

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

Faculté des Sciences de Technologie
Département d'Electronique



Domaine : Sciences technologiques
Filière : Electronique

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de Master
Option : Instrumentation

Thème :

**Commande d'un Onduleur Monophasé
avec Elimination d'Harmonique
à base du Microcontrôleur PIC 18F4431**

Réalisé par :

- MEFTAH Saber
- BELHADJ Islam

Encadré par :

- Pr. MEZACHE Amar
- Dr. OUDIRA Houssine

Année universitaire : 2019/2020

Remerciements :

En premier lieu nous tenons à manifester nos louanges à Dieu le tout puissant par aisance et excellence, de nous avoir donné la force et la patience de réaliser ce travail.

*Nous tenons particulièrement à remercier chaleureusement notre encadreur Pr. **Mezache Amar** et notre Co-encadreur Dr. **Oudira Houcine** pour nous avoir accompagné toute au long de ce travail et pour son guide.*

*Nous adressons nos remerciements aux membres de jury Dr. **Benahcene Madani** et Dr. **Brik Youcef** de nous avoir fait l'honneur de présider le jury et d'évaluer ce travail.*

Nous tenons à remercier également Mr le Chef de département de L'électronique et tous les enseignants qui ont contribué à notre cycle de formation et aussi tout le personnel du Hall de Technologie pour leur serviabilité.

Nous tenons à formuler notre gratitude et nos profondes reconnaissances à l'égard de nos parents pour leurs soutiens durant nos études. A tous les amis (es) qui n'ont pas hésité à nous donner leurs aides.

Enfin on ne peut oublier de remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicaces

*Je remercie dieu de m'avoir donné le courage et la volonté
tout au long de mon cursus.*

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents ;

Mes grands-mères et Mes grands-pères ;

Mes frères ;

Mes sœurs ;

Mes cousins ; Mes cousines ; Mes tantes ; Mes oncles ;

Toute la famille MEFTAH ;

Mes amis (es) ;

Tous les gens qui m'ont soutenu durant mes études.

Dédicaces

*Je remercie dieu de m'avoir donné le courage et la volonté
tout au long de mon cursus.*

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents ;

Mes grands-mères et Mes grands-pères ;

Mes sœurs ;

Mes cousins ; Mes cousines ; Mes tantes ; Mes oncles ;

Toute la famille BELHADJ ;

Mes amis (es) ;

Tous les gens qui m'ont soutenu durant mes études.

Table des matières :

Remerciements	
Dédicas	
Table des matières.....	I
Liste des figures	II
Liste des tableaux.....	III
Introduction Générale.....	1

Chapitre 1 : Onduleurs de Tension Multiniveaux

1. 1 Introduction	5
1. 2 Différentes topologies des onduleurs multi-niveaux.....	6
1.2.1 Onduleur de tension en cascade.....	7
1.2.2 Onduleur de tension à structure NPC.....	7
1.2.3 Onduleur de tension à condensateurs flottants.....	9
1. 3 Comparaison entre les trois topologies des onduleurs	9
1. 4 Onduleurs à élimination d’harmonique.....	11
1.4.1 Commande MLI.....	11
1.4.2 Onduleur MLI monophasé (trois niveaux)	12
1.4.3 Onduleur monophasé 5 niveaux.....	17
1. 5 Méthode d’optimisation de Newton-Raphson.....	21
1. 6 Transformée de Fourier rapide (FFT)	23
1. 7 Conclusion	24

Chapitre 2 : Les microcontrôleurs

2. 1 Introduction	26
--------------------------------	-----------

2. 2 Familles de microcontrôleurs	26
2. 3 Microcontrôleurs de Microchip	28
2.3.1. Interruptions.....	2
2.3.2 Registres.....	28
2. 4 Aperçu sur le microcontrôleur PIC18F4431.....	33
2.4.1 Timers	34
2.4.2 Le module POWER CONTROL PWM	40
2. 5 Conclusion	42

Chapitre 3 : Résultats de Simulations Matlab et Proteus

3. 1 Introduction	44
3. 2 Simulations Matlab	44
3.2.1 Onduleur MLI monophasé.....	44
3.2.2 Onduleur monophasé à 5 niveaux	52
3. 3 Simulations Proteus.....	54
3.3.1 Circuit de commande	54
3.3.2 Circuit de puissance	59
3.3.3 Simulations de l'onduleur MLI en créneau	61
3.3.4 Simulations de l'onduleur à 5 niveaux.....	65
3. 4 Conclusion	68

Chapitre 4 : Résultats Expérimentaux

4. 1 Introduction	70
4. 2 Conception logicielle.....	70
4. 2. 1 Configuration du module ADC.....	70
4. 2. 2 Configuration du module Timer2	71
4. 2. 3 Configuration du module PWM.....	71
4. 2. 4 Configuration du module LCD.....	72

4. 2. 5 Réglage de la fréquence des signaux de commande.....	72
4. 2.6 Réglage de la tension efficace.....	72
4. 3 Conception matérielle	74
4. 3. 1 La carte d'alimentations.....	74
4. 3. 2 La carte de commande	76
4. 3. 3 La carte de puissance	79
4. 3. 4 La charge inductive.....	82
4. 4 Résultats pratiques	84
4. 4. 1 Signaux de sortie.....	85
4. 4. 2 Etude de spectre	91
4. 5 Conclusion	91
Conclusion Générale.....	92

Les références

Annexes

Le résumé

Figure 1. 1 : Schéma de conversion DC/AC et grandeur de sortie.....	5
Figure 1. 3 : Onduleur en cascade à 3 niveaux	6
Figure 1. 2 : Différentes topologies des onduleurs multi-niveaux.....	7
Figure. 1. 4 : Structure monophasée d'un onduleur cascade à cinq niveaux	8
Figure 1. 5 : Onduleurs de structure NPC.....	8
Figure 1. 6 : Onduleurs à condensateurs flottants.....	9
Figure. 1. 7 : Onduleurs à trois niveaux.....	13
Figure. 1. 8 : Signaux de commande des interrupteurs d'un onduleur à trois niveaux	14
Figure. 1. 9 : Motif adopté pour éliminer c-1 harmoniques	17
Figure. 1. 10 : Structure de l'onduleur monophasé à 5 niveaux	18
Figure. 1. 11 : Forme d'ondes de commande et de sortie d'un onduleur 5 niveaux	19
Figure. 1. 12 : Calcul de THD à l'aide de la FFT	24
Figure. 2. 1 : Logique d'interruption	30
Figure. 2. 2 : Architecture des pins de PIC18F4431	34
Figure. 2. 3 : Diagramme de bloc de timer0 en mode 8 bits.....	35
Figure. 2. 4 : Diagramme de bloc de timer0 en mode 16 bits.....	35
Figure. 2. 5 : Diagramme de bloc timer1 en mode 8 bits	36
Figure. 2. 6 : Diagramme de bloc timer1 en mode lecture/écriture 16 bits	37
Figure. 2. 7 : Diagramme de bloc timer2	38
Figure. 2. 8 : Diagramme de bloc TIMER5 (mode lecture/écriture 16 bits affiché).....	39
Figure. 2. 9 : Diagramme de bloc PWM simplifié	40
Figure. 2. 10 : Sortie PWM	41
Figure. 3. 1 : Schéma de blocks principaux du Matlab.....	45
Figure. 3. 2 : Solutions du système (1.5) par la méthode de Newton-Raphson.....	46
Figure. 3. 3 : Schéma de blocks des onduleurs MLI et 5 niveaux monophasé	48
Figure. 3. 4 : Signaux de sortie pour $\alpha_1 = 13$, $\alpha_2 = 51$ et $\alpha_3 = 88$	
(a) Formes d'ondes de la tension et du courant de charge avec $r = 1.00$	
(b) Spectre de la tension de sortie avec un THD = 1.6429	49
Figure. 3. 5 : Signaux de sortie pour $\alpha_1 = 17$, $\alpha_2 = 59$ et $\alpha_3 = 83$	
(a) Formes d'ondes de la tension et du courant de charge avec $r = 0.86$	
(b) Spectre de la tension de sortie avec un THD = 1.0596	50
Figure. 3. 6 : Signaux de sortie pour $\alpha_1 = 24$, $\alpha_2 = 79$ et $\alpha_3 = 86$	

(a) Formes d'ondes de la tension et du courant de charge avec $r = 0.66$	
(b) Spectre de la tension de sortie avec un THD = 0.5334	51
Figure. 3. 7 : Solutions du système (1.9) par la méthode de Newton-Raphson.....	52
Figure. 3. 8 : Signaux de sortie pour $\theta_1 = 26$ et $\theta_2 = 34$	
(a) Formes d'ondes de la tension et du courant de charge avec $r = 1.1$	
(b) Spectre de la tension de sortie avec un THD = 0.2517	55
Figure. 3. 9 : Signaux de sortie pour $\theta_1 = 5$ et $\theta_2 = 65$	
(a) Formes d'ondes de la tension et du courant de charge avec $r = 0.9$	
(b) Spectre de la tension de sortie avec un THD = 0.2966	56
Figure. 3. 10 : Signaux de sortie pour $\theta_1 = 22$ et $\theta_2 = 82$	
(a) Formes d'ondes de la tension et du courant de charge avec $r = 0.68$	
(b) Spectre de la tension de sortie avec un THD = 0.3250	57
Figure. 3. 11 : Circuit électrique de la commande des onduleurs.....	59
Figure. 3. 12 : Circuit électrique de puissance (onduleurs)	61
Figure. 3. 13 : Signaux de sortie pour $\alpha_1 = 13$, $\alpha_2 = 51$ et $\alpha_3 = 88$	
(a) Signaux de commande des transistors « high-side)	
(b) Formes d'ondes de la tension et du courant de charge avec $r = 0.66$	62
Figure. 3. 14 : Signaux de sortie pour $\alpha_1 = 17$, $\alpha_2 = 59$ et $\alpha_3 = 83$	
(a) Signaux de commande des transistors « high-side)	
(b) Formes d'ondes de la tension et du courant de charge avec $r = 0.86$	63
Figure. 3. 15 : Signaux de sortie pour $\alpha_1 = 24$, $\alpha_2 = 79$ et $\alpha_3 = 86$	
(a) Signaux de commande des transistors « high-side)	
(b) Formes d'ondes de la tension et du courant de charge avec $r = 1$	64
Figure. 3. 16 : Signaux de sortie pour $\theta_1 = 24$ et $\theta_2 = 79$	
(a) Signaux de commande des transistors « high-side)	
(b) Formes d'ondes de la tension et du courant de charge avec $r = 1.1$	65
Figure. 3. 17 : Signaux de sortie pour $\theta_1 = 5$ et $\theta_2 = 65$ (a) Signaux de commande des transistors « high-side)	
(b) Formes d'ondes de la tension et du courant de charge avec $r = 0.9$	66
Figure. 3. 18 : Signaux de sortie pour $\theta_1 = 22$ et $\theta_2 = 82$ (a) Signaux de commande des transistors « high-side)	

(b) Formes d'ondes de la tension et du courant de charge avec $r = 0.68$	67
Figure. 4. 1 : Circuit électrique de la carte des alimentations.....	75
Figure. 4. 2 : Circuit imprimé (Typo) de la carte d'alimentations.....	76
Figure. 4. 3 : Circuits électriques de la carte de commande	
(a) Circuit électrique de la carte de commande	
(b) Circuit électrique de l'amplificateur.....	78
Figure. 4. 4 : Typos de la carte de commande	
(a) Carte de commande	
(b) Circuit amplificateur.....	79
Figure. 4. 5 : Connexion détaillé du circuit driver IR2112 avec le PIC et le bras de	
L'onduleur.....	80
Figure. 4. 6 : Circuits électriques de la carte de puissance	81
Figure. 4. 7 : Typos de la carte de puissance	82
Figure. 4. 8 : Charge inductive.....	82
Figure. 4. 9 : Programmateur PICkit 3 de Microship	83
Figure. 4. 10 : Oscilloscope RIGOLE DS1054	83
Figure. 4. 11 : Assemblage des cartes réalisées	84
Figure. 4. 12 : Tension et courant mesurés de l'onduleur MLI avec une fréquence $f = 53\text{Hz}$	
(a) Niveaux faibles	
(b) Niveaux moyens	
(c) Niveaux élevés.....	86
Figure. 4. 13 : Tension et courant mesurés de l'onduleur MLI avec une fréquence $f = 111\text{Hz}$	
(a) Niveaux faibles	
(b) Niveaux moyens	
(c) Niveaux élevés.....	87
Figure. 4. 14 : Tension et courant mesurés de l'onduleur à 5 niveaux avec $f = 64\text{Hz}$	
(a) Niveaux faibles	
(b) Niveaux moyens	
(c) Niveaux élevés.....	88
Figure. 4. 15 : Tension et courant mesurés de l'onduleur à 5 niveaux avec $f = 105\text{ Hz}$	
(a) Niveaux faibles	
(b) Niveaux moyens	
(c) Niveaux élevés.....	89
Figure. 4. 16 : Signaux de commande réels	
(a) Onduleur MLI en créneaux	
(b) Onduleur à 5 niveaux	90

Tableau 1. 1 Nombre des composants nécessaires des différents types des onduleurs à 3 niveaux	10
Tableau 1. 2 Nombre des composants nécessaires des différents types des onduleurs à (m+1) niveaux	10
Tableau. 1. 3 Modes de fonctionnement de l'onduleur à 5 niveaux	19
Tableau. 2. 1: Caractéristiques du PIC de Microchip	29
Tableau. 3. 1 Angles de commutation optimaux trouvés par la méthode de Newton-Raphson du système (1.5)	46
Tableau. 3. 2 Angles de commutation optimaux trouvés par la méthode de Newton-Raphson du système (1.9)	53
Tableau. 3. 3 : Liste du circuit de commande à base du PIC18F4431	58
Tableau. 3. 4 : Liste du circuit de puissance avec la charge inductive	60
Tableau 4. 1 : Fréquences considérées dans notre projet	74
Tableau 4. 2 : Liste des composants de la carte d'alimentations	74
Tableau. 4. 3 : Liste des composants de la carte de commande	76
Tableau. 4. 4 : Liste des composants de la carte de puissance	80
Tableau. 4. 5 : Valeurs de THD utilisant des données simulées et réelles	91

Introduction Générale

L'électronique de puissance concerne l'exploitation des dispositifs à semi-conducteurs en forte puissance permettant de changer la forme de l'énergie électrique (convertisseurs). Elle comprend l'étude, la réalisation et la maintenance des structures de la commande et des applications des convertisseurs d'énergie. Les quatre fonctions de base de conversion d'énergie électrique sont les suivantes [1] :

- Convertisseur AC/DC (redresseurs)
- Convertisseur DC/DC (hacheurs)
- Convertisseur AC/AC (gradateurs ou cyclo-convertisseur)
- Convertisseur DC/AC (onduleurs)

Les onduleurs occupent une place très importante dans les applications industrielles. Ils sont utilisés dans les alimentations de secours à fréquence fixe lors de coupures électriques ou le démarrage des générateurs électriques. Les onduleurs autonomes à fréquence variables sont principalement conçus pour les entraînements à vitesses variables des machines électriques, puisque la majorité des techniques de commande imposent à chaque temps d'échantillonnage une certaine amplitude et une certaine fréquence des courants de sortie de l'onduleur. C'est pourquoi que beaucoup de chercheurs dans ce domaine s'intéressent à la production des signaux performants contenant moins d'harmoniques à la sortie de l'onduleur [2]. La qualité de la tension d'un onduleur est mesurée par un paramètre nommé THD (Total Harmonics Distorsion). On peut contrôler cette grandeur par deux manières ; changement de la structure du circuit onduleur et/ou application d'une technique de commande performante. La commande à modulation de la largeur d'impulsion (MLI) a trouvé une application importante de commande des onduleurs mono et triphasés. Cette approche ne nécessite pas une optimisation des angles de commutation mais elle est produite après une comparaison en temps réel de deux signaux [3]. Le premier est appelé signal porteuse qui a une forme en général en dents de scie et l'autre est un signal de référence basse fréquence. Par le biais de cette commande, les variations instantanées des niveaux de la tension de sortie permettent d'obtenir un courant presque sinusoïdal qui contient une valeur minimale de THD. Une autre façon d'aboutir de bonnes valeurs de THD est de considérer un onduleur de plusieurs niveaux. A titre d'exemple, ceci est réalisé par l'ajout des sources de tension isolées et reliées avec elle par des interrupteurs auxiliaires. Ce système se base sur l'étude du contexte fréquentielle de la

tension de sortie et impose ainsi une optimisation off-line des angles de commutation des transistors de puissance.

Dans ce projet, nous allons réaliser deux types d'onduleurs à élimination d'harmoniques. Le premier est basé sur le pont en H (onduleur monophasé MLI en créneaux) et le deuxième est basé sur la technique de commutation des sources d'entrée (onduleur monophasé à 5 niveaux). Ces deux onduleurs ont des stratégies de commande différentes. La partie théorique de ces onduleurs est bien expliquée dans le cours « Electronique de puissance avancée » de la formation Master 2 en Electronique option Instrumentation. Le microcontrôleur PIC18F4431 est utilisé pour la génération des impulsions de commande des onduleurs. Alors, notre but est d'obtenir en pratique les mêmes signaux de commande et de sortie (tension et courant) présentés en théorie. A cet effet, notre projet s'articule sur les points suivants :

- Développement des codes Matlab et CCS pour l'étude en simulations des onduleurs MLI en créneaux et à 5 niveaux
- Maitrise les environnements Matlab (Simulink), CCS PICC, Proteus et MPLAB.
- Conception matérielle des différents étages (étage d'alimentation, étage de puissance et étage de commande à base du PIC18F4431).
- Calcul de THD en simulation et en pratique.
- Comparaison des signaux expérimentaux et simulés.

Dans ce projet, nous avons effectué plusieurs étapes de conception, commençant par le développement des codes de commande jusqu'à les tests sur les maquettes réalisées.

Le mémoire est organisé en quatre chapitres distincts :

Dans le **Chapitre 1**, nous définirons les onduleurs multi-niveaux et nous énumérerons également leurs types de base. Nous allons aussi aborder le principe de la commande MLI pré calculée appliquée aux onduleurs monophasés. Puis, la commande par élimination d'harmoniques sera détaillée pour le réglage de la fréquence et de la valeur efficace de la tension ondulée à la sortie de l'onduleur monophasé en pont en H. En plus, nous allons évoquer la méthode d'optimisation Newton-Raphson pour déterminer les angles de commutation des semi-conducteurs de puissance (les MOSFETs). On va élaborer aussi une structure qui consiste en pont en H amené par deux interrupteurs auxiliaires pour but de

générer 5 niveaux de la tension de sortie. En effet, les techniques de réglage est fondée sur l'élimination d'harmoniques. L'outil FFT est aussi présenté sous forme d'un code Matlab pour le calcul du THD.

Dans le **Chapitre 2**, nous définissons d'une manière générale les micromoteurs avec leurs familles et leur classification. Après, nous intéressons à montrer les caractéristiques et les modules du microcontrôleur PIC18F4431 que nous avons utilisé dans ce projet. En particulier, nous déclarons que ce type de microcontrôleur dispose la génération de huit signaux MLI réglables en complémentarité, en fréquence, en rapport cyclique et en temps mort utilisés dans les applications de la commande et de la conversion d'énergie électrique.

