Techniques de commande onduleur triphasé	15
II.2.1	Commande par hystérésis	15
II.2.2.	Commande plein onde	15
II.2.2.1	Commande plein onde 180°	16
II.2.2.2	Commande plein onde décalée 120°	16
II.2.3	Commande par la modulation de largeur d'impulsion	17
II.2.4	Commande par MLI vectorielle ou SVM (Space Vector Modulation)	17
II.2.4.1	Représentation vectorielle des vecteurs de tension d'un onduleur à deux niveaux	18
II.2.4.2	Principe de la modulation vectorielle (SVM)	21
II.2.4.3	Localisation du vecteur de référence	21
II.2.4.4	Calcul des temps de commutation	22
II.2.4.5	Génération des impulsions de commande	24
II.3	Synthèse d'une commande linéaire pour un onduleur de tension débité un charge résistive via un filtre LC	26
II.3.1	Synthèse du régulateur des tensions des condensateurs dans le repère dq	27
II.3.2	Synthèse du régulateur des courants des inductances dans le repère dq	27
II.4	Résultats de simulations	28
II.4.1	Validation de l'algorithme de la modulation vectorielle (SVM)	28
II.4.2	Performances du système avec une tension de référence fixe	30
II.4.3	Performances du système avec une variation brusque de tension de référence	33
II.5.	Conclusion	36

Chapitre III

Réalisation d'un onduleur de tension triphasé piloté par la modulation vectorielle

III.1.	Introduction	37
III.2.	Description du banc d'essai réalisé	37
III.2.1	Carte de développement DSP TMS320F28335	39

III.2.2 Circuit du pilote et de protection du IGBT _____	40
III.2.3 Onduleur de tension triphasé _____	41
III.3 Résultats expérimentaux _____	41
III.3.1. Validation de l'algorithme de la modulation vectorielle (SVM) _____	41
III.3.2. Validation de l'algorithme de la modulation vectorielle avec filtre LC _____	45
III.4. Conclusion _____	46

Liste des figures

Chapitre I

Figures.....	Pages
Figure (I.1): Schéma synoptique de la conversion continue- alternative	3
Figure (I.2): Onduleur avec transformateur à point milieu	4
Figure (I.3): Montage pratique d'un onduleur en demi-pont	5
Figure (I.4): Structure d'un onduleur de tension monophasé (en pont)	6
Figure (I.5): Structure d'un onduleur de tension triphasé	6
Figure (I.6): Onduleur de tension. (a) à base des Mosfet, (b) à base des IGBT	7
Figure (I.7): Structure d'un onduleur triphasé à cinq niveaux	8
Figure (I.8): Structure d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux	9
Figure (I.9): Structure d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux alimentant une charge résistive via un filtre LC	11

Chapitre II

Figure (II.1): Principe de la modulation à hystérésis.....	15
Figure (II.2): Onduleur de tension triphasé.....	15
Figure (II.3): Formes des signaux de commande des interrupteurs K1, K2, K3.....	16
Figure (II.4): Formes des signaux de commande des interrupteurs K1, K2, K3.....	17
Figure (II.5): Principe de la modulation de largeur d'impulsions.....	17
Figure (II.6): Structure d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux.....	18
Figure (II.7): Diagramme vectoriel de l'onduleur à deux niveaux (hexagone de commutation)...	19
Figure (II.8): Limitation du vecteur de référence \vec{v}^*	20
Figure (II.9): Organigramme de calcul du secteur.	21
Figure (II.10): Principe de génération des impulsions de commande par <i>MLI</i> vectorielle	24
Figure (II.10)(suite): Principe de génération des impulsions de commande par <i>MLI</i> vectorielle..	25
Figure (II.11): Logigramme de la modulation vectorielle à deux niveaux.....	25
Figure (II.12): Schéma global de la commande linéaire d'un onduleur de tension débite alimente une charge résistive via un filtre LC.	26
Figure (II.13): Boucle de régulation de la tension du bus continu.	27
Figure (II.14): Schéma de régulation des courants de l'onduleur.....	28

Figure (II.15): Schéma bloc utilisé pour valider l'algorithme de la modulation vectorielle.....	29
Figure (II.16): Figure(II.16): Formes d'ondes des tensions d'un onduleur de tension à deux niveaux piloté par la modulation vectorielle: (a) Tensions au borne d'un interrupteur v_{a0} , (b) Tension composées v_{ab}	29
Figure (II.16)(suite): Figure(II.16): Formes d'ondes des tensions d'un onduleur de tension à deux niveaux piloté par la modulation vectorielle: (c) Tension simple v_{an}	30
Figure (II.17): Formes d'ondes des tensions et des courants d'un onduleur de tension à deux niveaux piloté par la modulation vectorielle: (a) Tension quadratique de la de charge et sa référence,(b) Tension directe de la de charge et sa référence.....	31
Figure (II.17)(suite): Formes d'ondes des tensions et des courants d'un onduleur de tension à deux niveaux piloté par la modulation vectorielle: (c) Tension de la de charge stationnaire et sa référence,(d) courant quadratique de la charge et sa référence,(e) courant directe de la charge et sa référence.....	32
Figure (II.18): Formes d'ondes des tensions et des courants d'un onduleur de tension à deux niveaux piloté par la modulation vectorielle: (a) Tension quadratique de la de charge et sa référence,(b) Tension directe de la de charge et sa référence,(c) Tension de la de charge stationnaire et sa référence.....	34
Figure (II.18)(suite): Formes d'ondes des tensions et des courants d'un onduleur de tension à deux niveaux piloté par la modulation vectorielle: ,(d) courant quadratique de la charge et sa référence,(e) courant directe de la charge et sa référence.	35

Chapitre III

Figure (III.1): Schéma synoptique du banc d'essai réalisé.....	38
Figure (III.2): Photo du banc d'essai réalisé	38
Figure (III.3) : Carte de développement DSP TMS320F28335.	39
Figure (III.4): Schéma synoptique du circuit du pilotage et de protection des IGBTs.....	40
Figure (III.5): Carte d'isolation et pilotage réalisée.....	41
Figure (III.6): Onduleur de tension triphasé réalisé.	41
Figure (III.7): Figure(II.7): Formes d'ondes des tensions d'un onduleur triphasé à deux niveaux piloté par la modulation vectorielle (amplitude des tensions de référence égale $9\mathbf{V}$): (a) Tension simple d'une phase (v_{an}).....	42
Figure (III.7)(suite): Formes d'ondes des tensions d'un onduleur triphasé à deux niveaux piloté par la modulation vectorielle (amplitude des tensions de référence égale $9\mathbf{V}$): (b) Tension composée d'une phase v_{ab} .(c)Deux tensions simples de l'onduleur (v_{an} et v_{bn}).	43
Figure (III.8): Formes d'ondes des tensions d'un onduleur triphasé à deux niveaux piloté par la modulation vectorielle (amplitude des tensions de référence égale $15\mathbf{V}$): (a) Tension simple d'une phase(v_{an}), (b) Tension composée d'une phase v_{ab} .(c)Deux tensions simples de l'onduleur (v_{an} et v_{bn}).	44

Figure (III.9): Formes d'ondes des tensions d'un onduleur triphasé à deux niveaux piloté par la modulation vectorielle (amplitude des tensions de référence égale 19V): **(a)** Deux tensions simples de l'onduleur (v_{an} et v_{bn}). **(b)** Tension composée d'une phase v_{ab} 45

Figure (III.10): Formes d'ondes des tensions simples de l'onduleur débite une charge résistive via un filtre LC. 46

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau (II.1): : Etats de l'onduleur et les coordonnées du vecteur v_i dans le plan (α, β)	19
Tableau (II.2): Temps de commutation pour chaque secteur	23
Tableau (II.3): Paramètres utilisés pour la simulation	31

Chapitre III

Tableau (III.1): Paramètres du banc d'essai expérimental.	39
----------------------------------------------------------------	----

Nomenclature

Abréviations

MLI: Modulation de largeur d'impulsion.

SVM: Modulation vectorielle.

PI: Régulateur proportionnel intégral.

THD: (Total Harmonic Distortion) : taux de distorsion harmoniques.

PWM: (Pulse Width Modulation) : Modulation de largeur d'impulsion.

IGBT: Insolated Gate Bipolar Transistor.

Notations

f_s : Fréquence de commutation.

T_s : Période de commutation.

ξ : Facteur d'amortissement.

ω_n : Pulsation du système.

ω : Fréquence angulaire du fondamental.

k_{pv}, k_i : Gains du régulateur PI.

θ : Argument du vecteur de référence .

Introduction générale

Les avancées technologiques obtenues ces dernières années dans le domaine des composants de l'électronique de puissance ont favorisé une croissance du marché des convertisseurs de puissance.[1] L'électronique de puissance s'est imposée comme un des éléments essentiels dans la conversion de l'énergie électrique. Le développement des stratégies modulation a apporté une plus grande souplesse dans le domaine du contrôle des convertisseurs et permet d'améliorer la dynamique et la précision de la régulation des systèmes électriques.

L'évolution dans le domaine des calculateurs et les cartes de développement permet d'implémenter des algorithmes de commande plus performants et plus fiables dans le domaine d'électronique de puissance.[2]

L'objectif principal du présent mémoire est d'étudier réaliser expérimentalement un onduleur de tension triphasé à deux niveaux convertisseur piloté une modulation vectorielle.

Dans le premier chapitre nous avons présenté les topologies des onduleurs de tension les plus populaires, leurs principes de fonctionnement. Ensuite, nous avons focalisé notre étude sur l'onduleur de tension à deux niveaux en détaillant son principe de fonctionnement et la modélisation permettant de le contrôler.

Dans le deuxième chapitre on parlera sur les différentes stratégies des modulations de l'onduleur tension triphasé à deux niveaux. Ensuite, nous allons présenter en détail la modulation vectorielle telle que la localisation du vecteur de référence, le choix des vecteur de tension à appliquer et le calcul de leur temps d'application. Après nous allons synthétiser une commande en boucle fermée d'un onduleur de tension débite une charge via un filtre LC. La

commande synthétisée à pour objectif de forcer l'onduleur de générer la tension désirée à la charge.

Le dernier chapitre sera consacré à la réalisation expérimentale l'onduleur de tension à deux niveaux piloté par une modulation vectorielle implémentée sur une carte DSP. En premier temps, nous allons présenter le banc d'essai expérimental ainsi que les différentes cartes électroniques réalisées. Ensuite nous validons l'algorithme de la commande SVM en boucle ouverte en visualisant les différentes formes d'ondes générées par l'onduleur.

Chapitre I:

Modélisation de l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux

I.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. [3]

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 des 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 (I.1) montre un schéma synoptique de la conversion continue alternative. [4]

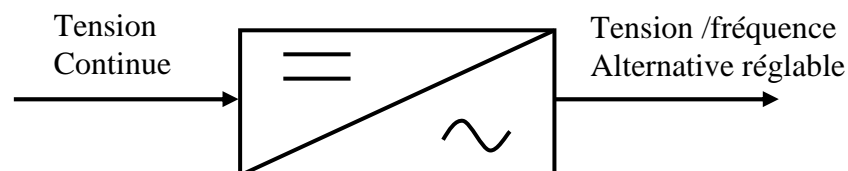


Figure (I.1): Schéma synoptique de la conversion continue- alternative.

Dans ce chapitre on présente n premier temps une brève description des onduleurs triphasés à deux niveaux. Nous verrons ensuite, quelques domaines d'applications des onduleurs de tension. Enfin, nous allons présenter en détail la modélisation de l'onduleur triphasé à deux niveaux, cette modélisation sera utilisé ensuite pour contrôler l'onduleur en boucle fermée.

I.2 Définition de l'onduleur de tension

L'onduleur de tension est un convertisseur statique permet de fournir une tension alternative d'amplitude et de fréquence réglables à partir d'une source de tension continue. Il est constitué de cellules de commutations généralement à base des IGBT ou des MOSFET. [5]

I.3 Classification des onduleurs

Les structures des onduleurs sont très nombreuses en fonction de leurs applications, et leurs commandes. Nous pouvons classer les onduleurs selon les critères suivants:

- Nombre de phase;
- Nature de la source d'entrée;
- Nature des interrupteurs;
- Nombre des niveaux de tension de sortie.

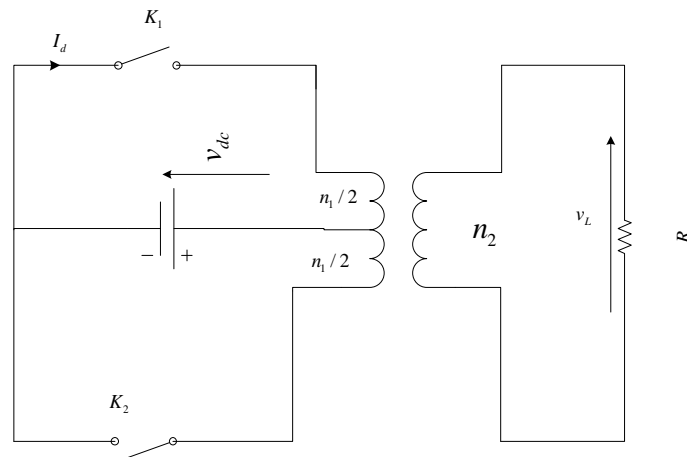
Dans les sous-sections suivantes, nous allons détailler les critères précédents

I.3.1 Classification selon le nombre de phases

I.3.1.1 Onduleurs monophasés

I.3.1.1.1 Onduleur avec transformateur à point milieu

Il est souvent appelé onduleur Push pull, il ne nécessite que deux interrupteurs et un transformateur à point milieu du coté source d'alimentation, figure (I.2).



Figure(I.2): Onduleur avec transformateur à point milieu

- Quand K_1 et K_2 sont ouverts aucun courant ne circule dans la charge.
- Quand K_1 est fermé et K_2 est bloqué; ou K_2 est fermé, K_1 est bloqué.

Les deux signaux de commande pour K_1 et K_2 sont complémentaires (sont contrôlés à tour de rôle).

La fréquence du signal de sortie est imposée par la fréquence des signaux de commande.

La tension efficace de sortie est ajustée par le nombre des spires n_1 et n_2 .

I.3.1.1.2 Onduleur en demi-pont

Une autre façon de réaliser un onduleur monophasé de tension avec deux interrupteurs est de placer en parallèle de la tension d'entrée un diviseur capacitif formé de deux condensateurs C_1 et C_2 de même capacité. La figure (I.3) représente le montage pratique d'un onduleur en demi-pont.

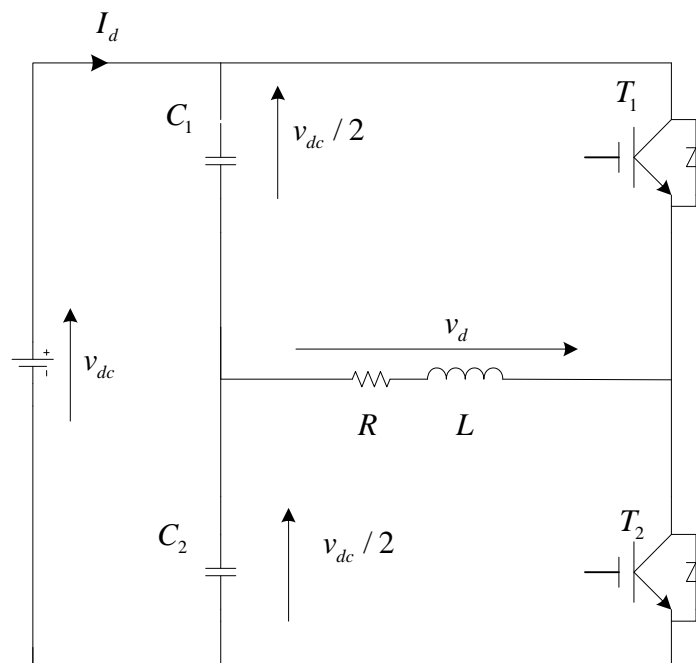


Figure (I.3): Montage pratique d'un onduleur en demi-pont

I.3.1.1.3 Onduleur en pont

En plus On utilise quatre interrupteurs pour supprimer la nécessité du point milieu du diviseur capacitif.

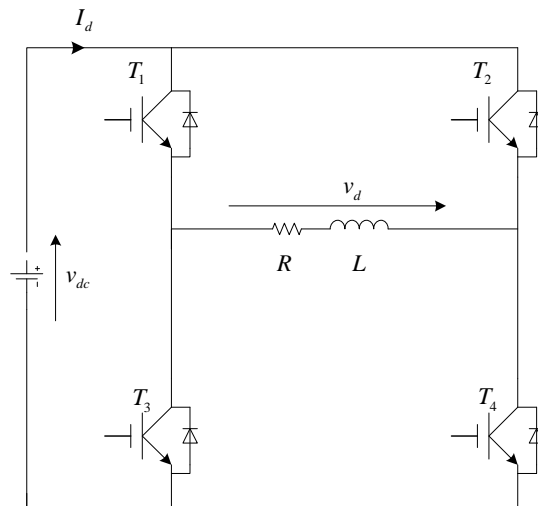


Figure (I.4): Structure d'un onduleur de tension monophasé (en pont)

I.3.1.2 les onduleurs triphasés

Le schéma simplifié d'un onduleur triphasé à deux niveaux est montré dans la figure (I.5).

