

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-MSILA



**FACULTE DE TECHNOLOGIE
FILIERE : ELECTRONIQUES
SPECIALITE : SYSTEMES EMBARQUES**

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

Par:

**OUANANE Sara
NECHE Imane**

Intitulé :

**Validation pratique d'une commande linéaire d'un onduleur de
tension triphasé à deux niveaux**

Membres du jury:

Dr. Bakhti Elhadi	Président	Université de M'sila
Dr. Zorig Abdelmalik	Rapporteur	Université de M'sila
Dr. Bentoumi Miloude	Examineur	Université de M'sila

Année universitaire : 2019/2020

REMERCIEMENT

Dieu merci pour la santé, la volonté, le courage et la détermination qui nous ont accompagnés tout au long de la préparation et l'élaboration de ce travail et qui nous ont permis d'achever ce modeste travail.

*Nous exprimons d'abord nos profonds remerciements à notre encadreur, **Dr. ZRIG Abdelmalik**, pour l'aide qu'il a fournie et les connaissances qu'il a nous transmettre, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui nous a guidé dans notre travail, nous le remercions vivement et nous espérons que nos efforts et nos résultats ont été à la mesure de son attente.*

Aux membres de notre jury Pour le grand honneur qu'ils nous font en acceptant de juger ce travail.

*Nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères au corps professoral et administratif de **pôle nord universitaire de M'sila**, pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une bonne formation.*

DEDICACE

Merci Allah (mon dieu) de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve

Ma Chère Maman Boumendjel Djahida

Je dédie ce travail à celle qui m'a donné la vie, à ma mère, Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi, ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études.

Merci pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte.

A mon très cher père Larbi

Tu as toujours été pour moi un exemple du père respectueux, honnête, de la personne méticuleuse, grâce à toi papa j'ai appris le sens du travail et de la responsabilité. Je voudrais te remercier pour ton amour, ta générosité, ta compréhension... Ton soutien fut une lumière dans tout mon parcours.

Ce modeste travail est le fruit de tous les sacrifices que vous avez déployés pour mon éducation et ma formation. Puisse dieu, vous procure santé, bonheur et longue vie.

A mes chers frères Alaa Eddine Et Bahaa Eddine

A tous les moments d'enfance passés avec vous, en gage de ma profonde estime pour l'aide que vous m'as apporté. Vous m'as soutenu, réconforté et encouragé. Puisse nos liens fraternels se consolider et se pérenniser encore plus, que dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde.

A ma très chère sœur Safa

Ton encouragement et ton soutien étaient la bouffée d'oxygène qui me ressourçait dans les moments pénible, merci d'être toujours à mes coté, par ta présence, par ton amour et ta tendresse, pour donner du gout à notre vie je prie dieu le tout puissant pour qu'il te donne bonheur, réussite et prospérité.

A ma belle sœur Yasmine Merzougi

Ma belle sœur, mais aussi ma grande sœur. Je te dis merci et je prie dieu le tout puissant pour qu'il te donne bonheur, réussite et prospérité.

A ma petite princesse Aridj

Avoir une nièce est le plus beau cadeau qu'un frère puisse vous faire. Tes petites mains, ton envie de parcourir le monde, tes sourires, tes yeux brillants sont incomparables. Tu as apporté beaucoup de bonheur à notre famille. Je t'aime

Ouanane Sarra

DEDICACE

Merci Allah (mon dieu) de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve

A Mon cher papa El Rezki

Mon soutien moral et source de joie et de bonheur, vous n'avez jamais cessé de déployer tous vos efforts afin de subvenir à nos besoins, nous encourager et nous aider à choisir le chemin de la Réussite votre patience, votre bonne volonté, vos conseils précieux ainsi que votre confiance en moi ont été pour beaucoup dans ma réussite.

Ma Chère Maman Neche Nouara

Si Dieu a mis le paradis sous les pieds des mères, ce n'est pas pour rien. Tu m'as comblé avec ta tendresse et affection tout au long de mon parcours. Tu n'as cessé de me soutenir et de m'encourager durant toutes les années de mes études tu as toujours été présente à mes coté pour me consoler quand il fallait. Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de vos sacrifices, de l'amour dont vous n'avez jamais cessé de faire preuve. Que Dieu, tout puissant, vous procure longévité et bonne santé.

A ma très chère sœur Ghania

En souvenir d'une enfance dont nous avons partagé les meilleurs et les plus agréables moments. Pour toute la complicité et l'entente qui nous unissent, ce travaille est un témoignage de mon attachement et de mon amour merci d'être toujours a mes coté je prie dieu le tout puissant pour qu'il te donne bonheur, réussite et prospérité.

A mes chers frères Zohir , Ilyesse

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez et encouragement, merci d'être toujours là pour moi, en témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse, je vous soutien une vie pleine de bonheur et de succès que dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde.

A Mon cher fiancé Seraiche Bilal

Pour tout l'encouragement et laide qu'il m'a toujours accordé, je te dédis ce travail.

Neche Imane

Table des matières

Table des matières

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Notions et symboles

Introduction Générale1

Chapitre I: Modélisation de l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux

I.1.Introduction	2
I.2 Définition de l'onduleur de tension	3
I.3 Différents types d'onduleur de tension	3
I.3.1 Onduleur non autonome.....	3
I.3.2 Onduleur autonome.....	3
I.4 Classification des onduleurs.....	3
I.4.1 Classification selon le nombre de phases.....	4
I.4.1.1 Onduleurs monophasés.....	4
I.4.1.1.1 Onduleur avec transformateur à point milieu.....	4
I.4.1.1.2 Onduleur en demi-pont.....	4
I.4.1.1.3 Onduleur en pont.....	4
I.4.1.2 Onduleur triphasé.....	5
I.4.2 Classification selon le nombre des niveaux de tension de sortie	5
I.5 Applications des onduleurs.....	6
I.5.1 Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone.....	6
I.5.2 Alimentation de secours.....	6
I.5.3 Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes.....	7
I.6 Onduleur de tension à deux niveaux.....	7

I.6.1 Modélisation de l'onduleur triphasé à deux niveaux.....	7
I.6.1.1 Structure général d'un onduleur triphasé à deux niveaux.....	7
I.6.1.2 Principe de fonctionnement de l'onduleur triphasé.....	8
I.6.1.3 Fonction de commutation.....	8
I.6.1.4 Tensions de sortie.....	9
I.7 Modélisations d'un onduleur triphasé à deux niveaux alimente une charge R-L via un filtre LC.....	10
I.7.1 Modélisation du système (onduleur +filtre LC+charge) dans le repère stationnaire (abc).....	10
I.7.2 Modélisation du système (onduleur+filtre LC+charge) dans le repère $\alpha\beta$	11
I.7.3 Modélisation du système (onduleur+filtre LC+charge) dans le repère d-q.....	11
I.8 Modulation vectorielle (Space Vector Modulation)	12
I.8.1 Représentation vectorielle des vecteurs de tension d'un onduleur à deux niveaux...12	
I.8.2 Principe de la modulation vectorielle (SVM)	14
I.8.2.1 Etape 1 : Localisation du vecteur de référence.....	14
I.8.2.2 Etape 2: Calcul des temps d'application des vecteurs de tension.....	14
I.8.2.3 Etape 3: Génération des impulsion de commande	16
I.9 Conclusion	17

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

II.1 Introduction	18
II.2 Synthèse d'une commande linéaire pour un onduleur de tension débite une charge résistive via un filtre LC	19
II.2.1 Synthèse du régulateur des tensions des condensateurs	20
II.2.2 Synthèse du régulateur des courants de l'onduleur	21
II.3 Résultats de simulations	22

II.4 Conclusion24

Chapitre III: Validation expérimentale d'une commande linéaire d'un onduleur triphasé à deux niveaux

III.1 Introduction26

III.2 Présentation et description de la plateforme du banc d'essai26

III.2.1 Carte de développement DSP TMS320F2833528

III.2.2 Onduleur de tension triphasé28

III.2.3 Circuit de pilotage et de protection du IGBT29

III.2.4 Alimentation $\pm 15V$ 30

III.2.5 banc du condensateur31

III.2.6 Inductance du filtre31

III.2.7 Carte de mesure de tension32

III.2.8 Carte de mesure des courants33

III.2.9 Carte d'adaptation des signaux de mesure34

III.3 Résultats expérimentaux36

III.3.1 Validation de la boucle ouverte de l'algorithme de modulation vectorielle (SVM).....36

III.3.2 Validation de l'algorithme de la modulation vectorielle avec filtre LC.....37

III.4.Conclusion38

Conclusion Générale.....39

Références bibliographiques40

Résumé

Liste des figures

Chapitre I

Figure (I.1): Schéma synoptique de l'onduleur de tension.....	3
Figure(I.2): Onduleur avec transformateur à point milieu	4
Figure (I.3): Structure de base d'un onduleur en demi-pont.....	4
Figure (I.4): Structure d'un onduleur de tension monophasé en pont.....	5
Figure (I.5): Structure d'un onduleur de tension triphasé.	5
Figure (I.6) : Structure d'un onduleur triphasé à cinq niveaux.....	6
Figure (I.7) : Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone.....	6
Figure (I.8) : Alimentation de secours	7
Figure (I.9) : Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes.....	7
Figure (I.10) : Structure d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux.....	8
Figure(I.11): Bras d'un onduleur triphasé à deux niveaux.....	9
Figure (I.12) : Onduleur de tension triphasé à deux niveaux alimente une charge via un filtre LC.....	10
Figure (I.13) : Diagramme de commutation pour un onduleur à deux niveaux.....	13
Figure (I.14) : Limitation du vecteur de référence	14
Figure (I.15) : Répartition des vecteurs de tension à appliquer pour chaque secteur.....	17

Chapitre II

Figure (II.1): Structure de la commande linéaire d'un onduleur de tension débite alimente une charge résistive via un filtre LC.	19
Figure (II.2): Boucle de régulation de la tension du bus continu.....	20
Figure (II.3): Schéma de régulation des courants de l'onduleur	21
Figure(II.4): 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, (d) courant quadratique de la charge et sa référence, (e) courant directe de la charge et sa référence.....23

Chapitre III

Figure (III.1): Photo du banc d'essai réalisé	27
Figure (III.2): Carte de développement DSP TMS320F28335.....	28
Figure(III.3): Photo d'onduleur de tension triphasé réalisé par [1].....	29
Figure(III.4): Photo d'onduleur de tension triphasé amélioré.....	29
Figure(III.5): Photo de carte d'isolation et pilotage réalisée.....	30
Figure (III.6): Photo de carte d'alimentation ± 15 V.....	30
Figure (III.7): Schéma du circuit d'alimentation continue +15, -15 V	31
Figure(III.8): Photo du une banc de condensateurs réalisé.....	31
Figure (III.9): photo des inductances.....	31
Figure (III.10): Carte de mesure des tensions.....	32
Figure (III.11): Schéma du circuit électrique utilisé la mesure des tensions.....	32
Figures (III.12): carte de mesure des courants réalisée.....	33
Figures(III.13): Schéma électrique utilisé pour la chaine de mesure des courants.....	34
Figure (III.14): Carte d'adaptation des signaux	35
Figure (III.15): Schéma du circuit d'adaptation d'un signal	35
Figure(III.16): Formes d'ondes de deux tensions simples, tension de référence d'amplitude de 18V.....	36
Figure(III.17): Formes d'ondes de deux tensions composées, tension de référence d'amplitude de 18V.....	36
Figure(III.18): Formes d'ondes de deux tensions simple et composé de référence d'amplitude de 18V d'un onduleur de tension triphasé débite une charge résistive via un filtre LC (a) Tension simple, (b) deux tensions composées.....	37
Figure (III.19) : Formes d'ondes de deux courants de charge.....	37

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau (I.1): Combinaisons des fonctions de connexion et les vecteur de tension correspondants dans la repère $\alpha\beta$ 13

Tableau (I.2): Temps d'application des vecteurs de tension16

Chapitre II

Tableau (II.1): Paramètres utilisés pour la simulation.....22

Chapitre III

Tableau (III.1): Les caractéristiques des différentes pièces de modèle réalisée.....27

Nomenclature

Abréviations

HVDC: High Voltage Direct Current.

MLI: Modulation de largeur d'impulsion.

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

IGBT: Insolated Gate Bipolare Transistor.

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

AC: Alternative Current.

DC: Direct Current.

GTO: Gate turn-Off Thyristor.

SVM : Space Vector Modulation : modulation vectorielle.

PI: Régulateur proportionnel intégral.

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

Notations

S_{xi} : Fonction de connexion.

$v_{cha}, v_{chb}, v_{chc}$: Tensions de la charge.

L_f, R_f : Représentent respectivement l'inductance du filtre et sa résistance interne.

$i_{cha}, i_{chb}, i_{chc}$: Représentent les courants de la charge.

θ : Argument du vecteur de référence.

ω : Fréquence angulaire du fondamental.

ω_{ni} : Pulsation du système.

m : Taux de modulation.

T_h : Période de commutation.

k_{pv}, k_{iv} : représentent les gains du régulateur.

i_{Cfd}^*, i_{Cfq}^* : Représentent les courants de référence.

i_{chd} : Courants direct.

i_{chq} : Courants en quadrature de la charge.

$H_v(s)$: Fonction de transfert.

ξ : Facteur d'amortissement.

i_d^*, i_q^* : Courant de référence.

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

Introduction générale

Le développement récent dans convertisseur de puissance a permis d'importants progrès dans le secteur industriel notamment dans les systèmes de production d'énergie électrique. Parmi ces convertisseur, l'onduleur de tension jeu le rôle essentiel dans plusieurs application, telle que l'entraînement des machines électriques, les systèmes photovoltaïques, les systèmes éoliens, les systèmes (HVDC: High Voltage Direct Current)...etc. Ce dernier assure la conversion continue (DC) alternative (AC) avec la possibilité de varier certaines grandeurs telles que l'amplitude et la fréquence de la tension de sortie.

Néanmoins, la bonne performance de ce convertisseur liée principalement au bon dimensionnement de ses composants, le choix approprié du type de modulation utilisé, la synthèse et l'implémentation de sa structure de commande. Plusieurs stratégies de modulation ont été proposée et étudiées dans l'objectif d'améliorer la qualité de la tension à la sortie de l'onduleur, telles que la modulation de largeur d'impulsions MLI, (Pulse Width Modulation PWM) la modulation de largeur d'impulsions à troisième harmonique, modulation vectorielle (SVM : Space Vector Modulation)...etc.

La modulation vectorielle présente des avantages importants par rapport aux autres techniques tels que meilleur indice de modulation, taux de distorsion d'harmonique (THD) réduit, et redondance dans les vecteurs zéros qui peuvent être exploités pour réaliser des fonctions supplémentaires.