Dans le **Chapitre 3**, nous allons faire une commande des angles de commutations de l'onduleur MLI en créneaux et l'onduleur à 5 niveaux. Ceci est accomplit par l'optimisation de deux systèmes d'équations non-linaires à trois et deux variables. Avant de faire la plateforme matérielle, il est souhaitable d'effectuer dans ce chapitre les simulations Matlab et Proteus. A cet effet, en se basant sur les programmes développés ainsi que les outils de développement utilisés. Pour évaluer la qualité du convertisseur d'énergie, le THD est calculé par le biais de l'algorithme FFT.

Dans le **Chapitre 4**, nous allons essayer de mettre en évidence l'aspect pratique de ce que nous avons vu dans les chapitres précédents. Ce qui fait que ce travail a été divisé en deux parties, la réalisation de la maquette matérielle et les résultats obtenus sur le système réel via un oscilloscope numérique. La conception logicielle concerne les techniques de configuration de quelques modules du microcontrôleur PIC18F4431. Puis, nous montrons les détails des étapes de réalisation de chaque étage à savoir le circuit d'alimentations, le circuit de puissance et le circuit de commande.

Enfin, une conclusion générale est présentée qui résume les résultats essentiels trouvés dans ce projet.

Onduleurs de Tension Multi-niveaux

Sommaire du Chapitre :

1. 1 Introduction.....	5
1. 2 Différentes topologies des onduleurs multi-niveaux.....	6
1. 3 Comparaison entre les trois topologies des onduleurs	9
1. 4 Onduleurs à élimination d'harmonique	11
1. 5 Méthode d'optimisation de Newton-Raphson.....	20
1. 6 Transformée de Fourier rapide (FFT)	22
1. 7 Conclusion.....	24

Résumé du Chapitre :

Dans ce chapitre, nous définirons les onduleurs multi-niveaux et nous énumérerons également leurs types de base. Nous allons aussi aborder le principe de la commande MLI pré calculée appliquée aux onduleurs monophasés. Puis, la commande par élimination d'harmoniques sera détaillée pour le réglage de la fréquence et de la valeur efficace de la tension ondulée à la sortie de l'onduleur monophasé en pont en H. En plus, nous allons évoquer la méthode d'optimisation Newton-Raphson pour déterminer les angles de commutation des semi-conducteurs de puissance (les MOSFETs). On va élaborer aussi une structure qui consiste en pont en H amené par deux interrupteurs auxiliaires pour but de générer 5 niveaux de la tension de sortie. En effet, les techniques de réglage est fondée sur l'élimination d'harmoniques. L'outil FFT est aussi présenté sous forme d'un code Matlab pour le calcul du THD.

1. 1 Introduction

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC). En fait, cette conversion d'énergie est satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (semi-conducteurs). Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande (voir [Figure. 1. 1](#)). Cette tension peut comporter un ou plusieurs créneaux par alternance suivant qu'il s'agit d'une commande à un créneau par alternance ou d'une commande MLI (Modulation de Largeur d'Impulsions) ou PWM (Pulse With Modulation) [\[8\]](#).

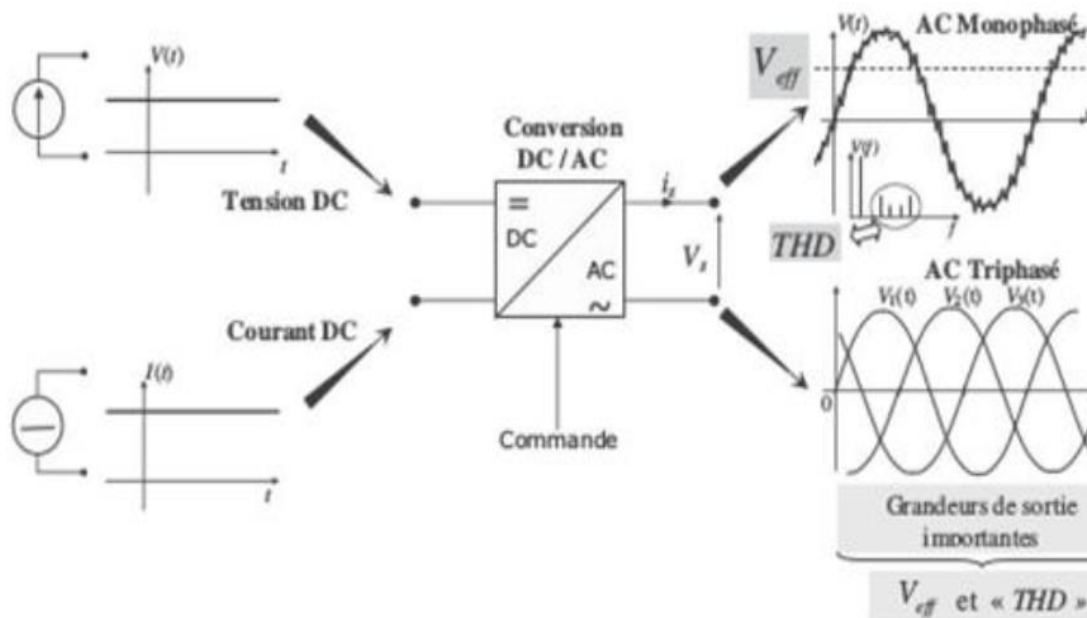


Figure 1. 1 : Schéma de conversion DC/AC et grandeur de sortie [\[2\]](#).

Dans les dernières décennies, l'évolution croissante des calibres en tension et en courant des semi-conducteurs de puissance a incité le marché des convertisseurs statiques de puissance spécialement dédiés aux applications de moyennes et de fortes puissances, l'apparition ainsi de nouvelle topologie des convertisseurs technologies utilisées en développement et en fabrication des interrupteurs de puissance. Tels que les onduleurs multi-niveaux qui ont contribué à l'évolution à conversion d'énergie électrique dans les applications

haute, moyenne et basse puissance, car ils présentent les avantages d'une faible distorsion harmonique, et une plus grande efficacité par rapport aux onduleurs classiques [3].

Le concept d'onduleur multi-niveaux avait commencé en 1975 pour surmonter l'inconvénient des onduleurs à deux niveaux (onduleur de source de tension qui produisent une sortie à deux niveaux, c'est-à-dire $+E$ et $-E$ ayant plus de contenu d'ondulation) et aussi réduire les ondulations de la tension de sortie (voir Figure. 1. 2). Ce type d'onduleur (à deux niveaux) présente quelques inconvénients le plus remarquable est que la tension de sortie est très riche en harmoniques, ce qui entraîne un mauvais fonctionnement de la charge, et engendre quelques inconvénients tels que l'échauffement supplémentaire, la diminution du facteur de puissance et le vieillissement rapide de la machine [4]. Un autre inconvénient est que ces onduleurs sont limités en tension et en puissance. Afin de palier à ces limitations, les onduleurs multi-niveaux ont été introduits dans le domaine des puissances fortes [7].

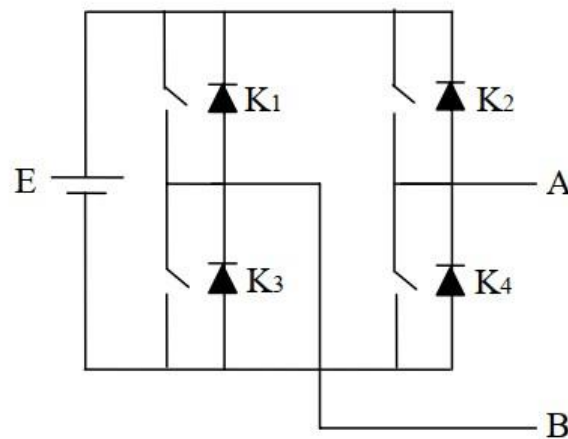


Figure 1. 2 : Onduleur en cascade à 3 niveaux [7]

Un onduleur multi-niveau utilise la technique MLI à fréquence de commutation élevée. Les onduleurs multi-niveaux peuvent être classés comme montré par la Figure. 1. 3.

1. 2 Différentes topologies des onduleurs multi-niveaux

Un convertisseur statique est dit « multi-niveaux » lorsqu'il génère une tension découpée de sortie composée d'au moins trois niveaux. Ce type de convertisseur présente essentiellement deux avantages. D'une part, les structures multi-niveaux permettent de limiter les contraintes en tension subies par les interrupteurs de puissance, chaque composant,

lorsqu'il est à l'état bloqué, supporte une fraction d'autant plus faible de la pleine tension de bus continu que le nombre de niveaux est élevé. D'autre part, la tension de sortie délivrée par les convertisseurs multi-niveaux présente des qualités spectrales intéressantes [5].

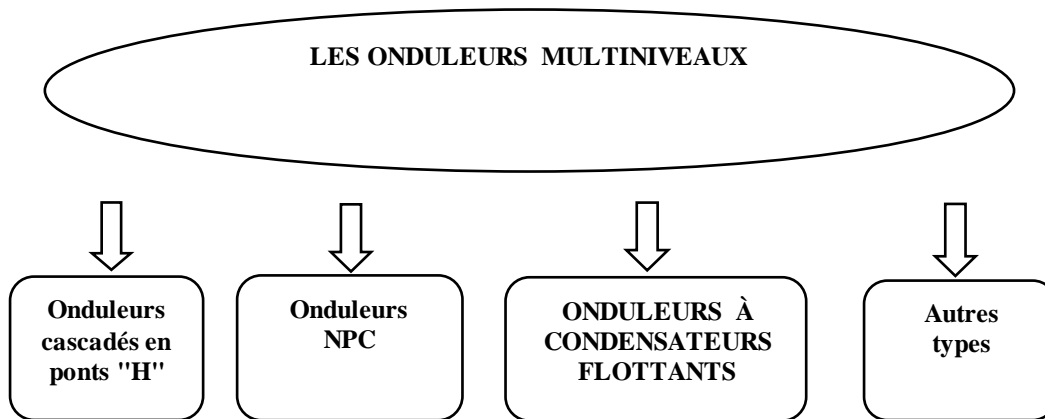


Figure 1. 3 : Différentes topologies des onduleurs multi-niveaux.

1. 2. 1 Onduleur de tension en cascade

Le premier modèle d'onduleur était l'onduleur en pont H, apparu en 1975. Un progrès des onduleurs multiniveaux a été dû au modèle en pont H cascadié en sérié (voir [Figure. 1. 4](#)). La première application d'onduleur en pont H était pour la stabilisation des plasmas en 1988. Les sorties des onduleurs en pont sont connectées en série de telle sorte que l'onde de la tension synthétisée soit la somme des tensions de sortie. L'avantage majeur de cette approche est que le nombre de paliers sur le motif de la tension de sortie peut être augmenté sans aucun ajout de nouveaux composants. L'utilisation de cellules de conversion de puissance en série permet d'accroître le nombre de niveau de tension et de puissance du convertisseur. Mais l'inconvénient Majeur de cette topologie est le grand nombre de tensions continues isolées exigées pour chaque pont [6].

1. 2. 2 Onduleur de tension à structure NPC

Cette topologie a été présentée la première fois par Nabae et Akagi en 1981. Elle avait pour but d'ajouter un niveau de tension intermédiaire à la tension de sortie d'un onduleur afin de réduire les harmoniques. La [Figure 1. 5](#) montre un convertisseur NPC trois niveaux et cinq niveaux. Ainsi que les séquences de fonctionnement du convertisseur. Dans le cas d'un seul

bras, le point milieu entre les deux capacités permet de diviser la tension d'entrée E en deux niveaux, ainsi, à l'aide des interrupteurs, la tension de sortie pourrait être E , $E/2$ ou 0 .

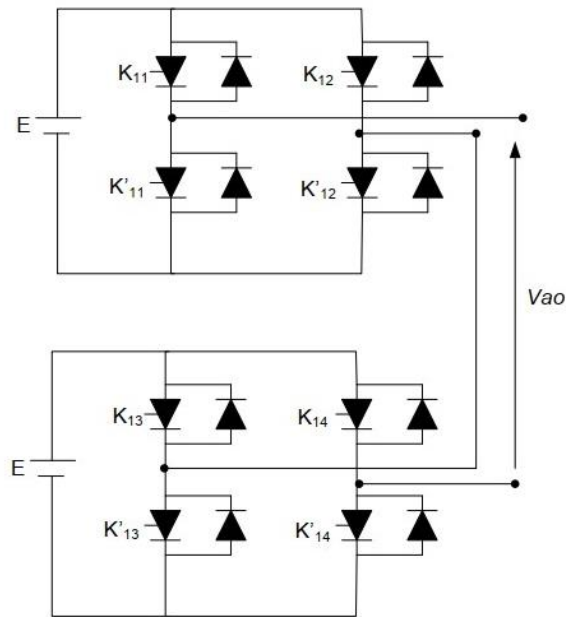
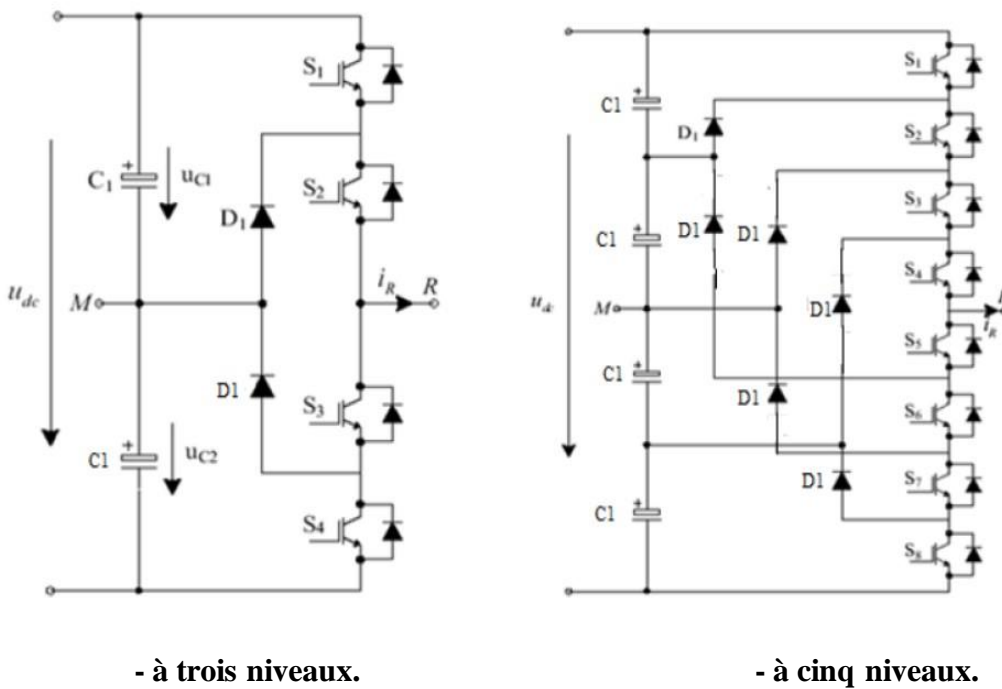


Figure. 1. 4 : Structure monophasée d'un onduleur cascade à cinq niveaux.



- à trois niveaux.

- à cinq niveaux.

Figure 1. 5 : Onduleurs de structure NPC [2]

1. 2. 3 Onduleur de tension à condensateurs flottants

Dans la topologie multi niveaux proposée par T. Meynard et H. Foch en 1992. La structure de ce convertisseur est similaire à celle de l'onduleur à diode de bouclage sauf qu'au lieu d'utiliser des diodes de blocage, l'onduleur utilise des condensateurs à leur place. D'où l'appellation « Onduleur à condensateurs flottants ». Cette structure est proposée pour résoudre d'une part le problème de balancement de tension, et d'autre part le nombre excessif des diodes (voir Figure. 1. 6) [5].

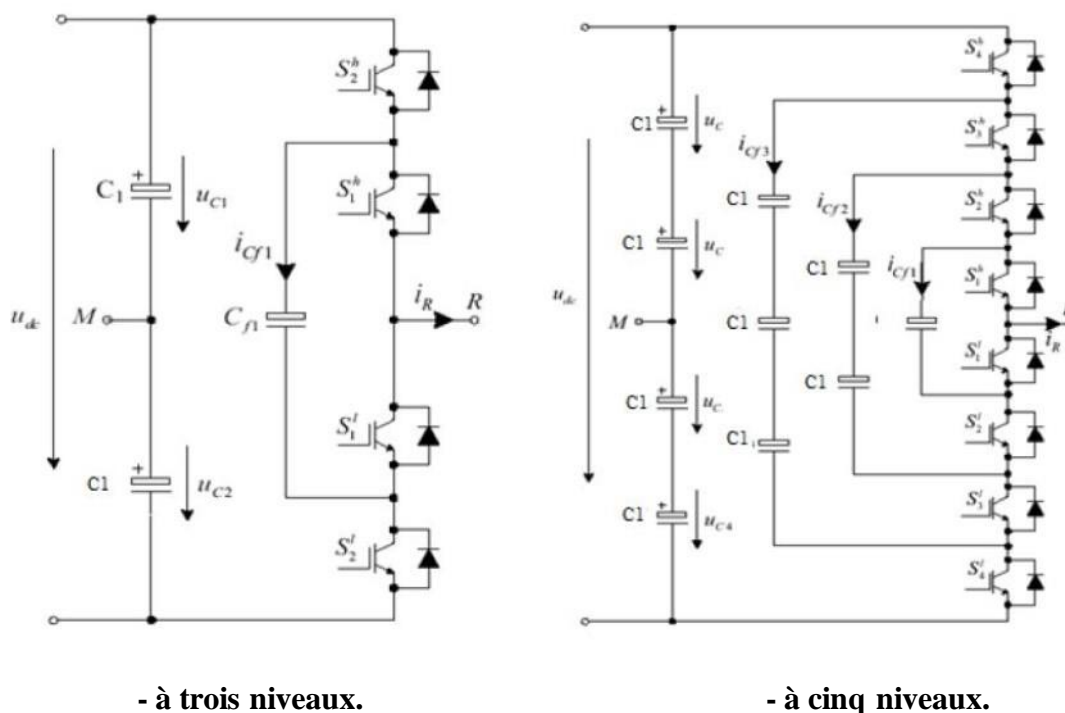


Figure 1. 6 : Onduleurs à condensateurs flottants [2]

1. 3 Comparaison entre les trois topologies des onduleurs principales

On va faire une comparaison entre le nombre du composant pour une réalisation de chaque structure de trois topologies principales des onduleurs multi-niveaux. En utilisant pour cela les Tableaux. 1. 1 et 1. 2. Les composants sont supposés de taille identique, tous les onduleurs sont supposés alimentés par une source de tension continue, les condensateurs intermédiaires ne sont donc pas comptabilisés pour les onduleurs en pont et pour les onduleurs à condensateurs flottants. L'onduleur en pont est ajouté à la liste comme base de

comparaison, m transistors sont mis en série pour former les interrupteurs utilisés. Pour le cas qui a déjà été étudié permettant d'obtenir 3 niveaux par branche [7].

Tableau 1. 1 Nombre des composants nécessaires des différents types des onduleurs à 3 niveaux [7].