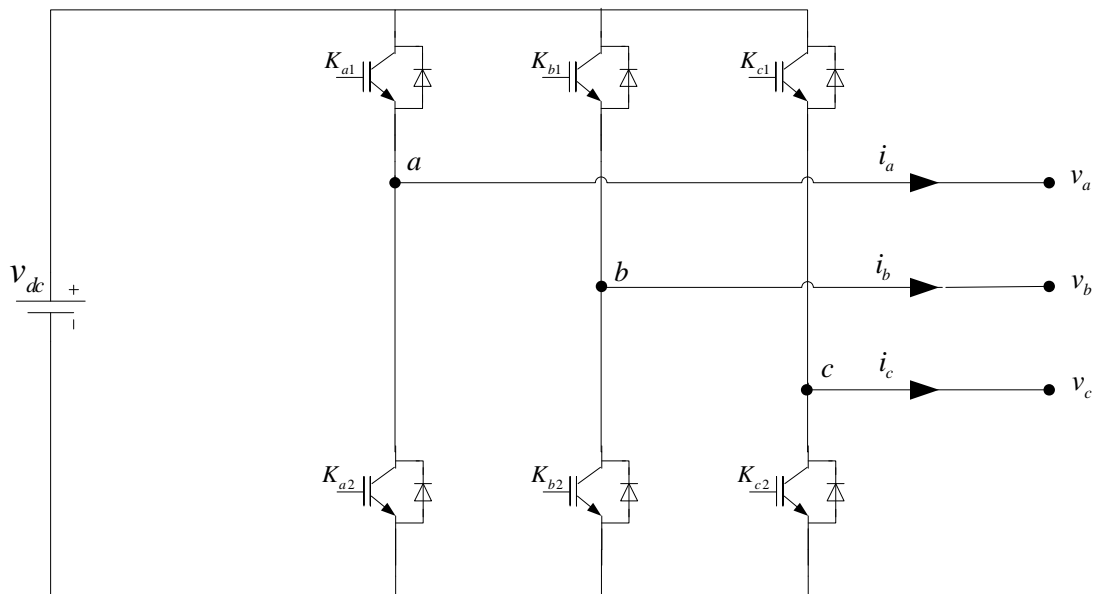


Figure (I.5): Structure d'un onduleur de tension triphasé

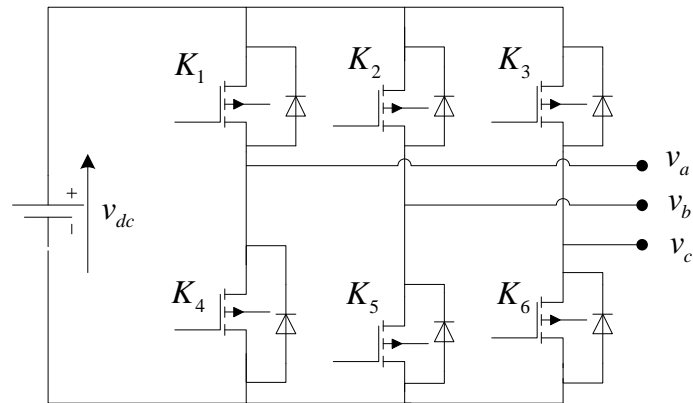
I.3.2 Classification selon la nature de la source d'entrée

L'onduleur de tension : alimenté par un générateur de tension continu, il impose par sa commande la tension de sortie la charge impose alors l'intensité du courant.

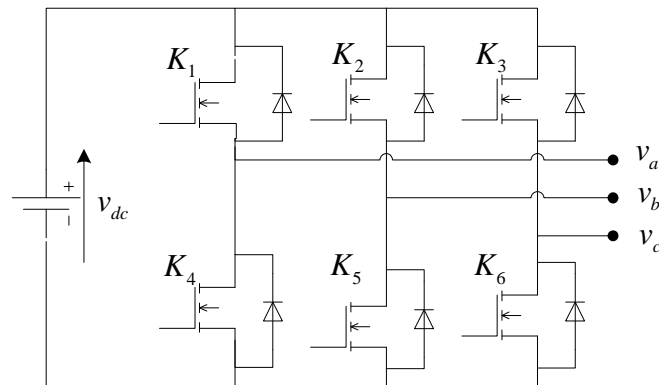
L'onduleur de courant : alimenté par un générateur de courant continu, il impose par sa commande le courant de sortie; la charge impose la tension de sortie.

I.3.3 Classification selon la nature des interrupteurs de puissance

On peut classer également les onduleurs selon le type des interrupteurs de puissance. Ces derniers peuvent-être des interrupteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture (transistor Mosfet, figure I.6(a), IGBT figure I.6(b), ou des interrupteurs commandés seulement à la fermeture (thyristors).



(a)



(b)

Figure (I.6): Onduleur de tension. (a) à base des Mosfet, (b) à base des IGBT

I.3.4 Classification selon les Nombres des niveaux de tension de sortie

On peut classer aussi les onduleurs selon leur niveau de tension de sortie. On trouve des onduleurs classiques à deux niveaux, Figure (I.5) et des onduleurs multi niveaux comme l'onduleur à cinq niveaux présentés dans la figure (I.7)

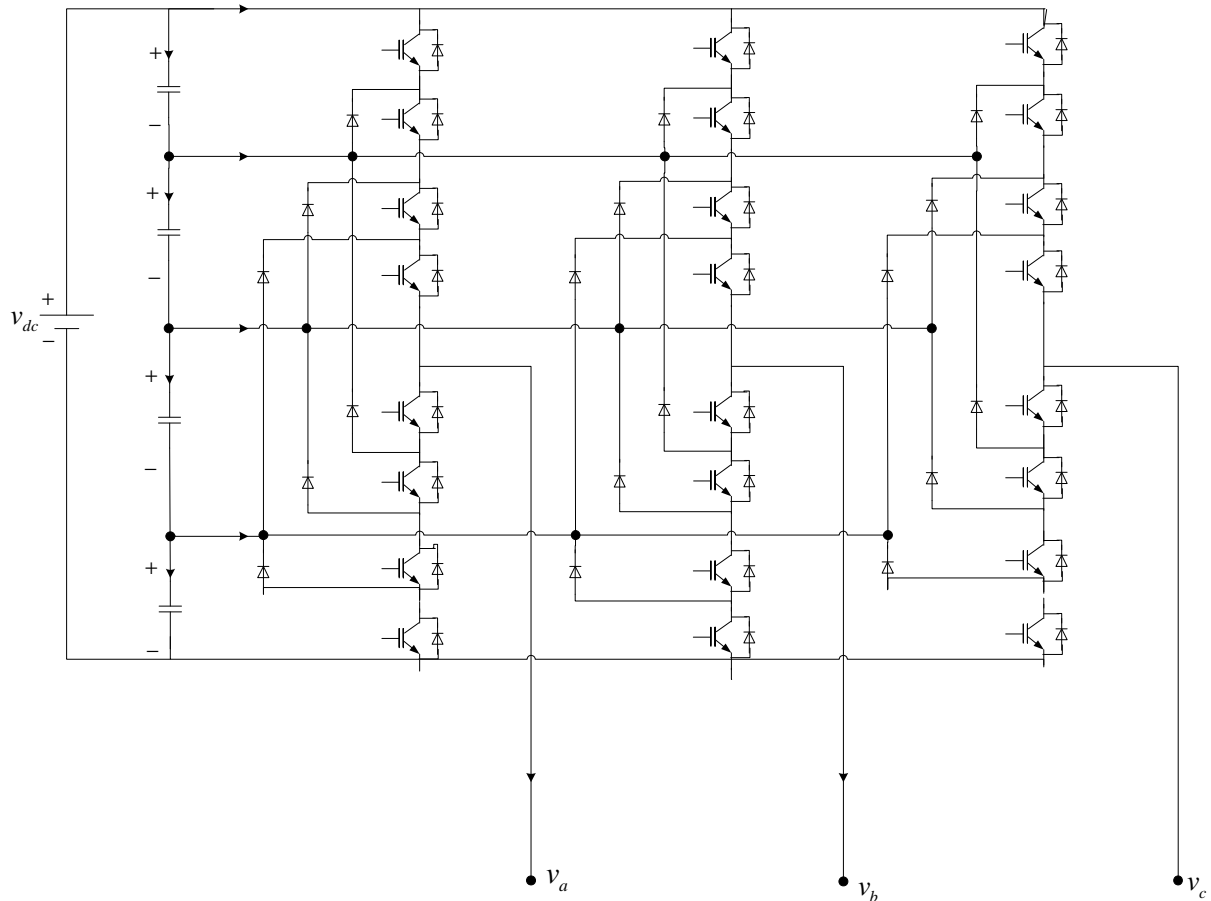


Figure (I.7) : Structure d'un onduleur triphasé à cinq niveaux

I.4 Modélisation de l'onduleur triphasé à deux niveaux

I.4.1 Structure de base d'un onduleur triphasé à deux niveaux

La structure générale d'un onduleur de tension à deux niveaux est représentée dans la Figure (I.8).

L'onduleur est composé de trois bras chacun comportant deux interrupteurs bidirectionnels commandables à l'ouverture et à la fermeture. Ils peuvent être soit des *MOSFET* pour les faibles puissances et fréquences très élevées, des *IGBT* pour les grandes puissances et fréquences élevées, ou des *GTO* pour les très grandes puissances et fréquences faibles, misent en antiparallèle avec des diodes pour assurer la circulation bidirectionnelle du courant.

Pour simplifier l'étude on crée un point milieu O par deux condensateurs fictives chacune prend la moitié de la tension continue v_{dc} . [6]

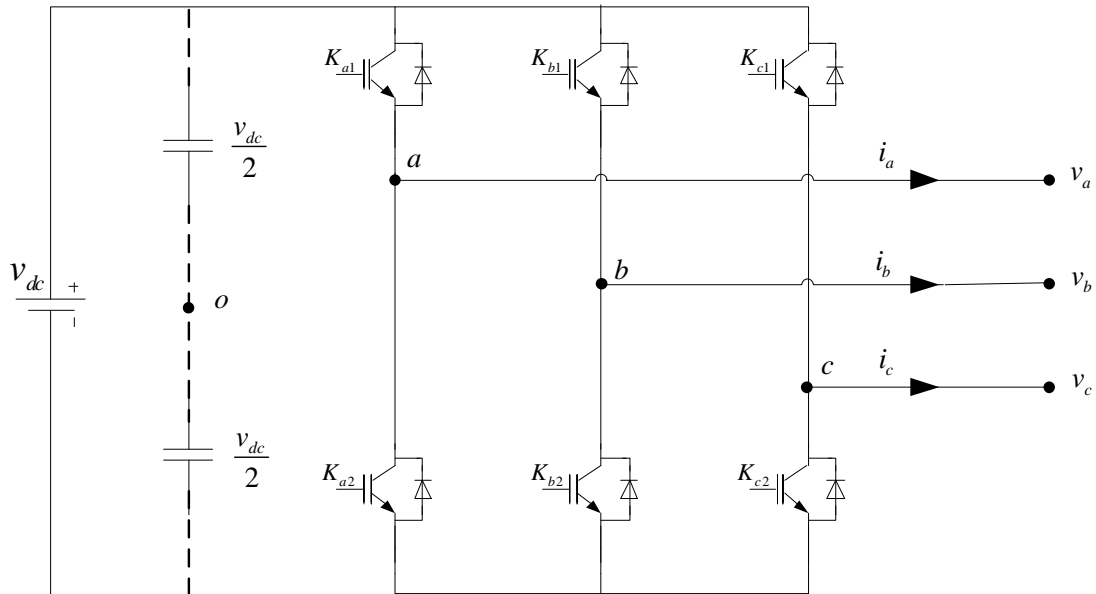


Figure (I.8) : Structure d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux

I.4.2 Fonction de commutation

Les commutations établies par les interrupteurs, supposés idéaux, sont décrites par une fonction de connexion. Cette dernière décrit leurs états ouvert ou fermé. Chaque interrupteur k_{xi} est associé à une fonction de connexion S_{xi} , tel que :

$$\begin{cases} S = 1 & \text{si } K \text{ fermé} \\ S = 0 & \text{si } K \text{ ouvert} \end{cases} \quad (\text{I.1})$$

Avec $x=a,b,c$: Indicateur de phase; $i=1, 2$: Numéro de l'interrupteur du bras x .

Sachant que la fermeture ou l'ouverture simultanée des deux interrupteurs du même bras conduit au risque de destruction du condensateur et des composants semi-conducteurs soit par surintensité soit par surtension, il est indispensable de réaliser une commande complémentaire entre les deux interrupteurs K_{x1} et K_{x2} .

les considérations précédentes conduisent à la relation logique suivante :

$$S_{x2} = \bar{S}_{x1} = 1 - S_{x1} \quad (\text{I.2})$$

I.4.3 Tension de sortie

L'onduleur de tension à deux niveaux délivre deux niveaux de tensions $v_{dc}/2$ ou $-v_{dc}/2$ suivant la fonction de connexion S_{x1} comme illustré dans l'équation (I.3).

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

ou v_{xo} représente la tension simple entre la phase x et le point milieu O .

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

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

Donc, Les trois tensions simples v_{ao}, v_{bo} et v_{co} peuvent être exprimées par la relation suivante :

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

Les tensions composées entre phases v_{ab}, v_{bc} et v_{ca} deviennent donc :

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

En considérant que les tensions simples représentent un système équilibré, on peut écrire

$$v_a + v_b + v_c = 0 \quad (\text{I.7})$$

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

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} v_{ab} - v_{ca} \\ v_{bc} - v_{ab} \\ v_{ca} - v_{bc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ao} \\ v_{bo} \\ v_{co} \end{bmatrix} \quad (\text{I.8})$$

En utilisant l'équation (I.6), l'équation (I.8) peut être écrit sous la forme matricielle suivante

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} v_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{a1} \\ S_{b1} \\ S_{c1} \end{bmatrix} \quad (\text{I.9})$$

La forme complexe de la tension de sortie est donnée par :

$$v = v_a e^{j0} + v_b e^{-j2\pi/3} + v_c e^{j2\pi/3} \quad (\text{I.10})$$

Après avoir transformé le système triphasé dans un système biphasé par la transformation de Concordia, on peut représenter le vecteur v dans un espace à deux dimensions (α, β) par :

$$v = v_\alpha + jv_\beta \quad (\text{I.11})$$

Où v_α et v_β sont les projections du vecteur v dans le système fixe (α, β) données par:

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

I.5 Modélisations d'un onduleur triphasé à deux niveaux avec filtre LC

Dans les sections suivantes, nous allons modéliser le système de la figure (I.9) dans le repère stationnaires triphasé (a,b,c), le repère stationnaires $\alpha\beta$ et dans le repère synchrone dq .

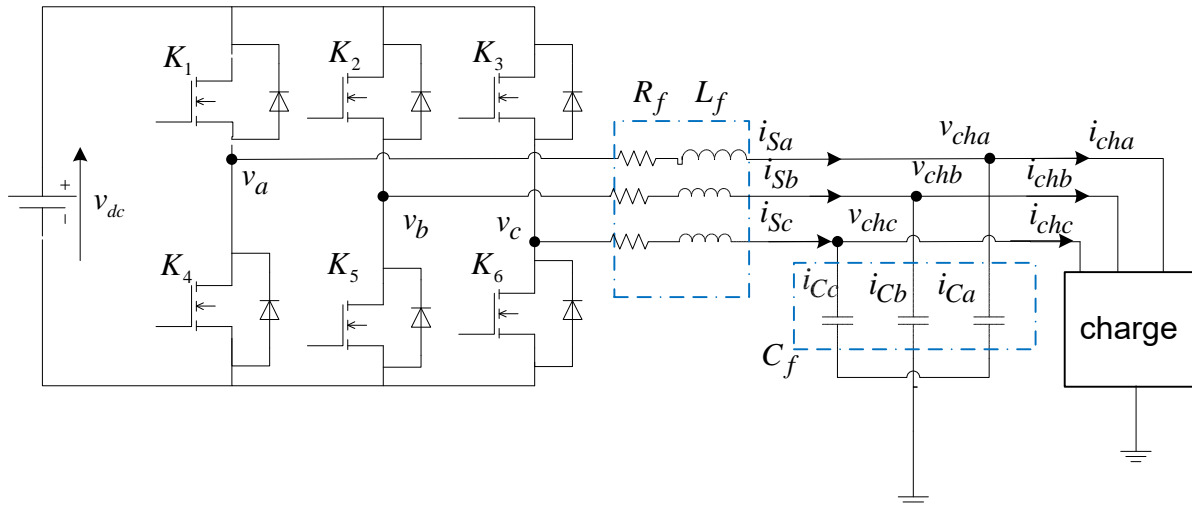


Figure (I.9) : Structure d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux alimentant une charge résistive via un filtre LC.

I.5.1 Modélisation du système (onduleur + filtre LC + charge) dans le repère abc

La structure de l'onduleur triphasé à deux niveaux alimentant une charge résistive triphasée est représentée dans la Figure (I.9). Le modèle mathématique de l'onduleur dans le repère stationnaire triphasé (abc) est obtenu en appliquant la loi de Kirchhoff au côté alternatif du système comme suit :

$$L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{Sa} \\ i_{Sb} \\ i_{Sc} \end{bmatrix} = R_f \begin{bmatrix} i_{Sa} \\ i_{Sb} \\ i_{Sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{cha} \\ v_{chb} \\ v_{chc} \end{bmatrix} \quad (\text{I.14})$$

Où, $v_{cha}, v_{chb}, v_{chc}$ sont les tensions triphasé de la charge, v_a, v_b, v_c et i_{Sa}, i_{Sb}, i_{Sc} sont respectivement, les tensions et les courants triphasés de l'onduleur; L_f, R_f représentent respectivement les inductances et résistances équivalentes internes des inductances de filtre.

D'un autre côté, la dynamique des tensions aux bornes des condensateurs des filtres est décrite par le système d'équation suivant:

$$C_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_{cha} \\ v_{chb} \\ v_{chc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{Sa} \\ i_{Sb} \\ i_{Sc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{cha} \\ i_{chb} \\ i_{chc} \end{bmatrix} \quad (\text{I.15})$$

Où, $i_{cha}, i_{chb}, i_{chc}$ sont les courants de la charge.

I.5.2 Modélisation du système (onduleur+filtre LC+charge) dans le repère $\alpha\beta$

Les modèles représentés dans les systèmes d'équation (I.14) et (I.15) peuvent être transformés respectivement dans les repères stationnaires $\alpha\beta$ en utilisant la transformation de Clark donnée par la matrice suivante:

$$\begin{bmatrix} v_{x\alpha} \\ v_{x\beta} \end{bmatrix} = T_{\alpha\beta}^{abc} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (\text{I.16})$$

où, x peut prendre les grandeurs i_{ch}, v_{ch}, v ou i_S .