Le but de ce travail est d'étudié par simulation et expérimentalement l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux. Dans le premier chapitre, nous allons présenter une brève description sur les différents types de l'onduleur de tension. Ensuite une étude détaillée sur l'onduleur de tension triphasé sera présenté. Enfin nous allons étudier en détail la modulation vectorielle en focalisant sur la méthode de trois vecteurs les plus proches.

Dans le deuxième chapitre, nous allons synthétiser une commande en boucle fermée d'un onduleur de tension débite charge RL via un filtre LC. La commande synthétisée à pour objectif de forcer l'onduleur de générer la tension désirée aux bornes de la charge. Pour cela nous allons adopter le régulateur PI et la méthode de placement des pôles pour calculer les gains des régulateurs.

Dans le dernier chapitre nous allons présenter une partie expérimentale sur l'onduleur de tension triphasé. En premier temps, nous allons présenter le banc d'essai utilisé pour la validation (structure de l'onduleur réalisé, carte de protection et de pilotage, carte de développement (DSP), filtre LC, cartes de mesure de tension et de courant, carte d'adaptation, carte d'alimentation...). Ensuite, nous présenterons quelques résultats qui valident les structures réalisées et l'implémentation la commande synthétisée.

Chapitre I:

Modélisation de l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux

I.1 Introduction

Grâce aux progrès technologiques réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance, les convertisseurs statiques tels que les onduleurs élargissent progressivement leur champ d'applications, notamment dans le domaine de filtrage actif, les systèmes de production d'énergie renouvelable et l'entraînement des moteurs électriques [1].

L'onduleur de tension permet de générer une tension alternative qui alimente la plus part des dispositifs domestiques et industriels. En plus, il joue un rôle essentiel dans plusieurs applications industrielles telles l'entraînement des machines électriques, le filtrage des harmoniques, la connexion au réseau des systèmes photovoltaïques...etc.

Dans ce chapitre, nous allons étudier l'onduleur de tension à deux niveaux. En premier temps nous allons présenter des généralités sur les onduleurs de tensions. Ensuite nous allons présenter une étude détaillée sur l'onduleur de tension à deux niveaux en focalisant sur sa structure, son fonctionnement, et la modélisation mathématique qui permis de dimensionner et contrôler ce convertisseur.

I.2 Définition de l'onduleur de tension

Les onduleurs sont des convertisseurs statiques, dont la fonction est de convertir une tension continue (DC) en une tension alternative (AC), réglable en terme d'amplitude et de fréquence. Les onduleurs de tension se composent le plus souvent d'interrupteurs de puissance tels que les IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor), les MOSFET (Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect Transistor) ou des thyristors. La figure (I.1) représente un schéma synoptique de l'onduleur de tension.

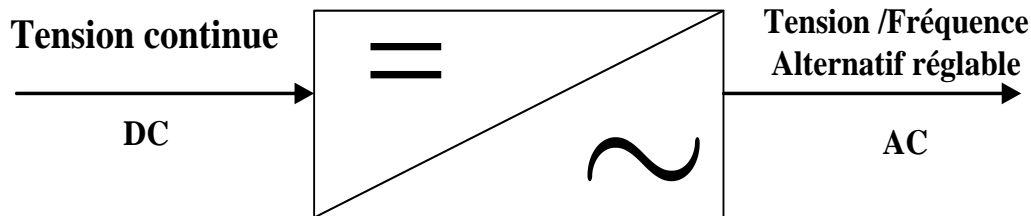


Figure (I.1): Schéma synoptique de l'onduleur de tension.

I.3 Différents types d'onduleur de tension

Les onduleurs sont classés en deux grandes catégories :

I.3.1 Onduleur non autonome

Un onduleur est dit non autonome si l'énergie nécessaire pour commuter les thyristors est fournie par le réseau alternatif, qui est donc un réseau actif. C'est le cas lorsque le redresseur fonctionne comme un onduleur. La forme d'onde de fréquence et de tension est imposée par le réseau AC.

I.3.2 Onduleur autonome

Un onduleur autonome délivre une tension avec une fréquence soit fixe, soit ajustable par l'utilisateur. Il n'a pas toujours besoin de réseau électrique pour fonctionner, on dit un onduleur est autonome quand il impose sa propre fréquence à la charge.

I.4 Classification des onduleurs

Les onduleurs de tension sont de nombreuses structures et cela est dû à leurs applications et contrôles. Les onduleurs de tension peuvent être classés selon les critères suivants:

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

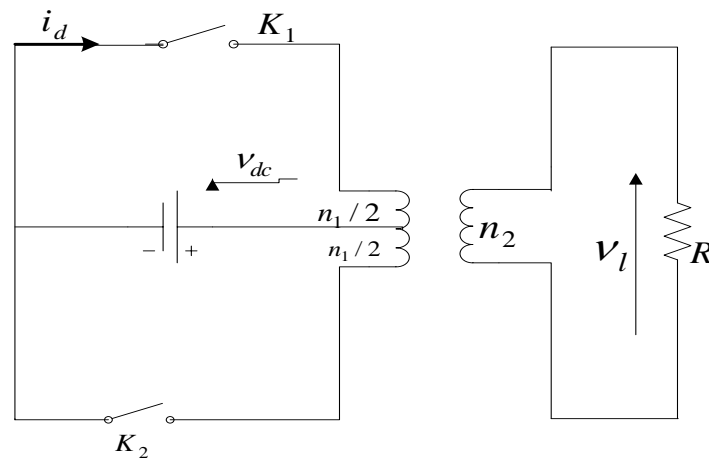
I.4.1 Classification selon le nombre de phases

I.4.1.1 Onduleurs monophasés

Ce type d'onduleur délivre en sa sortie une tension alternative monophasée, est généralement destinée aux alimentations de secours. Trois classes d'onduleurs monophasés sont à distinguer suivant leur topologie.

I.4.1.1.1 Onduleur avec transformateur à point milieu

Pour obtenir une tension alternative à partir d'une tension continue en utilisant deux interrupteurs (K_1 , K_2), un transformateur à point milieu. Chaque interrupteur conduit à tour de rôle pendant une demi-période de commutation, la figure (I.2) montre le circuit électrique de cet onduleur.



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

I.4.1.1.2 Onduleur en demi-pont

Ce type d'onduleur présente un diviseur capacitif à sa entrée et deux interrupteurs de puissance bidirectionnels (ou des thyristors connectés parallèle avec des diodes), la figure (I.3) montre la structure de base de cet onduleur.

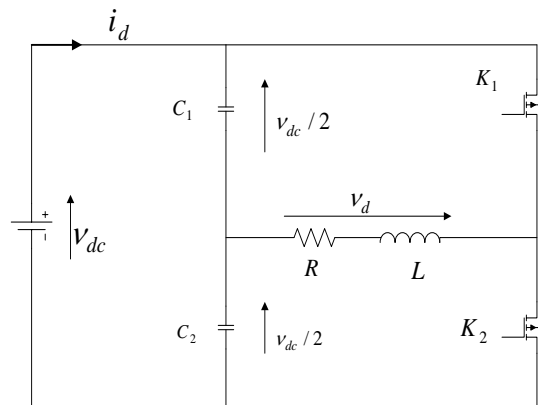


Figure (I.3): Structure de base d'un onduleur en demi-pont.

I.4.1.1.3 Onduleur en pont

L'onduleur monophasé en pont se compose de quatre interrupteurs de puissance bidirectionnels commandés, la figure (I.4) montre le circuit électrique de cet onduleur.

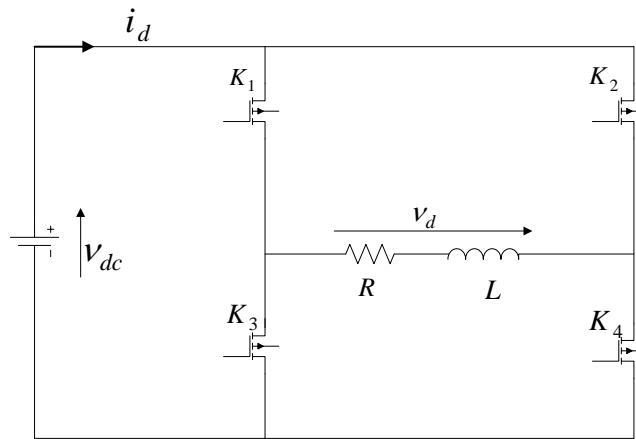


Figure (I.4): Structure d'un onduleur de tension monophasé en pont.

I.4.1.2 Onduleur triphasé

On peut réaliser un onduleur triphasé en regroupant, en parallèle, trois onduleurs monophasés (en pont ou en demi-pont) et commander les interrupteurs de chacun pour obtenir à la sortie trois phases, l'onduleur à constitue de six interrupteurs comme illustre la figure (I.5).

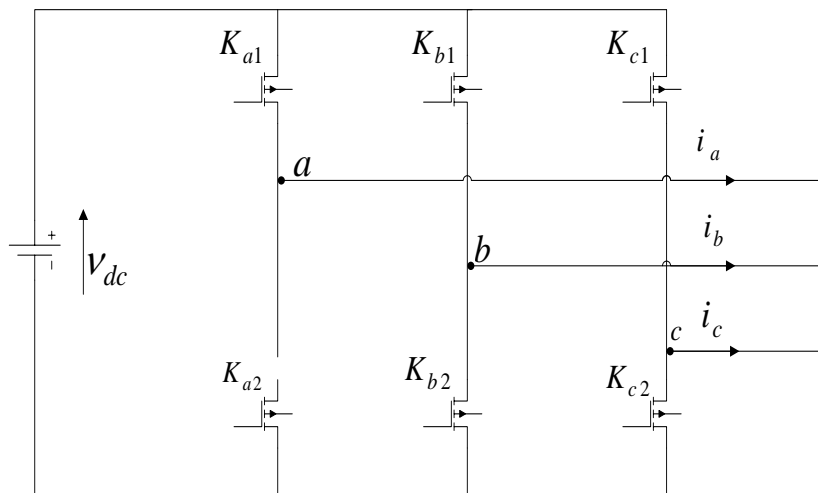


Figure (I.5): Structure d'un onduleur de tension triphasé.

I.4.2 Classification selon le nombre 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.6).

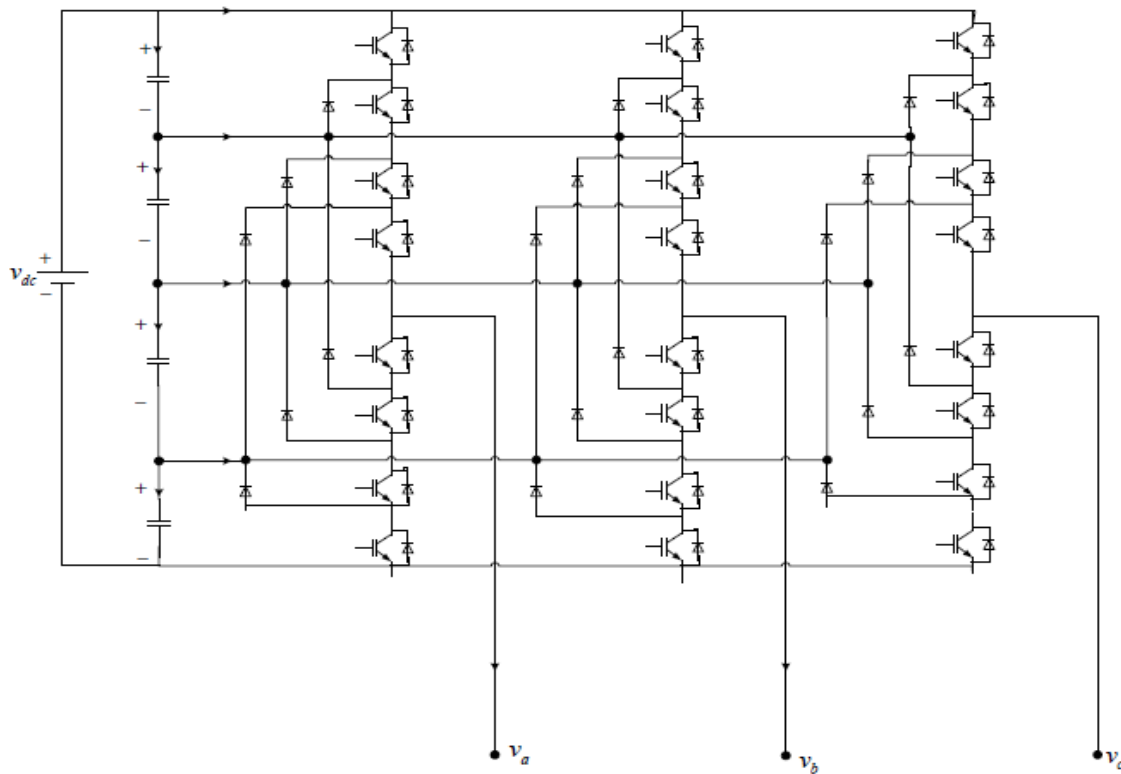


Figure (I.6) : Structure d'un onduleur triphasé à cinq niveaux.

I.5 Applications des onduleurs

L'onduleur est l'un des ensembles d'électronique de puissance les plus utilisés et est principalement conçu pour fonctionner dans les domaines d'application suivants.

I.5.1 Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone

La vitesse du moteur synchrone est déterminée par les impulsions des courants du stator. Pour changer la vitesse, il est nécessaire de changer la fréquence de la tension d'alimentation. Par conséquent, il est important de corriger la tension du réseau, puis de l'onduleur à la fréquence requise [2].

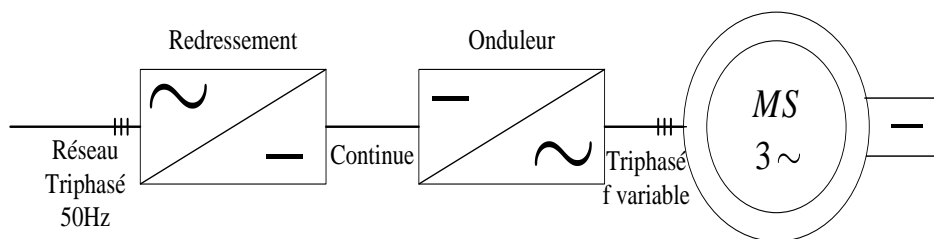


Figure (I.7) : Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone.

I.5.2 Alimentation de secours

Les onduleurs de tension sont fortement utilisés pour assurer la continuité de service en cas des pannes ou des coupures de tension de réseau.