Topologies	M	T	D	C	n	Ne
NPC	2	4	6	$2/b$	3	3
Condensateurs flottants	2	4	4	1	3	4
Cascade	2	4	4	1	3	3
Pont simple	2	4	4	0	2	2

Tableau 1. 2 Nombre des composants nécessaires des différents types des onduleurs à $(m+1)$ niveaux [7].

Topologies	M	T	D	C	n	Ne
NPC	m	$2m$	$m^2 + m$	$2m/b$	$m+1$	$m+1$
Condensateurs flottants	m	$2m$	$2m$	$(m^2 - m)/2$	$m+1$	2^m
Cascade	m	$2m$	$2m$	m	$m+1$	$3^{m/2}$
Pont simple	m	$2m$	$2m$	0	2	2

Avec :

m : nombre d'étages.

b : nombre de branches, 2 en monophasés, 3 en triphasé.

T : nombre de transistors.

D : nombre de diodes.

C : nombre de condensateurs.

n : nombre de niveaux obtenus.

NE : nombre d'états de commutation.

D'après la comparaison de nombre de composant des trois types principaux, nous concluons que l'onduleur le plus avantageuse de ces trois types c'est l'onduleur en structure en cascade.

De plus de trois topologies principales des onduleurs multi-niveaux, il y a d'autre topologies des onduleurs multi-niveaux :

- Le convertisseur asymétrique hybride.
- Le convertisseur avec des ponts en cascade et sources CC/CC avec isolement.
- Le convertisseur avec commutation douce.
- Les convertisseurs reliés par transformateur.
- Le convertisseur Diode/Capacitor-Clamped : variante de l'onduleur NPC.
- Le convertisseur multi niveaux généralisé [2].

1. 4 Onduleurs à élimination d'harmonique

L'onduleur multi niveaux est une nouvelle structure de convertisseur d'énergie, il présente l'idée d'employer des sources de tension continue séparées pour produire une forme d'onde en escalier de la tension alternative. La fonction principale de la structure d'onduleur multi niveaux est de réduire le nombre de dispositifs de commutation utilisés sans changer la nature d'escalier de la tension de sortie. Par conséquent, il devrait avoir le même nombre des alimentations DC comme un onduleur multi niveaux en cascade pour le même nombre de niveaux de la tension de sortie [10].

La qualité de la tension de sortie d'un onduleur dépend largement de la technique de commande utilisée.

1. 4. 1 Commande MLI

La modulation de largeur d'impulsion (en anglo-saxon pulse width modulation) consiste à adapter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie et à former chaque alternance d'une tension de sortie d'une succession de créneaux de largeurs convenables. Cette technique peut être considéré comme une extension du principe de la commande par découpage ou la durée des impulsions n'est plus régulière mais choisie de façon à supprimer le maximum d'harmoniques de rangs faibles difficiles à filtrer.

principe de base de la commande MLI :

Le principe de base de la modulation de largeur d'impulsion est sur le découpage d'une pleine onde rectangulaire. Ainsi la tension de sortie de l'onduleur est formée par une

succession de créneaux d'amplitude égale à la tension d'alimentation (continue) et de largeur variable. [11]. Le principe de cette dernière, est de comparer un signal de référence la modulante sinusoïdale V_r , avec un signal ou plusieurs porteuses triangulaires V_p . La commande MLI a plusieurs techniques de modulation :

- Modulation trapézoïdale.
- Modulation en escalier.
- Modulation par échelle.
- Modulation delta.
- Modulation par injection d'harmoniques.
- Modulation pré calculée.

Dans notre travail on va utiliser la technique de modulation MLI pré calculée. Cette technique de modulation, qui est une méthode très efficace et très importante pour la commande des onduleurs deux niveaux afin d'améliorer beaucoup plus la qualité de leurs tensions de sortie. Elle consiste à former l'onde de sortie de l'onduleur d'une succession de créneaux de largeurs variables. Généralement, on utilise une onde qui présente une double symétrie par rapport au quart et à la demi- période. Cette onde est caractérisée par le nombre de créneaux ou d'impulsions par alternance. Que ce soit impair ou pair, ces angles suffisent pour déterminer la largeur de l'ensemble des créneaux. On représente aussi le nombre d'angles de commutation par quart de période. Ces angles de commutation sont déterminés de telle façon à éliminer certains harmoniques. On peut s'intéressé par exemple à éliminer les premiers harmoniques (ex : 3, 5, 7, 9, 11, ... pour le cas monophasé et 5, 7, 11, 13, 17, ... pour le cas triphasé) qui sont les plus gênants et donc indésirables pour le fonctionnement des charges telles que les moteurs électriques [12].

1. 4. 2 Onduleur MLI monophasé (trois niveaux)

Le concept de base de l'onduleur a existé pendant plus de deux décennies. Cependant, il n'était pas entièrement réalisé jusqu'à ce que les deux chercheurs Lai et Peng présentent ses divers avantages sous forme d'un brevet d'invention en 1997. Pour ce type d'onduleur comme montré par la **Figure. 1. 7**, on distingue trois niveaux de tension d'une seule cellule.

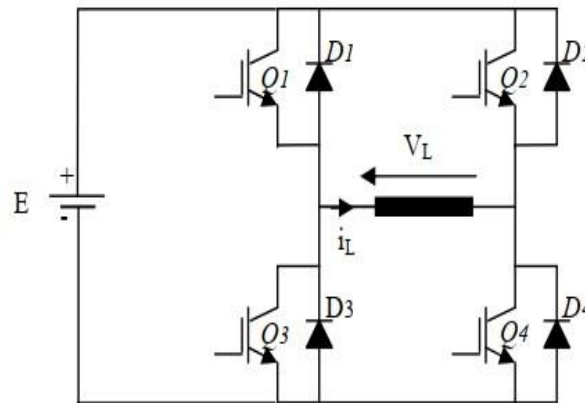


Figure. 1. 7 : Onduleurs à trois niveaux

Pour éviter le court-circuit des sources de tension par conduction de plusieurs interrupteurs, et pour que le convertisseur soit totalement commandable, on adopte une commande complémentaire, $Q_1 = \overline{Q_3}$ et $Q_2 = \overline{Q_4}$. Alors, les trois niveaux de tension de sortie sont générés de la façon suivante :

- Le niveau 1 :

Si : $\alpha_1 < t < \alpha_2$ et $\alpha_3 < t < \pi - \alpha_3$ et $\pi - \alpha_2 < t < \pi - \alpha_1$:

Q_1, Q_4 Sont passants et Q_2, Q_3 sont bloqués.

La tension de sortie est $V_L = +E$

- Le niveau 2 :

Si $0 < t < \alpha_1$ et $\pi - \alpha_3 < t < \pi - \alpha_2$ et $\pi + \alpha_2 < t < \pi + \alpha_3$ et $2\pi - \alpha_1 < t < 2\pi$:

Q_3, Q_4 Sont passants et Q_1, Q_2 sont bloqués.

Si $\alpha_2 < t < \alpha_3$ et $\pi - \alpha_1 < t < \pi + \alpha_1$ et $2\pi - \alpha_3 < t < 2\pi - \alpha_2$:

Q_1, Q_2 Sont passants et Q_3, Q_4 sont bloqués.

La tension de sortie est $V_L = 0$

- Le niveau 3 :

Si $\pi + \alpha_1 < t < \pi + \alpha_2$ et $\pi + \alpha_3 < t < 2\pi - \alpha_3$ et $2\pi - \alpha_2 < t < 2\pi - \alpha_1$:

Q_2, Q_3 Sont passants et Q_1, Q_4 sont bloqués.

La tension de sortie est $V_L = -E$

La Figure. 1.8 représente le signal de sortie d'un onduleur monophasé en pont en H (trois niveaux) et les signaux de commande des commutateurs de puissances Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 . Dans le but d'obtenir une tension proche de la sinusoïdale pure et avec un faible taux de

distorsion THD à la sortie de l'onduleur, on utilise la stratégie d'élimination d'harmonique. Les harmoniques proviennent principalement de charges non linéaires dont la caractéristique est d'absorber un courant qui n'a pas la même forme que la tension qui les alimente. Ce courant est riche en composantes harmoniques dont le spectre sera fonction de la nature de la charge [9].

Les charges industrielles sont alimentées par des équipements de l'électronique de puissance tels que les variateurs de vitesse, les redresseurs à diodes ou à thyristors, les onduleurs, charges utilisant l'arc électrique, fours à arc, machines à souder, éclairage...etc [9]. Le terme harmonique se référant à la qualité de l'énergie dans le monde idéal signifierait la pureté de la tension ou de courant, sous sa forme sinusoïdale.

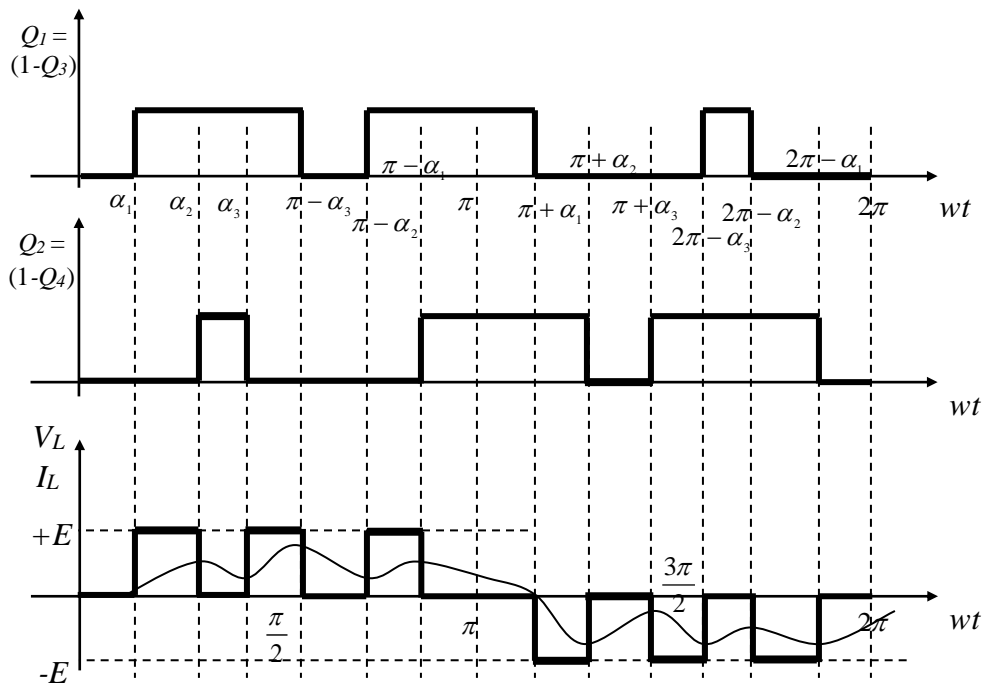


Figure. 1. 8 : Signaux de commande des interrupteurs d'un onduleur à trois niveaux.

L'idée de la stratégie d'élimination d'harmoniques a été introduite pour la première fois par Tumbull en 1967, puis développée par Patel et Hoft en 1973 [12]. Son principe consiste d'abord à formuler l'expression générale de l'amplitude des harmoniques, en se basant sur le développement en série de Fourier. L'expression obtenue est une fonction des angles, α_i de commutation. Ensuite, un système d'équations non linéaire est obtenu, en imposant la valeur désirée du fondamental et en annulant certains harmoniques. La résolution de ce

système non linéaire permet de déterminer les angles α_i , par conséquent les instants de commande des interrupteurs. Les séries de Fourier sont des séries de fonction périodiques. L'objectif est de décomposer un signal périodique en somme de sinus et de cosinus. Ceci peut être exprimé d'une manière mathématique par la relation suivante :

$$V_L(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(2n\pi f_0 t) + b_n \sin(2n\pi f_0 t)) \quad (1.1)$$

Les paramètres a_0 , a_n et b_n appelés : coefficients de Fourier, on note aussi que f_0 est la fréquence du fondamental. Pour une fonction périodique les coefficients a_0 , a_n et b_n sont déterminés à partir des relations suivantes :

$$\begin{cases} a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) dt \\ a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos(2n\pi f_0 t) dt \\ b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin(2n\pi f_0 t) dt \end{cases} \quad (1.2)$$

Avec: $n=1, 2, 3, \dots$

D'après la **Figure. 1. 8**, nous avons une fonction impaire de la tension de sortie $V_L(t)$. Cette dernière présente aussi une symétrie en demi-onde. Pour cela, on applique les propriétés de la série de Fourier. D'où

$$\begin{cases} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx = 0 \\ a_n = 0 & \forall n \\ b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin(nx) dx & \text{pour } n \text{ impair} \end{cases} \quad (1.3)$$

A partir de la **Figure. 1. 8** et l'équation (1.3), les coefficients b_i , $i= 1, \dots, 3$

$$\begin{cases} b_1 = \frac{4E}{\pi} (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2 + \cos\alpha_3) \\ b_3 = \frac{4E}{3\pi} (\cos3\alpha_1 - \cos3\alpha_2 + \cos3\alpha_3) \\ b_5 = \frac{4E}{5\pi} (\cos5\alpha_1 - \cos5\alpha_2 + \cos5\alpha_3) \end{cases} \quad (1.4)$$

Durant le réglage, on impose une tension de référence V_1 qui représente l'amplitude du fondamental. A partir de (1.4), on peut écrire

$$\begin{cases} \cos(\alpha_1) - \cos(\alpha_2) + \cos(\alpha_3) = \frac{\pi V_1}{4E} = \frac{\pi}{2} r \\ \cos(3\alpha_1) - \cos(3\alpha_2) + \cos(3\alpha_3) = 0 \\ \cos(5\alpha_1) - \cos(5\alpha_2) + \cos(5\alpha_3) = 0 \end{cases} \quad (1.5)$$

Où $r = V_1 / 2E$ est appelé coefficient de réglage. Alors, la tension instantanée de sortie est écrite en fonction des angles, $\alpha_i, i= 1, \dots, 3$

$$\begin{aligned} V_L(t) = & \frac{4E}{\pi} (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2 + \cos\alpha_3) \sin \omega_0 t + \frac{4E}{3\pi} (\cos 3\alpha_1 - \cos 3\alpha_2 + \cos 3\alpha_3) \sin 3\omega_0 t + \\ & \frac{4E}{5\pi} (\cos 5\alpha_1 - \cos 5\alpha_2 + \cos 5\alpha_3) \sin 5\omega_0 t + \dots + \frac{4E}{(2n+1)\pi} (\cos(2n+1)\alpha_1 - \\ & \cos(2n+1)\alpha_2 + \cos(2n+1)\alpha_3) \sin(2n+1)\omega_0 t \end{aligned} \quad (1.6)$$

D'une manière générale comme montré par la **Figure. 1.9**, (1.5) devient

$$\begin{cases} \cos\alpha_1 - \cos\alpha_2 + \cos\alpha_3 - \cos\alpha_4 + \dots \pm \cos\alpha_c = V_1 \frac{\pi}{4E} \\ \cos 3\alpha_1 - \cos 3\alpha_2 + \cos 3\alpha_3 - \cos 3\alpha_4 + \dots \pm \cos 3\alpha_c = 0 \\ \cos 5\alpha_1 - \cos 5\alpha_2 + \cos 5\alpha_3 - \cos 5\alpha_4 + \dots \pm \cos 5\alpha_c = 0 \\ \cos 7\alpha_1 - \cos 7\alpha_2 + \cos 7\alpha_3 - \cos 7\alpha_4 + \dots \pm \cos 7\alpha_c = 0 \\ \cdot \quad \cdot \quad \quad \quad \cdot \quad = \cdot \\ \cdot \quad \cdot \quad \quad \quad \cdot \quad = \cdot \\ \cdot \quad \cdot \quad \quad \quad \cdot \quad = \cdot \\ \cos c\alpha_1 - \cos c\alpha_2 + \cos c\alpha_3 - \cos c\alpha_4 + \dots \pm \cos c\alpha_c = 0 \end{cases} \quad (1.7)$$

L'optimisation du système non linéaire donné par (1.7) est effectuée à condition que les angles de conduction doivent obéir à la contrainte suivante :

$$\alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_c < \frac{\pi}{2} \quad (1.8)$$

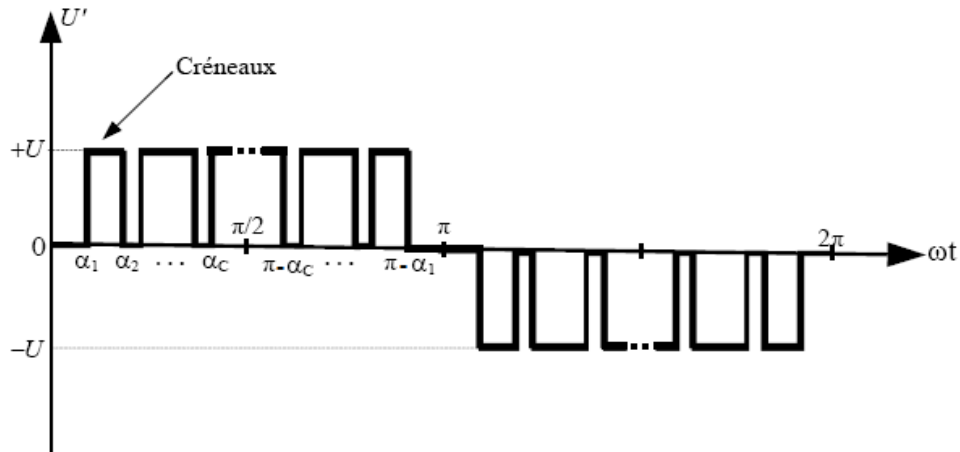


Figure. 1. 9 : Motif adopté pour éliminer c-1 harmoniques.

1. 4. 3 Onduleur monophasé à 5 niveaux

Ce type d'onduleur est formé d'un pont en H (quatre commutateurs de Q1-Q2) et deux commutateurs auxiliaires Q5 et Q6 et deux sources d'alimentations DC, V_{dc1} et V_{dc2} . La fonction des commutateurs auxiliaires est pour contrôler la logique des connexions des sources d'alimentations DC d'entrée afin de construire la forme en escalier de la tension de sortie. Cette configuration peut être exploitée aux trois modes de fonctionnement différents pour chaque période de conduction selon les signes de la tension et du courant de sortie, à savoir le fonctionnement de la charge comme récepteur, roue libre (récupération d'énergie selfique) et génératrice (récupération d'énergie vers la source) [10].

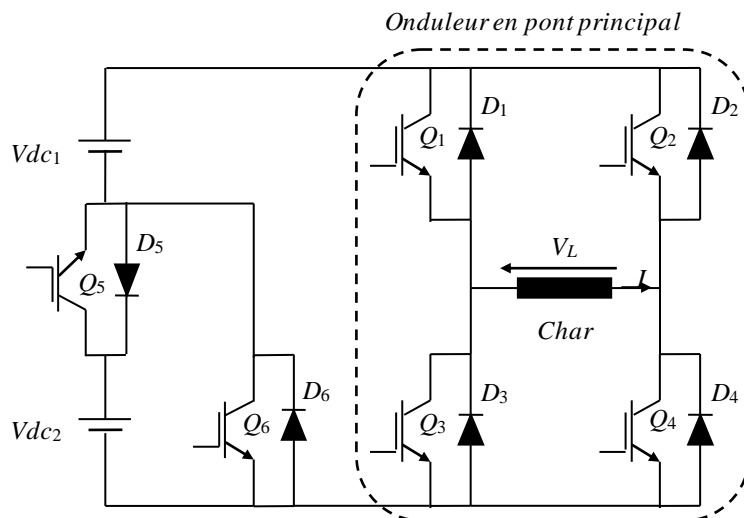


Figure. 1. 10 : Structure de l'onduleur monophasé à 5 niveaux [10]

On utilise la commande complémentaire pour éviter les courts-circuits des sources de tension par conduction de plusieurs interrupteurs, et pour que le convertisseur soit totalement commandable, on adopte une commande complémentaire, $Q_1 = \bar{Q}_3$, $Q_2 = \bar{Q}_4$ et $Q_5 = \bar{Q}_6$. L'onduleur 5 niveaux a deux niveaux positives, deux niveaux négatives et un niveau zéro. Les niveaux sont générés comme suit :

- Niveau 1 :

Q_3, Q_4, Q_6 sont passants et Q_1, Q_2, Q_5 sont bloqués.