On utilisant la transformation (I.16), dans (I.14) et (I.15), on trouve le modèle du système étudié dans le repère $\alpha\beta$ comme suit:

$$\begin{cases} L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{S\alpha} \\ i_{S\beta} \end{bmatrix} = -R_f \begin{bmatrix} i_{S\alpha} \\ i_{S\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{ch\alpha} \\ v_{ch\beta} \end{bmatrix} \\ C_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{S\alpha} \\ i_{S\beta} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{ch\alpha} \\ i_{ch\beta} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (\text{I.17})$$

I.5.3 Modélisation du système (onduleur +filtre LC+charge) dans le repère dq

Les modèles représentés dans les systèmes d'équation (I.14) et (I.15) peuvent être transformés respectivement dans les repères synchrone dq en utilisant la transformation suivante par :

$$\begin{bmatrix} v_{xd} \\ v_{xq} \end{bmatrix} = T_{\alpha\beta}^{abc} T_{dq}^{\alpha\beta} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (\text{I.18})$$

où l'angle θ est la calculé par la relation suivante:

$$\theta = \arctan(v_{\beta} / v_{\alpha}) \quad (\text{I.18})$$

On utilisant la transformation (I.18), dans (I.14) et (I.15), on trouve le modèle du système dans le repère synchrone (dq) comme suit:

$$\begin{cases} L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{Sd} \\ i_{Sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_f & \omega \\ -\omega & -R_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Sd} \\ i_{Sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{\alpha} \\ v_{\beta} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{chd} \\ v_{chq} \end{bmatrix} \\ C_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_{chd} - \omega v_{chq} \\ v_{chq} - \omega v_{chd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{Sd} \\ i_{Sq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{chd} \\ i_{chq} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (\text{I.17})$$

ou ω est la pulsation du système.

I.6 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. 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.

Dans le chapitre suivant, nous allons étudier la commande de l'onduleur de tension triphasé à base de la technique de modulation vectorielle et les régulateurs PI.

Chapitre II:

Commande linéaire d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux

II.1 Introduction

Avec le développement industriel, les onduleurs de tension sont plus en plus utilisés vie quotidienne et dans les secteurs industriels, on citons par exemple, les installations photovoltaïque domicile, les alimentations de secours, l'entraînement des machines électrique, et les systèmes de production d'énergie renouvelable couplé au réseau électrique. En effet, les performances et le rendement des onduleurs de tension sont dépend essentiellement de type de la modulation et la technique de la commande appliquées. [7]

Plusieurs stratégies de modulations peuvent être utilisées pour piloter les onduleurs de tension, à savoir la modulation plein ondes, la modulation de la largeur d'impulsion sinusoïdale (MLI), la modulation à hystérésis et la modulation vectorielle (en anglais Space Vector Modulation (SVM)).

Dans ce chapitre nous allons étudier la commande de l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux. Dans la première partie de ce chapitre, nous allons présenter brièvement les technique de modulation les plus reconnues dans littérature. Ensuite nous allons détailler le principe de la modulation SVM.

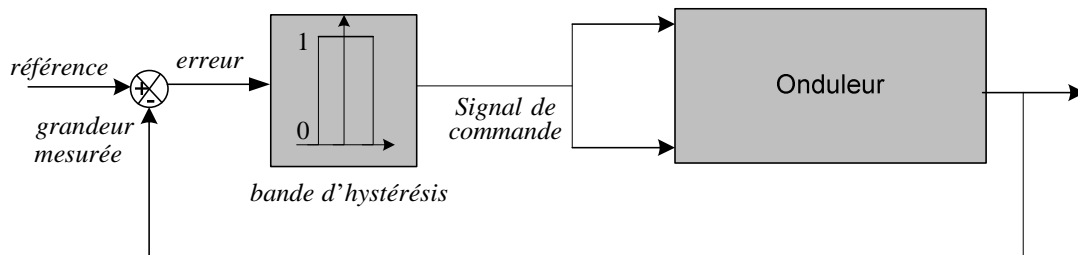
Dans la deuxième partie de ce chapitre nous allons présenter une structure de commande basée sur la modulation vectorielle (SVM) et les régulateurs PI permettant de contrôler un onduleur de tension débite une charge résistive via un filtre LC.

Enfin, nous allons valider par simulation l'algorithme en boucle ouverte de la modulation SVM. Et les performances de la structure de commande synthétisée en considérant plusieurs tests de robustesse telle que la variation de la tension de référence et la variation de la charge.

II.2 Techniques de commande onduleur triphasé

II.2.1 Commande par hystérésis

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire utilise l'erreur entre la grandeur de référence et la grandeur réelle (tension, courant,..) produit par l'onduleur.[8] L'erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis, lorsque que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure, un ordre de commande est généré de manière à rester à l'intérieur de la bande. le principe de cette modulation est montré par la figure (II.1).



la Figure (II.1): Principe de la modulation à hystérésis.

II.2.2 Commande plein onde

La tension de sortie est formée de créneaux rectangulaires, riche en harmoniques. Le filtrage de cette tension rectangulaire, à la fréquence industrielle, est lourd, coûteux. On distingue deux types de commandes:

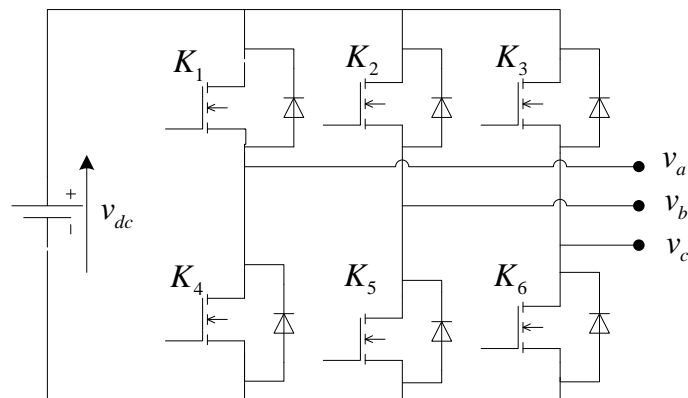


Figure II.2 Onduleur de tension triphasé.

II.2.2.1 Commande plein onde 180°

- La commande de chaque demi-pont est symétrique.
- Les commandes des demis ponts sont décalées de $T/3$ l'une par rapport à l'autre.
- Les interrupteurs K_1 et K_4 , K_2 et K_5 , K_3 et K_6 doivent être complémentaires deux à deux.

L'ouverture et la fermeture des six interrupteurs déterminent six intervalles distincts. Durant chaque période des grandeurs de sortie.

La figure II.3 montre l'état des interrupteurs K_1 , K_2 , K_3 de l'onduleur triphasé[4].

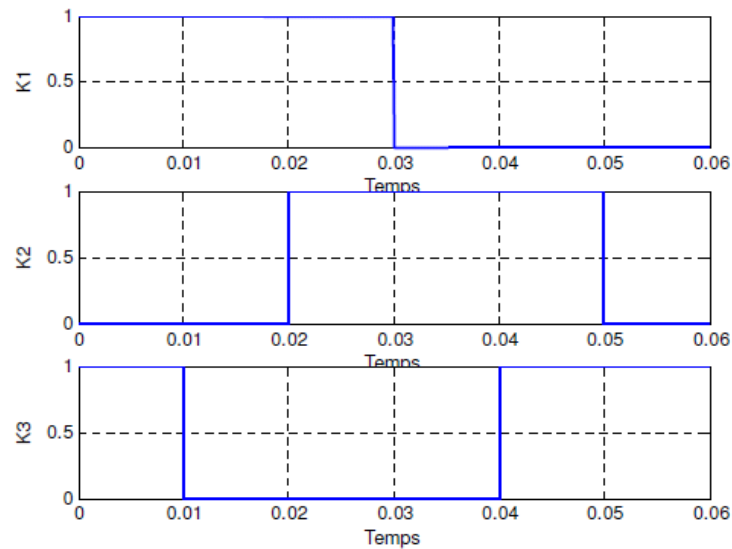


Figure (II.3): Formes des signaux de commande des interrupteurs K_1 , K_2 , K_3

II.2.2.2 Commande plein onde décalée 120°

La commande 120 délivre une tension de sortie avec un spectre d'harmoniques similaire à celui obtenue dans la commande 180° avec l'avantage de réduction de la durée de conduction des transistors.

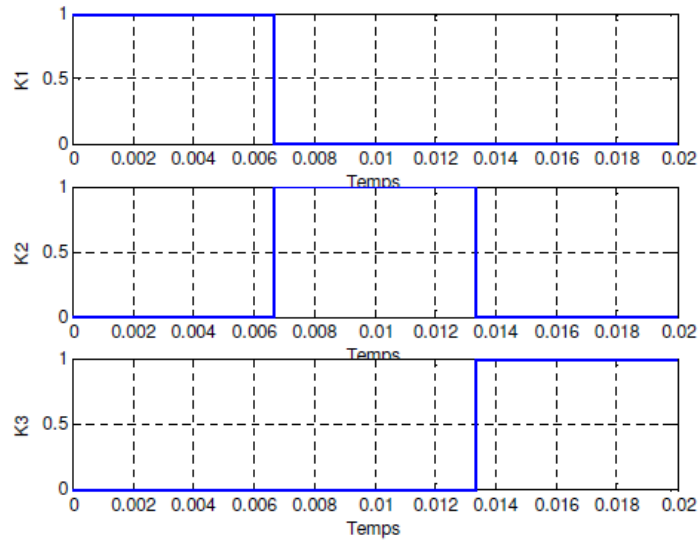


Figure (II.4): Formes des signaux de commande des interrupteurs K1, K2, K3

II.2.3 Commande par la modulation de largeur d'impulsion

La modulation de largeur d'impulsion MLI (Pulse Width Modulation) consiste à adopter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie.[9] Le principe de cette technique consiste à générer des impulsions de commande de largeur de manière à avoir à la sortie des convertisseurs la forme de tension désirée. Cette technique basée sur le découpage de l'onde rectangulaire de comparer le signal de référence ou la modulante sinusoïdale v_{ref} avec une porteuse triangulaires v_p comme la figure II.4 illustre.

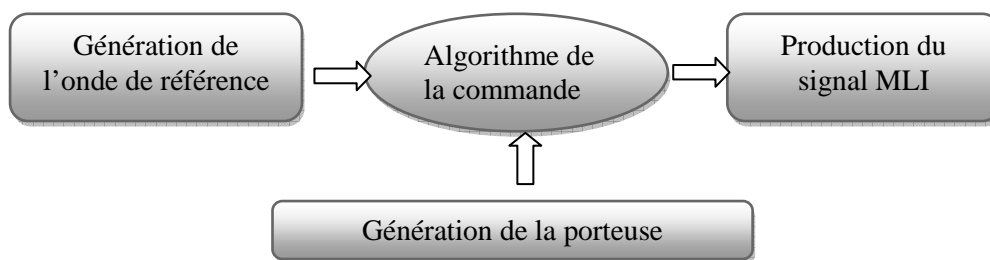


Figure (II.5): Principe de la modulation de largeur d'impulsions.

II.2.4 Commande par MLI vectorielle ou SVM (Space Vector Modulation)

La modulation vectorielle (en anglais : Space Vector Modulation ou SVM). Cette technique est très utilisée dans plusieurs applications en raison de ses avantages importants par rapports aux techniques précédentes, en termes de THD, indice de modulation...etc. De plus elle permet une implantation relativement simple avec les processeurs numériques. La modulation

vectorielle consiste à obtenir analytiquement une tension de référence (en valeur moyenne) à partir des états de commutation de l'onduleur. La modulation vectorielle présente les avantages suivants par rapport au reste des techniques de modulation:

- Cette technique de modulation est valable pour tous les types de convertisseurs multi niveaux.
- Elle contrôle directement les trois phases de l'onduleur.
- Une bonne utilisation de la tension du bus continu est atteinte car le troisième harmonique est introduit implicitement.
- Le courant de sortie a une ondulation très réduite.
- Les vecteurs redondants fournissent un degré de liberté additionnel. Ceci permet l'incorporation des fonctions complémentaires comme par exemple l'équilibrage de la tension du bus continu, la minimisation des pertes, la réduction d'harmoniques et la réduction de la tension en mode commun.
- L'implantation physique est relativement simple avec un processeur de signaux numériques.

Il y a plusieurs algorithmes utilisant la MLI vectorielle pour commander l'onduleur. Le but de toutes les stratégies de modulation est de réduire les pertes de commutation et les harmoniques, et d'assurer une commande précise.

II.2.4.2 Représentation vectorielle des vecteurs de tension d'un onduleur à deux niveaux

La structure de l'onduleur de tension à deux niveaux est montrée dans la figure (II.6).

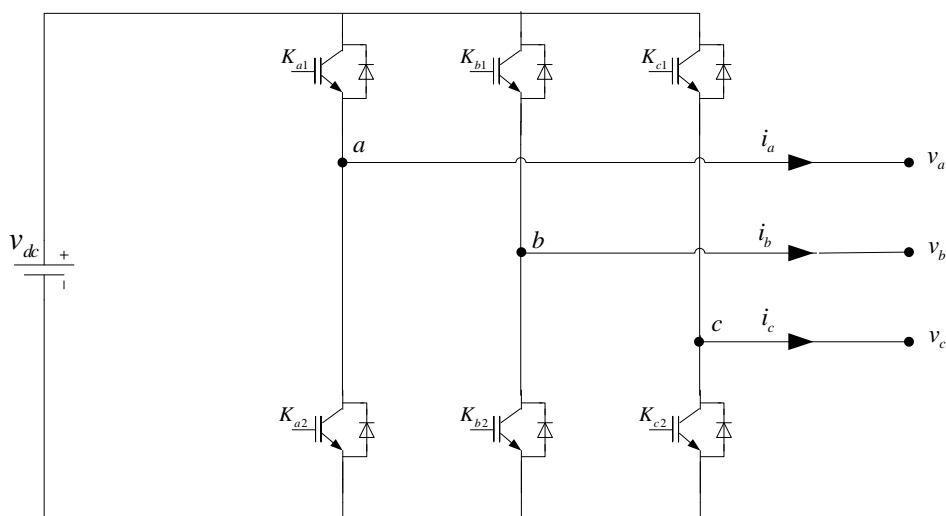


Figure (II.6) : Structure d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux.

L'objectif de la commande de l'onduleur est de rendre les tensions de sortie v_a, v_b et v_c aussi proches que possible des trois tensions de référence v_a^*, v_b^* et v_c^* . ces vecteurs peuvent être représentés dans le plan (α, β) par un seul vecteur de référence \vec{v}^* d'amplitude v^* égale à l'amplitude souhaitée des tensions simples, et tournant autour du centre de l'hexagone avec une vitesse angulaire $\omega = d\theta/dt$ constante correspondante à la pulsation électrique souhaitée. Ce vecteur est défini par :

$$\vec{v}^* = v^* e^{j\theta} \quad (\text{II.1})$$

Si on attribué au vecteur de référence \vec{v}^* uniquement les six positions discrètes de la figure (II.7), la tension de sortie sera riche en harmoniques. Afin de réduire le taux d'harmoniques de la tension de sortie résultante de la forme non circulaire de cet hexagone, on impose au vecteur \vec{v}^* de se positionner à l'intérieur du cercle délimité par l'hexagone. Ainsi, le module maximal admissible du vecteur \vec{v}^* est :

$$v_{\max}^* = \sqrt{\frac{2}{3}} v_{dc} \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) = \sqrt{\frac{1}{2}} v_{dc} \quad (\text{II.2})$$

L'équation (II.1) devient :

$$\vec{v}^* = m v_{\max}^* e^{j\theta} \quad (\text{II.3})$$

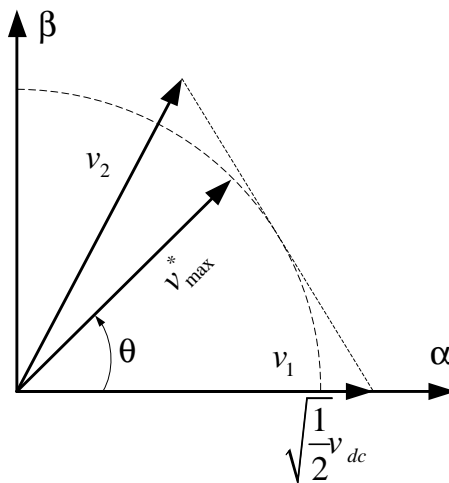


Figure (II.8) : Limitation du vecteur de référence \vec{v}^*

Avec m : le taux de modulation qui a une valeur entre 0 et 1 et défini par la relation suivante :

$$m = \frac{\sqrt{2} v^*}{v_{dc}} \quad (\text{II.4})$$

II.2.4.1 Principe de la modulation vectorielle (SVM)

Le principe de la SVM consiste à projeter le vecteur de tension de référence \vec{v}^* désiré sur les deux axes du plan (α, β) . Ces projections sont utilisées dans le calcul des temps de commutations désirées de deux états non nuls de l'onduleur. Si on désigne par t_i et t_{i+1} les deux temps de commutation en question, leur somme doit être forcément inférieure à la période de commutation de l'onduleur T_h . Pour maintenir la fréquence de commutation constante, un état nul de l'onduleur est appliqué durant le reste de la période T_h . [10]

II.2.4.3 Localisation du vecteur de référence

Afin de connaître dans quel secteur se trouve le vecteur de tension \vec{v}^* , deux stratégies sont généralement utilisées. La première consiste de faire une série de tests sur v_α^* et v_β^* pour localiser le secteur contenant le vecteur de référence comme illustre la figure (II.5).