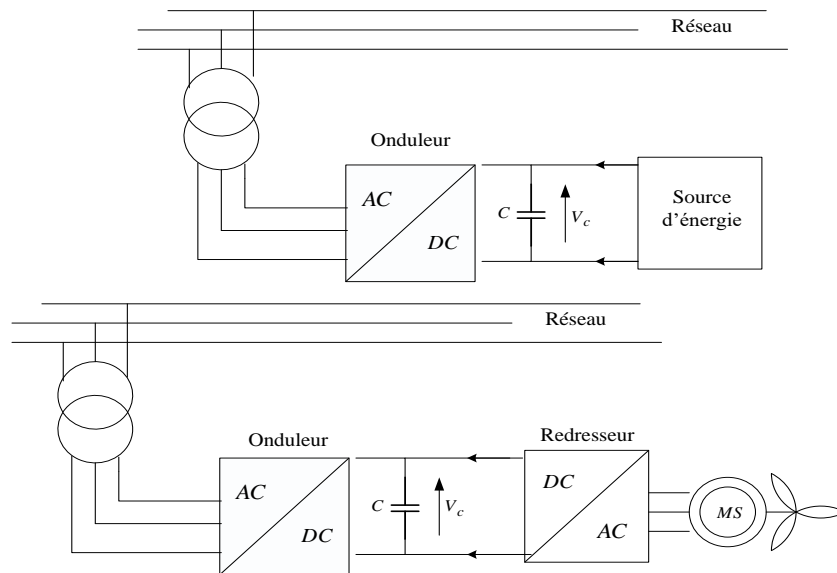


Figure (I.8) : Alimentation de secours.

I.5.3 Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes

La France fournit de l'énergie électrique (de fréquence 50Hz) à la Grande-Bretagne, mais la fréquence du réseau anglais est 60 Hz. Dans ce cas il est nécessaire d'adapter la fréquence du réseau fournisseur au celle de récepteur, et là l'onduleur et le redresseur triphasé sont utilisés pour réaliser cette tâche [3].

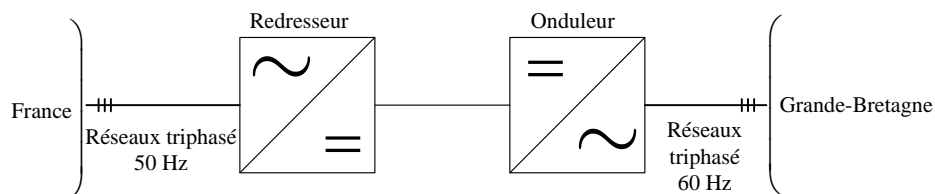


Figure (I.9) : Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes.

Dans la section précédente, nous avons présenté brièvement les différents types d'onduleur de tension. Dans le reste de ce travail on s'intéresse seulement à onduleur de tension triphasé à deux niveaux.

I.6 Onduleur de tension à deux niveaux

I.6.1 Modélisation de l'onduleur triphasé à deux niveaux

I.6.1.1 Structure général d'un onduleur triphasé à deux niveaux

La structure de l'onduleur se compose d'une source de tension continue et de trois bras, chacun comprenant deux commutateurs bidirectionnels qui sont des transistors avec une diode parallèle dont chacun peut être commandé pour l'ouverture et la fermeture. Il peut s'agir de MOSFET pour les basses puissances et les très hautes fréquences, d'IGBT pour les grandes puissances et les hautes fréquences, ou de GTO pour les très grandes puissances et les basses fréquences, en conflit avec des diodes pour assurer

la circulation du courant dans les deux sens. La figure (I.10) montre une structure d'onduleur de tension triphasé a deux niveaux à base des IGBTs.

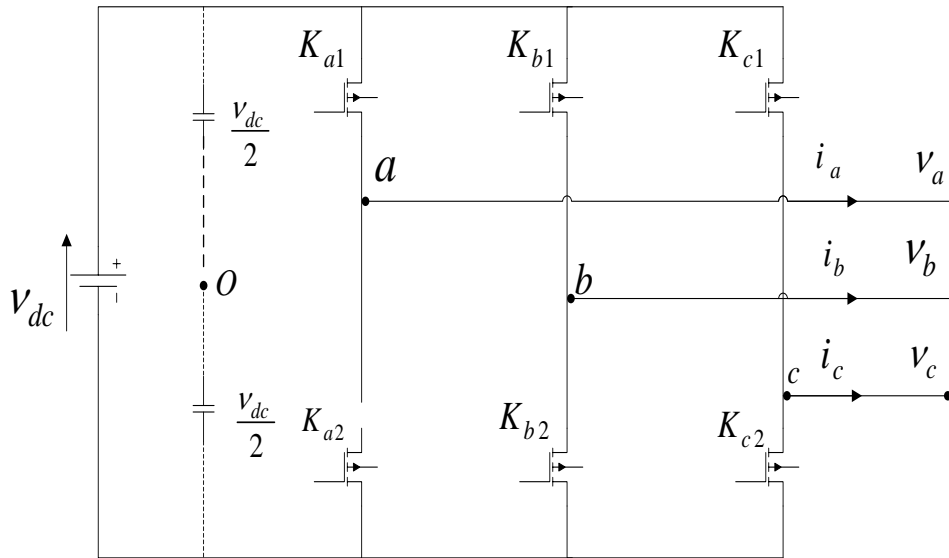


Figure (I.10) : Structure d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux.

I.6.1.2 Principe de fonctionnement de l'onduleur triphasé

L'onduleur est composée de six IGBT bidirectionnels ($k_{xi}, x = a, b, c, i = 1, 2$) organisés comme dans la figure (I.10). Etant donné les commutateurs réelles des interrupteurs de puissance (temps d'ouverture et de fermeture différents), la configuration la plus dangereuse est celle ou les deux transistors sont fermés, car la tension du bus est mise en court-circuit et par conséquent un courant important travers les IGBT et entraînant leur destruction.

I.6.1.3 Fonction de commutation

Comme nous l'avons expliqué précédemment, il est nécessaire d'effectuer une commande de commutation entre les interrupteurs pour éviter tout dommage, pour cela les commutations qui sont créées par les interrupteurs qui sont supposées être idéales, sont décrites par la fonction de connexion S_{xi} $x = a, b, c, i = 1, 2$ comme suit :

$$\begin{cases} S_{xi} = 1 \Rightarrow K_{xi} \text{ fermé} \\ S_{xi} = 0 \Rightarrow K_{xi} \text{ ouvert} \end{cases} \tag{I.1}$$

Considérant que les bras de l'onduleur triphasé à deux niveaux se compose de deux IGBT commutent de façon complémentaire, on peut écrire la règle de commutation suivante :

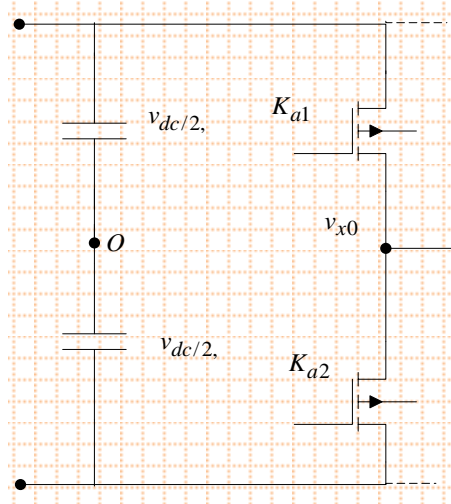
$$S_{x1} = 1 - S_{x2}, \quad x = a, b, c \tag{I.2}$$

I.6.1.4 Tensions de sortie

La figure (I.11) représente un bras d'un onduleur triphasé à deux niveaux, la tension générée à la sortie de

chaque bras v_{x0} peut être exprimé par la relation suivante :

$$v_{x0} = \begin{cases} v_{dc}/2, & K_{x1} = 1 \\ -v_{dc}/2, & K_{x1} = 0 \end{cases} \quad x = a, b, c \quad (\text{I.3})$$



Figure(I.11): Bras d'un onduleur triphasé à deux niveaux.

Les tensions composées v_{ab}, v_{bc}, v_{ca} (voir figure I.10) peuvent être calculées en fonction des tensions des bras v_{a0}, v_{b0}, v_{c0} comme suit :

$$\begin{cases} v_{ab} = v_{a0} - v_{b0} = (S_{a0} - S_{b0})v_{dc} / 2 \\ v_{bc} = v_{b0} - v_{c0} = (S_{b0} - S_{c0})v_{dc} / 2 \\ v_{ca} = v_{c0} - v_{a0} = (S_{c0} - S_{a0})v_{dc} / 2 \end{cases} \quad (\text{I.4})$$

Les tensions simples v_a, v_b, v_c sont calculées en fonction de tension composées v_{a0}, v_{b0}, v_{c0} comme suit :

$$\begin{cases} v_a = \frac{1}{3}(v_{ab} - v_{ca}) \\ v_b = \frac{1}{3}(v_{bc} - v_{ab}) \\ v_c = \frac{1}{3}(v_{ca} - v_{bc}) \end{cases} \quad (\text{I.5})$$

En considérant que la charge est équilibrée, i.e. $v_a + v_b + v_c = 0$, les tensions simples peuvent être exprimées en fonction des fonctions des connexions S_{xi} comme suit :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{v_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{a1} \\ S_{b1} \\ S_{c1} \end{bmatrix} \tag{I.6}$$

I.7 Modélisations d'un onduleur triphasé à deux niveaux alimente une charge R-L via un filtre LC

Dans cette partie, nous allons développer le modèle mathématique du système représenté dans la figure (I.14) dans le repère stationnaire triphasé (abc), le repère stationnaire biphasé ($\alpha\beta$) et le repère asynchrone (dq). Cette modélisation sera utilisée ensuite pour contrôler ce système.

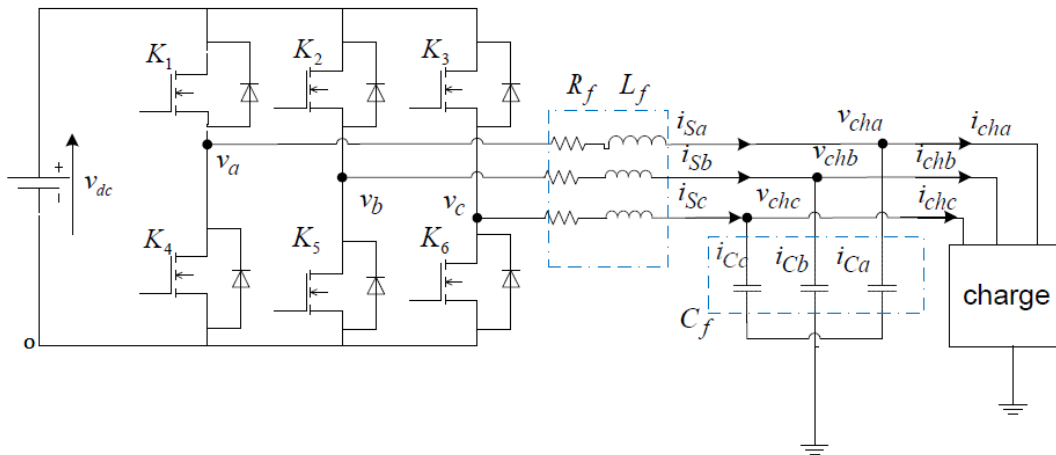


Figure (I.12) : Onduleur de tension triphasé à deux niveaux alimente une charge via un filtre LC.

I.7.1 Modélisation du système (onduleur +filtre LC+charge) dans le repère stationnaire (abc)

La figure (I.14) montre la structure de l'onduleur triphasé à deux niveaux alimente une charge inductive via un filtre L-C. Le modèle mathématique de ce système dans repère stationnaire triphasé (abc) est obtenu en appliquant la loi de Kirchhoff au côté alternatif du système, ce qui donne:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + R_f \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{cha} \\ v_{chb} \\ v_{chc} \end{bmatrix} \tag{I.7}$$

Où $v_{cha}, v_{chb}, v_{chc}$ sont les tensions de la charge, v_a, v_b, v_c et i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} sont respectivement, les tensions et les courants générés par l'onduleur; L_f, R_f représentent respectivement l'inductance du filtre et sa résistance interne.

D'un autre côté, les tensions aux bornes des condensateurs du filtre sont décrites par le système d'équation suivant:

$$C_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_{cha} \\ v_{chb} \\ v_{chc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{cha} \\ i_{chb} \\ i_{chc} \end{bmatrix} \quad (\text{I.8})$$

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

I.7.2 Modélisation du système (onduleur+filtre LC+charge) dans le repère $\alpha\beta$

Les modèles représentés dans les systèmes d'équation (I.7) et (I.8) peuvent être transformé dans le repère stationnaire biphasé en utilisant la transformation suivante :

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = T_{\alpha\beta}^{abc} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (\text{I.9})$$

$$\text{Où, } T_{\alpha\beta}^{abc} = \frac{\sqrt{2}}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}, x \text{ peut prendre les grandeurs } i_{ch}, v_{ch}, v \text{ ou } i_s.$$

On utilisant la transformation (I.9), les modèles mathématiques (I.7) et (I.8), peuvent être transformés dans le repère $\alpha\beta$ comme suit:

$$\begin{cases} L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} = -R_f \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{x\alpha} \\ v_{x\beta} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{ch\alpha} \\ v_{ch\beta} \end{bmatrix} \\ C_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{sch\alpha} \\ i_{sch\beta} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (\text{I.10})$$

I.7.3 Modélisation du système (onduleur+filtre LC+charge) dans le repère d-q

Le modèle représentés dans les systèmes d'équation (I.7) et (I.8) peuvent être transformés dans le repère synchrone (dq) en utilisant la transformation suivante :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = T_{dq}^{\alpha\beta} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{I.11})$$

$$\text{Où, } T_{dq}^{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix}, x \text{ peut prendre les grandeurs } i_{ch}, v_{ch}, v \text{ ou } i_s ; \theta \text{ est l'argument du}$$

vecteur de tension de la charge qui peut être calculé comme suit :

$$\theta = \text{actang}\left(\frac{v_\beta}{v_\alpha}\right) \quad (\text{I.12})$$

En utilisant la transformation (I.10), dans (I.7) et (I.8), on trouve le modèle du système de la figure (I.14) dans le repère synchrone (dq) comme suit :

$$\begin{cases} L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_f & \omega \\ -\omega & -R_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{chd} \\ v_{chq} \end{bmatrix} \\ C_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_{chd} & \omega - v_{chq} \\ v_{chq} & \omega - v_{chd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{chd} \\ i_{chq} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (\text{I.13})$$

Où, ω représente la pulsation du système.

I.8 Modulation vectorielle (Space Vector Modulation)

Plusieurs techniques de modulation ont été proposées dans la littérature afin d'améliorer les performances des onduleurs triphasés (réduire le taux de distorsion d'harmoniques (THD), utilisation du bus continu, facteur de puissance...). Parmi ces techniques, la modulation vectorielle (Space Vector Modulation) présente des avantages importants par rapports aux autres techniques (indice de modulation plus proche de 1, THD réduit, distribution d'énergie uniforme sur les interrupteurs de puissance....).