La tension de sortie devient, $V_L = 0$.

- Niveau 2 :

Q_1, Q_4, Q_6 sont passants et Q_3, Q_2, Q_5 sont bloqués.

La tension de sortie devient, $V_L = V_{dc1}$.

- Niveau 3 :

Q_1, Q_4, Q_5 sont passants et Q_3, Q_2, Q_6 sont bloqués.

La tension de sortie devient, $V_L = V_{dc1} + V_{dc2}$.

- Niveau 4 :

Q_3, Q_2, Q_6 sont passants et Q_1, Q_4, Q_5 sont bloqués.

La tension de sortie devient, $V_L = -V_{dc1}$.

- Niveau 5 :

Q_1, Q_4, Q_6 sont passants et Q_3, Q_2, Q_5 sont bloqués.

La tension de sortie devient, $V_L = -(V_{dc1} + V_{dc2})$.

Le **Tableau. 1. 3** montre les modes de fonctionnement pour chaque intervalle de conduction. La tension de sortie et les signaux de commande des interrupteurs sont aussi montrées par la **Figure.1. 11** ($V_{dc1} = V_{dc2} = V_{dc}$).

Tableau. 1. 3 Modes de fonctionnement de l'onduleur à 5 niveaux

K_1	K_2	K_5	V_L	I_L	Mode de fonctionnement
F	O	O	$+V_{dc1}$	>0	Récepteur
F	O	F	$+V_{dc1}+V_{dc2}$	>0	"
F	-	-	0	>0	Récupération d'énergie selfique
-	O	-	0	>0	"
O	F	O	$-V_{dc1}$	<0	Récepteur
O	F	F	$-V_{dc1}-V_{dc2}$	<0	"
O	-	-	0	<0	Récupération d'énergie selfique
-	F	-	0	<0	"
-	-	O	$+V_{dc1}$	<0	Génératrice
-	-	O	$-V_{dc1}$	>0	"

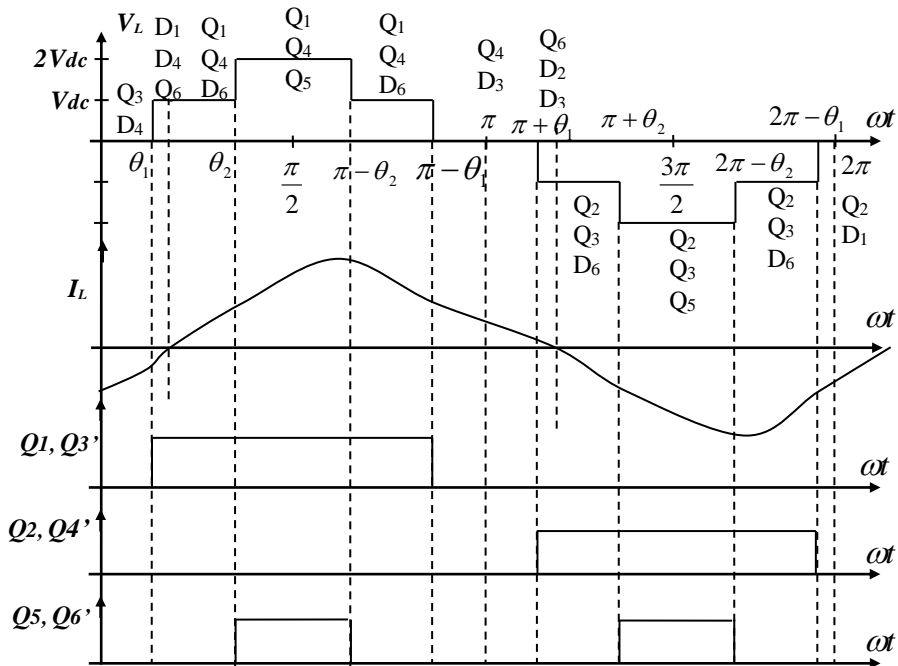


Figure. 1. 11 : Forme d'ondes de commande et de sortie d'un onduleur 5 niveaux [10]

Pour optimiser les angles de conceptions des transistors, nous appliquons également la série de fourrier de la tension générée par l'onduleur monophasé 5 niveaux. Alors, nous

décomposons le signal de sortie pour déterminer les équations exprimant des différentes harmoniques. Ces équations sont en fonction des angles de commutation de commande des interrupteurs.

En suivant la même procédure que précédemment, le système d'équations à optimiser selon la Figure. 1. 11 est donnée par

$$\begin{cases} \cos(\theta_1) + \cos(\theta_2) = \frac{\pi V_1}{4E} = \frac{\pi}{2} r \\ \cos(3\theta_1) + \cos(3\theta_2) = 0 \end{cases} \quad (1.9)$$

La contrainte $\theta_1 < \theta_2 < \theta_3 < \frac{\pi}{2}$ est respectée durant l'optimisation des angles.

Pour un nombre de niveaux n élevé, nous obtenons

$$\begin{cases} \cos(\theta_1) + \cos(\theta_2) + \cos(\theta_3) + \dots + \cos(\theta_s) = m \\ \cos(3\theta_1) + \cos(3\theta_2) + \cos(3\theta_3) + \dots + \cos(3\theta_s) = 0 \\ \cos(5\theta_1) + \cos(5\theta_2) + \cos(5\theta_3) + \dots + \cos(5\theta_s) = 0 \\ \vdots \\ \cos(n\theta_1) + \cos(n\theta_2) + \cos(n\theta_3) + \dots + \cos(n\theta_s) = 0 \end{cases} \quad (1.10)$$

Où $m = \frac{\pi}{2} r$

1. 5 Méthode d'optimisation de Newton-Raphson :

La méthode la plus largement utilisée pour résoudre les équations algébriques non linéaires est la méthode de Newton-Raphson. Elle est basée sur le procédé d'approximation successif. La méthode de Newton-Raphson est une méthode utilisée pour résoudre une équation algébrique non linéaire, basée sur le procédé d'approximation successif.

D'une façon générale, le système d'équation non-linéaire de N variables peut être représenté par :

$$\begin{cases} f_1(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N) = k_1 \\ f_2(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N) = k_2 \\ \vdots \\ f_N(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N) = k_N \end{cases} \quad (1.11)$$

On peut écrire

$$F(\alpha) = K \quad (1.12)$$

où :

$$\begin{cases} F = [f_1, f_2, \dots, f_N]^T \\ \alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N] \\ K = [k_1, k_2, \dots, k_N] \end{cases} \quad (1.13)$$

Pour la résolution des systèmes d'équations donnés par (1.5) et (1.9), l'algorithme de la méthode de newton peut être présenté par les étapes suivantes :

1) Donner les valeurs initiales des α qui assurent la convergence de la méthode pour $j = 0$

$$\text{On pose : } \alpha^0 = [\alpha_1^0, \alpha_2^0, \dots, \alpha_N^0]$$

2) Calculer la matrice,

$$F(\alpha^j) = F^j$$

3) Linéarisation de l'équation (1.11) :

$$F^j + \left[\frac{\partial f}{\partial \alpha} \right]^j d\alpha^j = K$$

Où

$$\left[\frac{\partial f}{\partial \alpha} \right]^j = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial f_1}{\partial \alpha_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial \alpha_N} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial f_2}{\partial \alpha_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial \alpha_N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_N}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial f_N}{\partial \alpha_2} & \dots & \frac{\partial f_N}{\partial \alpha_N} \end{bmatrix}$$

Et :

$$d\alpha^j = [d\alpha_1^j, d\alpha_2^j, \dots, d\alpha_N^j]^T$$

4) La solution mène à trouver :

$$d\alpha^j = INV \left[\frac{\partial f}{\partial \alpha} \right]^j (K - F^j)$$

Où : $INV \left[\frac{\partial f}{\partial \alpha} \right]^j$ est la matrice inverse de $\left[\frac{\partial f}{\partial \alpha} \right]^j$

5) Mise a jour de α ,

$$\alpha^{j+1} = \alpha^j + d\alpha^j$$

6) Répéter le processus, jusqu'à la valeur désirée de $d\alpha^j$.

Pour tester la performance d'onduleur, le THD (Total Harmonics Distorsion) est considéré comme une mesure de l'effet ou pollution harmonique sur la qualité du signal de sortie. Etant donné les coefficients de Fourier (amplitudes des harmoniques et le fondamental)

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} H_n^2}}{H_1} \quad (1.14)$$

Où H_1 est l'amplitude de la composante fondamentale, dont la pulsation est ω_0 . H_n est l'amplitudes de l'harmonique de rang n , dont la pulsation est $n\omega_0$. D'où

$$H_n = \frac{4E}{n\pi} \sum_{K=1}^N \cos(n\alpha_K) \quad (1.15)$$

$$H_1 = \frac{4E}{\pi} \sum_{K=1}^N \cos(\alpha_K) \quad (1.16)$$

et

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{1}{n} \sum_{K=1}^N \cos(n\alpha_K) \right)^2}}{\sum_{K=1}^N \cos(\alpha_K)} \quad (1.17)$$

1. 6 Transformée de Fourier rapide (FFT)

La transformation de Fourier rapide (FFT Fast Fourier Transform) est un algorithme pour le calcul de la transformation de Fourier discrète (TFD). La transformée de fourrier rapide est une technique de calcul mathématique pour transformer un signal numérique du domaine temporel en une représentation dans le domaine fréquentiel de l'amplitude relative de différentes régions de fréquence dans le signal. La FFT est une

méthode pour faire ce processus très efficacement. La FFT est l'un des sujets les plus importants en traitement des signaux numériques. C'est extrêmement important dans le domaine de l'analyse fréquentiel (spectrale) ; par exemple : reconnaissance vocale, codage numérique des signaux acoustique pour la réduction du flux de données cas de transmission numérique, détection de vibration machine, filtrage des signaux, résolution des équations différentielles partielles, etc [15].

A titre d'exemple, on présente par la suite le code Matlab pour le calcul du THD du signal V discret (Tension de charge à la sortie de l'onduleur à 5 niveaux). On prend un nombre d'harmoniques égale à 100.

```
%Analyse par FFT :
nombre_harmoniques=100;
[Ordre_Harmoniques,Amplitudes_Normalises]=fun_fft(nombre_harmoniques,V);
subplot(2,1,2); bar(Ordre_Harmoniques,Amplitudes_Normalises);
xlabel('Order des Harmoniques');ylabel('Amplitudes des Harmoniques
(V1)');grid;axis([0 nombre_harmoniques 0 1]);
VH=Amplitudes_Normalises;
THDV=sqrt(sum(VH.^2)-1), % THD de la tension de charge

function [Ordre_Harmoniques,Amplitudes_Normalises] =
fun_fft(nombre_harmoniques,X)
%nombre_harmoniques=100;
Fourier=fft(X);
Ordre_Harmoniques=(0:nombre_harmoniques-1);
Amplitudes=abs(2*Fourier(1:nombre_harmoniques)/length(X));
Fondamentale=Amplitudes(2);
Amplitudes_Normalises=Amplitudes/Fondamentale;
```

La **Figure 1. 12** montre la représentation temporelle et fréquentielle de la tension de sortie. Dans cet exemple, le THD de cette tension périodique est 0.1780.

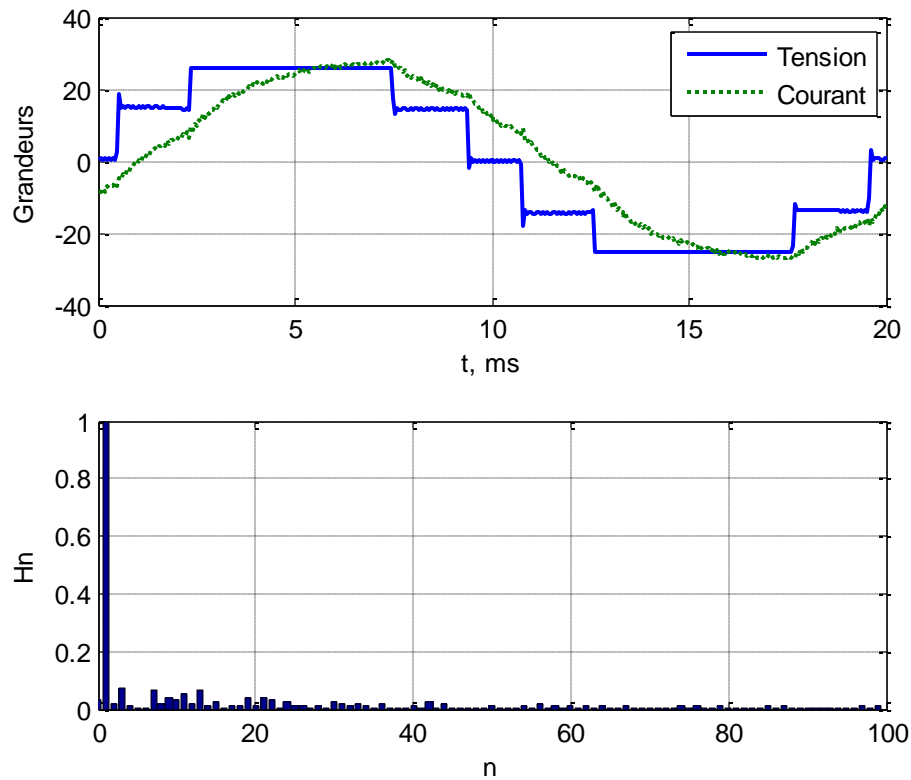


Figure. 1. 12 : Calcul de THD à l'aide de la FFT

1. 7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons intitulé les différentes topologies des onduleurs monophasés multiniveaux et nous avons étudié les onduleurs à élimination d'harmoniques avec deux méthodes différentes de commande ; la commande MLI précalculée et la commande à pleine onde de l'onduleur monophasé. La méthode d'optimisation de Newton-Raphson a été considérée pour résoudre les systèmes d'équations non-linéaires. Ensuite, nous avons donné l'expression explicite du calcul de THD à partir des mesures des signaux de sortie. Enfin, l'outil FFT était introduit pour la détermination des coefficients de Fourier ainsi que le THD.

Les microcontrôleurs

Sommaire du Chapitre :

2. 1 Introduction.....	26
2. 2 Familles de microcontrôleurs.....	26
2. 3 Microcontrôleurs de Microchip.....	28
2. 4 Aperçu sur le microcontrôleur PIC18F4431.....	33
2. 5 Conclusion.....	42

Résumé du Chapitre :

Dans ce chapitre, nous définissons d'une manière générale les microcontrôleurs avec leurs familles et leur classification. Après, nous intéressons à montrer les caractéristiques et les modules du microcontrôleur PIC18F4431 que nous avons utilisé dans ce projet. En particulier, nous déclarons que ce type de microcontrôleur dispose la génération de huit signaux MLI réglables en complémentarité, en fréquence, en rapport cyclique et en temps mort utilisés dans les applications de la commande et de la conversion d'énergie électrique.

2.1 Introduction

Un microcontrôleur (en notation abrégée μc , ou uc ou encore MCU en anglais) est un circuit intégré qui rassemble les éléments essentiels d'un ordinateur : processeur, mémoires (mémoire morte et mémoire vive), unités périphériques et interfaces d'entrées-sorties. Les microcontrôleurs se caractérisent par un plus haut degré d'intégration, une plus faible consommation électrique, une vitesse de fonctionnement plus haute (de quelques mégahertz jusqu'à plus d'un gigahertz) et un coût réduit par rapport aux microprocesseurs polyvalents utilisés dans les ordinateurs personnels. Les microcontrôleurs sont fréquemment utilisés dans les systèmes embarqués, comme les contrôleurs des moteurs automobiles, les télécommandes, les appareils de bureau, l'électroménager, les jouets, la téléphonie mobile, etc.

Le PIC (Programmable Interface Contrôler) est un circuit fabriqué par la société américaine Arizona MICROCHIP Technology. Les PICs sont des composants dits RISC (reduced Instructions set computer) c'est-à-dire composant à jeu d'instructions réduit (à l'opposé on trouve CISC : Complexe Instructions Set Computer). Cela lui confère l'avantage de la rapidité dans l'exécution en un seul cycle machine [18]. Il existe plusieurs familles de microcontrôleurs, se différenciant par la vitesse de leur processeur et par le nombre de périphériques qui les composent. Toutes ces familles ont un point commun c'est de réunir tous les éléments essentiels d'une structure à base de microprocesseur sur une même puce. Voici généralement ce que l'on trouve à l'intérieur d'un microcontrôleur [17] :

- Un processeur (C.P.U.),
- Les bus,
- La mémoire de donnée (RAM et EEPROM),
- La mémoire de programme (ROM, OTPROM, UVPROM ou EEPROM),
- Les interfaces parallèles pour la connexion des entrées / sorties,
- Les interfaces séries (synchrone ou asynchrone) pour le dialogue avec d'autres unités,
- Les télémétries (timers) pour générer ou mesurer des signaux avec une grande précision temporelle.

2.2 Familles de microcontrôleurs

De façon générale, les instructions et modes d'adressage disponibles varient fort selon les familles de microcontrôleurs. Certains microcontrôleurs suivent une architecture Harvard :

ils possèdent des bus séparés pour la mémoire de programme et la mémoire de données, ce qui permet aux accès d'avoir lieu en même temps (on parle d'accès concurrent). Lorsqu'on utilise une architecture Harvard, les mots de programme peuvent avoir une largeur (nombre de bits) différente de celle des mots de la mémoire de données et des registres. Par exemple, il peut y avoir des instructions de 12 bits et des registres de données de 8 bits. On peut classer les types de microcontrôleur en plusieurs grandes familles [25] :

- la famille Atmel AT91 ;
- les familles ARM Cortex-M et ARM Cortex-R
- la famille Atmel AVR (utilisée par des cartes Wiring et Arduino) ;
- le C167 de Siemens/Infineon ;
- la famille des Infineon AURIX TC3x, Infineon AURIX TC2x, Infineon TriCore TC1x, Infineon XMC, XC2000 de Infineon Technologies ;
- la famille Hitachi H8 ;
- la famille Intel 8051, qui ne cesse de grandir ; de plus, certains processeurs récents utilisent un cœur 8051, qui est complété par divers périphériques (ports d'E/S, compteurs/temporisateurs, convertisseurs A/N et N/A, chien de garde, superviseur de tension, etc.) ;
- l'Intel 8085, à l'origine conçu pour être un microprocesseur, a en pratique souvent été utilisé en tant que microcontrôleur ;
- le Freescale 68HC11 ;
- la famille Freescale 68HC08 ;
- la famille Freescale 68HC12 ;
- la famille Freescale Qorivva MPC5XXX ;
- la famille des PIC de Microchip ;
- la famille des dsPIC de Microchip ;
- la famille ADuC d'Analog Devices ;
- la famille PICBASIC de Comfile Technology ;
- la famille MSP430 de Texas Instruments ;
- la famille 8080, dont les héritiers sont le microprocesseur Zilog Z80 (désormais utilisé en tant que contrôleur dans l'embarqué) et le microcontrôleur Rabbit ;
- la famille PSoC de Cypress Semiconductor ;
- la famille LPC21xx ARM7-TDMI de Philips ;
- la famille V800 de NEC ;

- la famille K0 de NEC;
- la famille des ST6, ST7, ST10, STR7, STR9, de STMicroelectronics ;
- la famille STM32 de STMicroelectronics;
- la famille STM8 de STMicroelectronics.