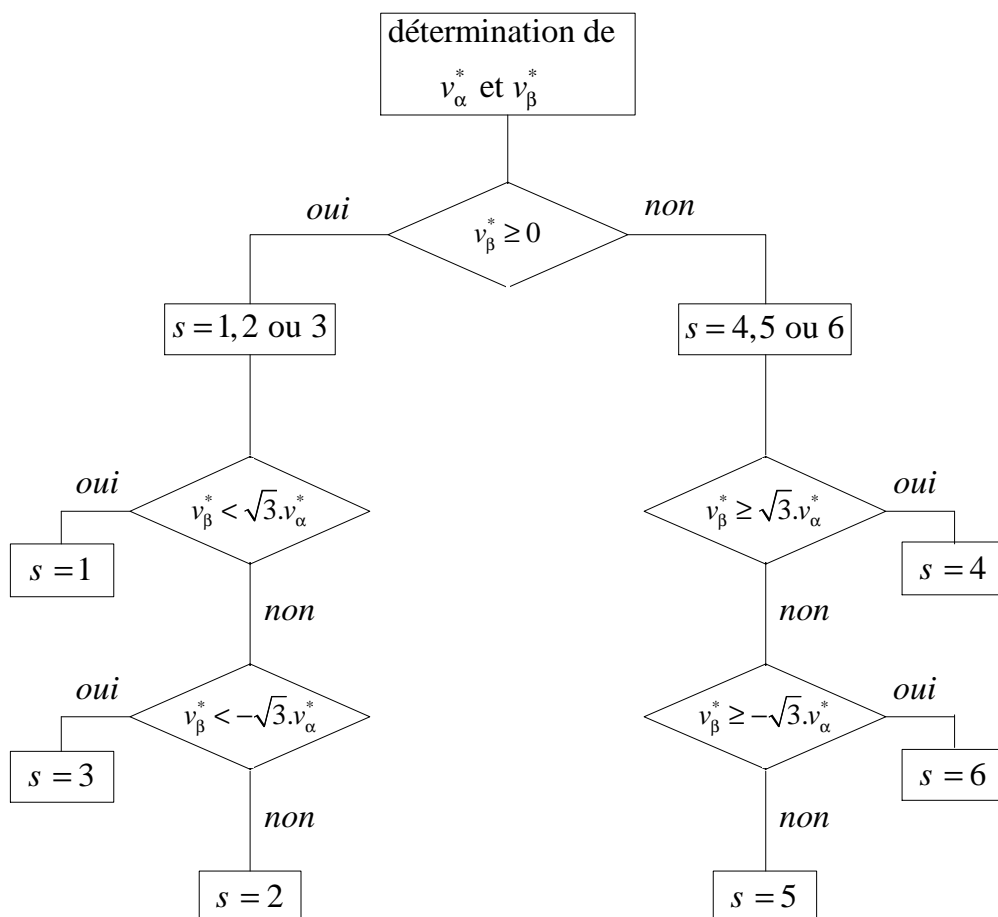


Figure (II.9) : Organigramme de calcul du secteur.

Tandis que la deuxième consiste de faire une série de tests sur l'argument du vecteur de référence θ selon la relation suivante:

$$s = \begin{cases} 1 & si & \theta \in [0, \pi/3] \\ 2 & si & \theta \in [\pi/3, 2\pi/3] \\ 3 & si & \theta \in [2\pi/3, \pi] \\ 4 & si & \theta \in [\pi, 4\pi/3] \\ 5 & si & \theta \in [4\pi/3, 5\pi/3] \\ 6 & si & \theta \in [5\pi/3, 2\pi] \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

A l'intérieur d'une période de commutation de l'onduleur, il existe différentes stratégies d'application des vecteurs assurant l'obtention de la tension désirée. Afin de réduire les harmoniques, il est préférable de générer des tensions centrées sur la période de commutation de l'onduleur. [9]

Dans les cas où le système de commande exige des tensions supérieures à la valeur maximum de l'algorithme MLI vectorielle, il sera nécessaire de développer un mécanisme de limitation des tensions de sortie.

II.2.4.4 Calcul des temps de commutation

Dans le cas général, l'onduleur n'est pas capable de générer directement le vecteur \vec{v}^* , car il ne peut prendre que les huit états discrets illustrés précédemment. On doit donc construire \vec{v}^* à l'aide d'une combinaison des vecteurs nuls (v_0 ou v_7) et des deux vecteurs adjacents v_i et v_{i+1} du secteur qui contient le vecteur de référence ($i=s$). Ces vecteurs sont appliqués individuellement pendant certaines durées t_0, t_i et t_{i+1} de sorte que \vec{v}^* soit égale à la valeur moyenne de ces vecteurs pendant une période de découpage :

$$\vec{v}^* = \bar{v}_i + \bar{v}_{i+1} + \bar{v}_0 \quad (\text{II.8})$$

Avec :

$$\bar{v}^* = \frac{1}{T_h} \int_t^{t+T_h} \vec{v}^* dt \quad (\text{II.9})$$

Puisque la période de découpage T_h est très faible, la valeur moyenne de tension \vec{v}^* peut être considérée comme constante. Et puisque les vecteurs v_i et v_{i+1} sont des vecteurs fixes on a :

$$\bar{v}_i = \frac{1}{T_h} \int_t^{t+t_i} v_i dt = \frac{1}{T_h} v_i t_i \quad (\text{II.10})$$

Et

$$\bar{v}_{i+1} = \frac{1}{T_h} \int_t^{t+t_{i+1}} v_{i+1} dt = \frac{1}{T_h} v_{i+1} t_{i+1} \quad (\text{II.11})$$

L'équation (II.8) devient :

$$T_h v^* = t_{i+1} v_{i+1} + t_i v_i + t_0 v_0 \quad (\text{II.12})$$

Par comparaison des parties réelles et imaginaires des deux membres on obtient :

$$\begin{cases} T_h v_\alpha^* = t_{i+1} v_{i+1}^\alpha + t_i v_i^\alpha \\ T_h v_\beta^* = t_{i+1} v_{i+1}^\beta + t_i v_i^\beta \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

$$\begin{cases} T_h v_\alpha^* = t_{i+1} v_{i+1}^\alpha + t_i v_i^\alpha \\ T_h v_\beta^* = t_{i+1} v_{i+1}^\beta + t_i v_i^\beta \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

Connaissons les valeurs des coordonnées des vecteurs de sortie v_i^α et v_i^β (Tableau II.1). On peut calculer les temps de commutation t_i et t_{i+1} en fonction des coordonnées du vecteur de référence par la résolution du système d'équation (II.14).

Pendant le reste de la période de commutation on applique les vecteurs nuls chacun pendant la moitié de ce temps, donc :

$$t_0 = t_7 = \frac{T_h - t_i - t_{i+1}}{2} \quad (\text{II.15})$$

Afin de simplifier l'analyse, on définit les trois variables e , l et k suivants :

Les temps t_i et t_{i+1} pour chaque secteur sont exprimés en fonction des variables e , l et k suivant le tableau (II.2) :

Tableau (II.2) : Temps de commutation pour chaque secteur

Secteur	1	2	3	4	5	6
t_i	e	l	k	$-e$	$-l$	$-k$
t_{i+1}	k	$-e$	$-l$	$-k$	e	l

$$\begin{cases} e = T_h \frac{\sqrt{3}v_{\alpha}^* + v_{\beta}^*}{\sqrt{2}v_{dc}} \\ l = T_h \frac{\sqrt{3}v_{\alpha}^* - v_{\beta}^*}{\sqrt{2}v_{dc}} \\ k = T_h \frac{\sqrt{2}v_{\beta}^*}{v_{dc}} \end{cases} \quad (II.16)$$

II.2.4.5 Génération des impulsions de commande

L'application des vecteurs d'états durant une période de découpage doit tenir en compte de deux critères:

- Minimisation des harmoniques, par la génération d'une tension de sortie la plus proche que possible de la tension de référence, par l'application du vecteur d'état v_i pendant une durée t_i , le vecteur v_{i+1} pendant une durée t_{i+1} et le vecteur nul pendant le reste de la période. On applique v_0 aux extrémités de la période de découpage et v_7 au centre de cette période.
- Minimisation des pertes dans les interrupteurs par la réduction du nombre de commutation de chaque interrupteur, par l'application du vecteur d'indice impair avant l'application du vecteur d'indice pair pendant la demi période de découpage et inversement durant l'autre demi période.

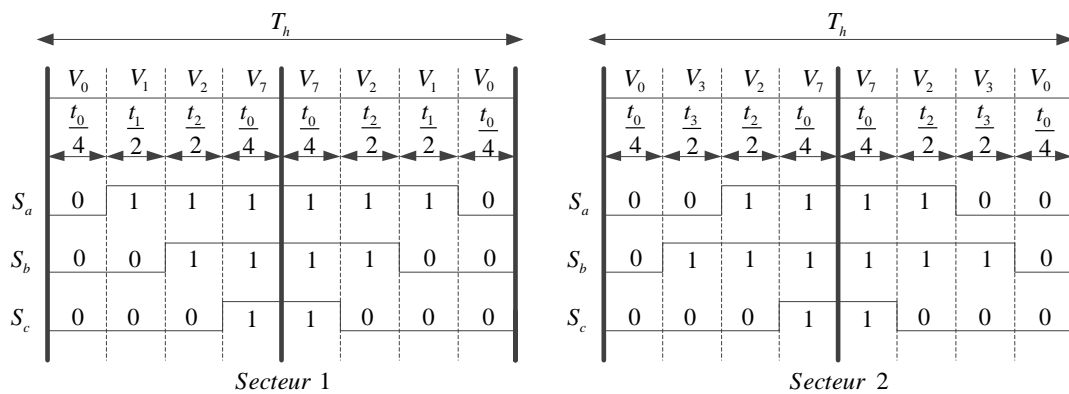


Figure (II.10) : Principe de génération des impulsions de commande par MLI vectorielle.

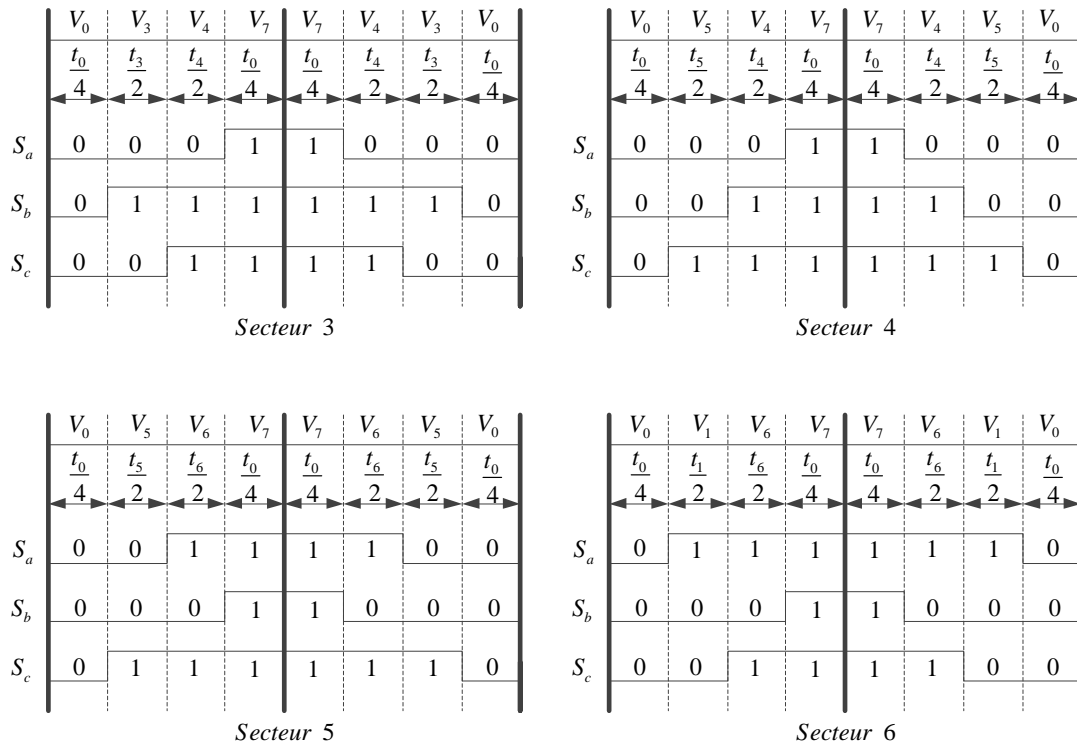


Figure (II.10) (suite) : Principe de génération des impulsions de commande par MLI vectorielle.

Si on veut résumer la méthode de calcul de l'algorithme de la modulation SVM, on peut énumérer les points suivants :

- 1- A partir des tensions de référence v_a^* , v_b^* et v_c^* on déduit les composantes du vecteur référence v_α^* et v_β^* dans le repère de (α, β) ;
- 2- Calcul du numéro du secteur s où se situe le vecteur de référence;
- 3- Calcul des temps (t_i, t_{i+1} et t_0) d'application des vecteurs (v_i, v_{i+1} et v_0) ;
- 4- Génération des impulsions de commandent des interrupteurs.

La figure (II.11), montre un schéma qui résume les étapes à suivre pour développer un algorithme de la modulation vectorielle.

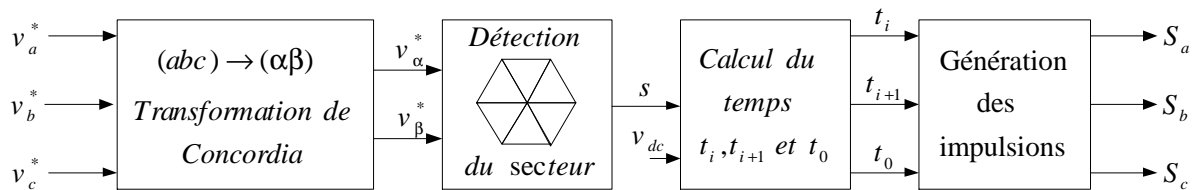


Figure (II.11): Logigramme de la modulation vectorielle à deux niveaux.

II.3 Synthèse d'une commande linéaire pour un onduleur de tension débité un charge résistive via un filtre LC

Le schéma global de la commande du système est montré dans la figure (II.12). La commande se compose de deux boucles en cascade. Les boucles externes permettant d'imposer la tension désirée sur la charge (v_{chd}^*, v_{chq}^*) en asservissant les tensions aux bornes des condensateurs dans le repère dq . Tandis que les boucles internes servent à contrôler les courants de l'onduleur (i_{sd}, i_{sq}) dans le repère synchrone (dq).

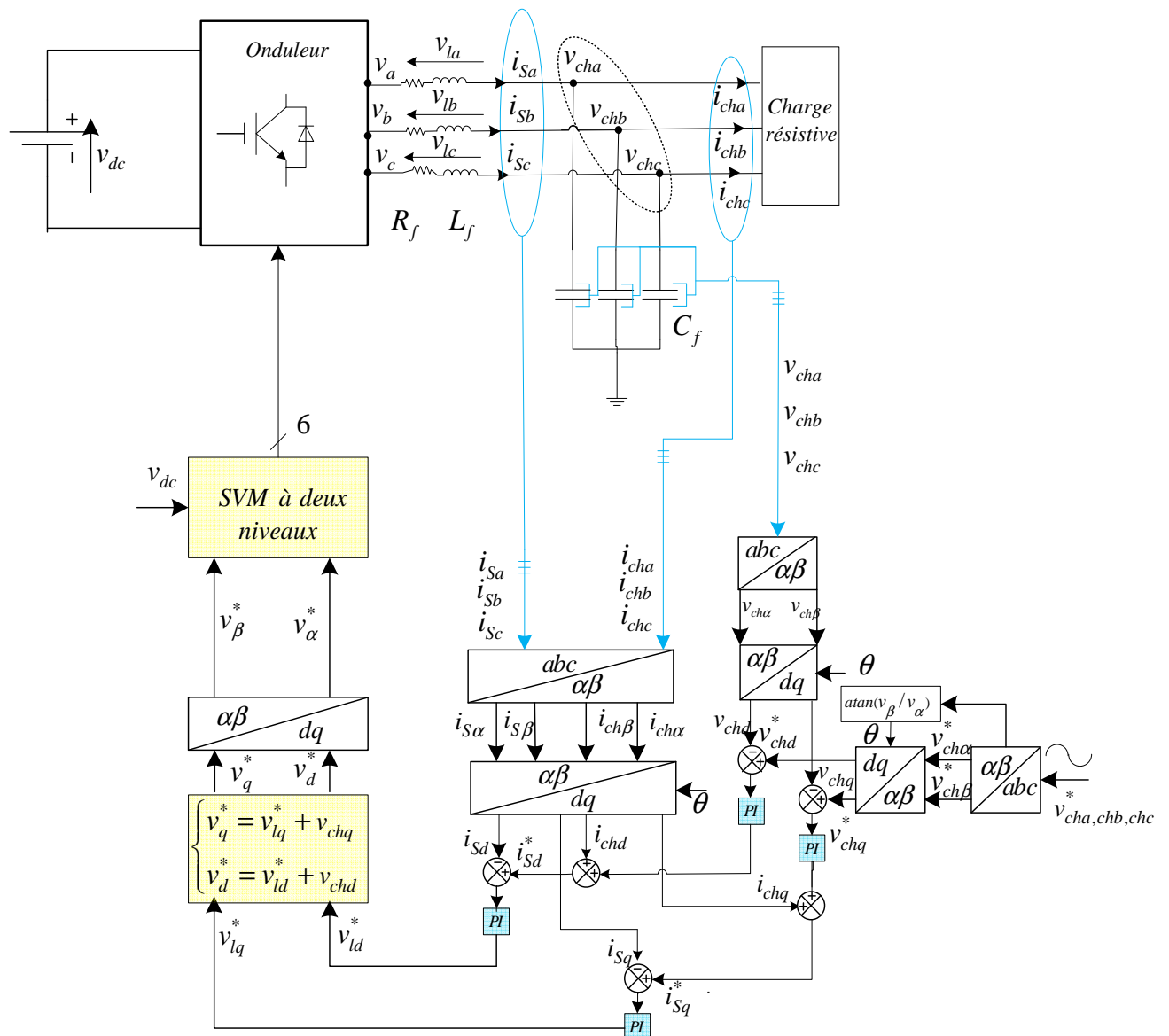


Figure (II.12): Schéma global de la commande linéaire d'un onduleur de tension débité une charge résistive via un filtre LC.