I.8.1 Représentation vectorielle des vecteurs de tension d'un onduleur à deux niveaux

Le circuit d'onduleur triphasé à deux niveaux est représenté dans la figure (I.10). Étant donné la fonction de connexion de chaque bras (S_a, S_b, S_c) présente deux états (0 ou 1), ce que fait, il y a huit combinaisons possibles (000, 001, 100, 110, 010, 011, 101, 111) qui correspondent dans le repère $\alpha\beta$ aux vecteurs de tension ($v_0, v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7$). Les huit vecteurs de tension $v_k, k = \{0, 1, \dots, 7\}$, peuvent être exprimés par l'équation suivante :

$$\begin{cases} v_{k+1} = \sqrt{\frac{2}{3}} v_{dc} e^{jk(\frac{\pi}{3})} & (k = 0, \dots, 5) \\ v_0 = v_7 = 0 \end{cases} \quad (\text{I.14})$$

Le tableau (I.1) résume les différentes combinaisons de fonction de connexion et les vecteurs de tension correspondants dans le repère $\alpha\beta$. Ces vecteurs forment le diagramme vectoriel de l'onduleur à deux niveaux représenté dans la figure (I.15).

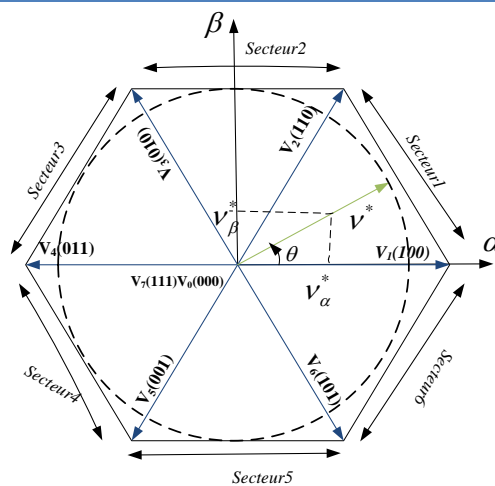
La modulation vectorielle résulte de la projection des vecteurs de tension sur les deux axes (α, β). Si on attribue au vecteur de référence v^* uniquement les six positions discrètes de la figure (I.15), la tension de sortie sera riche en harmoniques. Afin de réduire le taux d'harmoniques de la tension de sortie résultante de la forme non circulaire de cet hexagone, on impose au vecteur v^* de se positionner à l'intérieur du

cercle limité par l'hexagone (voir figure (I.13)). Ainsi, le module maximal admissible du vecteur de référence v^* est donné par :

$$v_{\max}^* = \sqrt{\frac{2}{3}} v_{dc} \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) = \sqrt{\frac{1}{2}} v_{dc} \tag{I.16}$$

Tableau (I.1): Combinaisons des fonctions de connexion et les vecteurs de tension correspondants dans le repère $\alpha\beta$

(v_i)	S_a	S_b	S_c	v_α	v_β
v_0	0	0	0	0	0
v_1	1	0	0	$\sqrt{2/3}V_{dc}$	0
v_2	1	1	0	$\sqrt{1/6}V_{dc}$	$\sqrt{1/2}V_{dc}$
v_3	0	1	0	$-\sqrt{1/6}V_{dc}$	$\sqrt{1/2}V_{dc}$
v_4	0	1	1	$-\sqrt{2/3}V_{dc}$	0
v_5	0	0	1	$-\sqrt{1/6}V_{dc}$	$-\sqrt{1/2}V_{dc}$
v_6	1	0	1	$\sqrt{1/6}V_{dc}$	$-\sqrt{1/2}V_{dc}$
v_7	1	1	1	0	0



Figure(I.13) Diagramme de commutation pour un onduleur à deux niveaux.

L'équation (I.14) devient :

$$v^* = m v_{\max}^* e^{j\theta} \quad (\text{I.17})$$

Où, θ représente l'argument du vecteur de référence et m représente le taux de modulation ($m_{\max} = \frac{\sqrt{3}}{2}$, $m \in [0, 1]$).

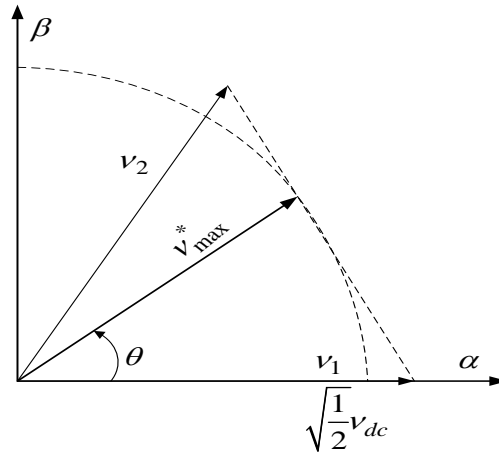


Figure (I.14) : Limitation du vecteur de référence

I.8.2 Principe de la modulation vectorielle (SVM)

L'algorithme de la SVM (Space Vector Modulation) consiste à calculer les temps d'application des vecteurs de tension qui permettent de générer le vecteur de référence souhaité et de calculer les rapports cycliques d'interrupteurs de l'onduleur. Dans les paragraphes suivants, nous allons présenter les différentes étapes qui permettent de développer cet algorithme.

I.8.2.1 Etape 1 : localisation du vecteur de référence

A partir des coordonnées $v_{\alpha}^*, v_{\beta}^*$ et de l'angle θ , on déduit le secteur s triangulaire contenant ce vecteur de la relation suivante:

$$s = \begin{cases} 1 & \theta \in [0, \pi/3] \\ 2 & \theta \in [\pi/3, 2\pi/3] \\ 3 & \theta \in [2\pi/3, \pi] \\ 4 & \theta \in [\pi, 4\pi/3] \\ 5 & \theta \in [4\pi/3, 5\pi/3] \\ 6 & \theta \in [5\pi/3, 2\pi] \end{cases} \quad (\text{I.18})$$

A noter que l'angle du vecteur de référence est calculé par la relation l'équation ($\theta = \arctg(v_{\beta}^* / v_{\alpha}^*)$).

I.8.2.2 Etape 2 : calcul les temps d'application des vecteurs de tension

Si le vecteur de référence v^* est dans le secteur s_i ($i = 1, \dots, 6$), alors t_i, t_{i+1} sont les temps d'application des vecteurs adjacents v_i, v_{i+1} , et t_0 est le temps d'application de deux vecteurs nuls (

v_0, v_7). Puisque le vecteur de référence v^* est égal à la valeur moyenne de ces vecteurs pendant la période de commutation T_h alors on peut écrire :

$$\frac{1}{T_h} \int_t^{t+T_h} v^* dt = \frac{1}{T_h} \left(\int_t^{t+t_1} v_i dt + \int_{t+t_1}^{t+t_1+t_2} v_{i+1} dt + \int_{t+t_1+t_2}^{t+T_h} v_0 dt \right) \quad (\text{I.19})$$

Dans une période d'échantillonnage T_h très petite, la tension v^* est constante, l'équation (I.19) peut être simplifié à :

$$v^* T_h = t_i v_i + t_{i+1} v_{i+1} + t_0 v_0 \quad (\text{I.20})$$

Par exemple si le vecteur de référence est localisé dans le secteur 1 on a :

$$v^* = \frac{1}{T_h} (t_1 v_1 + t_2 v_2 + t_0 v_0) \quad (\text{I.21})$$

Les vecteurs de tension (v_1, v_2, v_0) dans le premier secteur sont :

$$\begin{cases} v_1 = \sqrt{\frac{2}{3}} v_{dc} \\ v_2 = \sqrt{\frac{2}{3}} v_{dc} \left(\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \\ v_0 = 0 \end{cases} \quad (\text{I.22})$$

D'autre part le vecteur de tension peut être décomposé dans le repère $\alpha\beta$ comme suit :

$$v^* = v_\alpha^* + j v_\beta^* \quad (\text{I.23})$$

En remplaçant (I.22) et (I.23) dans (I.19) on obtient :

$$\begin{cases} v_\alpha^* = \sqrt{\frac{2}{3}} v_{dc} \frac{t_1}{T_h} + \frac{1}{\sqrt{6}} v_{dc} \frac{t_2}{T_h} \\ v_\beta^* = \frac{1}{\sqrt{2}} v_{dc} \frac{t_2}{T_h} \end{cases} \quad (\text{I.24})$$

La solution de (I.24) donne :

$$\begin{cases} t_1 = \frac{\sqrt{6} v_\alpha^* - \sqrt{2} v_\beta^*}{v_{dc}} T_h \\ t_2 = \frac{\sqrt{2} v_\beta^*}{v_{dc}} T_h \\ t_0 = T_h - (t_1 + t_2) \end{cases} \quad (\text{I.25})$$

En effectuant le même calcul, on peut obtenir les temps d'application des vecteurs adjacents et les vecteurs nuls si le vecteur référence est localisé dans les autres secteurs. Le Tableau (I.2) résume le calcul des temps d'application des vecteurs de tension dans tous les secteurs.

Tableau (I.2) : Temps d'application des vecteurs de tension

Secteur 1	$t_1 = \frac{\sqrt{6}v_\alpha^* - \sqrt{2}v_\beta^*}{2V_{dc}} T_h$	$t_2 = \frac{\sqrt{2}v_\beta^*}{V_{dc}} T_h$	$t_0 = T_h - (t_1 + t_2)$
Secteur 2	$t_2 = \frac{\sqrt{6}v_\alpha^* + \sqrt{2}v_\beta^*}{2V_{dc}} T_h$	$t_3 = \frac{-\sqrt{6}v_\alpha^* + \sqrt{2}v_\beta^*}{2V_{dc}} T_h$	$t_0 = T_h - (t_2 + t_3)$
Secteur 3	$t_3 = \frac{\sqrt{2}v_\beta^*}{V_{dc}} T_h$	$t_4 = \frac{-\sqrt{6}v_\alpha^* - \sqrt{2}v_\beta^*}{2V_{dc}} T_h$	$t_0 = T_h - (t_3 + t_4)$
Secteur 4	$t_4 = \frac{-\sqrt{6}v_\alpha^* + \sqrt{2}v_\beta^*}{2V_{dc}} T_h$	$t_6 = \frac{\sqrt{6}v_\alpha^* - \sqrt{2}v_\beta^*}{2V_{dc}} T_h$	$t_0 = T_h - (t_4 + t_5)$
Secteur 5	$t_5 = \frac{-\sqrt{6}v_\alpha^* - \sqrt{2}v_\beta^*}{2V_{dc}} T_h$	$t_5 = -\frac{\sqrt{2}v_\beta^*}{V_{dc}} T_h$	$t_0 = T_h - (t_5 + t_6)$
Secteur 6	$t_6 = -\frac{\sqrt{2}v_\beta^*}{V_{dc}} T_h$	$t_1 = \frac{\sqrt{6}v_\alpha^* + \sqrt{2}v_\beta^*}{2V_{dc}} T_h$	$t_0 = T_h - (t_6 + t_1)$

I.8.2.3 Etape 3 : Génération des impulsions de commande

Les distributions des vecteurs qui seront appliqués aux différentes positions du vecteur de tension de référence sont représentées sur la figure (I.15) . Afin de minimiser les pertes par commutation et de réduire les harmoniques de la tension de sortie, on applique les vecteurs de tension dans l'ordre croissant durant la demi-période puis dans l'ordre inverse pour le deuxième demi période comme montre la figure(I.17) [4].

Ainsi, si le vecteur de référence v^* est dans le premier secteur, le rapport cyclique de l'interrupteur S_a est calculé par :

$$d_{sa} = \frac{t_{on}}{T_h} = \frac{(t_1 + t_2 + t_0 / 2)}{T_h} \quad (I.26)$$

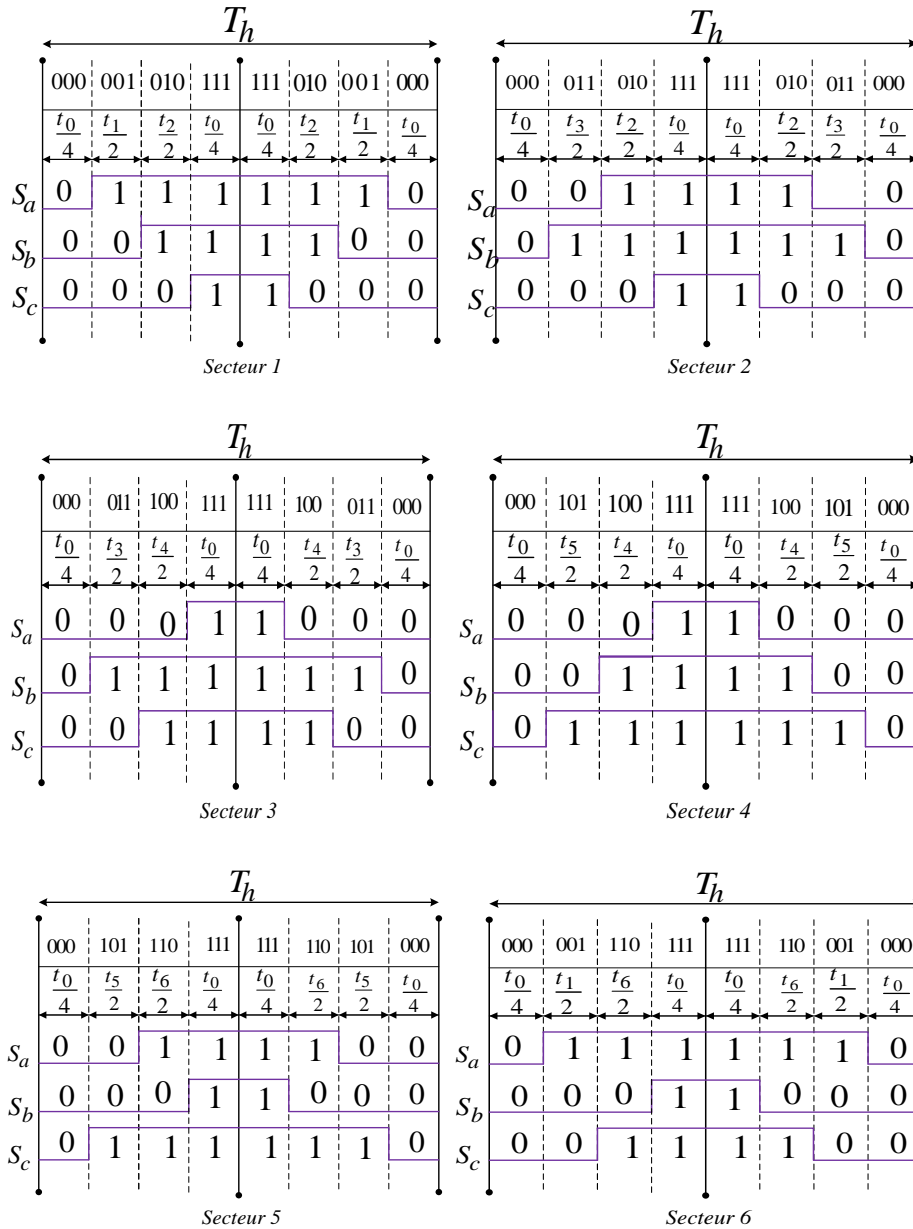


Figure (I.15) : Répartition des vecteurs de tension à appliquer pour chaque secteur

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié la modélisation de l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux. En premier temps, nous avons présenté une brève théorie sur les différentes structures de l'onduleur de tension. Ensuite, nous avons focalisé notre étude sur l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux, où nous avons présenté en détail son principe de fonctionnement, son modèle mathématique dans le repère stationnaire triphasé (abc), le repère stationnaire biphasé ($\alpha\beta$), et le repère synchrone (dq). Dans la dernière partie nous avons présenté en détail la modulation vectorielle (SVM) qui permet de piloter l'onduleur.