2. 3 Microcontrôleurs de Microchip :

On peut classés les types de microcontrôleur de Microchip en trois grandes familles (voir [Tableau. 2. 1](#)) [18] :

- La famille base line : mot de 12 bits
- La famille Mid-range : mot de 14 bits
- La famille High-End: mot de 16 bits

2. 3. 1 Interruptions

Les interruptions représentent un concept important dans les microcontrôleurs. Une interruption provoque le microcontrôleur pour répondre aux événements externes et internes (par exemple, une minuterie) très rapidement. Lorsqu'une interruption se produit, le microcontrôleur quitte son flux normal de l'exécution et saute à une partie spéciale du programme connu sous le nom de service d'interruption routine (ISR). Le code de programme à l'intérieur de l'ISR est exécuté et, à son retour de la ISR le programme reprend son flux normal d'exécution [23]. La logique d'interruptions est montrée par la [Figure. 2. 1](#).

IPEN : interrupt priority enable. Cette fonction peut être désactivée pour avoir une compatibilité logicielle avec l'unité centrale. Si IPEN est à 1, chaque source d'interruption peut être configurée comme prioritaire ou non (entre autres : registres IPR1 et IPR2). Si elle est prioritaire, une autre source d'interruption sera prise en compte seulement à la fin de l'interruption prioritaire.

GEIH : global interrupt enable high (validation des interruptions prioritaires, adresse 0x0008)

GEIL : global interrupt enable low (validation des interruptions non prioritaires, adresse 0x0018)

Il y a dix registres qui sont utilisés pour contrôler et Interrompre l'opération. Ces registres sont les suivants [19] :

- RCON
- INTCON
- INTCON2
- INTCON3
- PIR1, PIR2
- PIE1, PIE2
- IPR1, IPR2

Tableau. 2. 1: Caractéristiques du PIC de Microchip [22]

Family	ROM [Kbytes]	RAM [bytes]	Pins	Clock Freq. [MHz]	A/D Inputs	Resolution of A/D Converter	Comparators	8/16 – bit Timers	Serial Comm.	PWM Outputs	Others
Base-Line 8 - bit architecture, 12-bit Instruction Word Length											
PIC10FXXX	0.375 - 0.75	16 - 24	6 - 8	4 - 8	0 - 2	8	0 - 1	1 x 8	-	-	-
PIC12FXXX	0.75 - 1.5	25 - 38	8	4 - 8	0 - 3	8	0 - 1	1 x 8	-	-	EEPROM
PIC16FXXX	0.75 - 3	25 - 134	14 - 44	20	0 - 3	8	0 - 2	1 x 8	-	-	EEPROM
PIC16HVXXX	1.5	25	18 - 20	20	-	-	-	1 x 8	-	-	Vdd = 15V
Mid-Range 8 - bit architecture, 14-bit Instruction Word Length											
PIC12FXXX	1.75 - 3.5	64 - 128	8	20	0 - 4	10	1	1 - 2 x 8 1 x 16	-	0 - 1	EEPROM
PIC12HVXXX	1.75	64	8	20	0 - 4	10	1	1 - 2 x 8 1 x 16	-	0 - 1	-
PIC16FXXX	1.75 - 14	64 - 368	14 - 64	20	0 - 13	8 or 10	0 - 2	1 - 2 x 8 1 x 16	USART I2C SPI	0 - 3	-
PIC16HVXXX	1.75 - 3.5	64 - 128	14 - 20	20	0 - 12	10	2	2 x 8 1 x 16	USART I2C SPI	-	-
High-End 8 - bit architecture, 16-bit Instruction Word Length											
PIC18FXXX	4 - 128	256 - 3936	18 - 80	32 - 48	4 - 16	10 or 12	0 - 3	0 - 2 x 8 2 - 3 x 16	USB2.0 CAN2.0 USART I2C SPI	0 - 5	-
PIC18FXXJXX	8 - 128	1024 - 3936	28 - 100	40 - 48	10 - 16	10	2	0 - 2 x 8 2 - 3 x 16	USB2.0 USART Ethernet I2C SPI	2 - 5	-
PIC18FXXKXX	8 - 64	768 - 3936	28 - 44	64	10 - 13	10	2	1 x 8 3 x 16	USART I2C SPI		

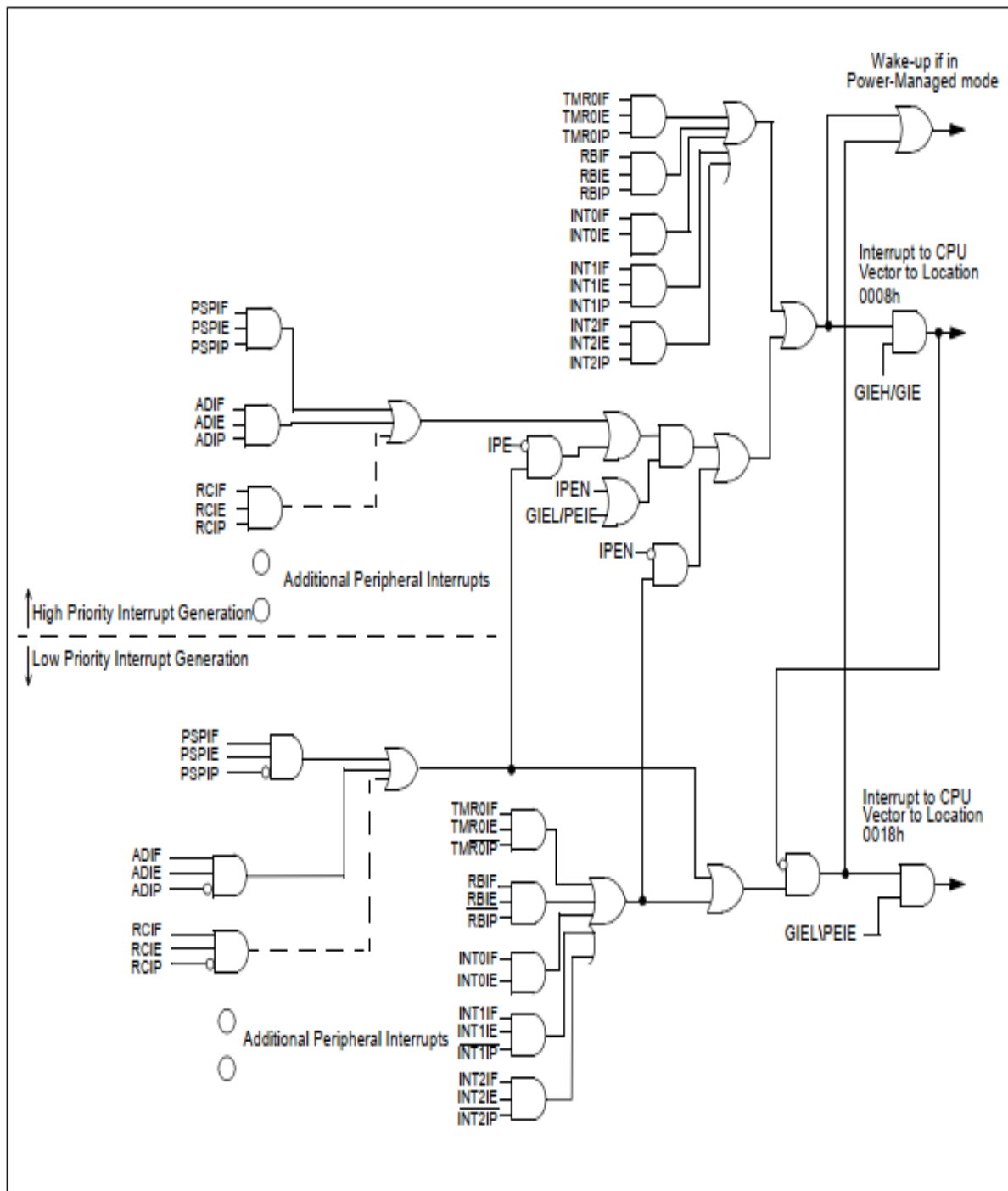


Figure. 2. 1 : Logique d'interruption [19]

2. 3. 2 Registres :

Registre RCON [19]:

Le registre RCON contient des bits utilisés pour déterminer la cause du dernier Réinitialisation ou réveil du mode power-managed. RCON contient également le bit qui permet d'interrompre les priorités (IPEN).

R /W -0	U -0	U -0	R /W-1	R-1	R-1	R /W -0	R/W-0	
IPEN	—	—	\overline{RI}	\overline{TO}	\overline{PD}	\overline{POR}	\overline{BOR}	
bit7								bit 0

Registres INTCON [19] :

Les registres INTCON sont lisibles et écrivable (writable), qui contiennent divers permis, priorité et bits de drapeau.

Le registre INTCON:

R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-x	
GIE/GIEH	PEIE/GIEL	TMR0IE	INT0IE	RBIE	TMR0IF	INT0IF	RBIF	
bit7								bit 0

Le registre INTCON2 :

R/W-1	R/W-1	R/W-1	R/W-1	U -0	R/W-1	U-0	R/W-1	
$\overline{RBP\overline{U}}$	INTEDG0	INTEDG1	INTEDG2	—	TMR0IP	—	RBIP	
bit7								bit 0

Le registre INTCON3 :

R/W-1	R/W-1	U-0	R/W-0	R/W-0	U-0	R/W-0	R/W-0	
INT2IP	INT1IP	—	INT2IE	INT1IE	—	INT2IF	INT1IF	
bit7								bit 0

Registres PIR [19] :

Les registres PIR contiennent les bits d'indicateur individuels interruptions périphériques. En raison du nombre de périphériques sources d'interruption, il y a deux interruptions périphériques registres d'indicateurs (PIR1, PIR2).

Le registre de demande d'interruption périphérique PIR1 :

U-0	R/W-0	R-0	R-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
—	ADIF	RCIF	TXIF	SSPIF	CCP1IF	TMR2IF	TMR1IF
bit7				bit 0			

Le registre PIR2 :

R/W-0	U-0	U-0	R /W-0	U-0	R/W-0	U-0	R/W-0
—	ADIF	RCIF	TXIF	SSPIF	CCP1IF	TMR2IF	TMR1IF
bit7				bit 0			

Registres PIE [19] :

Les registres PIE contiennent les bits d’activation individuels les interruptions périphériques. En raison du nombre de périphériques sources d’interruption, il y a deux interruptions périphériques pour activer les registres (PIE1, PIE2). Lorsque IPEN = 0, le bit PEIE doit être réglé pour permettre à l’un de ces périphériques Interrrompt.

Interruption périphérique activer PIE1 :

U-0	R /W -0	R /W -0	R /W-0	R /W -0	R/W-0	R /W -0	R/W-0
—	ADIE	RCIE	TXIE	SSPIE	CCP1IE	TMR2IE	TMR1IE
bit7				bit 0			

Le registre PIE2 :

R /W -0	U-0	U-0	R /W-0	U-0	R/W-0	U-0	R/W-0
OSFIE	—	—	EEIE	—	LVDIE	—	CCP2IE
bit7				bit 0			

Registres des IPR [19] :

Les registres des IPR contiennent les bits prioritaires individuels les interruptions périphériques. En raison du nombre de sources d’interruption périphériques, il y a deux

registres prioritaires d'interruption (IPR1, IPR2). L'utilisation des bits de priorité exigent que l'activation de la priorité d'interruption (IPEN) bit être réglé.

Priorité d'interruption périphérique IPR1 :

U-0	R/W-1	R/W-1	R/W-1	R/W-1	R/W-1	R/W-1	R/W-1
—	ADIP	RCIP	TXIP	SSPIP	CCP1IP	TMR2IP	TMR1IP
bit7							bit 0

Le registre IPR2 :

R/W-1	U-0	U-0	R/W-1	U-0	R/W-1	U-0	R/W-1
OSFIP	—	—	EEIP	—	LVDIP	—	CCP2IP
bit7							bit 0

2. 4 Aperçu sur le microcontrôleur PIC18F4431 :

Dans cette section, nous présentons uniquement des caractéristiques et les modules internes du microcontrôleur PIC18F4431 que nous avons utilisé dans ce projet. Le microcontrôleur PIC18F4431 offre des solutions rentables pour des applications à usage général écrites en C qui utilisent un système d'exploitation (RTOS) et nécessitent une pile de protocoles de communication complexes TCP/IP, CAN, USB ou ZigBee. Les appareils PIC18FXX fournissent la mémoire de programme flash dans des tailles de 8 à 128 koctets et mémoire de données de 256 à 4 koctets, fonctionnant à une gamme de 2 à 5 volts, à des vitesses allant de DC à 40 MHz [20]. Dans les appareils PIC18FXX, trois adresses au bas de la mémoire du programme sont réservées aux vecteurs matériels. Code d'application pour ces appareils place la destination adresses pour les réinitialisations matérielles, interruption de haut niveau Routines de service (ISR) et ISR de bas niveau en 00h, 08h et 18h, respectivement. Le diagramme des pins du PIC18F4431 est montré par la **Figure. 2. 1**.

Ce microcontrôleur est conçu pour la commande des moteurs électriques car il dispose de quelques modules dédiés qu'on ne trouve pas généralement dans les microcontrôleurs comme le module « MOTION FEEDBACK » qui permet le décodage des signaux de l'encodeur incrémental et le module MCPWM qui génère les signaux jusqu'à 8 signaux MLI

avec les options de complémentarité et le temps mort au convertisseur de puissance qui peut être constitué de 1 jusqu'à 4 bras.

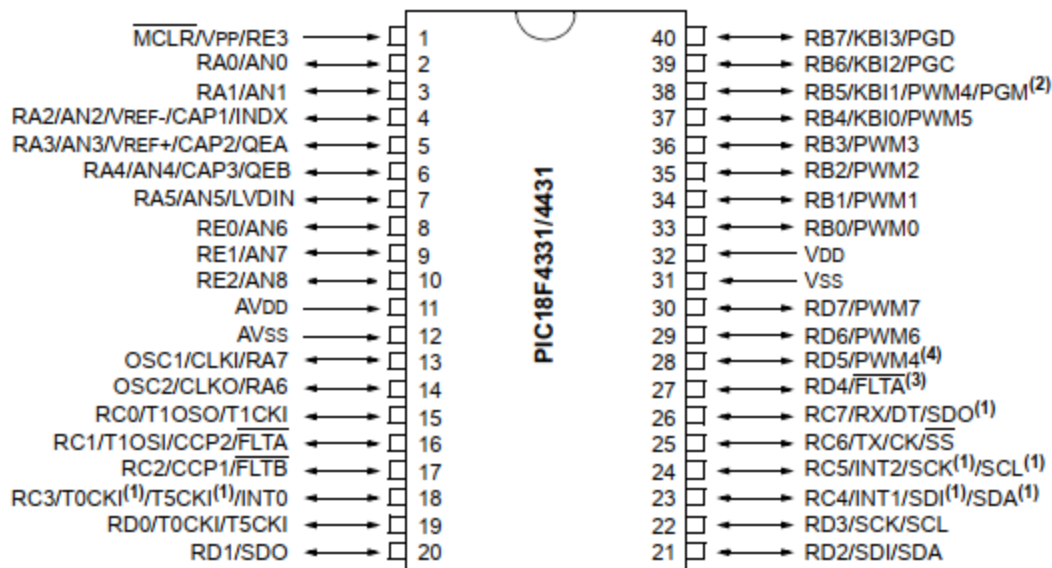


Figure. 2. 2 : Architecture des pins de PIC18F4431

2. 4. 1 Timers :

Le microcontrôleur PIC18F4431 dispose de quatre minuteries programmables qui peuvent être de nombreuses tâches, telles que la génération de signaux de synchronisation, entraînant des interruptions intervalles de temps spécifiques, mesurant les intervalles de fréquence et de temps, et ainsi de suite [23].