II.3.1 Synthèse du régulateur des tensions des condensateurs dans le repère dq

Afin d'imposer la tension désirée à charge, nous avons synthétisé une boucle de régulation à base des régulateurs PI permettant d'asservir les tensions aux bornes des condensateurs dans le repère dq . La figure (II.13) montre le schéma de la boucle de régulation utilisée.

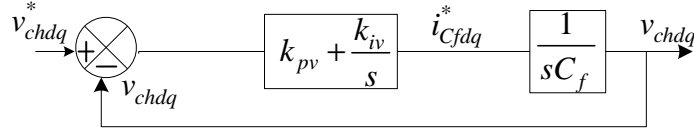


Figure (II.13): Boucle de régulation de la tension du bus continu.

A partir du schéma de la figure(II.12), la fonction de transfert du système en boucle fermée s'écrit comme:

$$H_v(s) = \frac{\frac{k_{pv}}{C_{pv}}s + \frac{k_{iv}}{C_{pv}}}{s^2 + \frac{k_{pv}}{C_{pv}}s + \frac{k_{iv}}{C_{pv}}} \quad (\text{II.17})$$

Pour calculer les gains du correcteur on utilise la méthode de placement des pôles. On désire que la fonction de transfert $H_v(s)$ présente le même comportement dynamique qu'un système de deuxième ordre de la forme suivante :

$$F(s) = \frac{\omega_{nv}^2}{s^2 + 2\xi_v \omega_{nv} s + \omega_{nv}^2} \quad (\text{II.18})$$

Où, ξ_v, ω_{nv} représentent respectivement le facteur d'amortissement et la pulsation du système. par identification des deux équations caractéristiques des deux fonctions de transfert (II.17) (II.18) et (II.18), les gains du correcteur sont déterminés par:

$$\begin{cases} k_{pv} = 2\xi_v \omega_{nv} C_{pv} \\ k_{iv} = C_{pv} \omega_{nv}^2 \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

II.3.2 Synthèse du régulateur des courants des inductances dans le repère dq

Afin d'imposer le courant désiré à charge, nous avons synthétisé une boucle de régulation à base des régulateurs PI permettant d'asservir les courants dans les inductances dans le repère dq . La figure (II.14) montre le schéma de la boucle de régulation utilisée.

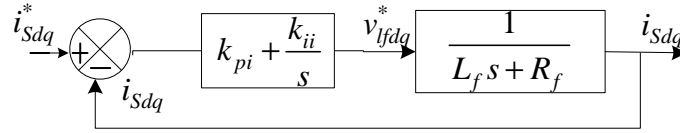


Figure (II.14): Schéma de régulation des courants de l'onduleur.

A partir du schéma de la figure (II.14) la fonction de transfert du système en boucle fermée s'écrit:

$$H_i(s) = \frac{\frac{k_{pi}s + k_{ii}}{L_f}}{s^2 + \frac{k_{pi} + R_f s + k_{ii}}{L_f}} \quad (\text{II.20})$$

Où : L_f, R_f représente respectivement l'inductance du filtre et sa résistance.

L'identification de la fonction de transfert en boucle fermée avec celle d'un système de deuxième ordre conduit à :

$$\begin{cases} k_{pi} = 2\xi_i \omega_{ni} L_f - R_f \\ k_i = L_f \omega_{ni}^2 \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

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

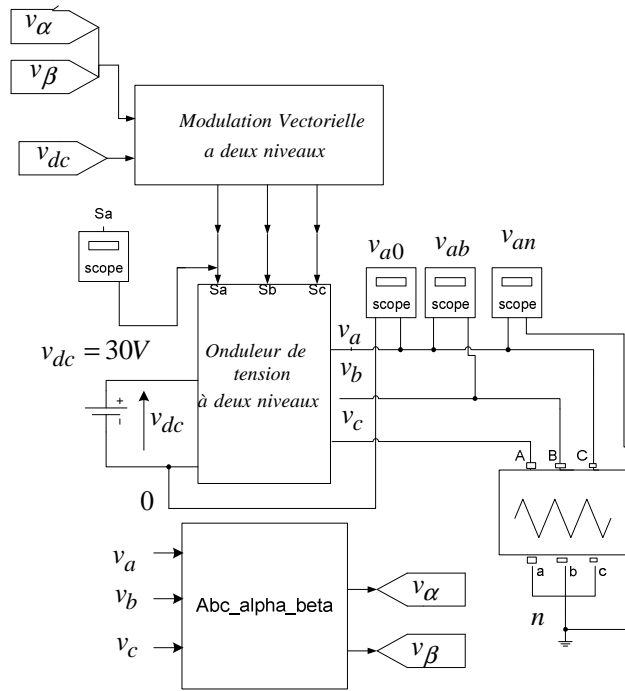
Enfin, les tensions de référence de l'onduleur dans le repère dq peuvent être calculées en fonction des tensions déterminées par les régulateurs (v_{lfd}^*, v_{lfq}^*) comme suit:

$$\begin{bmatrix} v_d^* \\ v_q^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{lfd}^* \\ v_{lfq}^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{chd} \\ v_{chq} \end{bmatrix} - L_f \omega \begin{bmatrix} i_{Sq} \\ i_{Sd} \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

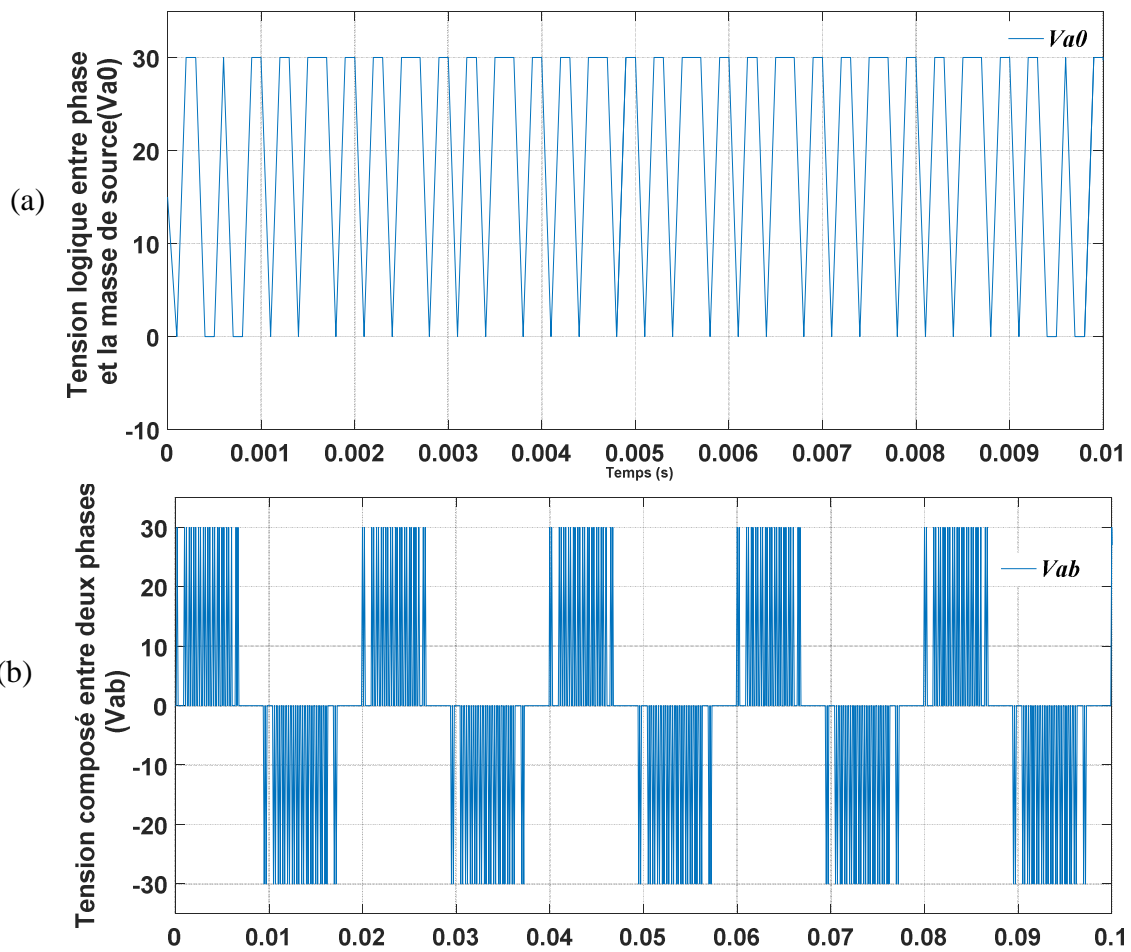
II.4 Résultats de simulations

II.4.1 Validation de l'algorithme de la modulation vectorielle (SVM)

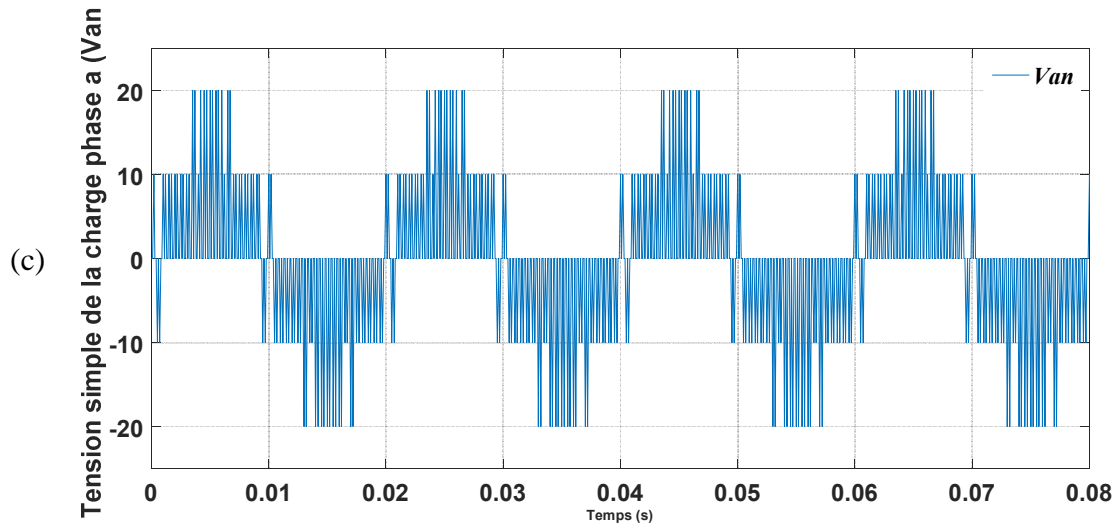
Dans ce test, nous allons vérifier en boucle ouverte l'algorithme de la modulation vectorielle à deux niveaux selon le schéma du système montré dans la figure II (15). Pour cela, nous avons visualisé les allures de la tension simple et la tension composée générées par l'onduleur. Les résultats de test sont présentés dans la figure(II.16).



Figure(II.15): Schéma bloc utilisé pour valider l'algorithme de la modulation vectorielle.



Figure(II.16): Formes d'ondes des tensions d'un onduleur de tension à deux niveaux piloté par la modulation vectorielle: (a) Tensions au borne d'un interrupteur v_{a0} , (b) Tension composées v_{ab}



Figure(II.16)(suite): Formes d'ondes des tensions d'un onduleur de tension à deux niveaux piloté par la modulation vectorielle: (c) Tension simple v_{an}

D'après la Figure(II.16) (a), on peut constater clairement que la forme d'onde de la tension aux borne d'un interrupteur présente deux niveau $(0, v_{dc})$ ce qui en conformément avec la théorie présenté dans le premier chapitre. La figure (II.16) (b), montre la forme d'onde d'une tension composé (v_{ab}) , on peut confirmer que la tension composées présente trois niveaux $(0, v_{dc}, -v_{dc})$, ce qui valide l'algorithme de la modulation SVM développé.

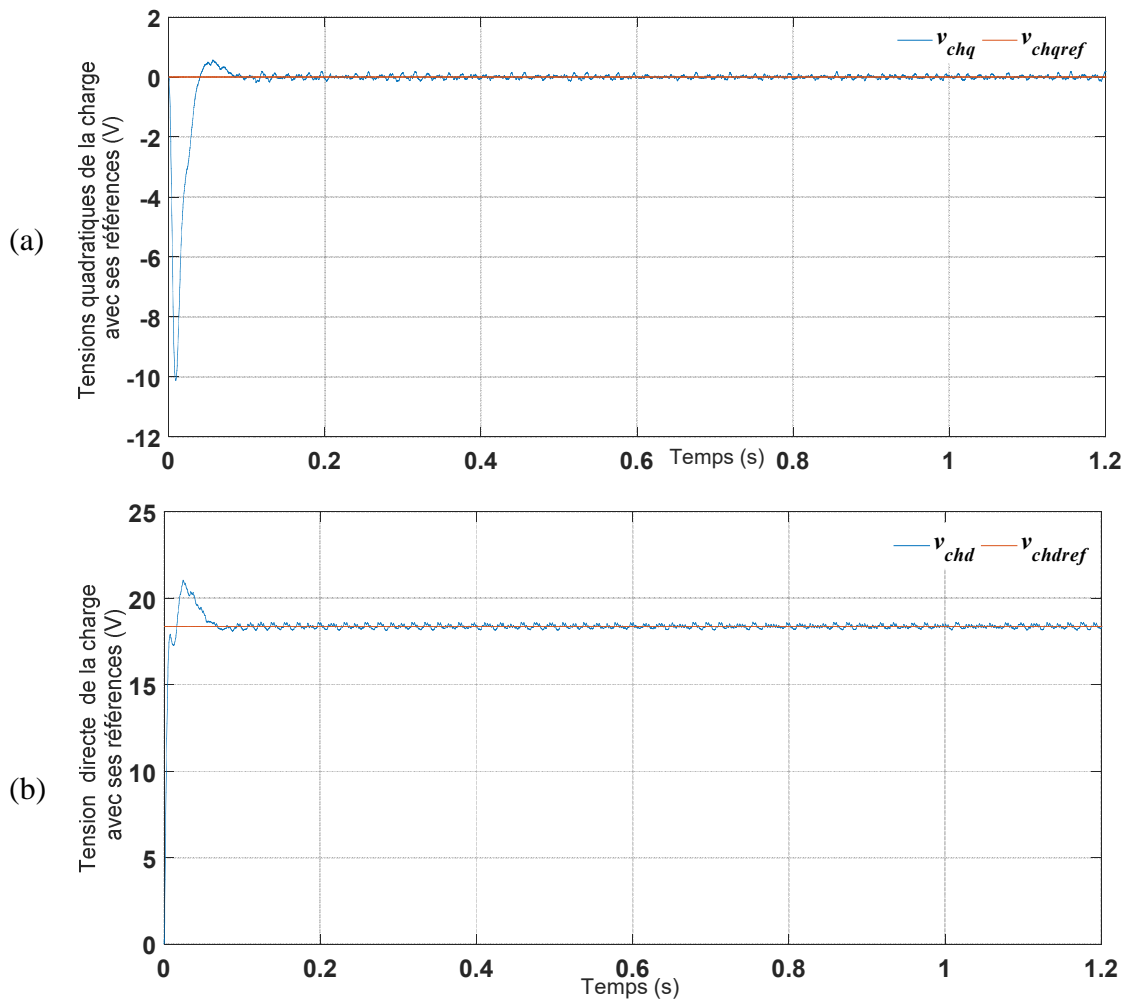
De plus, à partir de la figure (II.16)(c), il est clair que la tension simple de l'onduleur v_{an} présente cinq niveaux $(-2v_{dc}/3, -v_{dc}/3, 0, v_{dc}/3, 2v_{dc}/3)$, ce qui confirme valide également l'algorithme de la modulation SVM développé.

II.4.2 Performances du système avec une tension de référence fixe

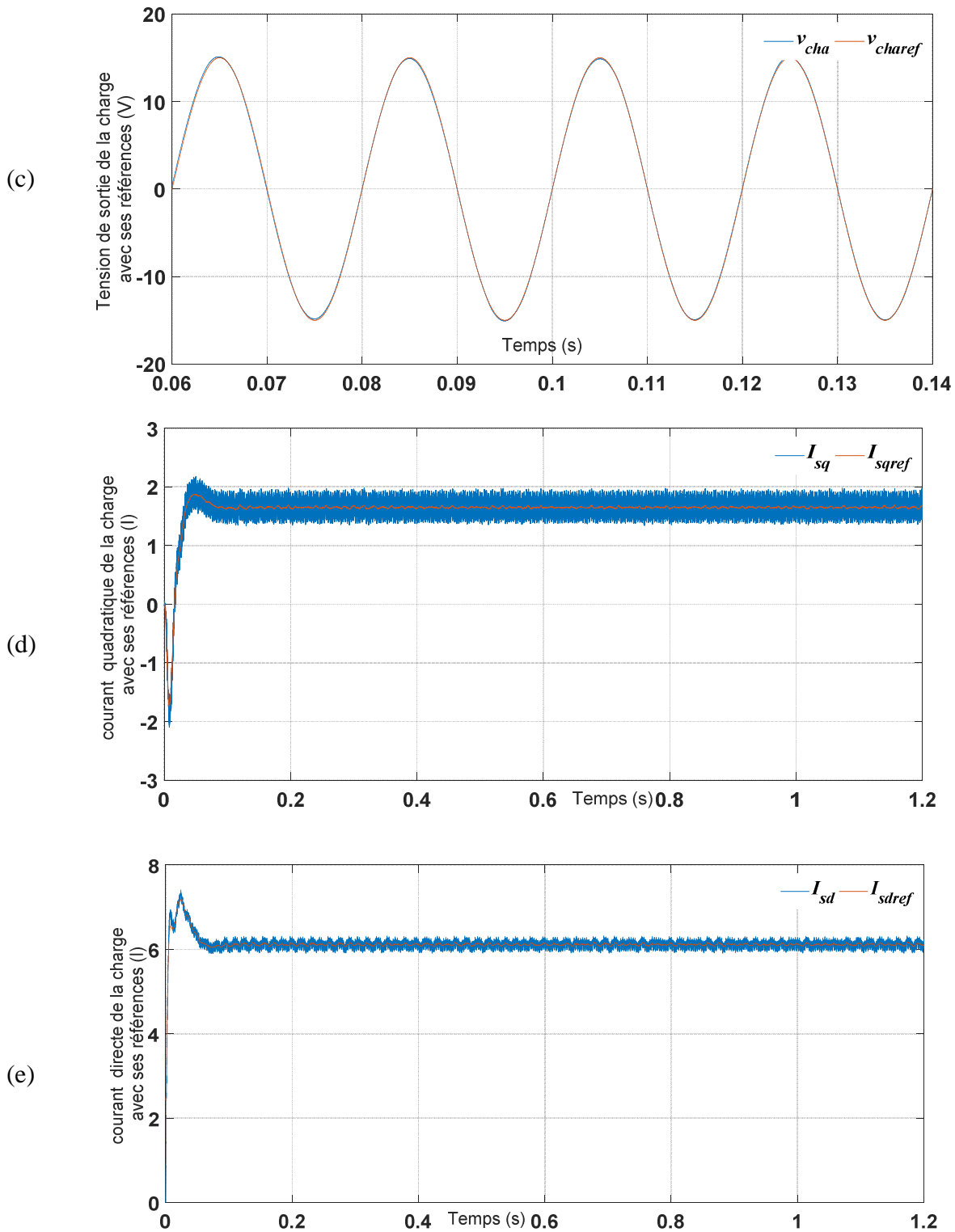
Dans ce test, nous allons vérifier l'efficacité de la commande présenté dans la figure (II.12) pour imposer une tension désirée à la charge. Les paramètres du système sont résumés dans le Tableau (II.3).