Le chapitre suivant fera l'objet de l'étude de la commande linéaire d'onduleur triphasé à deux niveaux.

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 dans la vie quotidienne et dans les secteurs industriels comme les installations photovoltaïques, les alimentations de secours, l'entraînement des machines électrique, et les systèmes de production d'énergie renouvelable couplés au réseau électrique. En effet, les performances et le rendement des onduleurs sont dépend essentiellement de type de la modulation et la technique de la commande appliquées [1].

Plusieurs stratégies de modulations peuvent être utilisées pour piloter les onduleurs de tension triphasée, à savoir la modulation plein ondes, la modulation de la largeur d'impulsion sinusoïdale (MLI), la modulation à hystérésis et la modulation vectorielle (Space Vector Modulation (SVM)). La modulation vectorielle présente des avantages importants par rapport au autres des techniques tels que:

- 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.
- La redondance dans les vecteurs zéros redondants fournissent un degré de liberté additionnel ce qui permet de les exploiter dans des fonctions complémentaires, la réduction de la tension en mode commun, et la commande du courant de circulation dans la mise en parallèles des onduleurs.

- L'implémentation est relativement simple avec les calculateurs disponibles actuellement [5].

Dans ce chapitre nous allons développer une commande linéaire pour un onduleur de tension triphasé à deux niveaux en utilisant la modulation vectorielle et les régulateurs PI.

II.2 Synthèse d'une commande linéaire pour un onduleur de tension débite une charge résistive via un filtre LC

Le système à contrôler se compose d'un onduleur de tension triphasé alimente une charge de type R-L via un filtre LC. La commande synthétisée pour ce système est représenté dans la figure (II.1). Deux boucles de régulation dans le repère dq sont utilisées pour avoir des bonnes performances. La boucle externe sert à régler la tension désirée aux bornes de charge (v_{chd}^*, v_{chq}^*) en agissant sur les tensions des condensateurs du filtre (v_{chd}, v_{chq}). Tandis que la boucle interne sert à contrôler les courants de l'onduleur (i_{sd}, i_{sq}).

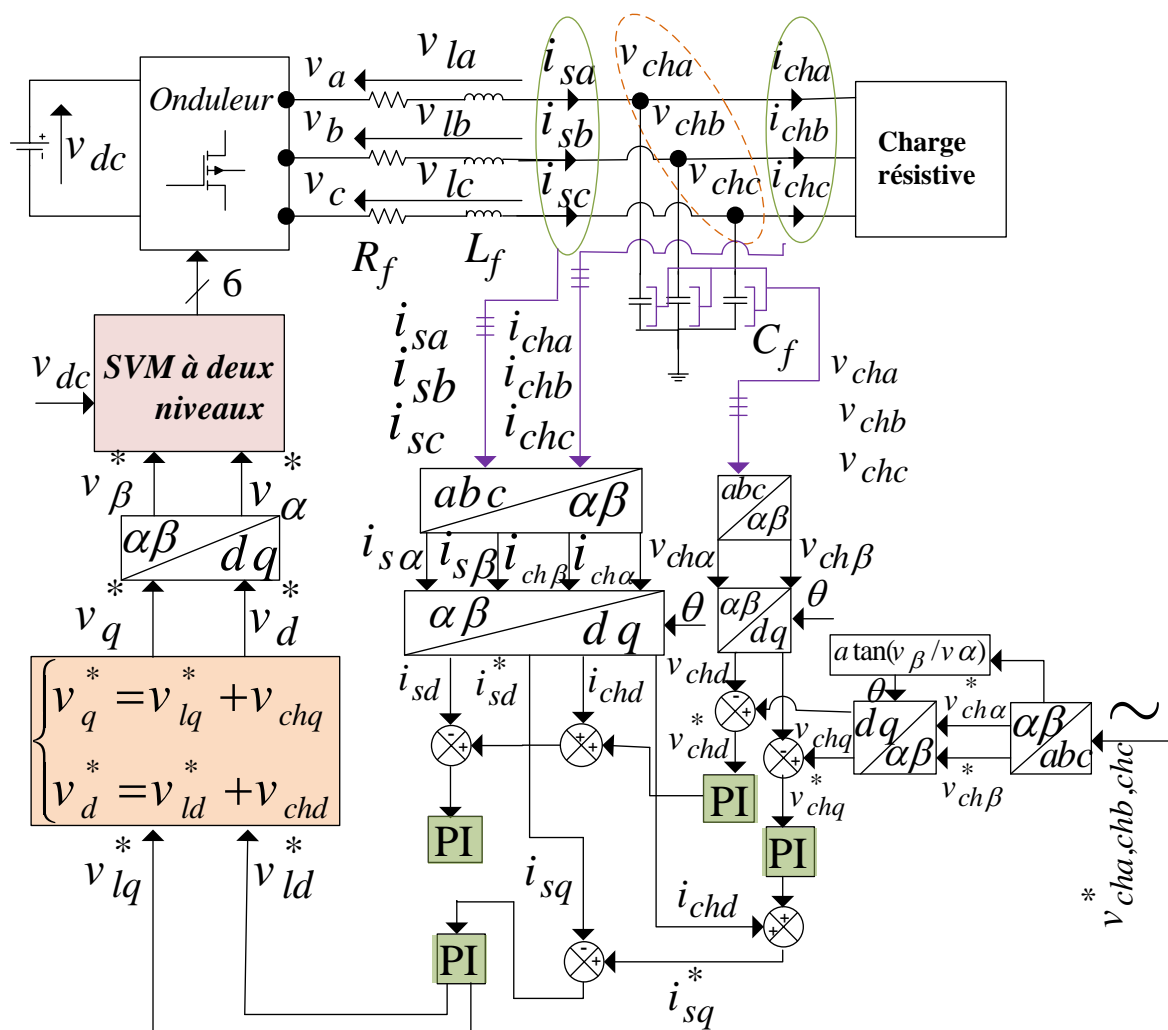


Figure (II.1): Structure de la commande linéaire d'un onduleur de tension débite alimente une charge résistive via un filtre LC.

II.2 .1 Synthèse du régulateur des tensions des condensateurs

Pour imposer la tension désirée aux bornes de la charge, une boucle de régulation à base de régulateur PI est utilisée pour asservir les tensions aux bornes des condensateurs comme illustre la figure (II.2), Où k_{pv}, k_{iv} représentent les gains du régulateur, i_{Cfd}^*, i_{Cfq}^* représentent les courants de référence qui doivent traverser les condensateurs. Ces derniers sont utilisés ensuite pour calculer la référence de la boucle interne (i_d^*, i_q^*) par la relation suivante :

$$\begin{cases} i_d^* = i_{Cfd}^* + i_{chd} \\ i_q^* = i_{Cfq}^* + i_{chq} \end{cases}$$

Où, i_{chd}, i_{chq} représentent respectivement le courants direct et en quadrature de la charge.

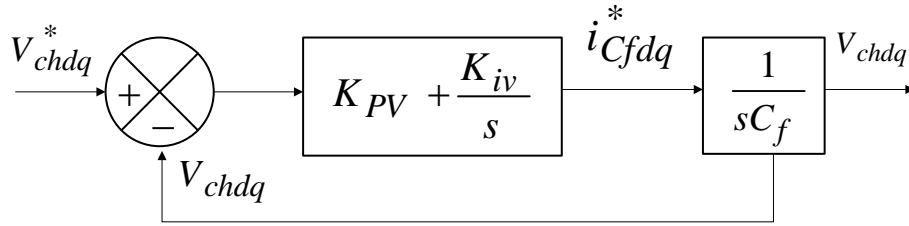


Figure (II.2): Boucle de régulation de la tension du bus continu

A partir du schéma de la figure (II.1), la fonction de transfert du système ($H_v(s)$) en boucle fermée s'écrit comme la suit:

$$H_v(s) = \frac{\frac{K_{pv}}{C_{pv}} s + \frac{K_{iv}}{C_{pv}}}{s^2 + \frac{K_{pv}}{C_{pv}} s + \frac{K_{iv}}{C_{pv}}} \quad (\text{II.1})$$

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 :

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

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.1) et (II.2), les gains du correcteur sont déterminés par:

$$\begin{cases} K_{pv} = 2\xi_v \omega_{nv} C_{pv} \\ K_{iv} = C_{pv} \omega_{nv}^2 \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

II.2.2 Synthèse du régulateur des courants de l'onduleur

Afin d'imposer le courant de référence i_d^*, i_q^* , nous avons synthétisé une boucle de régulation à base des régulateurs PI permettant d'asservir les courants traversant les inductances du filtre i_d, i_q comme montre la figure (II.3).

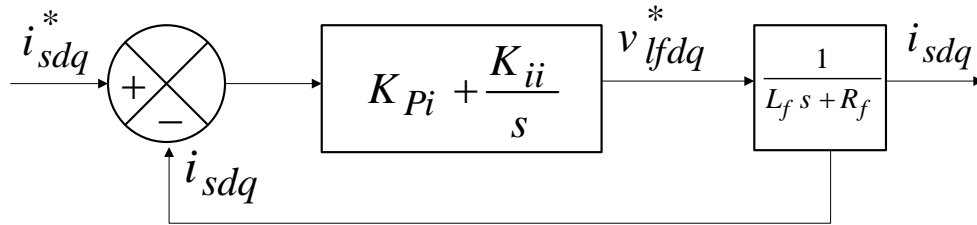


Figure (II.3): Schéma de régulation des courants de l'onduleur.

La fonction de transfert en boucle fermée du système de la figure (II.3) s'écrit comme:

$$H_i(s) = \frac{\frac{K_{pi}s + K_{ii}}{L_f}}{s^2 + \frac{K_{pi} + R_f s + K_{ii}}{L_f}} \quad (\text{II.4})$$

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 :

$$\begin{cases} K_{pi} = 2\xi_i \omega_{ni} L_f - R_f \\ K_{ii} = L_f \omega_{ni}^2 \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

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

Enfin, les tensions de référence (v_d^*, v_q^*) de l'onduleur peuvent être calculées en fonction des tensions déterminées par les régulateurs (v_{ifd}^*, v_{ifq}^*) comme suit:

$$\begin{bmatrix} v_d^* \\ v_q^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{ifd}^* \\ v_{ifq}^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{chd} \\ v_{chq} \end{bmatrix} - L_f \omega \begin{bmatrix} i_{sq} \\ i_{sd} \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

Ces tensions de référence (v_d^*, v_q^*) sont transformées ensuite dans le repère $\alpha\beta$ et transférées au bloc SVM pour générer les signaux de commande.

II.3 Résultats de simulations:

Dans ce test, nous allons vérifier l'efficacité de la structure de la commande présentée dans la figure (II.1) vis-à-vis une variation brusque de tension de référence selon le scénario suivant :

de	[0 s , 0,25s],	$v^* = 10V$;
de	[0,25 s , 0,50s],	$v^* = 25V$;
de	[0,50 s , 0,75s],	$v^* = 35V$;
de	[0,75 s , 1s],	$v^* = 40V$;
de	[1 s , 1,25s],	$v^* = 15V$.

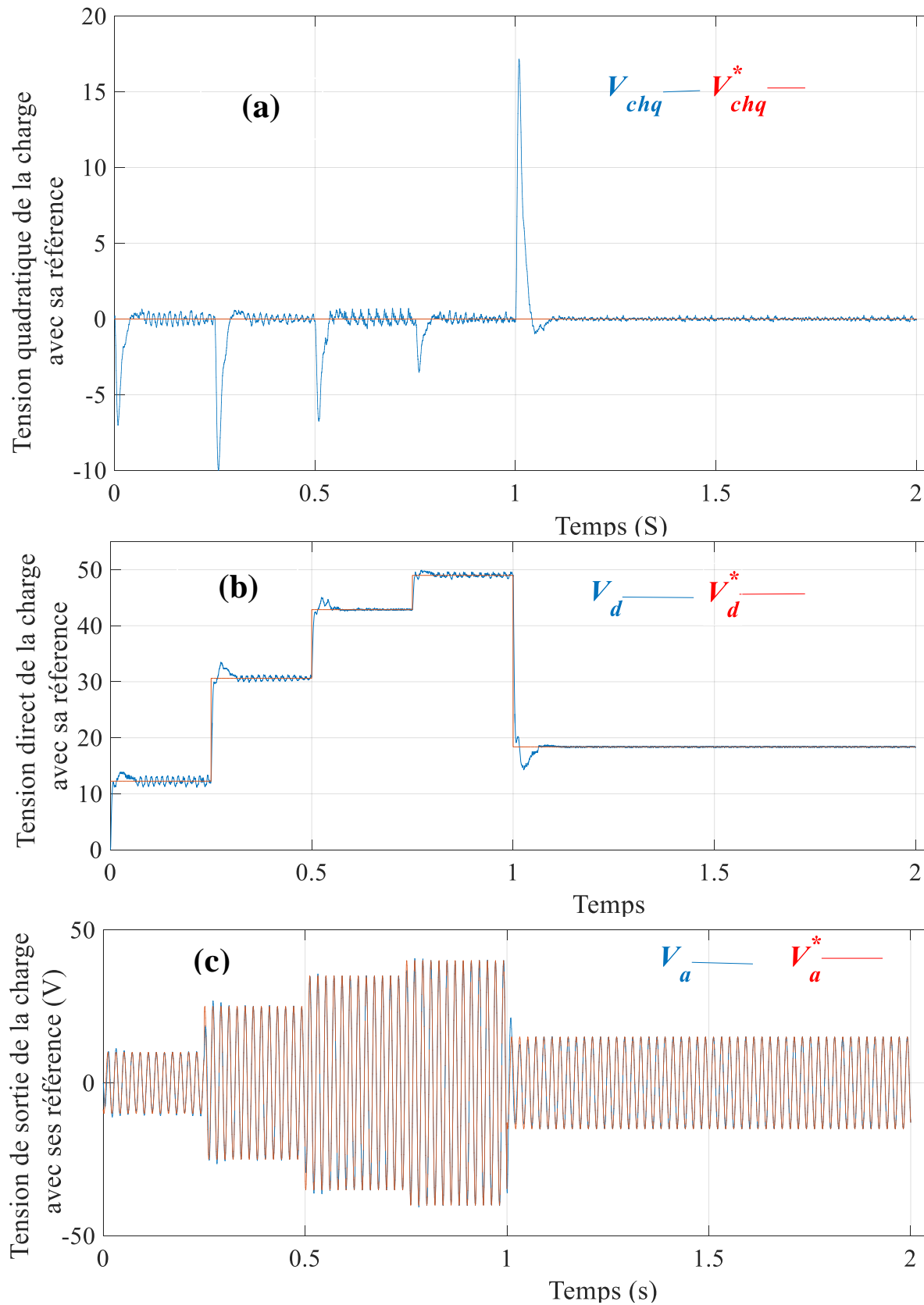
Les paramètres du système sont résumés dans le Tableau (II.1)