(i) Le module Timer0

Le module Timer0 possède les fonctionnalités suivantes [19] :

- Logiciel sélectionnable comme minuterie 8 bits ou 16 bits/ Counter
- Lisible et inscriptible
- Logiciel 8 bits dédié programmer
- Source d'horloge sélectionnable pour être externe ou interne
- Interruption sur débordement de FFh à 00h en 8 bits mode et FFFFh à 0000h en mode 16 bits
- Sélection de bords pour l'horloge externe

Registre de contrôle timer0 **T0CON** :

R /W-1	R /W-1	R /W-1	R /W-1	R /W-1	R/W-1	R /W-1	R/W-1
TMR0ON	T016BIT	T0CS	T0SE	PSA	T0PS2	T0PS1	T0PS0
bit 7					bit 0		

Les **Figures. 2. 3 et 2. 4** montrent les diagrammes de bloc de timer0 en mode 8 et 16 bits

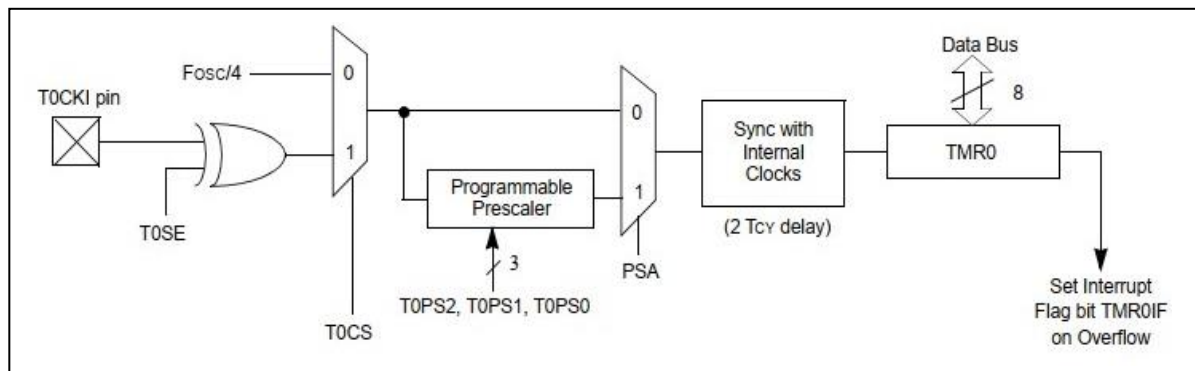


Figure. 2. 3 : Diagramme de bloc de timer0 en mode 8 bits [19]

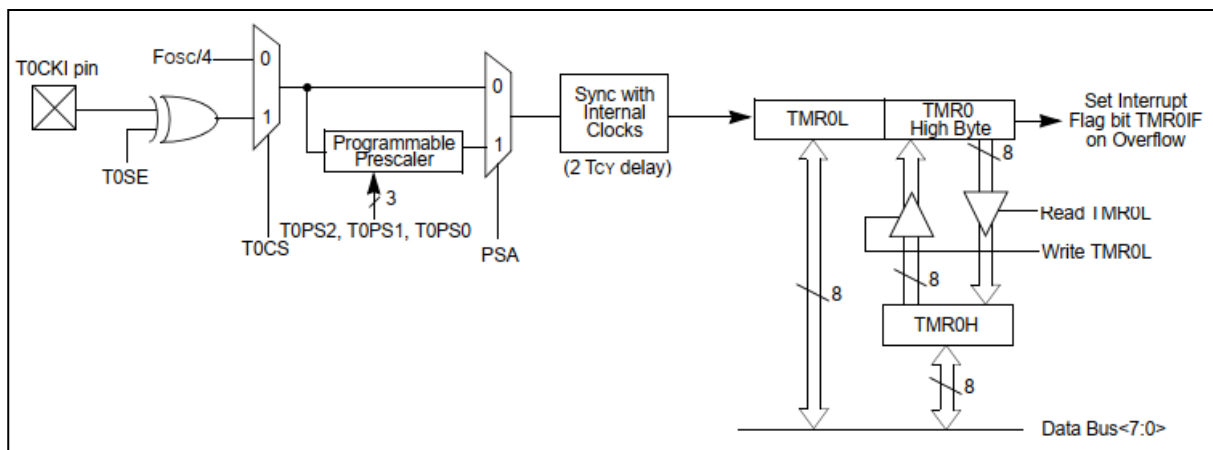


Figure. 2. 4 : Diagramme de bloc de timer0 en mode 16 bits [19]

(ii) Le module Timer1

Le minuterie/compteur du module Timer1 comporte les éléments suivantes fonctionnalités [19]:

- Minuterie/compteur 16 bits (deux registres 8 bits ; TMR1H et TMR1L)
- Lisible et inscriptible (les deux registres)
- Sélection d'horloges internes ou externes
- Interruption sur débordement de FFFFh à 0000h
- Réinitialiser à partir du déclencheur d'événement spécial du module CCP
- État du fonctionnement de l'horloge système

Registre de contrôle TIMER1 **T1CON** :

R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
RD16	T1RUN	T1CKPS1	T1CKPS0	T1OSCEN	$\overline{T1SYNC}$	TMR1CS	TMR1ON
bit7				bit 0			

Les **Figures. 2. 5 et 2. 6** montrent les diagrammes de bloc de timer1 à 8 et 16 bits.

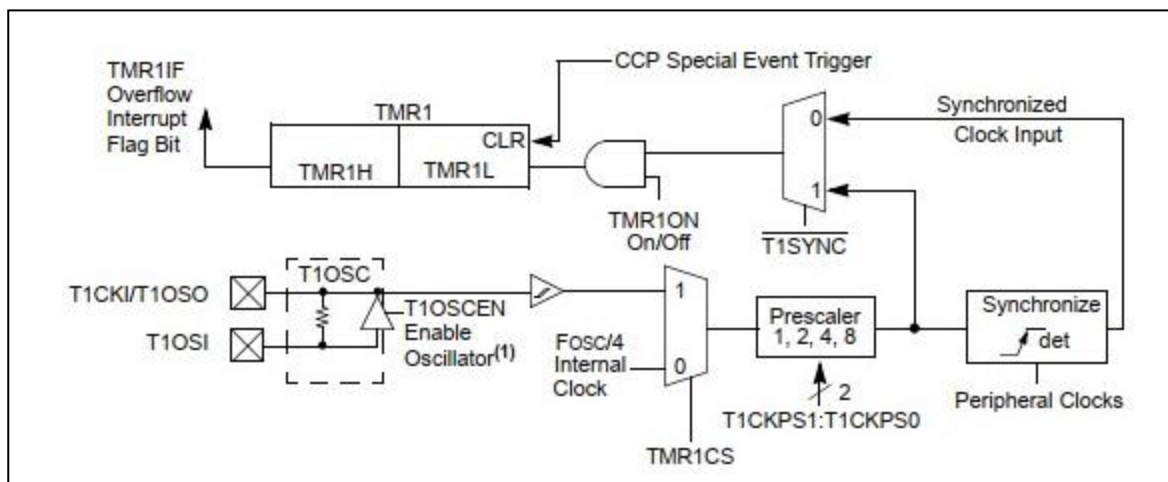


Figure. 2. 5 : Diagramme de bloc timer1 en mode 8 bits [19]

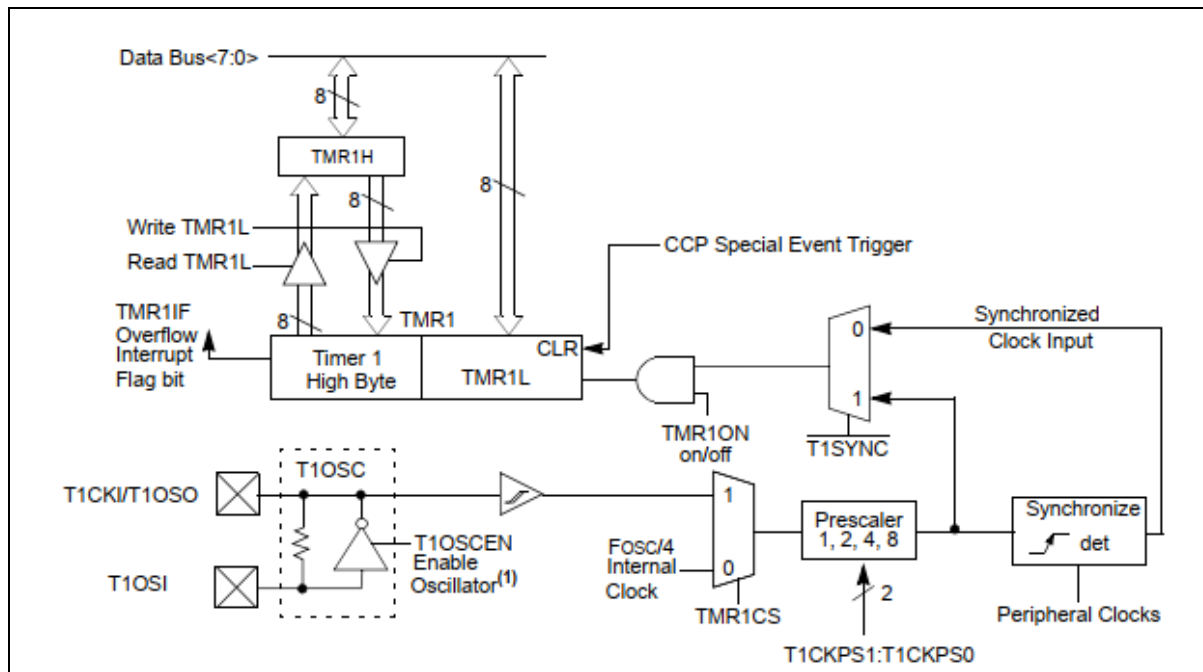


Figure. 2. 6 : Diagramme de bloc timer1 en mode lecture/écriture 16 bits [19]

(iii) Le module Timer2

La minuterie du module Timer2 possède les fonctionnalités suivantes [19] :

- Minuterie 8 bits (registre TMR2)
- Registre de période 8 bits (PR2)
- Lisible et inscriptible (les deux registres)
- Prédimensionneur programmable logiciel (1:1, 1:4, 1:16)
- Logiciel programmable postscaler (1:1 à 1:16)
- Interruption sur le match TMR2 avec PR2
- Utilisation facultative du module SSP de sortie TMR2 pour générer un décalage horaire

Le timer2 a un registre de contrôle affiché dans le registre T2CON. Il peut être arrêté par le bit de commande de compensation TMR2ON (T2CON<2>) pour minimiser la consommation d'énergie. La Figure. 2. 6 est un diagramme de bloc simplifié du Timer2 Module. Le registre T2CON affiche le contrôle Timer2 Register. Les paramètres préscaler et postscaler de Timer2 sont contrôlés par ce registre. Le timer2 peut être utilisé comme la base de temps de PWM pour le mode PWM du module CCP. Le registre TMR2 est lisible et inscriptible, et est autorisé sur n'importe quel appareil réinitialiser. L'horloge d'entrée (FOSC/4) dispose d'une option de pré-échelle de 1:1, 1:4 ou 1:16, sélectionnés par bits de contrôle

T2CKPS1:T2CKPS0 (T2CON<1:0>). La sortie de match de TMR2 passe par un postscaler 4 bits (qui donne une mise à l'échelle de 1:1 à 1:16 inclusivement) pour générer un Interruption TMR2 (verrouillé dans le bit d'indicateur TMR2IF, (PIR1<1>)). Le prescaler et le compteur de postcaler sont effacés lorsque l'un des éléments suivants se produit [19] :

- Une lecture au registre TMR2
- Une écriture au registre T2CON
- N'importe quel appareil Reset (réinitialisation de l'alimentation, réinitialisation **MCLR**Reset, timer de chien de garde ou réinitialisation de brown-out) TMR2 n'est pas effacé lorsque T2CON est écrit.

Le registre de contrôle TIMER2 T2CON :

	U-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
—	TOUTPS3	TOUTPS2	TOUTPS1	TOUTPS0	TMR2ON	T2CKPS1	T2CKPS0	
bit7								bit 0

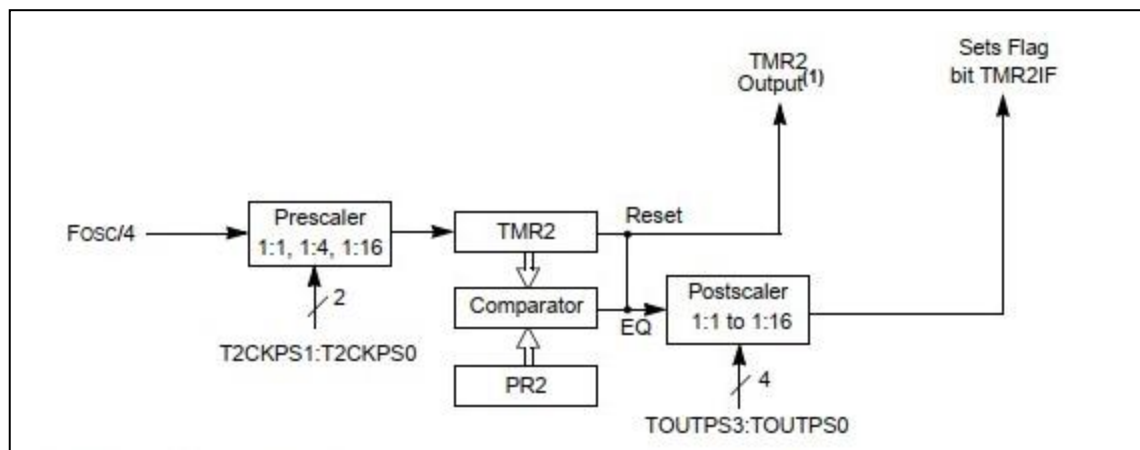


Figure. 2. 7 : Diagramme de bloc timer2 [19]

(iv) La module Timer5

Le module Timer5 implémente ces fonctionnalités [19] :

- Fonctionnement du minuterie/compteur 16 bits
- Modes de compteur synchrone et asynchrone
- Modes de fonctionnement continu et monomoteurs
- Quatre valeurs prescaler programmables (1:1 à 1:8)

- Interruption générée lors du match de période
- Déclencheur d'événements spéciaux Fonction de réinitialisation
- Registres à double tampon
- Opération pendant le sommeil
- Réveil CPU du sommeil
- Matériel sélectionnable Réinitialiser l'entrée avec un réveil Fonction

Le registre de contrôle TIMER5 T5CON :

R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
T5SEN	<i>RESEN</i>	T5MOD	T5PS1	T5PS0	<i>T5SYNC</i>	TMR5CS	TMR5ON
bit7				bit 0			

La **Figure. 2. 8** montre le diagramme de bloc TIMER5 (mode lecture/écriture 16 bits affiché).

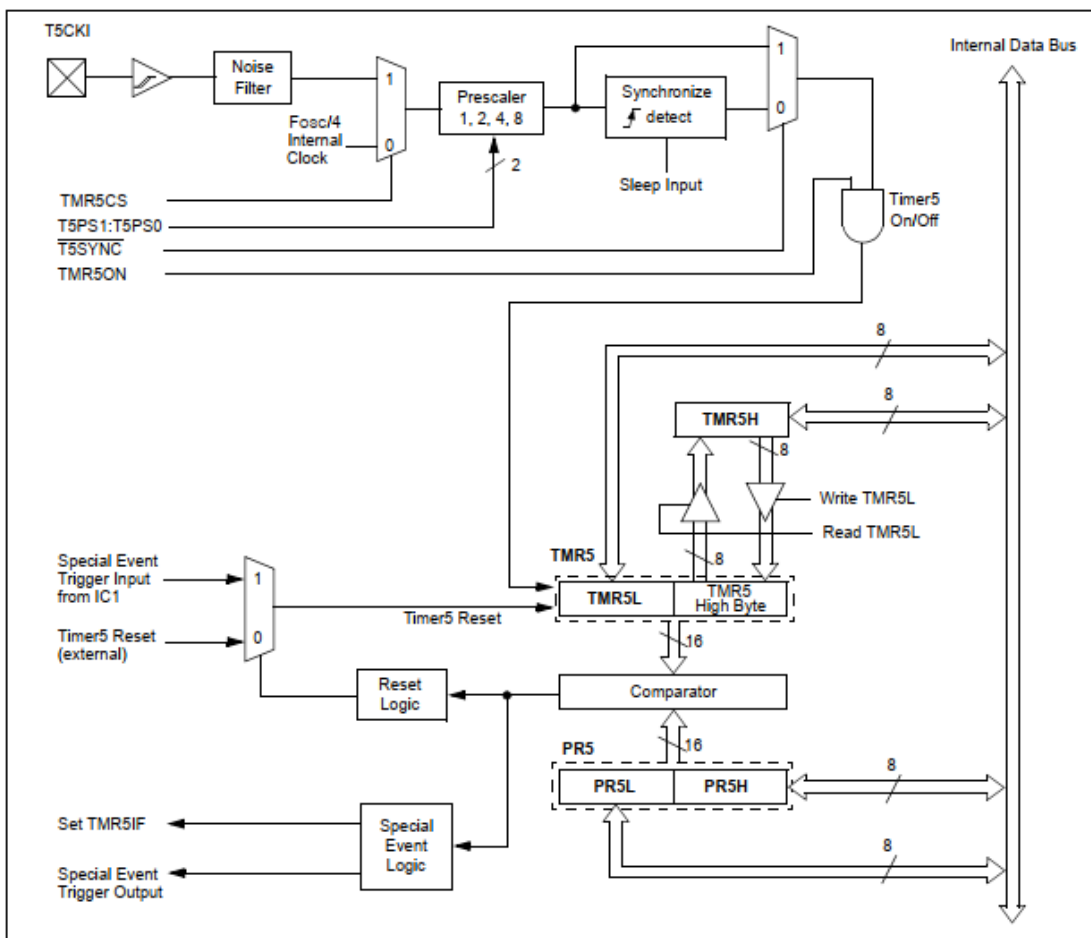


Figure. 2. 8 : Diagramme de bloc TIMER5 (mode lecture/écriture 16 bits affiché)

2. 4. 2 Le module POWER CONTROL PWM

Le mode PWM a l'option de créer un signal carré reconfigurable en fonction du cycle de service d'onde à une fréquence définie par l'utilisateur. Le logiciel d'application peut modifier le cycle ou la période de service en modifiant la valeur écrite en registre des fonctions [24]. En mode PWM, la broche CCP1 produit jusqu'à une sortie PWM de résolution 10 bits. Depuis la broche CCP1 est multiplexée avec le verrou de données PORTC, le bit TRISC<2> doit être autorisé à faire le CCP1 un pin de sortie [19]. La fonctionnalité du module PWM est présentée par la Figure. 2. 9.

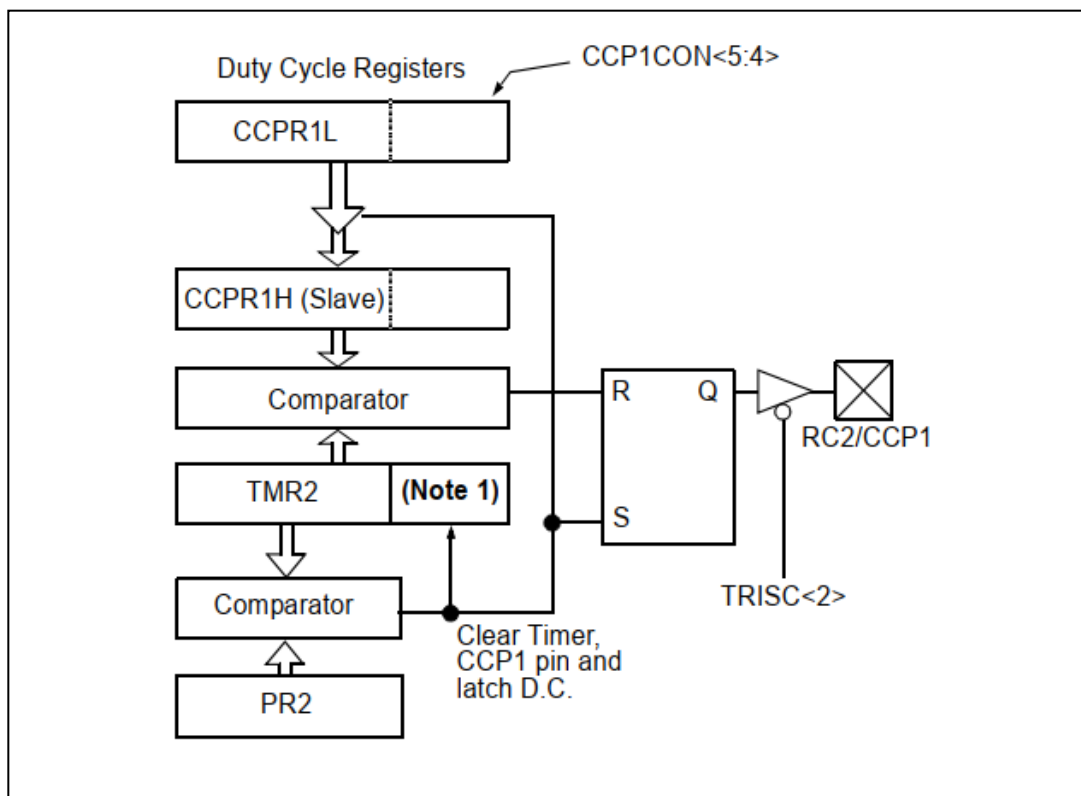


Figure. 2. 9 : Diagramme de bloc PWM simplifié [19]

Une production du signal PWM (voir Figure. 2. 10) a une base de temps (période) et un temps que la production est élevée (Duty cycle). Les étapes suivantes doivent être prises lors de la configuration le module CCP pour l'opération PWM [19] :

1. Définissez la période PWM en écrivant au registre PR2.
2. Définissez le cycle de service PWM en écrivant au CCPR1L s'inscrire et CCP1CON<5:4> bits.