Tableau (II.3): Paramètres utilisés pour la simulation.

paramètres de filtre LC $C_f = 330\mu F$, $R_f = 20m\Omega$, $L_f = 1mH$
paramètres du régulateur de tension $\omega_{nv} = 200 \text{ rad} / s$, $\xi_v = 1$
paramètres du régulateur de courant $\omega_{nv} = 700 \text{ rad} / s$, $\xi_v = 1$
Charges linéaires $R_{ch} = 3\Omega$, $l_{ch} = 40mH$



Figure(II.17): Formes d'ondes des tensions et des courants d'un onduleur de tension à deux niveaux piloté par la modulation vectorielle: (a) Tension quadratique de la charge et sa référence,(b) Tension directe de la charge et sa référence.



Figure(II.17) (**suite**): Formes d'ondes des tensions et des courants d'un onduleur de tension à deux niveaux piloté par la modulation vectorielle: (c) Tension de la de charge stationnaire et sa référence,(d) courant quadratique de la charge et sa référence,(e) courant directe de la charge et sa référence.

Dans ce test, l'aptitude de l'onduleur à suivre la tension de référence et l'imposer à la charge est évaluée selon le schéma de la commande montré dans la figure (II.12).

D'après les figure (II.17)(a) et (II.17)(b), on constate que les tensions de la charge dans le repère synchrone v_{chd}, v_{chq} suivent bien leurs tensions de référence désirées v_{chd}^*, v_{chq}^* , ce qui montre la bonne synthèse des régulateurs de tension. Ceci peut être confirmé également dans la figure (II.17) (c) où une bonne poursuite est également enregistrée dans le repère stationnaire (abc).

Selon les figures (II.17)(d) et (II.17)(e), les composantes des vecteurs courants de l'onduleur

Dans le repère synchrone (i_{sd}, i_{sq}) suivent avec précision leurs références i_{sd}^*, i_{sq}^* , ce qui valide la synthèse et l'efficacité des régulateurs des courant synthétisés.

II.4. 3 Performances du système avec une variation brusque de tension de référence

Dans ce test nous allons évaluer les performances du système avec une variation brusque de la tension de référence selon le scénario suivant:

de 0 à $0.25s$ $v^* = 10V$

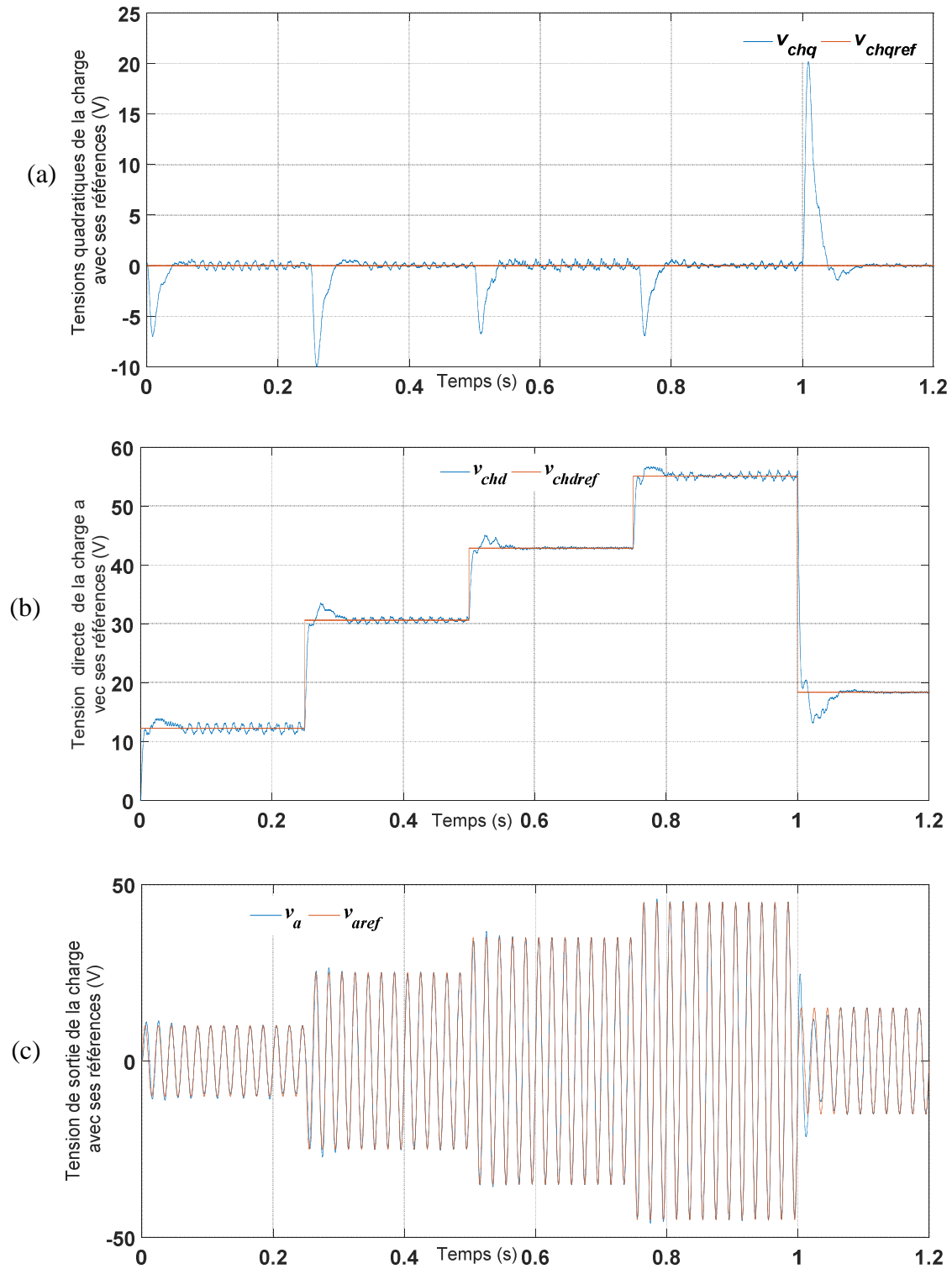
de $0.25s$ à $0.50s$ $v^* = 25V$

de $0.50s.$ à $0.75s$ $v^* = 35V$

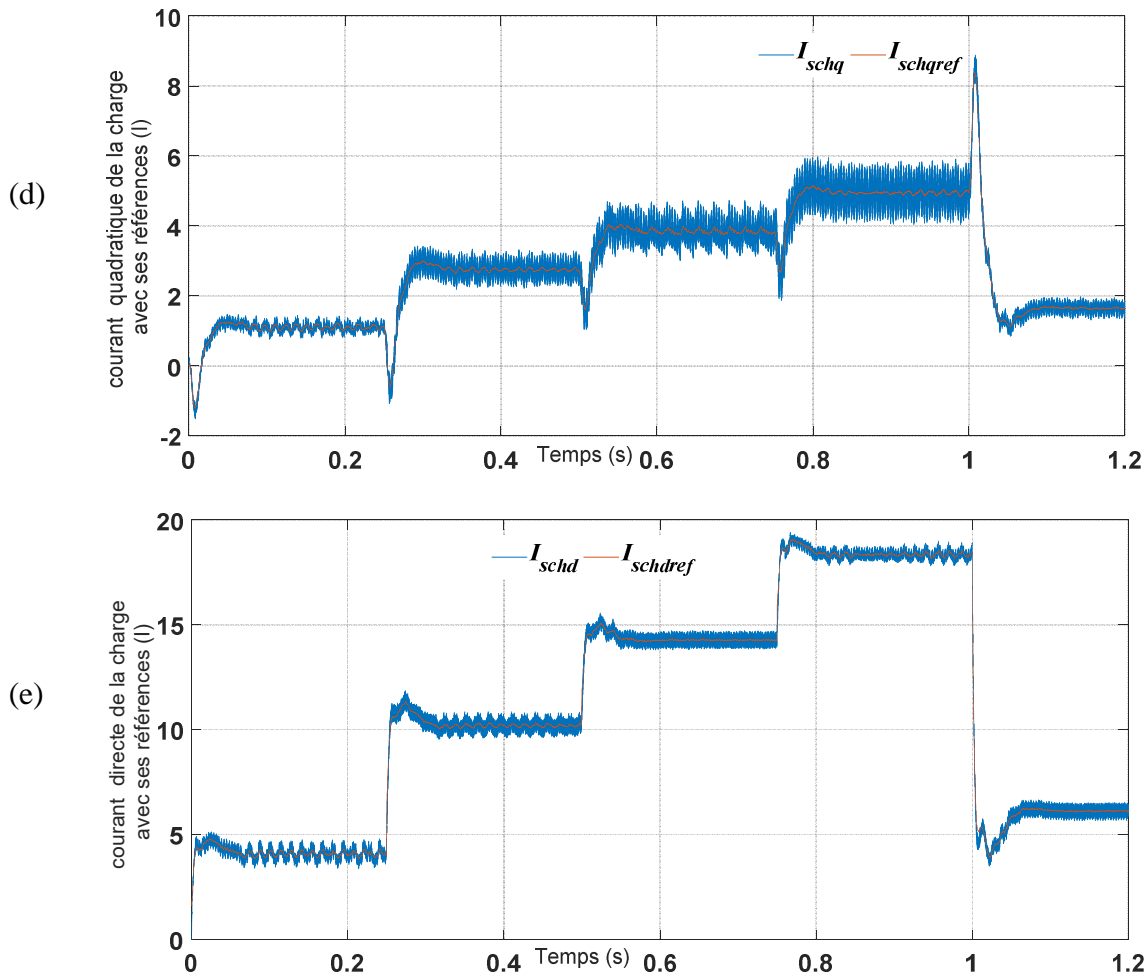
de $0.75s$ à $1s$ $v^* = 45V$

de $1s$ à $1.25s$ $v^* = 15V$

Les résultats de ce test sont présentés dans la figure (II.18).



Figure(II.18): Formes d'ondes des tensions et des courants d'un onduleur de tension à deux niveaux piloté par la modulation vectorielle: (a) Tension quadratique de la de charge et sa référence,(b) Tension directe de la de charge et sa référence,(c) Tension de la de charge stationnaire et sa référence.



Figure(II.18)(suite): Formes d'ondes des tensions et des courants d'un onduleur de tension à deux niveaux piloté par la modulation vectorielle: (d) courant quadratique de la charge et sa référence,(e) courant directe de la charge et sa référence.

D'après les figure (II.18) (a) et (II.18)(b), on constate que les tensions de la charge dans le repère synchrone v_{chd}, v_{chq} suivent bien leurs tensions de référence désirées v_{chd}^*, v_{chq}^* , ce qui montre la bonne synthèse des régulateurs de tension. Ceci peut être confirmé également dans la figure (II.18)(c) où une bonne poursuite est également enregistrée dans le repère stationnaire (abc) même en présence de variations brusques de la tension de référence.

Selon les figures (II.18)(d) et (II.18)(e), les composantes des vecteurs courants de l'onduleur

Dans le repère synchrone (i_{Sd}, i_{Sq}) suivent avec précision leurs références i_{Sd}^*, i_{Sq}^* , ce qui valide la synthèse et l'efficacité des régulateurs des courant synthétisés même en présence de variations brusques de la tension de référence

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous allons étudier la commande de l'onduleur de tension triphasé à base de la technique de modulation vectorielle SVM et les régulateurs PI.

Nous avons présenté dans la première, les différents techniques de commande d'un onduleur de tension à deux niveaux telle que la commande par hystérésis, plein onde, la modulation MLI et la commande vectorielle SVM. De plus, la validation de la modulation vectorielle SVM sur un onduleur de tension contrôlé avec une boucle de régulations. Afin de montrer l'efficacité de ce modulation et la performance de système pour un test de poursuite de la tension de référence. Où les résultats de simulations montrent une bonne performance de système aussi bien la variation brusque de la tension de référence.

Le chapitre prochain nous allons valider l'algorithme de modulation vectorielle (SVM) sur un circuit réalisé d'un onduleur de tension à deux niveaux à base d'une carte DSP.

Chapitre III

Réalisation d'un onduleur de tension triphasé piloté par la modulation vectorielle

III.1.Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'implantation expérimentale d'un onduleur de tension-à deux niveaux-piloté par une carte DSP. Tout d'abord, nous allons présenter le banc d'essai expérimental ainsi que les différentes cartes électroniques réalisées au sein de Laboratoire de réalisation des projets de fin d'étude.

Nous allons tous d'abord valider expérimentalement le circuit du pilotage (driving) des interrupteurs de puissance. Ensuite, nous allons valider l'algorithme de la commande SVM en boucle ouverte en visualisant les différentes formes d'ondes générées par l'onduleur.

III.2. Description du banc d'essai réalisé

Dans cette section, nous allons présenter le banc d'essai réalisé au Laboratoire de fin d'étude. Comme illustre la figure (III.1) et (III.2), ce banc d'essai est constitué par un onduleur de tension triphasé réalisé à base des Insolated Gate Bipolar Transistor (IGBT)*K30T60* [11] et une carte de pilotage à base des trois optocoupleurs *HCPL2200*[12], trois drivers *IR2111*[13], une charge résistive ECO 3Tubes (33Ω , 7,6A, 600V) et une carte de développement TMS320F28335 de la société Texas Instrument[14]. Les paramètres de différentes parties constituant ce prototype expérimental sont résumés dans le Tableau (III.1). Dans le paragraphe suivant, nous allons détailler les parties essentielles constituant ce banc d'essai.

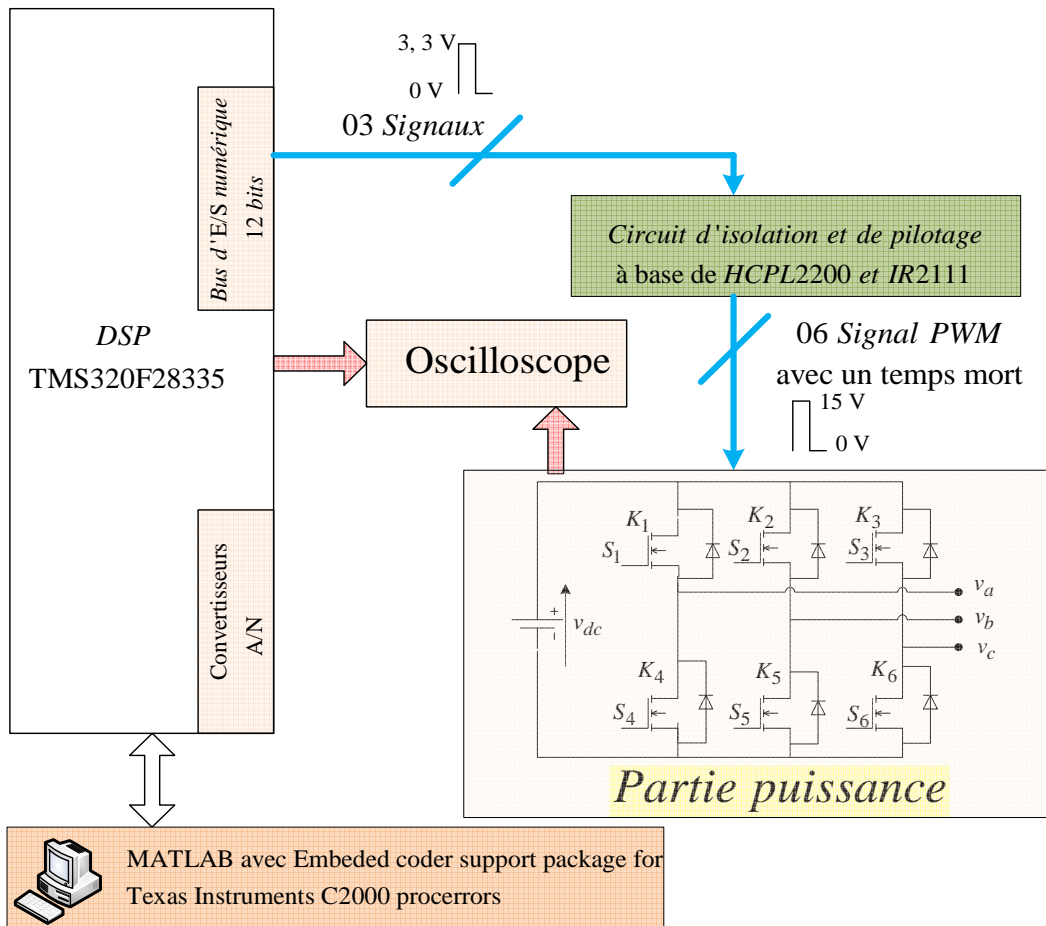


Figure (III.1):Schéma synoptique du banc d'essai réalisé.