Tableau (II.1): Paramètres utilisés pour la simulation

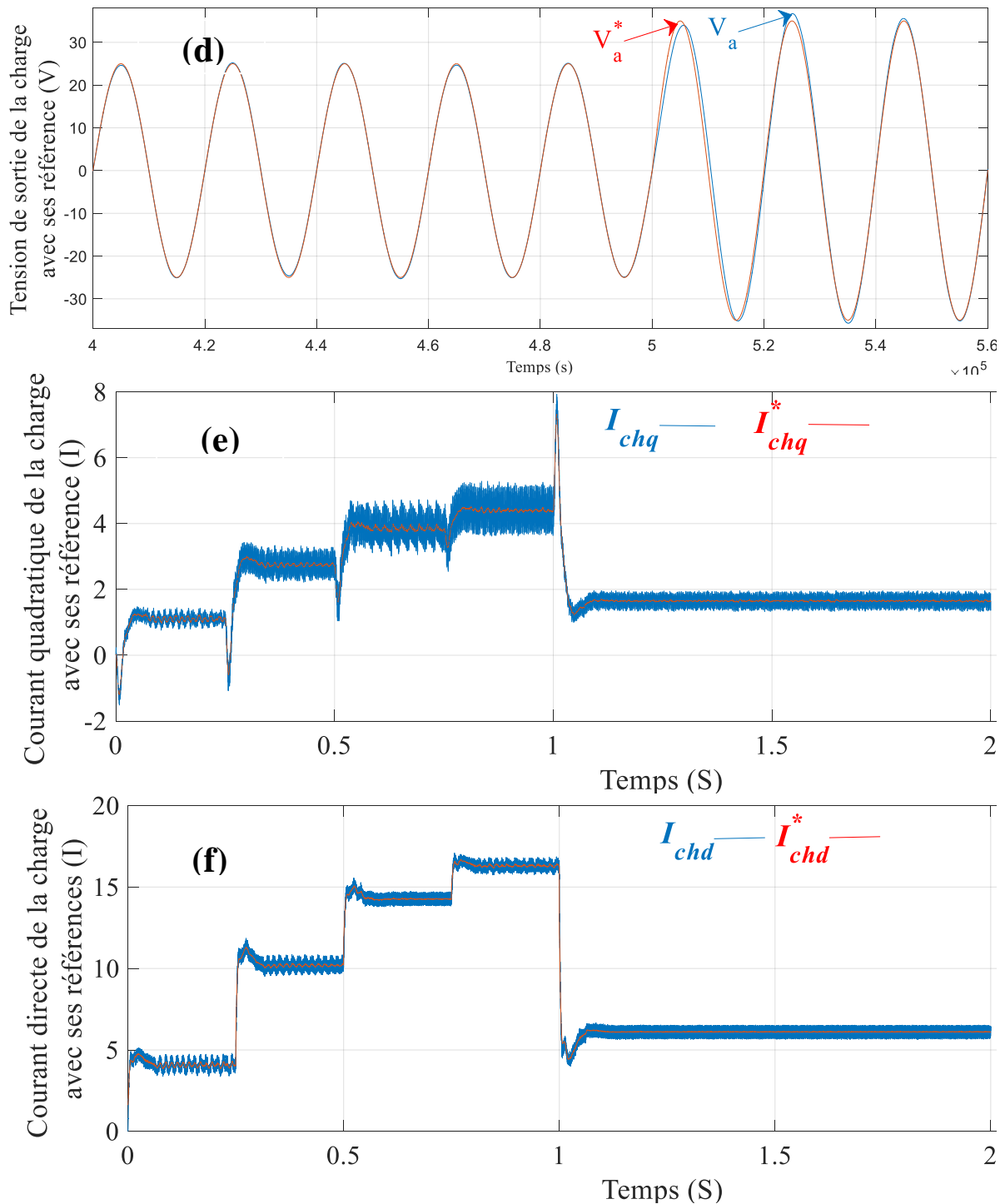
Paramètres de filtre LC	$C_f = 330\mu F$, $R_f = 20m\Omega$, $L_f = 1mH$
Paramètres du régulateur de tension	$\omega_{nv} = 200 \text{ rad} / s$, $\xi_v = 1$
paramètres du régulateur de courant	$\omega_{nv} = 700 \text{ rad} / s$, $\xi_v = 1$
Charges linéaires	$R_{ch} = 3\Omega$, $i_{ch} = 40mH$

D'après les figures (II.4) (a) et (II.4) (b), on constate que les tensions de la charge synchrone v_{chd}, v_{chq} suivent avec précision leurs tensions de référence v_{chd}^*, v_{chq}^* malgré la variation brusque de la tension de référence. Ceci peut être confirmé également dans la figure (II.4) (c) où une bonne poursuite est enregistrée également dans le repère stationnaire (abc).

Selon les figures (II.4) (d) et (II.4) (e), les courants de l'onduleur (i_{sd}, i_{sq}) suivent parfaitement leurs courant références i_{sd}^*, i_{sq}^* ce qui valide l'efficacité des régulateurs des courant synthétisés.



Figure(II.4): 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 sortie de la charge avec ses référence, (d) Tension de la de charge stationnaire et sa référence.



Figure(II.4)(suite): Formes d'ondes des tensions et des courants d'un onduleur de tension à deux niveaux piloté par la modulation vectorielle: (d) Zoom de la figure (c), (e) courant quadratique de la charge et sa référence, (f) courant directe de la charge et sa référence.

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous allons étudier la commande linéaire de l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux. Une structure de commande à base de régulateurs linéaires (PI) et la modulation vectorielle à été développée pour contrôler un onduleur alimente une charge via

un filtre LC. Cette structure de commande est montrée une excellente poursuite de la tension désirée aux bornes de la charge même avec des variations brusques de la tension de référence.

Dans le chapitre suivant nous allons valider expérimentalement l'algorithme de modulation vectorielle (SVM) et la commande synthétisée.

Chapitre III:

Validation expérimentale d'une commande linéaire d'un onduleur triphasé à deux niveaux

III.1 Introduction

Dans ce dernier chapitre, nous présenterons la mise en œuvre expérimentale d'un onduleur de tension à deux niveaux piloté par une carte DSP et l'application de techniques de commande, tout d'abord, nous présenterons la plate-forme de test expérimental ainsi que les différentes cartes électroniques, nous afficherons ensuite le circuit de commande de l'onduleur où nous validerons l'algorithme de commande linéaire en boucle ouverte et en boucle fermée pour visualiser les différentes formes d'onde générées par l'onduleur.

Où toutes les tâches concernant la réalisation de notre onduleur triphasé (test sur une plaque d'essai et test final de l'onduleur...), ont été réalisées au niveau du laboratoire de fin d'étude et du labo de recherche.

III.2 Présentation et description de la plateforme du banc d'essai

Dans cette partie, nous présenterons le banc d'essai réalisé au laboratoire de fin d'étude Comme illustre la figure (III.1).

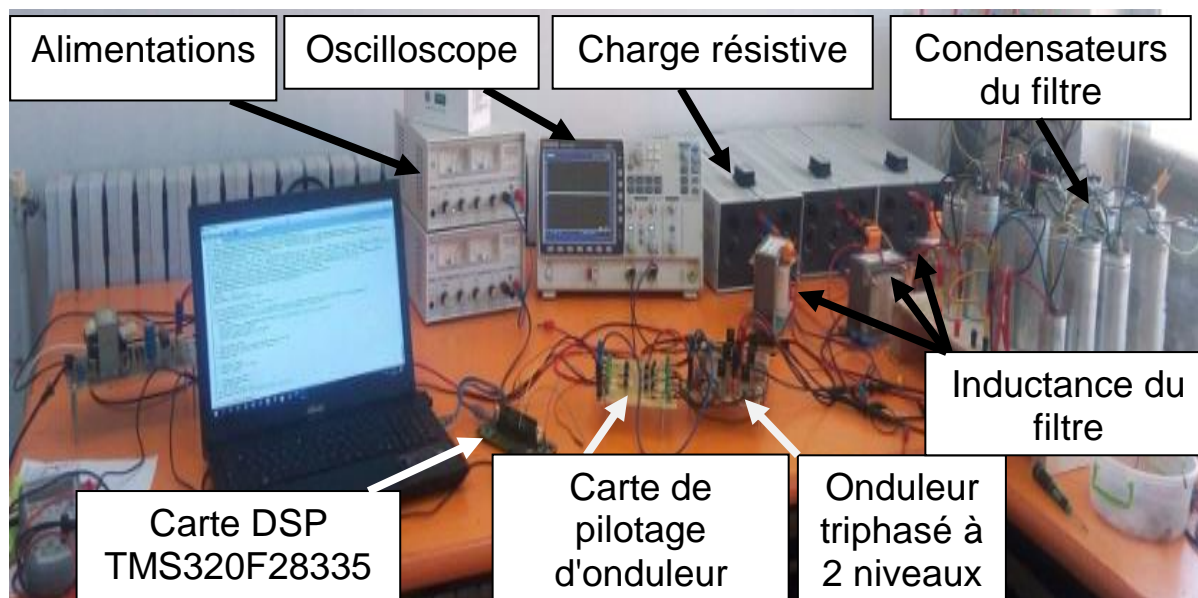


Figure (III.1):Photo du banc d'essai réalisé.

Ce banc d'essai se compose d'un onduleur de tension triphasé constitué Insolated Gate Bipolar Transistor(IGBT) K30T60 [6] avec une carte de commande basée sur trois optocoupleurs HCPL2200 [7], trois drivers IR2111 [8], trois charge résistive ECO 3Tubes ($33\Omega, 7.6A, 600V$), des filtres LC, banc de condensateurs, trois inductance ($2mH, 30A$) et la carte de développement Texas Instrument TMS320F28335 [9].

Les caractéristiques des différentes pièces qui composent ce modèle expérimental sont résumées dans le tableau (III.1).

Tableau (III.1): La caractéristique des différentes pièces de modèle réalisée.

Source d'alimentation du circuit d'isolation	15V
Source d'alimentation du circuit d'onduleur	60V
Résistance de la charge	33Ω
Capacité du filtre-LC L'inductance du filtre-LC Resistance interne	$C = 273\mu F$ $L = 2mH$ $r_i = 0.2\Omega$
Fréquence de commutation	50Hz
Fréquence échantillonnage	50Hz

Et nous détaillerons les principales pièces qui composent ce banc d'essai dans les paragraphes suivant :

III.2.1 Carte de développement DSP TMS320F28335

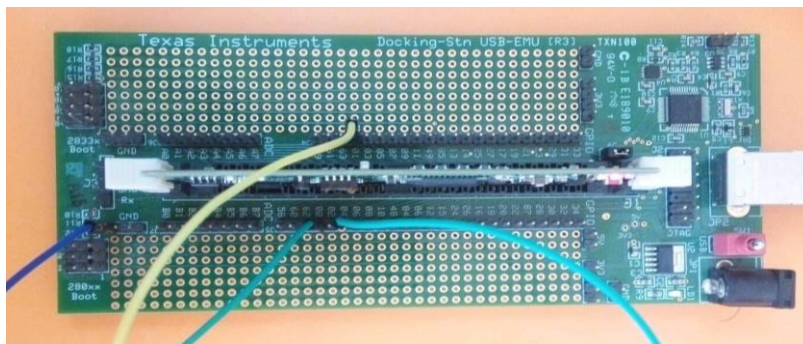


Figure (III.2): Carte de développement DSP TMS320F28335.

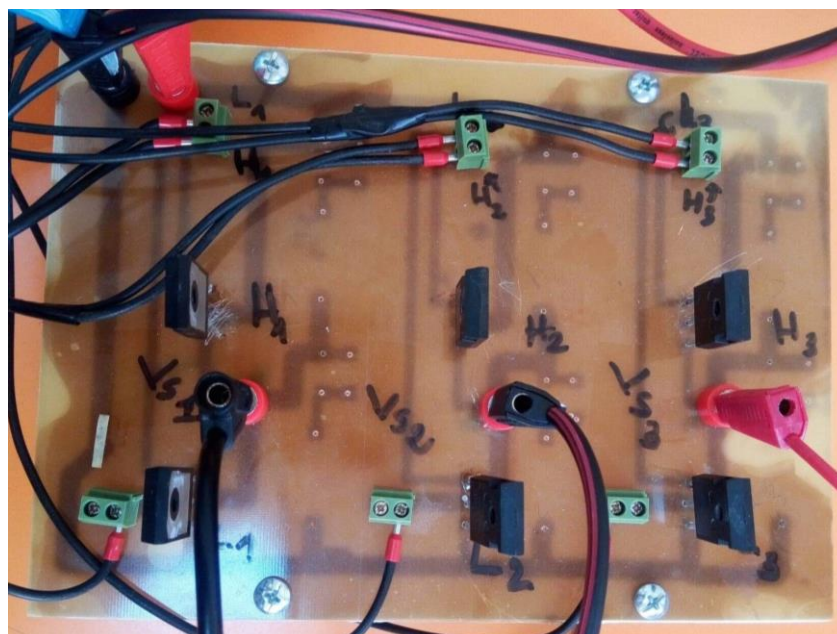
La carte DSP TMS320F28335 est une carte de développement puissante utilise le microcontrôleur C2000TM 32-bit qui peuvent être configurés avec plusieurs logiciels tels que MATLAB et Psim. Les caractéristiques principales de cette carte sont [1]:

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

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

III.2.2 Onduleur de tension triphasé:

Dans notre travail nous avons utilisé un onduleur déjà réalisé au labo [1]. Nous avons amélioré cet onduleur par des circuits snubber qui permettent de réduire les pertes par commutation et le déplacement de tension au niveau des interrupteurs de puissance. La figure (III.3) montre la structure réalisée par [1] et la figure (III.4) montre la structure améliorée.



Figure(III.3): Photo d'onduleur de tension triphasé réalisé par [1].