3. Faire de la goupille CCP1 une sortie en TRISC<2> bit.
4. Définissez la valeur de prscale TMR2 et activez timer2 en écrivant à T2CON.
5. Configurez le module CCP1 pour le fonctionnement de PWM.

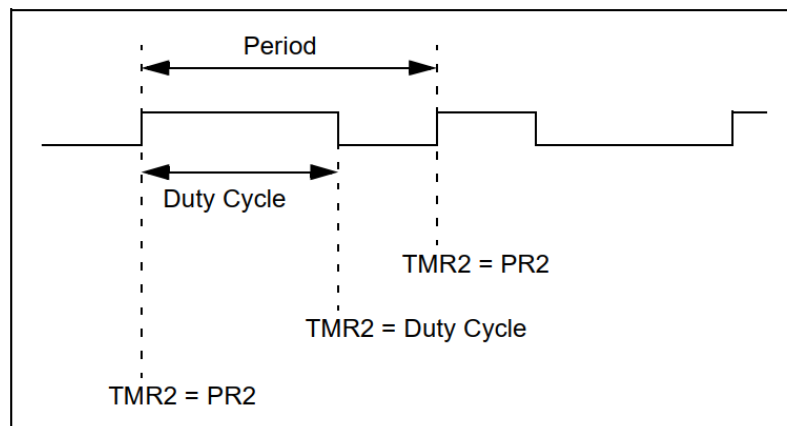


Figure. 2. 10 : Sortie PWM [19]

Le module Motion Feedback est un périphérique conçu pour les applications de rétroaction de mouvement. Avec le module PWM power control, il fournit une variété de solutions de contrôle pour un large éventail de moteurs électriques. Le module se compose en fait de deux sous-modules [19] :

- Module de capture d'entrée (IC)
- Interface encodeur de quadrature (QEI)

Le module PCPWM (power control PWM) simplifie la mise en œuvre de la tâche de la génération des impulsions MLI pour les applications de commande des moteurs et de conversion de puissance électrique. En particulier, le contrôle de puissance et de mouvement suivant les applications sont prises en charge par le module PWM :

- Induction AC en trois phases et en une seule phase Moteurs
- Moteurs de réticence commutée
- Moteurs sans brosse DC (BLDC)
- Alimentations non ininterrompues (UPS)
- Plusieurs moteurs à brosse DC

Ce mode offre les caractéristiques suivantes :

- Jusqu'à 8 briches de sorties MLI avec 4 générateurs de rapport cyclique. Les broches peuvent fonctionner en pair pour donner un contrôle demi-point.
- Résolution jusqu'à 14 bits, selon la période MLI
- Génération des MLI suivant des triangulaires en dent de scie ou symétriques.
- Génération du temps mort réglable entre les MLI en mode pair.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté en premier temps les définitions, les familles et la classification des microcontrôleurs. En particulier, nous avons choisi le microcontrôleur PIC18F4431 comme un outil de commande numérique, car les caractéristiques et les modules internes que dispose ce dernier s'adaptent mieux au notre projet. Cette cible qu'elle offre de modules dédiés pour la commande des moteurs électriques, mais elle reste insuffisante pour cadencer des stratégies de commande avancées des machines électriques.

Résultats de Simulations Matlab & Proteus

Sommaire du Chapitre :

3. 1 Introduction.....	44
3. 2 Simulations Matlab	44
3. 3 Simulations Proteus.....	58
3. 4 Conclusion.....	68

Résumé du Chapitre :

Dans ce chapitre, nous allons faire une commande des angles de commutations de l'onduleur MLI en créneaux et l'onduleur à 5 niveaux. Ceci est accompli par l'optimisation de deux systèmes d'équations non-linaires à trois et deux variables. Avant de faire la plateforme matérielle, il est souhaitable d'effectuer dans ce chapitre les simulations Matlab et Proteus. A cet effet, en se basant sur les programmes développés ainsi que les outils de développement utilisés. Pour évaluer la qualité du convertisseur d'énergie, le THD est calculé par le biais de l'algorithme FFT.

3. 1 Introduction

La qualité de la tension de sortie d'un onduleur dépend largement de la technique de commande utilisée. En plus, la structure choisie de l'onduleur permet aussi de produire des signaux de sortie améliorés. Bien que ces paramètres aient un impact important sur la qualité des grandeurs de sortie, mais la performance d'un onduleur reste affectée par la pollution harmonique et qui ne peut pas être filtrée par la charge. De nos jours, une nouvelle technique basée sur le découpage de l'onde rectangulaire dénommée la modulation de largeur d'impulsion (MLI) ainsi que la commande à pleine onde à plusieurs niveaux sont largement utilisées pour la commande des onduleurs mono et triphasés.

Pour bien comprendre la fonctionnalité des convertisseurs schématisés par les **Figures. 1. 7 et 1. 10**, nous allons élaborer par la suite plusieurs formes de la tension et du courant de sortie utilisant les deux logiciels Matlab et Proteus. Les programmes développés sont présentés et l'évaluation du THD est aussi évoquée à la fin de ce chapitre. Dans cette série de simulations, on utilise une charge inductive et on applique la méthode de Newton-Raphson pour obtenir les angles optimaux.

3. 2 Simulations Matlab

Nous avons mentionné dans le Chapitre 1 que les onduleurs exigent une optimisation sérieuse des angles de commutations des transistors. Le Matlab est un logiciel commercial de calcul interactif. Il permet de réaliser des simulations numériques basées sur des algorithmes d'analyse numérique. Il peut donc être utilisé pour la résolution approchée d'équations différentielles, d'équations aux dérivées partielles ou de systèmes linéaires et non-linéaires, etc. Le Matlab est un logiciel de calcul matriciel à syntaxe simple, il peut être considéré comme un langage de programmation adapté pour les problèmes scientifiques, grâce à ses fonctions spécialisées. Aussi, il possède de bonnes capacités graphiques pour présenter des résultats ou pour créer des applications. Il peut être intégré avec d'autres langages à savoir C, FORTRAN, VHDL, etc. Il fonctionne dans plusieurs environnements tels que l'UNIX/X, le Windows et le Macintosh [14]. Schéma de blocks principaux du Matlab est montré par la **Figure. 3. 1**.

3. 2. 1 Onduleur MLI monophasé

Dans ce convertisseur, on joue sur l'amplitude du fondamental pour varier la valeur efficace de la tension de sortie. La fréquence de cette dernière est contrôlée par la période des

impulsions MLI générées. Alors, le réglage du débit de puissance dans la charge est lié à la combinaison d'angles optimisés après la solution du système d'équation donné par (1.5). Pour cette raison, on commence par l'optimisation de ce système non-linéaire.

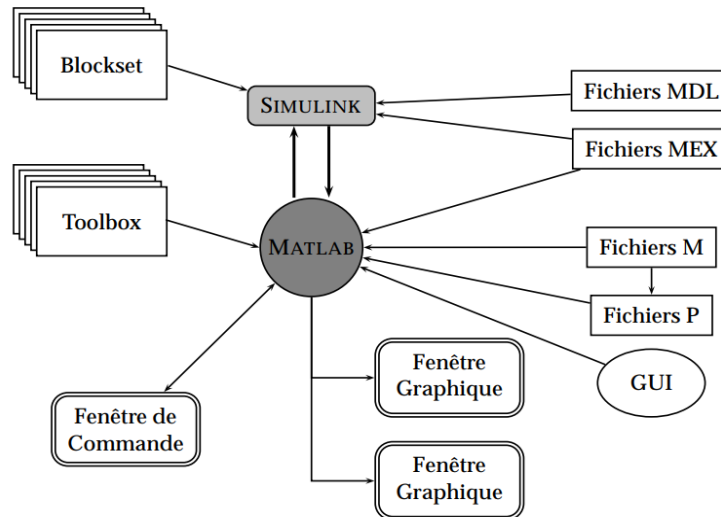


Figure. 3. 1 : Schéma de blocks principaux du Matlab [14]

(i) Calcul des angles de commutations

Dans cette partie de notre travail, un code Matlab (Voir Annexe A) a été développé pour la recherche des angles inconnus en fonction du taux de réglage, $r = V_1/2E$, où V_1 est l'amplitude du fondamental et E est l'alimentation du convertisseur. Durant l'optimisation, la contrainte (1.8) est toujours considérée dans l'algorithme de Newton-Raphson. L'allongement de l'intervalle du taux de réglage dépend du nombre de variables considéré. Dans notre projet, on a utilisé les formes des signaux comme données par la Figure. 1. 8 où l'algorithme de Newton-Raphson a trouvé des solutions uniquement pour, $0.66 < r < 1$. C'est-à-dire, on ne peut avoir un réglage parfait avec trois angles de commutation. D'une autre manière, nous pouvons obtenir des valeurs de la tension de sortie de « 0 » à une valeur maximale si la forme de la Figure. 1. 9 est utilisée. Comme montré dans la Figure. 3. 2, les allures des angles ont des natures non-linéaires dont la sélection d'une combinaison particulière est effectuée par le changement du rang du Tableau. 3. 1. Parce que le convertisseur d'énergie est un système rapide, l'optimisation est exécutée en mode « off-line ». A partir de la Figure. 3. 2 et le Tableau. 3. 1, l'erreur absolue aboutie par l'algorithme de Newton-Raphson est environ de 10^{-11} .

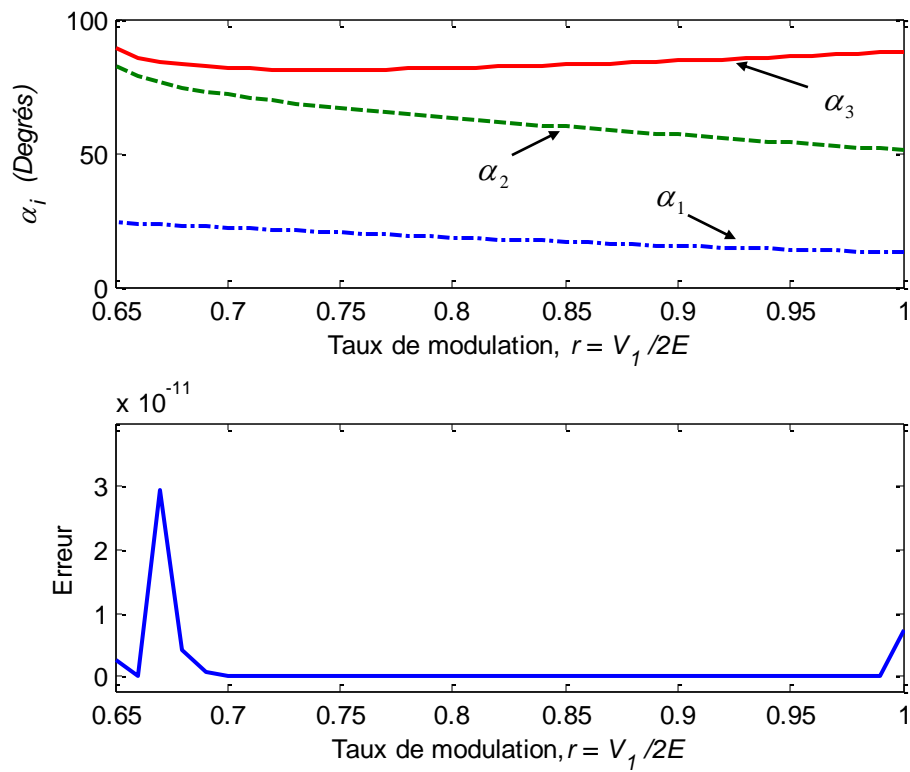


Figure. 3. 2 : Solutions du système (1.5) par la méthode de Newton-Raphson

Tableau. 3. 1 Angles de commutation optimaux trouvés par la méthode de Newton-Raphson du système (1.5)

$r = \frac{V_1}{2E}$	α_1	α_2	α_3	Erreur absolue $10^{-11}x$
1.00	13	51	88	0.738757996927689
0.98	13	52	87	0.000055326967316
0.96	14	53	86	0.000015063770274
0.94	14	54	86	0.000010409817680
0.92	15	56	85	0.000003845602026
0.90	15	57	84	0.000013287388363
0.88	16	58	84	0.000001392629148

0.86	17	59	83	0.000017096513554
0.84	17	60	83	0.000010161908153
0.82	18	62	82	0.000000798318893
0.80	19	63	82	0.000013374821841
0.78	19	64	81	0.000028793845539
0.76	20	66	81	0.000133865156882
0.74	21	68	81	0.000655270282972
0.72	21	69	81	0.001216683995267
0.70	22	72	82	0.017316608747823
0.68	23	74	83	0.410230741556850
0.66	24	79	86	0.000028338731504

(ii) Allures de la tension et du courant de charge

Les deux structures d'onduleurs des **Figures. 1. 7** et **1. 10** sont réunis avec un seul circuit de puissance comme montré par la **Figure. 3. 3**. Donc, il suffit d'agir sur les signaux de commande pour faire marcher soit l'onduleur MLI en créneaux ou soit l'onduleur à 5 niveaux. Le code Matlab pour ce type de commande MLI est donné dans l'Annexe B dont la fréquence est maintenue à 50 HZ. La charge inductive a pour $R = 50\Omega$ et $L = 51$ mH et chaque source est fixée à 15V. Les résultats de simulation sont présentés à travers des **Figures. 3. 4-3.6** qui montrent les différentes formes de la tension et du courant circulant dans le récepteur. A titre d'exemple, trois sortes de combinaisons des angles, α_i , $i = 1, 2$ et 3 sont choisis à partir du **Tableau. 3. 1** correspondant aux valeurs de taux de réglage $r = 1, 0.86$ et 0.66 respectivement. Nous observons que la tension de charge possède 3 niveaux (0V, 30V et -30V) avec des intervalles de conduction variables. Le courant augmente et diminue d'une façon exponentielle. Le spectre de la tension est aussi tracé au moyen de l'algorithme FFT comme présenté dans l'Annexe C. On remarque que le THD est inversement proportionnel au taux de réglage r . On peut aussi conclure que le THD ne reste jamais constant pendant le changement de la tension efficace de sortie.

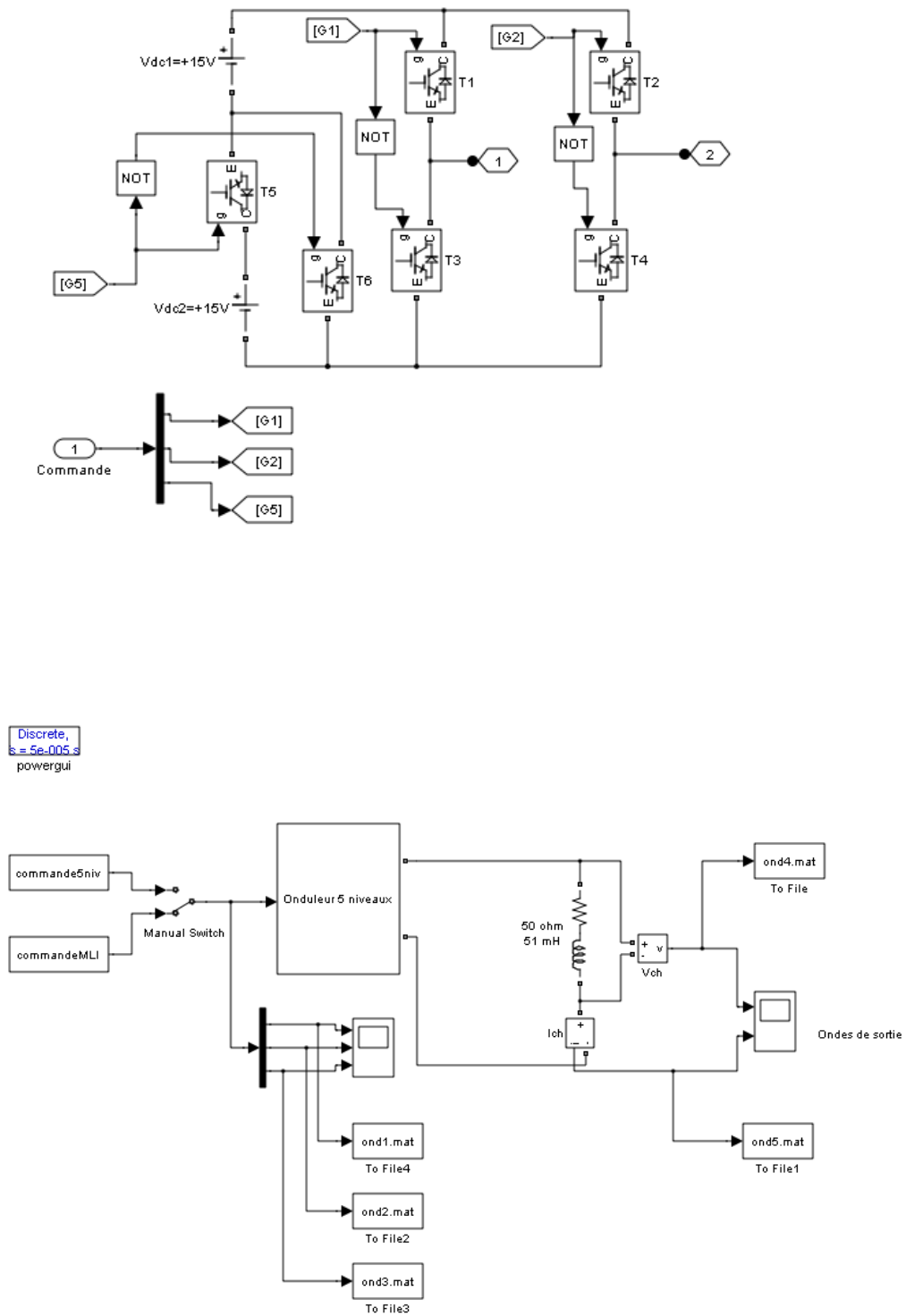


Figure. 3.3 : Schéma de blocks des onduleurs MLI et 5 niveaux monophasé

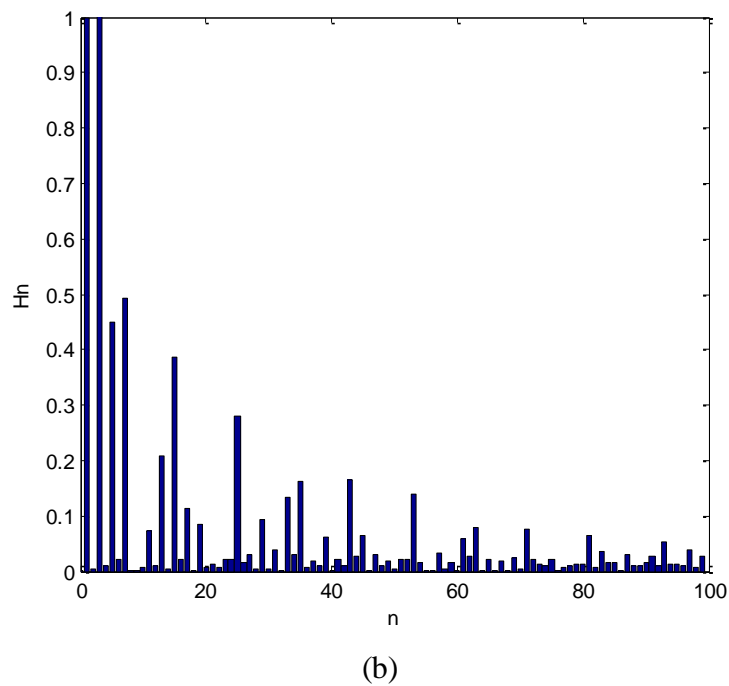
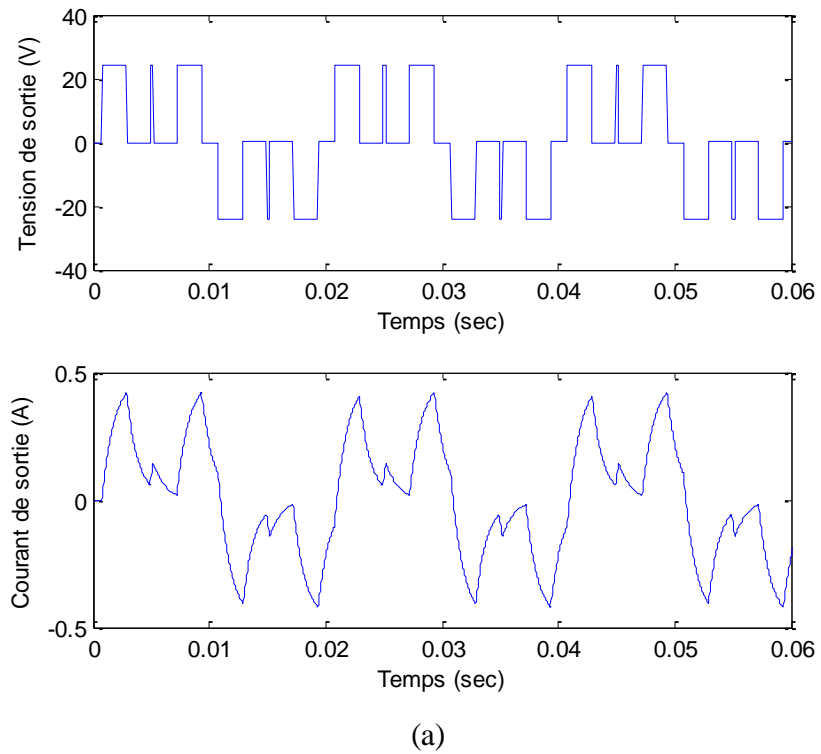