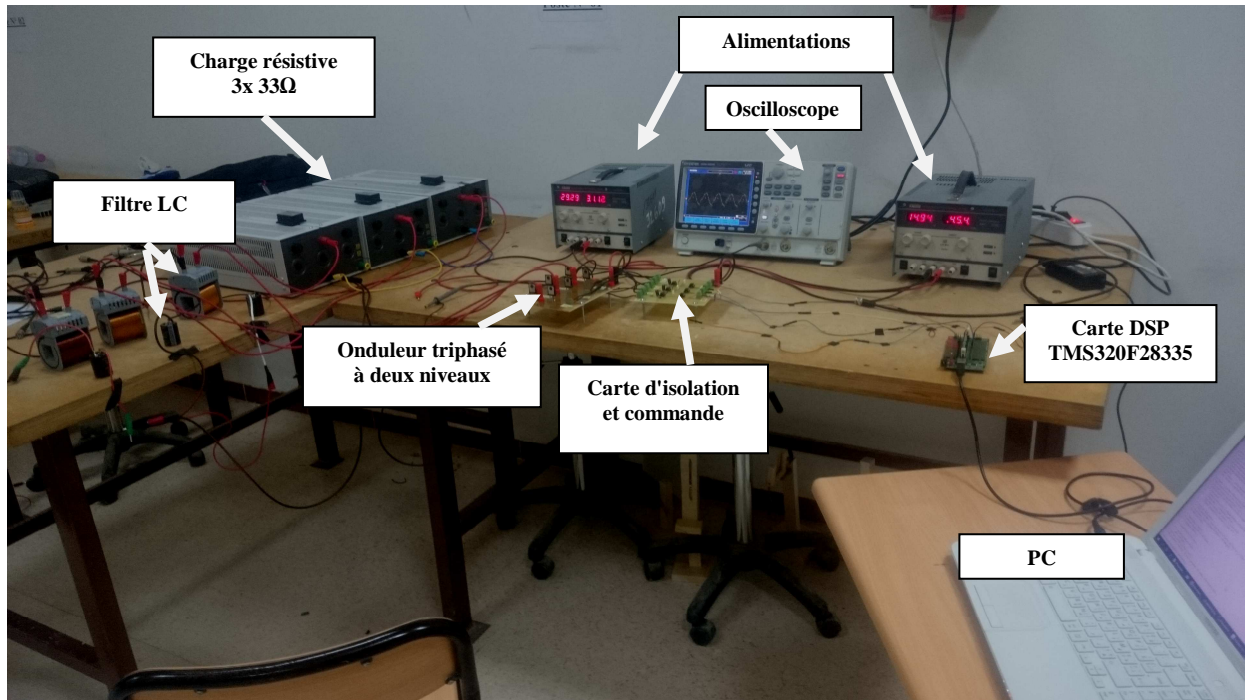


Figure (III.2):Photo du banc d'essai réalisé

Tableau (III.1):

Source d'alimentation du circuit d'isolation	15V
Source d'alimentation du circuit d'onduleur	30V
Résistance de la charge	33 Ω
Capacité du filtre LC	C=330 μF ,
Fréquence de commutation	10kHz
Fréquence échantillonnage	100kHz

III.2.1 Carte de développement DSP TMS320F28335

La carte DSP TMS320F28335 est une carte de développement puissante qui utilise le microcontrôleur C2000TM 32-bit qui peut être configuré avec plusieurs logiciels tels que MATLAB et Psim. Les caractéristiques principales de cette carte sont [15] :

- 16 convertisseurs analogiques numériques (A/N) ;
- Fréquence de fonctionnement jusqu'à 150MHz ;
- Bus d'entrée/sortie numériques de 64 portes organisés sur 8 groupes, chacun peut être configuré comme une entrée ou une sortie ;

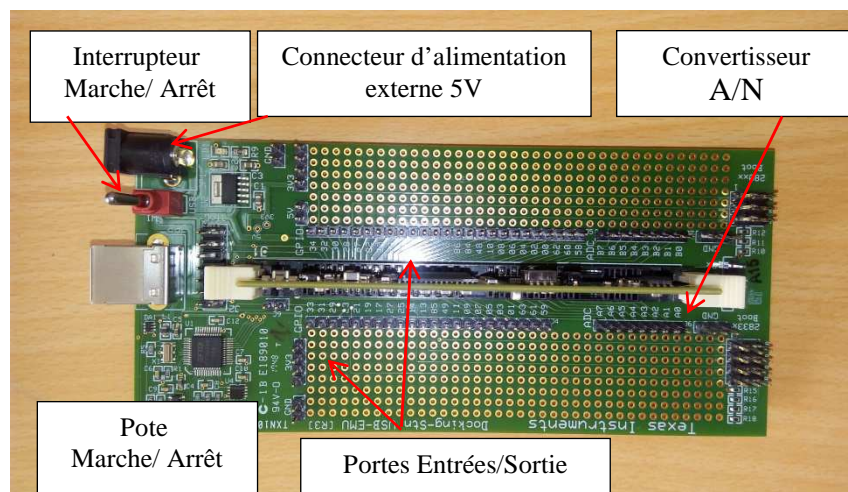


Figure (III. 3): Carte de développement DSP TMS320F28335.

- 18 sorties PWM configurables en plusieurs termes tels que, fréquence de commutation, rapport cyclique, temps mort ;
- 16 entrées des convertisseurs analogique/numérique, chacun de 12 bits ;
- 08 temporisateurs (timers) de 32-bit ;
- Supporte les compilateurs ; ANSIC/C⁺⁺ compiler /assembler/linker, Code composer studioTM IDE et DSP/ BiosTM and sys /Bios et Digital motor control et digital power software librares

- Elle peut être configurée avec le logiciel Matlab via la toolbox s Embedded coder support package for Texas Instruments DSP C2000 processors.

Dans notre travail, la DSP TMS320F28335 sert à envoyer les signaux PWM nécessaire pour la commutation des IGBTs du l'onduleur via le bus Entrée/Sortie.

III.2.2 Circuit du pilote et de protection du IGBT

Nous avons réalisé un circuit de pilotage et de protection à base de l'optocoupleur HCPL2200 et le driver IR2111. Le circuit sert à adapter le niveau de tension des 03 signaux PWM (0.3,3V) provenant de la carte DSP au niveau de tension et de courant nécessaires pour la commutation du IGBT (15V,10mA). De plus Le driver IR2111 permet de générer les trois signaux complémentaires avec un temps mort égale à (650ns) qui protègent les bras de l'onduleurs. La figure (III.4) et (III.5) montrent le schéma et une photo du circuit de pilotage et de protection réalisé.

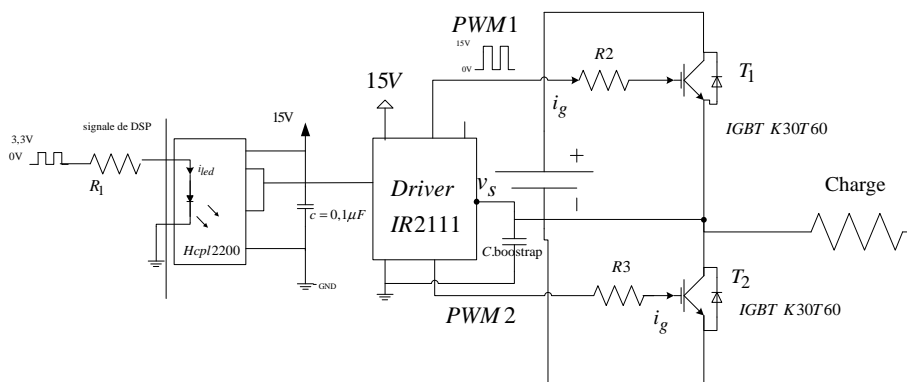


Figure (III.4): Schéma synoptique du circuit du pilotage et de protection des IGBTs

R_1 : Résistance pour limiter le courant de la diode i_{led} ;

R_2, R_3 : Résistances pour limiter le courant du gâchette (i_g).

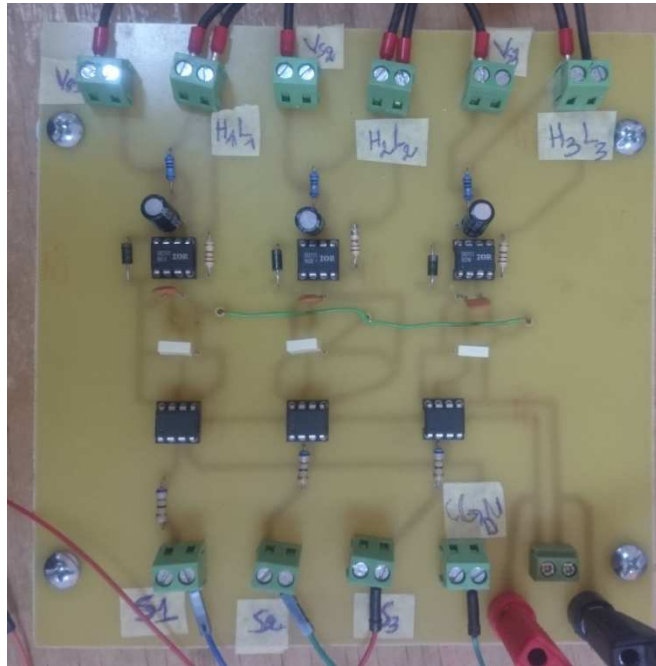


Figure. (III.5): Carte d'isolation et pilotage réalisée.

III.2.3 Onduleur de tension triphasé

L'onduleur de tension triphasé est conçu à base de IGBTK30T60 qui supportent une tension de 600V et un courant jusqu'à 30A. Les IGBTs sont contrôlables à la fermeture/ouverture par application d'une tension de 15V/0V entre l'émetteur et la gâchette.

La figure (III.6) montre l'onduleur de tension triphasé réalisé.

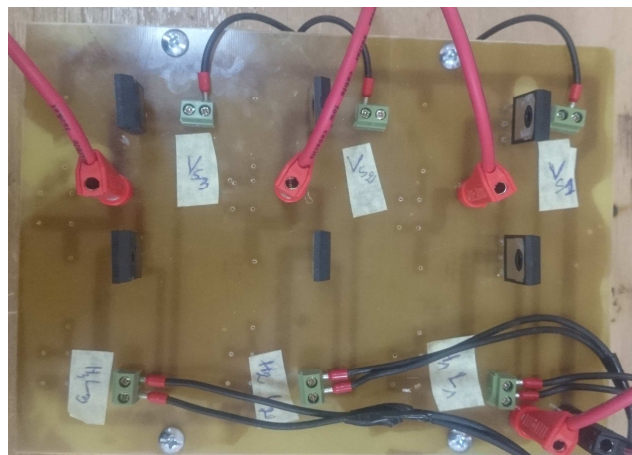


Figure. (III.6): Onduleur de tension triphasé réalisé.

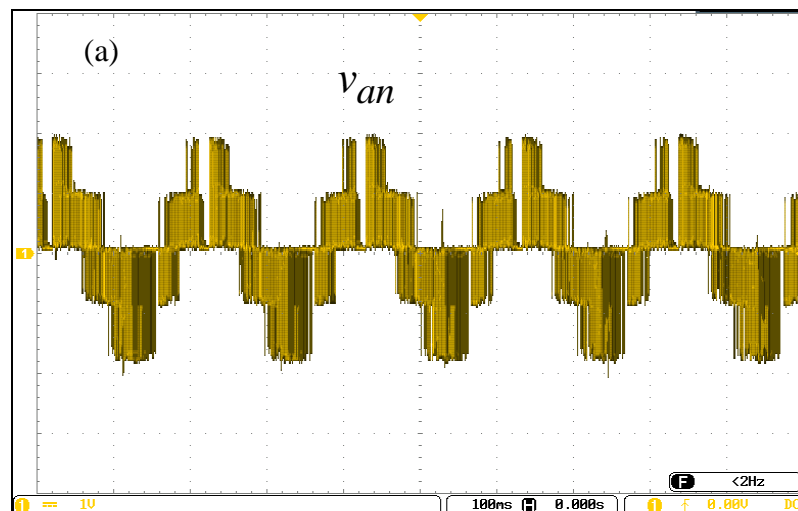
III.3 Résultats expérimentaux

III.3.1 Validation de l'algorithme de la modulation vectorielle (SVM)

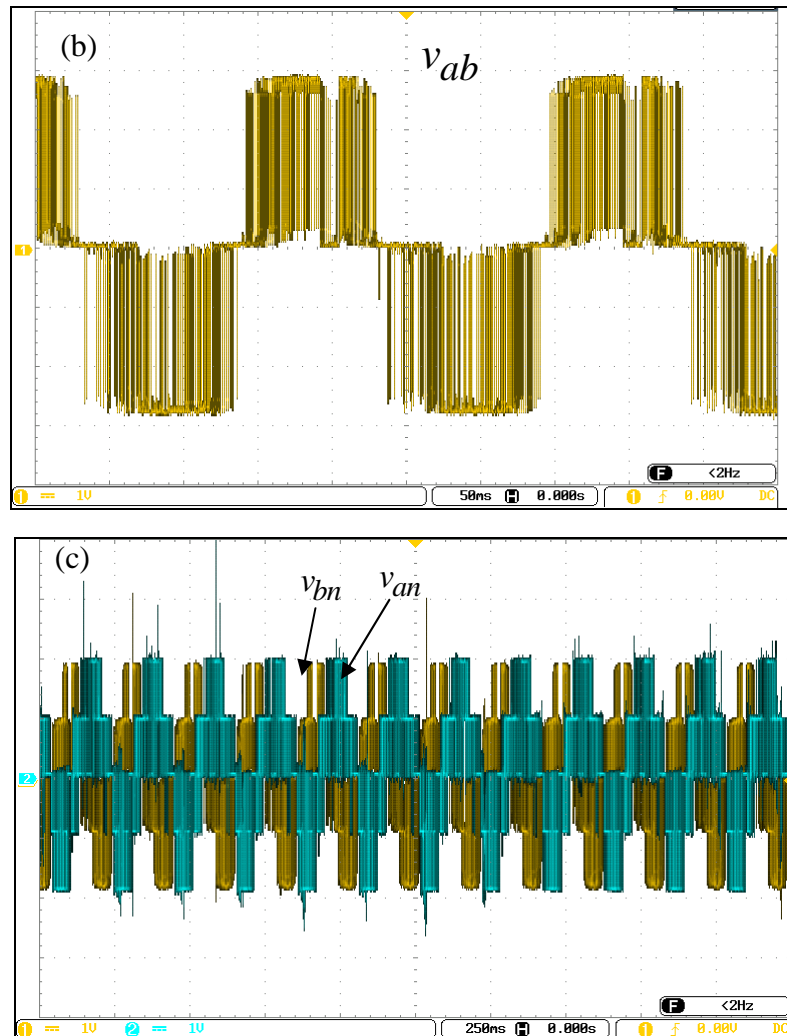
Dans ce test, nous allons valider en boucle ouverte l'algorithme de la modulation vectorielle qui pilote l'onduleur de tension à deux niveaux en utilisant le banc d'essai montré dans la figure. (III.2). Afin de visualiser clairement les niveaux de tension de l'onduleur, nous n'avons pas utilisé le filtre LC dans ce test. Les allures de la tension simple, la tension composée générées par l'onduleur sont visualisées pour plusieurs sinusoïdes de référence (9V, 15V et 19V). Les résultats obtenus sont présentés respectivement dans les figures (III.7), (III.8), et (III.9).

D'après les figures (III.7) (a), (III.8) (a) et (III.9) (a), on peut constater clairement que la forme d'onde de la tension simple de l'onduleur v_{an} présente cinq niveaux $(-2v_{dc}/3, -v_{dc}/3, 0, v_{dc}/3, 2v_{dc}/3)$, ce qui confirme les résultats obtenus par simulation dans le chapitre II, paragraphe (II.4.1) d'un côté et valide l'implémentation de l'algorithme de la modulation SVM d'un autre côté.

D'après les figures (III.7) (b), (III.9) (b) et (III.10) (b), on peut constater clairement que la forme d'onde de la tension composée (v_{ab}) présente trois niveaux $(0, v_{dc}, -v_{dc})$, conformément avec ces obtenus par simulation dans le paragraphe (II.4.1).