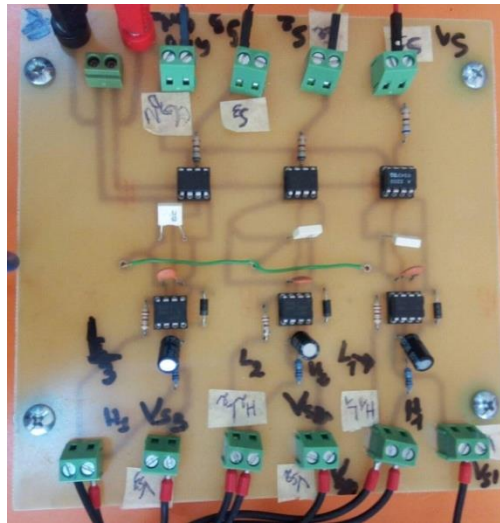


Figure(III.4): Photo d'onduleur de tension triphasé amélioré.

III.2.3 Circuit de pilotage et de protection du IGBT

Afin de piloté l'onduleur nous avons utilisé une carte de pilotage disponible au labo [1]. Cette carte permet d'adapter le niveau de tension des signaux PWM (0.3,3V) générés par la carte DSP au niveau de tension et de courant requis pour la commutation des IGBT (15V ,10mA . la carte est réalisé à base d'optocoupleur HCPL2200 [7] et le driver IR2111 [8]. En plus de la fonction d'adaptation, le driver IR2111 permet de générer également les trois signaux complémentaires avec un temps mort égal à (650ns).

La figure (III.5) montre une photo de la carte de pilotage d'onduleur.



Figure(III.5): Photo de carte d'isolation et pilotage réalisée.

III.2.4 Alimentation $\pm 15V$

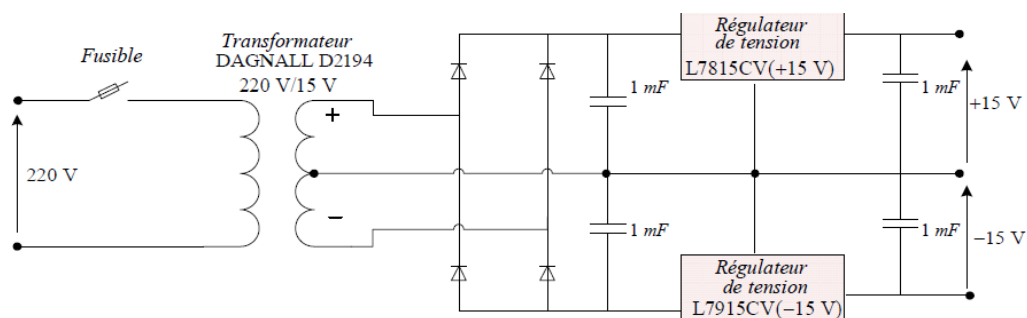
Pour alimenter les différentes cartes électroniques telles que les cartes de mesure, la carte de conditionnement et les drivers IGBT, à partir d'une source d'alimentation nous avons réalisé une alimentation bipolaire $\pm 15V$ via une carte d'alimentation qui est illustrée sur la Figure(III.6).



Figure (III.6): Photo de carte d'alimentation $\pm 15 V$.

La configuration de base de cette carte est basée sur un transformateur ($220V / 15V$) suivi d'un pont redresseur à diode, de condensateurs filtrants $1mF$ et de deux régulateurs de tension

L7815CV[10] et L7915CV[11]. Le schéma de circuit de la carte est indiqué dans la Figure(III.7) [4]:



Figure(III.7):Schéma du circuit d'alimentation continue +15, -15V

III.2.5 Banc du condensateur

Afin d'utiliser la valeur de la capacité nécessaire pour filtrer la tension de sortie nous avons branché plusieurs condensateurs non polarisés comme le montre la figure (III.8).



Figure(III.8) : Photo du banc de condensateurs réalisé.

III.2.6 Inductance du filtre

Après les dimensionnement du filtre, nous avons utilisé trois inductances de valeur $2mH$ et résistance interne 0.2Ω disponible au labo, la figure (III.9) montre les trois inductances utilisée avec le banc de condensateur pour réaliser le filtre LC.



Figure (III.9) photo des inductances.

III.2.7 Carte de mesure de tension

Nous avons réalisé une carte de mesure à base de capteur LV25-P [12] pour mesurer les tensions requises, la figure (III.10) représente la carte de mesure de tension réalisée.

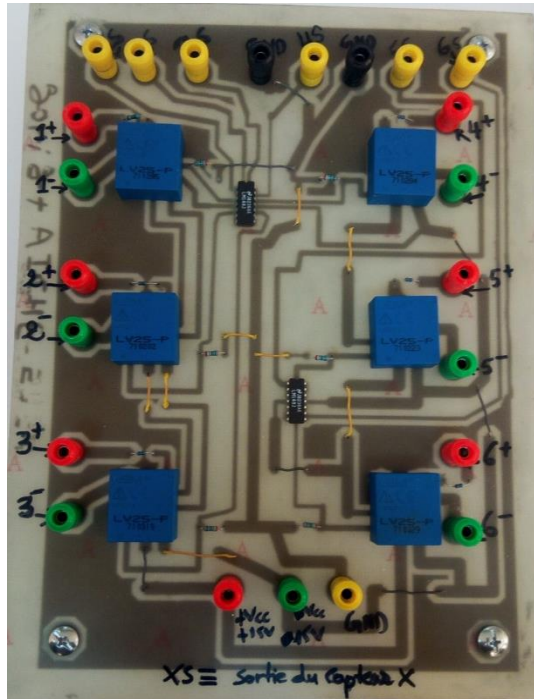


Figure (III.10): Carte de mesure des tensions.

Le capteur a un rapport de conversion compris entre 1000 et 2500 et une tension mesurée jusqu'à 500V [12]. Le circuit utilisé pour adapter les signaux d'entrée et de sortie du capteur LV25-P est illustré à la figure (III.11).

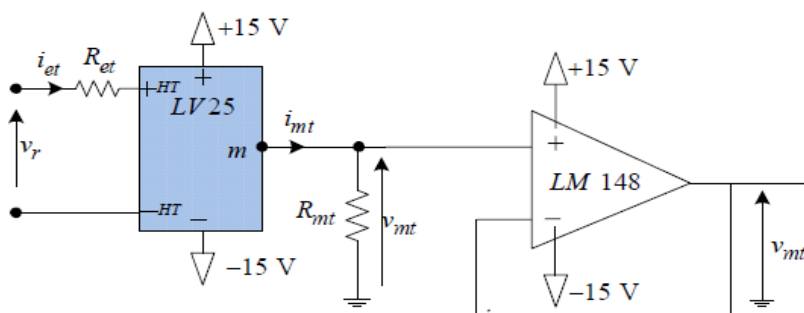


Figure (III.11) Schéma du circuit électrique utilisé la mesure des tensions.

Le capteur LV25-P produit un courant de sortie i_{mt} proportionnel à la tension réelle mesurée v_r dont sa valeur maximale est $i_{mt}(max) = 25mA$. Ensuite, ce courant (i_{mt}) est converti en une tension v_{mt} en utilisant une simple résistance de précision R_{mt} dont sa valeur est dimensionnée selon la tension maximale $v_{mt}(max)$ désirée à la sortie du capteur. Tandis que la

résistance à l'entrée du capteur R_{et} est dimensionnée pour que le courant d'entrée du capteur i_{et} ne dépasse pas la valeur donnée par le constructeur $10mA$ [4].

Pour notre cas, on désire que la tension de sortie maximale ne dépasse $5V$, alors :

$$v_{mt}(max) = 5V, \text{ alors } R_{mt} = 5V / 25mA = 200\Omega.$$

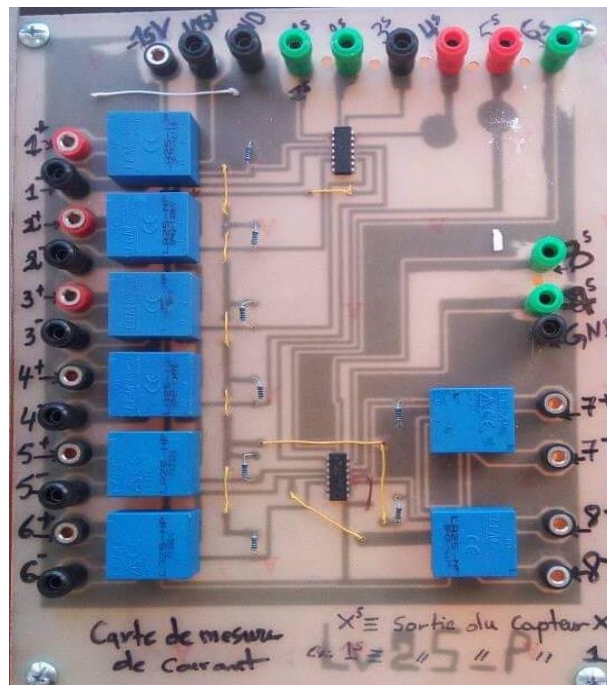
D'un autre côté, si on choisit la tension maximale à mesurer $v_r(max) = 20V$, la résistance R_{et} est calculée par: $R_{et} = 20V / 10mA = 2K\Omega$.

Finalement, la valeur réelle de la tension mesurée est calculée par la relation suivante:

$$v_r = v_{mt} \frac{v_r(max)}{v_{mt}(max)} = 4v_{mt} \tag{III.1}$$

III.2.8 Carte de mesure des courants

Pour mesurer les courants, une carte de mesure à base de capteurs LEM-LA 25-NP [13] à effet Hall a été réalisée la figure (III.12). La figure (III.13) montre le circuit électrique utilisé pour adapter les signaux à l'entrée et à la sortie du capteur LA-25NP.

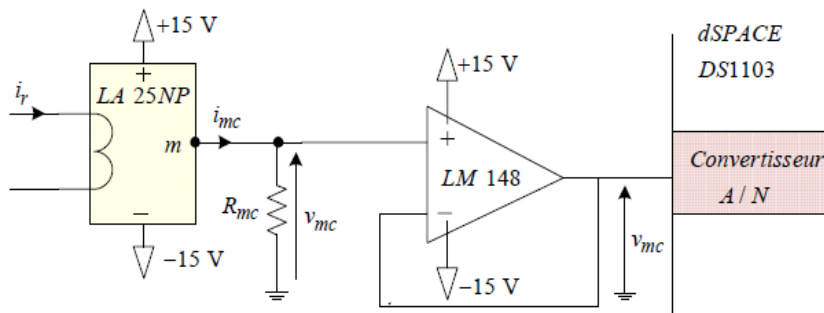


Figures (III.12): carte de mesure des courants réalisée.

Comme montre la figure (III.12), le capteur LA-25NP produit un courant i_{mc} proportionnel au courant réel i_r avec un rapport de conversion configurable (1/1000, 2/1000, 3/1000, 4/1000, ou 5/1000. La valeur maximale du courant de sortie dépend du gain choisi, par exemple un gain de 1/1000 correspond à un courant $i_{mc}(max) = 25mA$. La valeur du courant i_{mc} est ensuite convertie en une tension v_{mc} à travers une résistance de précision R_{mc} placée à la sortie du capteur. La valeur de cette dernière est dimensionnée selon la tension maximale désirée à la sortie du capteur $v_{mc}(max)$ [4].

Pour notre cas, nous avons choisi un gain de 1/1000, et une tension à la sortie du capteur n'excède pas le 5V, alors la résistance de mesure est $R_{mc} = 5V / 25mA = 200\Omega$. Ainsi la valeur du courant réel mesuré est calculée théoriquement par la relation suivante:

$$i_r = v_{mc} \frac{i_{mc}(max)}{v_{mc}(max)} 1000 = 5i_{mt} \quad (III.2)$$



Figures(III.13) : Schéma électrique utilisé pour la chaîne de mesure des courants.

III.2.9 Carte d'adaptation des signaux de mesure

Afin de conditionner le niveau de tension des signaux de mesure $[-5V, 5V]$ au niveau de tension admissible par les convertisseurs Analogique/Numérique de la carte DSP $[0, 3V]$, nous avons réalisé deux carte (figure III.14) permettant de réaliser cette tâche. La figure (III.15) montre le circuit électrique utilisé pour adapter les niveaux des signaux de mesure.

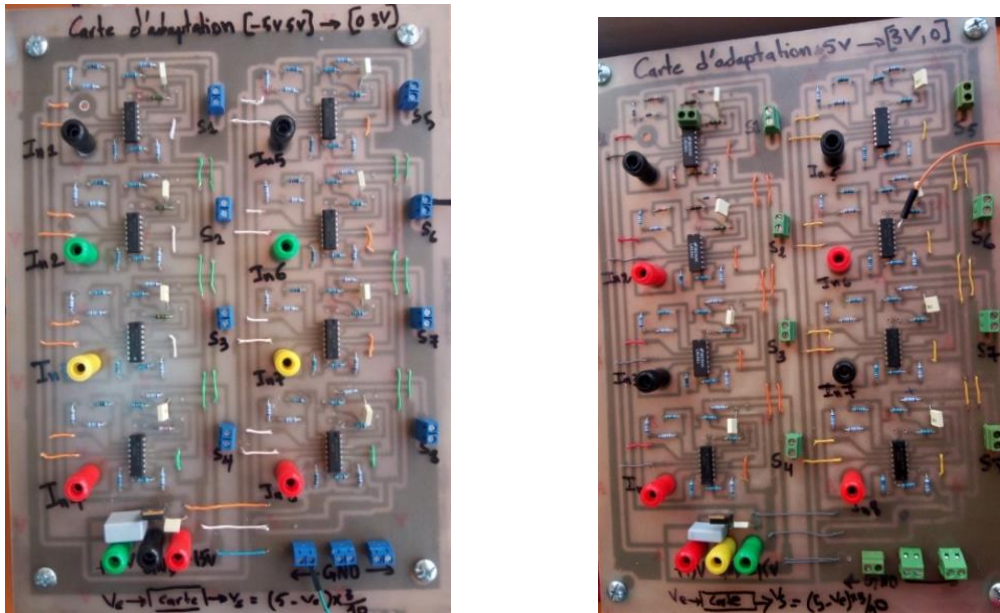


Figure (III.14): Carte d'adaptation des signaux de mesure.

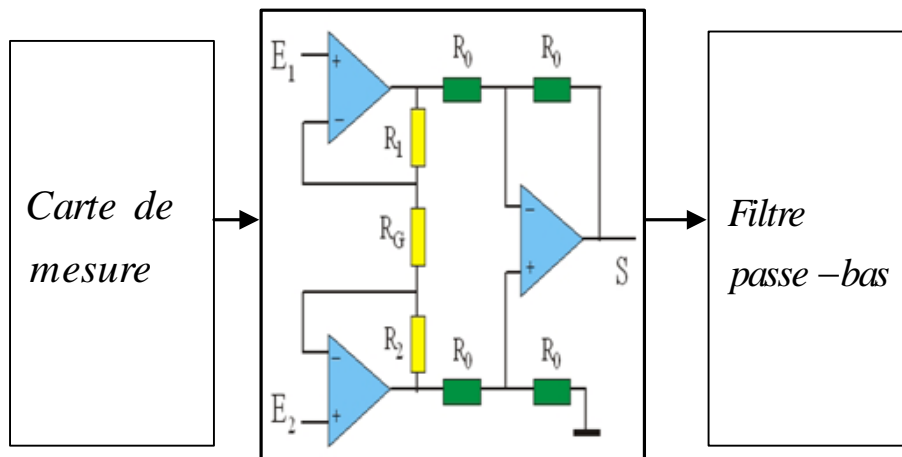


Figure (III.15): Schéma du circuit d'adaptation d'un signal.

La fonction de transfert de l'amplificateur est donné par :

$$V_S = \frac{R_2}{R_G} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) (E_2 - E_1) \quad (III.3)$$

La fonction de transfert d'un filtre passe-bas est donné par

$$f = \frac{1}{2\pi RC} = 100Hz \quad (III.4)$$

Dans notre nous avons opté les valeurs suivantes :

$$E_2 = 5V, E_1 = \text{Input } [-5V, 5V], \text{ le rapport } \frac{R_2}{R_G} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) = \frac{3}{10}$$

III.3 Résultats expérimentaux

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

Afin de valider pratiquement l'algorithme de la modulation vectorielle pilotant l'onduleur de tension, nous avons utilisé le banc d'essai de la figure (III.1). Afin de vérifier le nombre de niveaux de tension de différentes formes, nous n'avons pas branché le filtre LC.

Les figures (III.16) et (III.17) présentent les formes d'onde des tensions simple et les tensions composées générées par l'onduleur pour une tension référence (18V).

D'après la figure (III.16), on constate que la tension simple présente cinq (05) niveaux $(\frac{-2V_{dc}}{3}, \frac{-V_{dc}}{3}, 0, \frac{V_{dc}}{3}, \frac{2V_{dc}}{3})$ ce qui valide l'algorithme de la SVM développé.

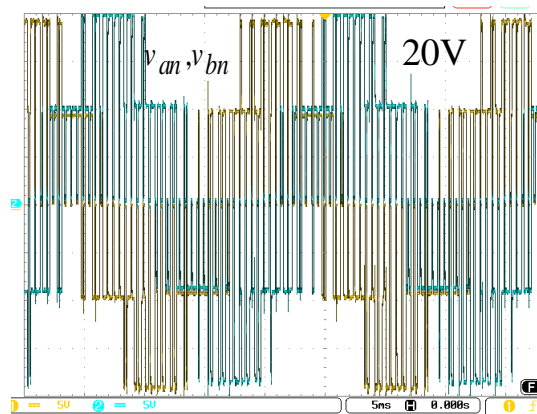


Figure (III.16) : Formes d'ondes de deux tensions simples, tension de référence d'amplitude de 18V.

D'après la figure (III.17), on constate que les forme d'ondes de tension composées $(v_{ab}), (v_{ca})$ présentent trois niveaux $(-v_{dc}, 0, v_{dc})$ ce qui valide également l'implémentation de notre algorithme SVM par la carte DSP.

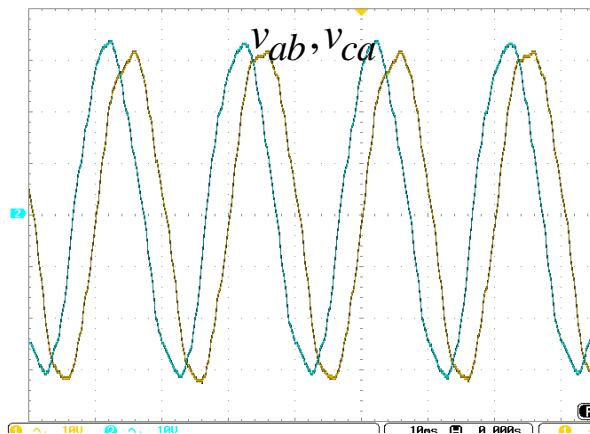


Figure (III.17) : Formes d'ondes de deux tensions composées, tension de référence d'amplitude de 18V.

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

Dans ce test, nous avons utilisé le filtre LC, la (Figure III.18) présentent les formes d'onde de deux tensions simple et composé pour une tension de référence (18V). D'après cette figure, nous pouvons clairement constater que les tensions simples ont des formes sinusoïdales et de fréquence 50Hz ce qui valide d'un côté le dimensionnement du filtre LC et la structure d'onduleur et l'algorithme de modulation vectorielle d'un autre côté.

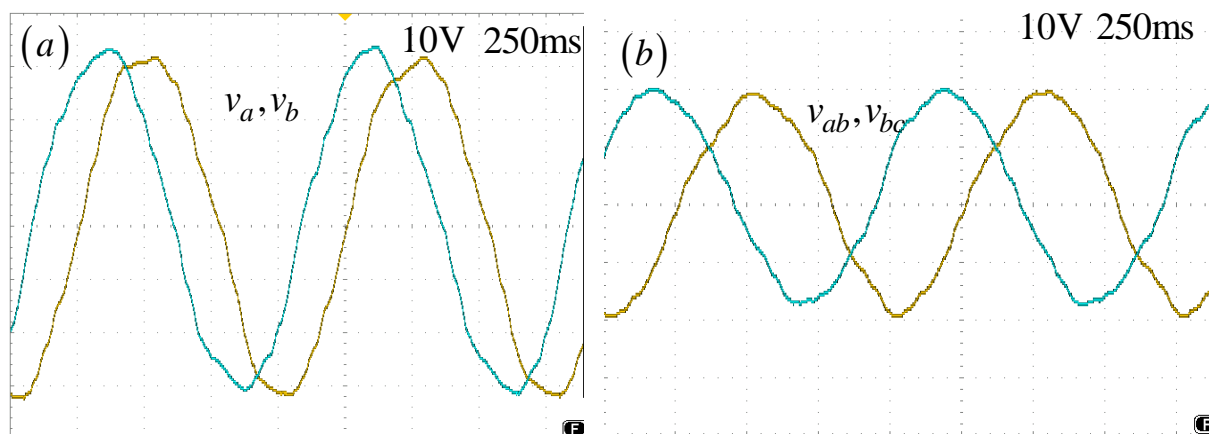


Figure (III.18) : Formes d'ondes de deux tensions simple et composé de référence d'amplitude de 18V d'un onduleur de tension triphasé débite une charge résistive via un filtre LC (a) Tension simple, (b) deux tensions composées.

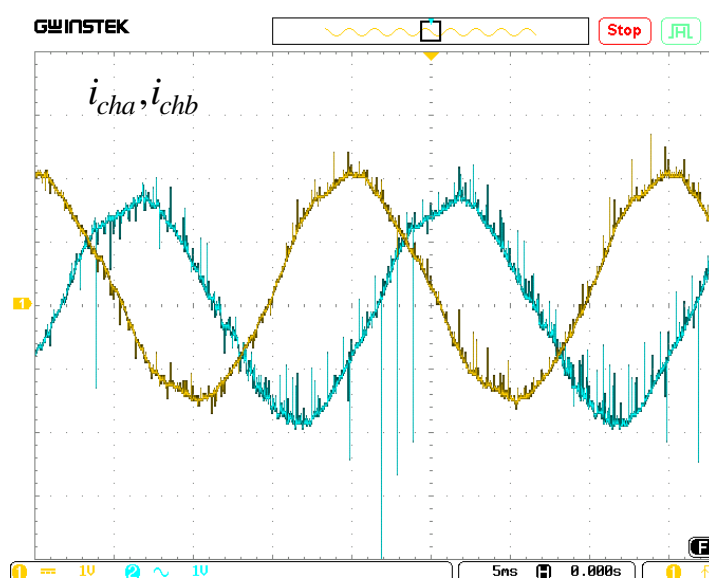


Figure (III.19) : Formes d'ondes de deux courants de charge.

III.4.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'implémentation d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux. En premier temps, nous avons présenté en détail le banc d'essai utilisé pour la validation. Ensuite, nous avons présenté et commenté les différentes formes d'ondes des tensions générées par l'onduleur avec et sans filtre LC. Les résultats obtenus, ont été en conformité avec la théorie et valide la réalisation de la structure d'onduleur, le dimensionnement du filtre LC et l'implémentation de l'algorithme de la modulation vectorielle sur la carte DSP.

Conclusion générale

L'utilisation des convertisseurs statiques dans l'industrie est devenue un champ extrêmement vaste, parmi ces convertisseurs, les onduleurs triphasés de tension qui sont très utilisés et touchent beaucoup de domaines. La fonction principale de l'onduleur de tension est de convertir une continue à une tension alternative réglable en termes de d'amplitude et de fréquence.

Le but de notre travail est l'étudier expérimentalement la réalisation et le contrôle d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux en focalisant sur la modulation vectorielle. Le travail est organisé en trois chapitres.

Le premier chapitre commence par des généralités sur les onduleurs de tension. Ensuite, une étude détaillée sur l'onduleur triphasé à deux niveaux à été présenté. L'étude touche principalement la structure et le principe de fonctionnement de l'onduleur, la modélisation mathématique dans le repère stationnaire triphasé (abc), le repère stationnaire biphasé ($\alpha\beta$) et le repère synchrone (dq). Dans la dernière partie de ce chapitre nous avons présenté les différentes étapes qui permettent de développer l'algorithme de la modulation vectorielle telles que la localisation du vecteur de référence, le calcul des temps d'application des vecteurs de tension, la distribution des vecteurs de tension et leur temps d'application.etc.

Dans la deuxième partie nous avons focalisé notre étude sur la commande de l'onduleur triphasé à deux niveaux. Une structure de commande à base de modulation vectorielle et les régulateurs PI à été proposée pour contrôler un système se compose d'un onduleur de tension, filtre LC, et une charge RL. Afin de tester les performances de commande synthétisée, 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 montrent de bonnes performances en termes de la poursuite de la tension de référence et la fréquence de la tension de sortie.

Dans le dernier chapitre, nous avons présenté une validation expérimentale d'un onduleur de tension triphasé piloté par la modulation vectorielle. En premier temps, nous avons présenté les différents organes du banc d'essai utilisé pour la validation (onduleur de tension triphasé à deux niveaux, carte DSP TMS320F28335, filtre LC, charge résistive, carte de pilotage, deux cartes d'adaptations, cartes de mesures de tension et de courant). Ensuite, nous avons vérifié pratiquement l'algorithme de la modulation vectorielle où les résultats obtenus sont confirmé d'un côté notre étude théorique et les cartes réalisées d'un autre coté.

Bibliographie

- [1] ABDELAZIZ. Saad, "Commande et implémentation d'un onduleur de tension triphasé " Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf-M'sila, 2019.
- [2] OKBAOUI Sidiali. CHAIN Moncef, " Réalisation et commande d'un onduleur triphasé à deux niveaux", Mémoire de Master, Université Amer TELIDJI -LAGHOUAT 2019.
- [3] BOUKAROURA. Abdelkader, "Modélisation et diagnostic d'un onduleur triphasé par l'approche Bond-Graph", Magister en Electrotechnique, Université Ferhat Abbas- Sétif 2009.
- [4] ZORIG. Abdelmalik, " Commandes non linéaires d'une source décentralisée photovoltaïque a base de convertisseurs de puissance entrelacés et parallèles", Thèse de Doctorat, Université Amer TELIDJI - LAGHOUAT 2017.
- [5] MANSOURI Abdallah, " Commandes des onduleurs multi-niveaux", Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf-M'sila 2016.
- [6] Fiche technique "IGBT power electronics teaching system principle for sizing power converters,"fournie par le fabricant (société Semikrone), site web : <https://www.semikron.com/>.
- [7] Fiche technique de l'optocoupleur HCPL 2200, fournie par le fabricant (BROADCOM LIMITED), site web : www.broadcom.com.
- [8] Fiche technique du driver IR2111, fournie par le fabricant (Infineon Technology), site web : www.infineon.com.
- [9] Fiche technique du DSP TMS320F28335, fournie par le site web : www.ti.com.
- [10] Fiche technique du L7815CV, fournie par le site web :
- [11] Fiche technique du L7915CV, fournie par le site web :
- [12] Fiche technique du capture du tension LV25-P, fournie par le fabricant (société LEM), site web : www.lem.com.
- [13] Fiche technique du capture du courant LEM-LA 25-NP, fournie par le fabricant (société LEM), site web :www.lem.com.

Résumé

L'onduleur de tension est utilisé largement dans l'industrie et dans les systèmes de production d'énergie renouvelable. Les travaux de ce mémoire portent une étude détaillée sur onduleur de tension triphasé à deux niveaux (modélisation, dimensionnement, contrôle et implémentation). Premièrement, le modèle mathématique de l'onduleur est développé dans trois repères abc , $\alpha\beta$ et dq . Ensuite, une structure de commande à base des régulateurs PI et la modulation vectorielle à été développée et validée par simulation. Enfin, un banc d'essai équipé d'un onduleur de tension, filtre LC, cartes de mesures, cartes de pilotage et de protection à été présenté et utilisé ensuite pour valider la structure de commande synthétisée.

Mots clés: onduleur de tension triphasé à deux niveaux, modulation vectorielle, régulateur PI, Filtre LC, cartes de pilotage et de protection.

Abstract

The voltage inverter is widely used in industry and in renewable energy systems. The work of this Master thesis focused on three-phase two-level voltage inverter (modeling, sizing, control and implementation). First, the analytical model of the inverter is developed in three reference frames abc , $\alpha\beta$ and dq . Then, a control structure based PI controller and Space vector modulation is developed and validated through simulation task. Finally, an experimental platform equipped with a three-phase voltage inverter, LC filter, measurement cards, control and protection cards is presented and used to validate the synthesized control structure.

Key-words: Three-phase two-level voltage inverter, Space vector modulation, PI controller, LC filter.

ملخص

يستخدم مومج الجهد على نطاق واسع في الصناعة وأنظمة إنتاج الطاقة المتجددة. تتضمن هذه الأطروحة دراسة مفصلة لمومج ثلاثي الطور ذو مستويين (إعداد النموذج الرياضي، تحديد قيم مختلف العناصر الكهربائية، إعداد برامج التحكم وكذلك التجسيد التطبيقي). أولاً، تم إعداد النموذج الرياضي لمومج ثلاثي الطور ذو مستويين وذلك في ثلاث معالم مختلفة $\alpha\beta$ ، abc و dq . بعد ذلك، تم إعداد برنامج التحكم يعتمد على PI Controller و Space Vector Modulation و كذلك التحقق من صحتها بالمحاكاة. أخيراً، تم انجاز أرضية تطبيقية مزودة بمومج الجهد ثنائي المستوى ثلاثي الطور، LC filtre، لوحات قياس، لوحات تحكم وحماية و استعملت فيما بعد للتحقق من صحة بنية التحكم المركب.

الكلمات المفتاحية: مومج الجهد ثنائي المستوى ثلاثي الطور، تقنية Space Vector Modulation، filtre LC، PI Controller.