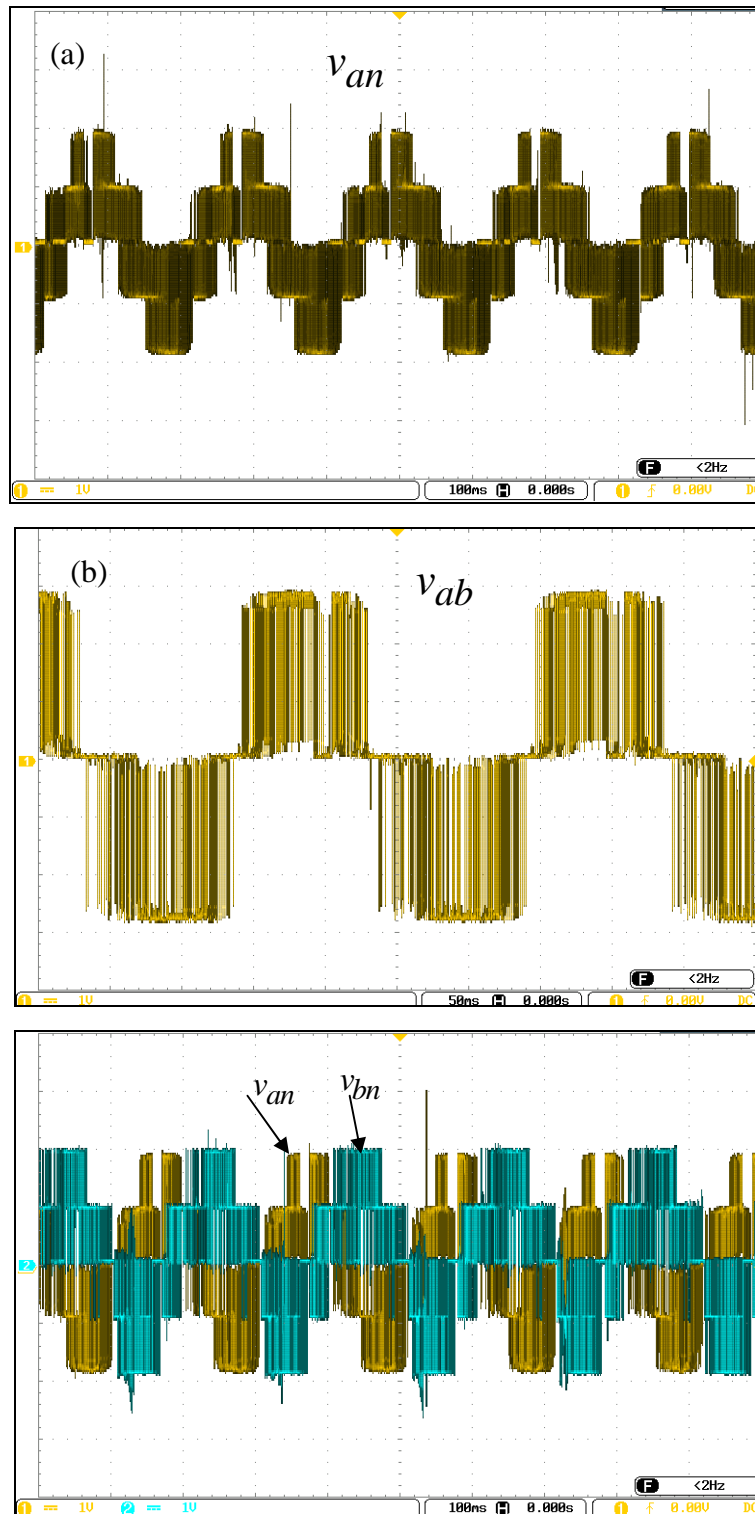


Figure(II.7): Formes d'ondes des tensions d'un onduleur triphasé à deux niveaux piloté par la modulation vectorielle (amplitude des tensions de référence égale 9V): (a) Tension simple d'une phase (v_{an}).

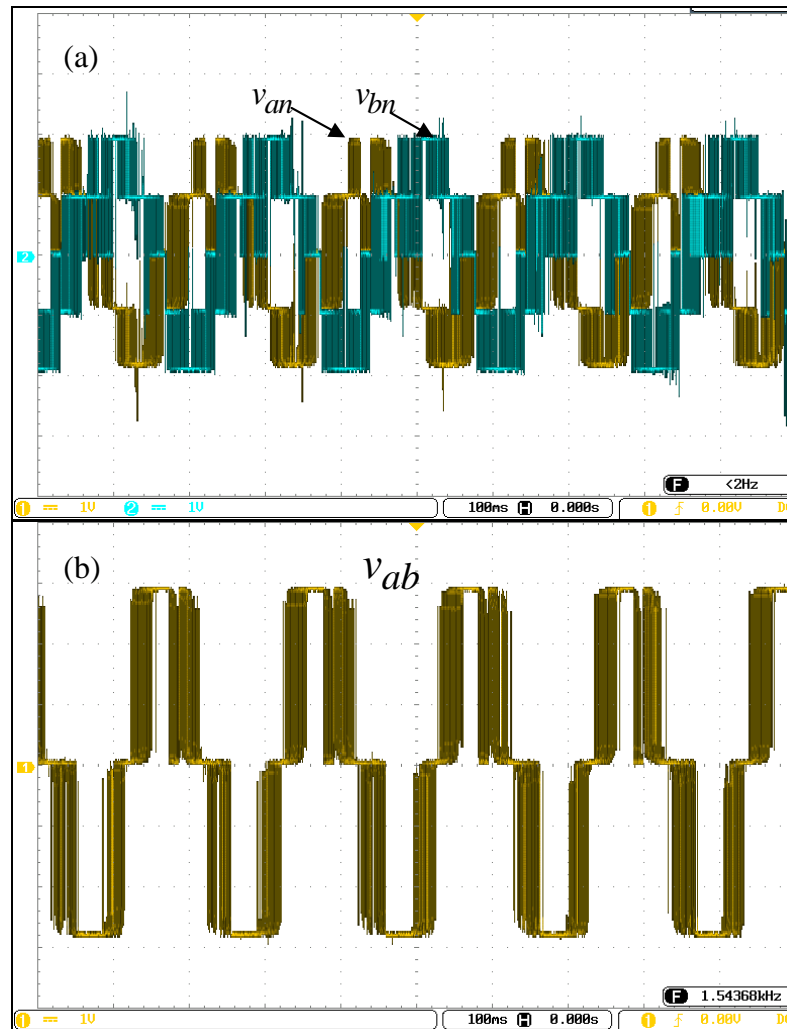


Figure(II.7)(suite): Formes d'ondes des tensions d'un onduleur triphasé à deux niveaux piloté par la modulation vectorielle (amplitude des tensions de référence égale $9V$): (b) Tension composée d'une phase v_{ab} . (c) Deux tensions simples de l'onduleur (v_{an} et v_{bn}).

D'après les figures (III.7) (c), (III.8) (c), et (III.9)(a), il est clair que les deux tensions simples sont déphasées entre elles par $2\pi/3$, ce qui valide également l'implémentation de l'algorithme de la modulation SVM et la structure de l'onduleur réalisé.



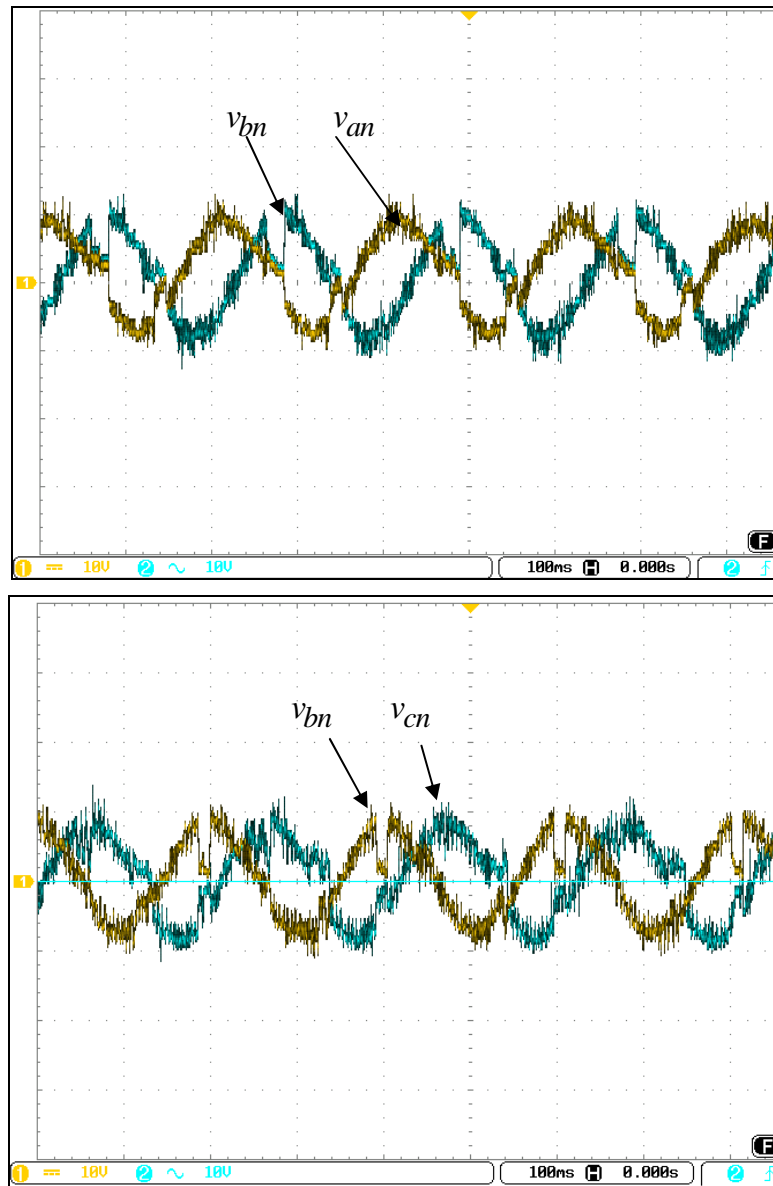
Figure(II.8): Formes d'ondes des tensions d'un onduleur triphasé à deux niveaux piloté par la modulation vectorielle (amplitude des tensions de référence égale **15V**): (a) Tension simple d'une phase (v_{an}), (b) Tension composée d'une phase v_{ab} . (c) Deux tensions simples de l'onduleur (v_{an} et v_{bn}).



Figure(II.9): Formes d'ondes des tensions d'un onduleur triphasé à deux niveaux piloté par la modulation vectorielle (amplitude des tensions de référence égale 19V): (a) Deux tensions simples de l'onduleur (v_{an} et v_{bn}). (b) Tension composée d'une phase v_{ab} .

III.3.2 Validation de l'algorithme de la modulation vectorielle avec filtre LC

Dans ce test, nous allons valider en boucle ouverte l'algorithme de la modulation vectorielle sur un onduleur de tension à deux niveaux avec un filtre LC en utilisant le banc d'essai présenté dans la figure (III.2). La figure(III.10) montre les allures des tensions simples de l'onduleur. D'après cette figure on peut constater clairement que les tensions simples de l'onduleur (v_{an}, v_{bn}, v_{cn}) représentent un système triphasé ce qui valide également l'algorithme de la modulation vectorielle implémenté.



Figure(II.10):Formes d'ondes des tensions simples de l'onduleur débite une charge résistive via un filtre LC.

III.4.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une validation expérimentale d'un onduleur de tension triphasé piloté la modulation vectorielle .Afin de valider l'algorithme de la modulation vectorielle, nous avons visualisé les différents formes d'ondes des tensions générées par de l'onduleur via et sans filtre LC pour plusieurs tension de références. Les résultats expérimentaux obtenus ont été on conformité avec la théorie de l'onduleur de tension à deux niveaux et valide également les résultats obtenus par simulation dans le chapitre II.

Conclusion générale

L'utilisation de l'électronique de puissance a contribué ces dernières années, à l'amélioration des performances des procédés ainsi qu'à une diminution du coût de fonctionnement des équipements. L'électronique de puissance permet de modifier la forme de l'énergie électrique pour l'adapter aux différents besoins.

Grâce aux progrès technologiques réalisés dans les interrupteurs de l'électronique de puissance (IGBT, Mosfet, GTO...), les convertisseurs de puissance voient progressivement leur champ d'applications dans plusieurs domaines (filtrage actif, systèmes de production d'énergies renouvelables...etc.). L'objectif de ce travail est de réaliser un onduleur de tension triphasé à deux niveaux piloté avec modulation vectorielle piloté sur une carte DSP. Parmi ces convertisseurs, l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux est l'un des convertisseurs les plus utilisés dans les secteurs industriels.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier l'implémentation pratique de la structure et de la commande de ce onduleur.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté la théorie des onduleurs de tension. 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 détaillée dédiée à la commande.

Le deuxième chapitre a été consacré sur la commande de l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux. Premièrement, nous avons présenté les stratégies des modulations les plus reconnues dans littérature. Deuxièmement, nous avons détaillé le principe de la modulation SVM. Troisièmes nous avons présenté une structure de commande à base de modulation vectorielle (SVM) et les régulateurs PI permettant de contrôler un onduleur de tension débitant une charge résistive via un filtre LC. La commande synthétisée a pour objectif de forcer l'onduleur d'imposer la tension désirée aux bornes de la charge. Afin de tester les performances de la commande, nous avons procédé à plusieurs tests de robustesse tels que la variation de la charge et la variation de la tension de référence. Les résultats obtenus ont

été montré une bonne performance en termes de temps de réponse et la poursuite de la tension de référence.

Dans le dernier chapitre, nous avons présenté une validation expérimentale d'un onduleur de tension triphasé piloté la modulation vectorielle. En premier temps nous avons présenté les différentes cartes électroniques réalisées. Ensuite, nous avons présenté brièvement la carte DSP utilisée pour la commande. Afin de valider l'algorithme de la modulation vectorielle, nous avons visualisé les différentes formes d'ondes des tensions de l'onduleur pour plusieurs tensions de références. Les résultats expérimentaux obtenus ont été en conformité avec la théorie de l'onduleur de tension à deux niveaux et confirme les résultats obtenus par simulation dans le deuxième chapitre.

Finalement, les points suivants résument les perspectives de nos futures travaux

- Validation expérimentale de la commande en boucle fermée d'un onduleur de tension à deux niveaux ;
- L'exploitation de la commande non linéaire telle que la commande à base des régulateur mode glissant et logique flou.

Bibliographie

- [1] A. Zorig, M. Belkheiri, S. Barkat and A. Rabhi "Control of Grid Connected Photovoltaic System Using Three-Level T-Type Inverter" 4th International conference on renewable energy: generation and applications, Belfort, France, 08-10, Feb. 2016.
- [2] Mr ZAIMEDDINE Rabah : «Contrôle Direct du Couple d'une machine Asynchrone Alimentée par des Onduleurs Multi-niveaux», thèse doctorat en génie électrique, Ecole Nationale Polytechnique, 2007.
- [3] Sofiane Lallam, "Etude et réalisation d'un onduleur de tension monophasés multi niveaux», mémoire de fin d'études pour obtention du diplôme d'ingénieur d'état. Ecole militaire polytechnique.2007.
- [4] 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.
- [5] A. Zorig, M. Belkheiri and S. Barkat, "Sliding Mode Control of Interleaved DC-DC Boost Converter Integrated in PV system ", The First International Conference on Power Electronics and their Applications, pp. 1-10, Djelfa, Algeria, Nov. 06-07, 2013.
- [6] N. Bouhalli, "Etude et intégration de convertisseurs multicellulaires parallèles entrelacés et magnétiquement couplés," Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, 2009.
- [7] Martin AIMÉ, "Evaluation et Optimisation de la Bande Passante des Convertisseurs Statiques (Application aux Nouvelles Structures Multicellulaires) ", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2003.
- [8] Faïçal Mnif " Etude et Réalisation des lois de commande par mode de Glissement et par approche Géométrique: Application à un Onduleur De Tension Monophasés", Thèse présentée à l'université du Québec a Trois-Rivières Comme Exigence Pour l'obtention du Déplume de maîtrise sciences appliquées en électronique industrielle, Université du Québec.1991.
- [9] A.Saad,H. Laterchi," réalisation d'un onduleur monophasé et l'optimisation de sa commande MLI", mémoire de fin d'études pour obtention du diplôme d'ingénieur d'état. université de M'sila.2009.
- [10] M.ISSAADI Salim, "Commande d'une poursuite du pointe de puissance maximale MPPT par les réseaux de neurones", Mémoire de Magistère de l'Université de Bejaia, 2006.
- [11] Fiche technique "IGBT power electronics teaching system principle for sizing power converters," fournie par le fabricant (société Semikrone), site web : <https://www.semikron.com/>.
- [12] Fiche technique du optocoupleur HCPL 2200, fournie par le fabricant (BROADCOM LIMITED), site web : www.broadcom.com.
- [13] Fiche technique du driver IR2111, fournie par le fabricant (Infineon Technology), site web : www.infineon.com.
- [14] Correvon.M, «Introduction aux DSP orientes application industrielles», Cet article est téléchargé au format pdf sur le site web : <http://perso.wanadoo.fr/lapiste/dsp.htm>.
- [15] Fiche technique du DSP TMS320F28335, fournie par le site web : www.ti.com.

Commande et implémentation d'un Onduleur de tension triphasé

Résumé:

Les convertisseurs électrique sont utilisés dans plusieurs domaines, Les travaux de ce mémoire portent de la conception, la simulation et la réalisation d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux avec développement de sa commande en exploitant la modulation vectorielle SVM .

Dans la partie théorique nous avons présenté une étude détaillée sur le modèle de l'onduleur et ses stratégies de commande à savoir la pleine onde et la triangulo-sinusoidal avec ses variantes. ainsi que une simulation pour validé la modulation vectorielle sur un onduleur de tension triphasé à deux niveaux avec des régulateurs PI.

Dans la partie pratique, nous avons présenté une validation expérimentale d'un onduleur de tension triphasé piloté la modulation vectorielle avec conformité de la théorie les résultats obtenus par la simulation de système de commande précédent.

Mots clés: système onduleur de tension triphasé à deux niveaux, modulation vectorielle SVM, régulateurs PI.

ملخص:

إن الهدف الأساسي من هذه الأطروحة هو التحكم في نظام كهربائي يسمح بتحويل الطاقة الكهربائية من تيار مستمر إلى تيار متناوب مع إبراز أنواع و طرق التحكم في هذه النظم الكهربائية. الجزء الأول من هذا العمل يعرض مفاهيم عامة عن الموجات الكهربائية ومجال استعمالها وكيفية تصنيفها مع عرض نظري خطي لهذا النظام . الجزء الثاني من العمل قمنا بإدرا محاكاة موج ثنائي المستوى في جمل كهربائية قصد تطبيق نظرية التحكم الموج الإشعاعي مع التحقق من النتائج النظرية للمحاكاة . في الجزء الأخير من العمل، قمنا بانجاز موج ثنائي المستوى مع التحقق من نتائج تطبيق احد تقنيات التحكم في الموجات والمعروفة ب معدل الاتجاهات او SVM.مع مقارنة النتائج التجريبية مع النتائج النظرية المتحصل عليها سابقا

كلمات مفتاحيه الموج الثنائي المستوى ، تقنيات التحكم في الموجات الكهربائية، تقنية معدل الاتجاهات.