Figure. 3. 4 : Signaux de sortie pour $\alpha_1 = 13$, $\alpha_2 = 51$ et $\alpha_3 = 88$

(a) Formes d’ondes de la tension et du courant de charge avec $r = 1.00$

(b) Spectre de la tension de sortie avec un THD = 1.6429

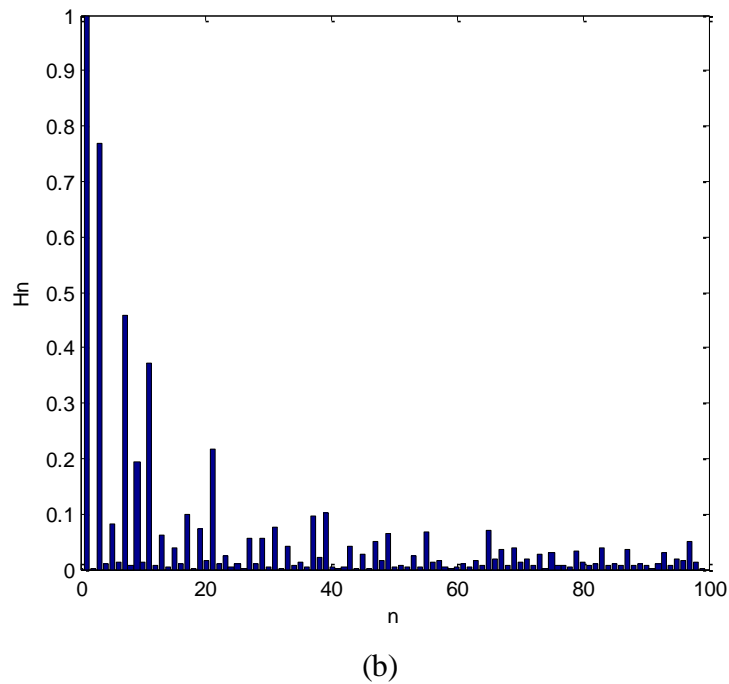
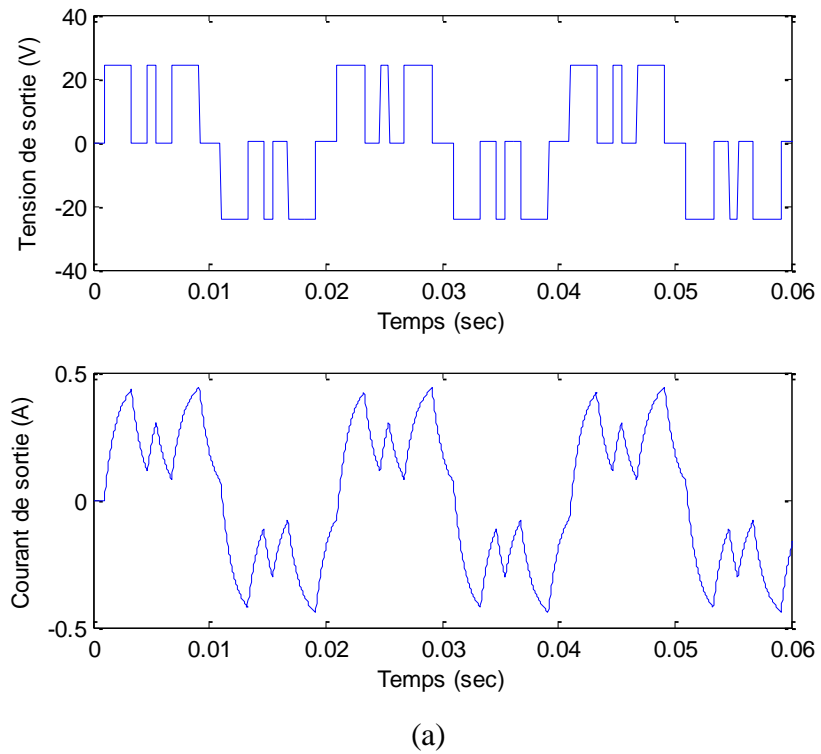


Figure. 3. 5 : Signaux de sortie pour $\alpha_1 = 17$, $\alpha_2 = 59$ et $\alpha_3 = 83$

(a) Formes d'ondes de la tension et du courant de charge avec $r = 0.86$

(b) Spectre de la tension de sortie avec un THD = 1.0596

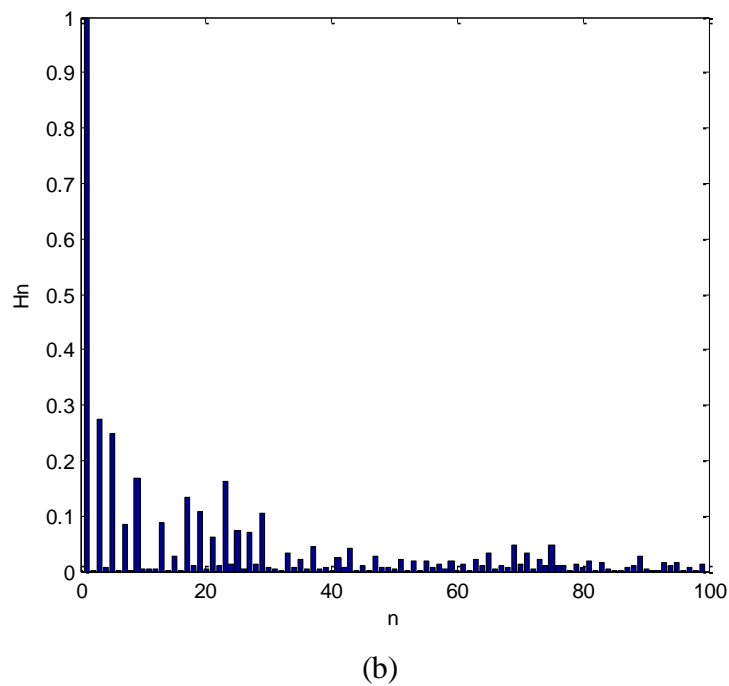
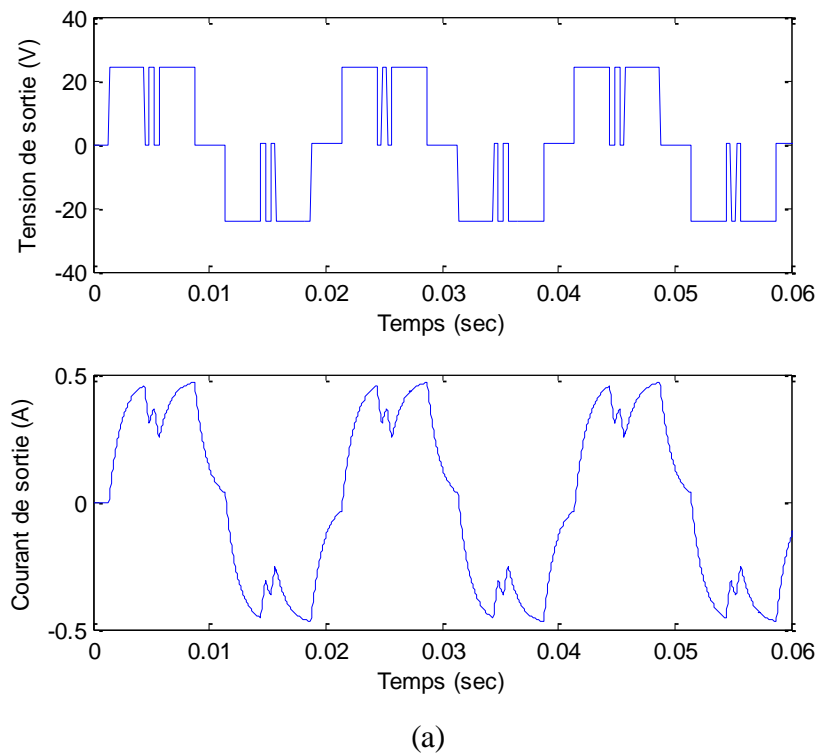


Figure. 3. 6 : Signaux de sortie pour $\alpha_1 = 24$, $\alpha_2 = 79$ et $\alpha_3 = 86$

(a) Formes d'ondes de la tension et du courant de charge avec $r = 0.66$

(b) Spectre de la tension de sortie avec un THD = 0.5334

3. 2. 2 Onduleur monophasé à 5 niveaux

Dans cette section, le système d'équation donné par (1.9) est pris en compte pour obtenir en premier lieu les angles optimaux de l'onduleur à 5 niveaux. Ensuite, l'illustration des résultats de simulations Matlab est effectuée par les mêmes valeurs de la charge et les tensions d'alimentation.

(i) Calcul des angles de commutations

Le code Matlab généré dans l'Annexe D est utilisé pour calculer les deux angles θ_1 et θ_2 . Dans ce cas, r varie entre 0.68 et 1.1 et les angles sont toujours classés comme montrée par la Figure. 3. 7 et le Tableau. 3. 2. L'erreur absolue aboutie par l'algorithme de Newton-Raphson est environ de 10^{-8} . A partir de ces résultats, on peut souligner que la méthode d'interpolation ne peut pas être exécutée en fonction de r , car les natures de variations de θ_1 et θ_2 ne sont pas monotones. Pour une application d'une commande en boucle fermée, r est imposé par le correcteur et peut avoir des valeurs aléatoires, un algorithme qui fait le choix de la combinaison correspondante de θ_1 et θ_2 doit être implémenté.

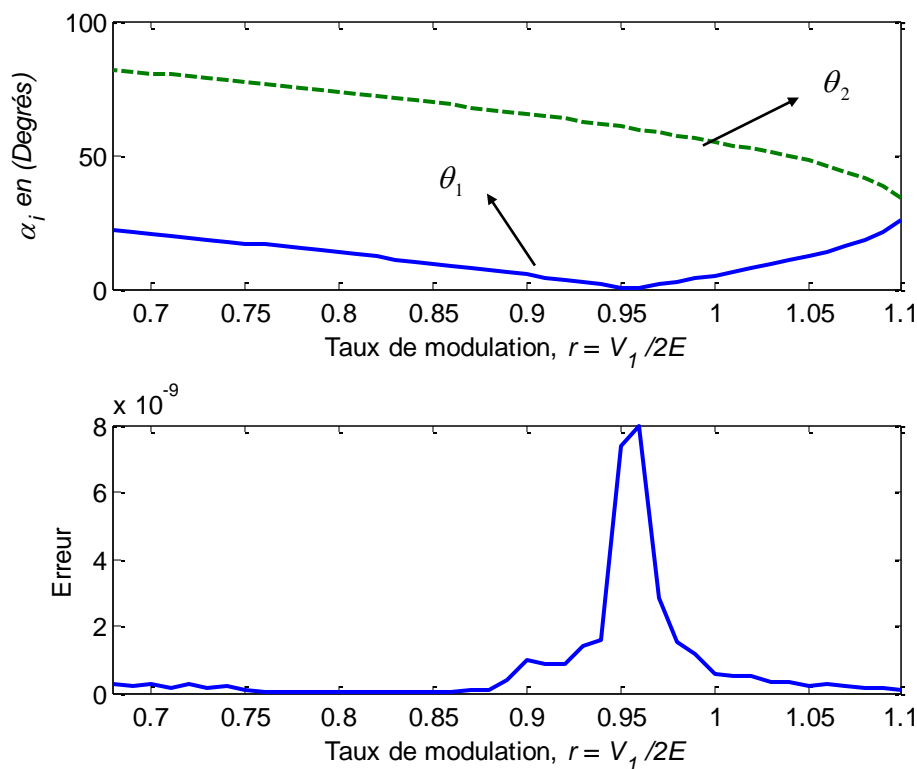


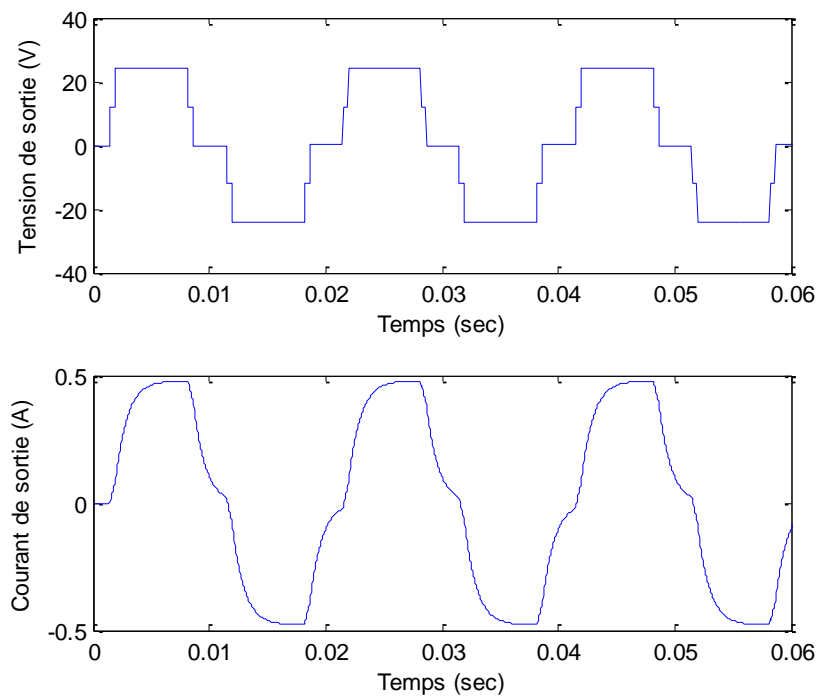
Figure. 3. 7 : Solutions du système (1.9) par la méthode de Newton-Raphson

Tableau. 3. 2 Angles de commutation optimaux trouvés par la méthode de Newton-Raphson du système (1.9)

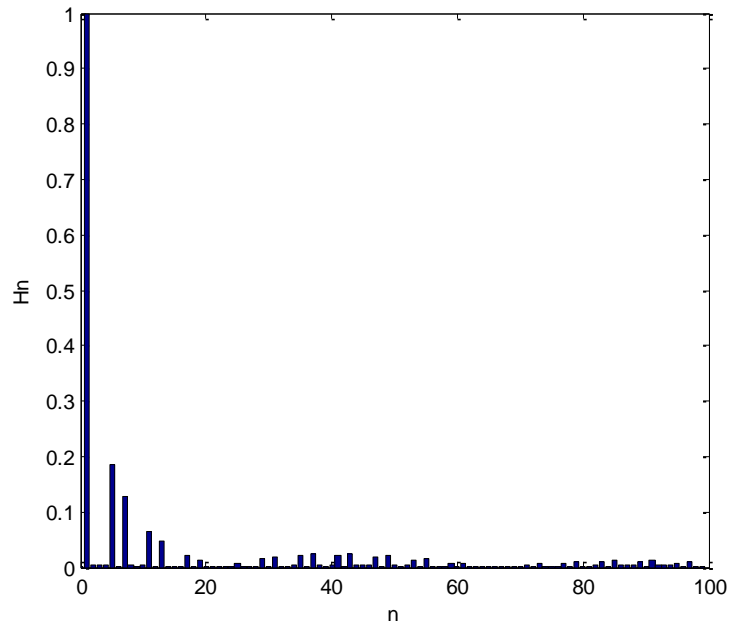
$r = \frac{V_1}{2E}$	θ_1	θ_2	Erreur absolue $10^{-8}x$
1.10	26	34	0.008081201291102
1.08	18	42	0.013790145790289
1.06	14	46	0.024643574588422
1.04	11	49	0.032998532743901
1.02	8	52	0.051192361122545
1.00	5	55	0.054985951296019
0.98	3	57	0.153361340009519
0.96	1	59	0.794791641027531
0.94	2	62	0.160526900269392
0.92	3	63	0.087450283748397
0.90	5	65	0.098059394914396
0.88	7	67	0.007322625292357
0.86	9	69	0.003393325726225
0.84	10	70	0.005255646348244
0.82	12	72	0.004625411294217
0.80	13	73	0.004747091005826
0.78	15	75	0.001963983127013
0.76	16	76	0.004802782586299
0.74	18	78	0.021381336379502
0.72	19	79	0.026986620519410
0.70	21	81	0.026070042264010
0.68	22	82	0.024489982685130

(ii) Allures de la tension et du courant de charge

Avec trois combinaisons des angles de conduction des transistors, les courbes de la tension et du courant de charge sont tracées comme montrées par les **Figures. 3. 8 - 3. 10**. On voit que la réponse de la tension a une forme en escaliers à 5 niveaux. Quand on met une valeur maximale de r , le THD devient petit. Ce phénomène a été aussi observé dans le cas de la commande de l'onduleur MLI en créneaux. En comparant les spectres des deux onduleurs, on remarque que l'onduleur à 5 niveaux offre des meilleures valeurs du THD. Ce convertisseur est un peu coûteux puisque deux alimentations de tension isolées doivent être câblées avec un supplément de deux semi-conducteurs auxiliaires.



(a)

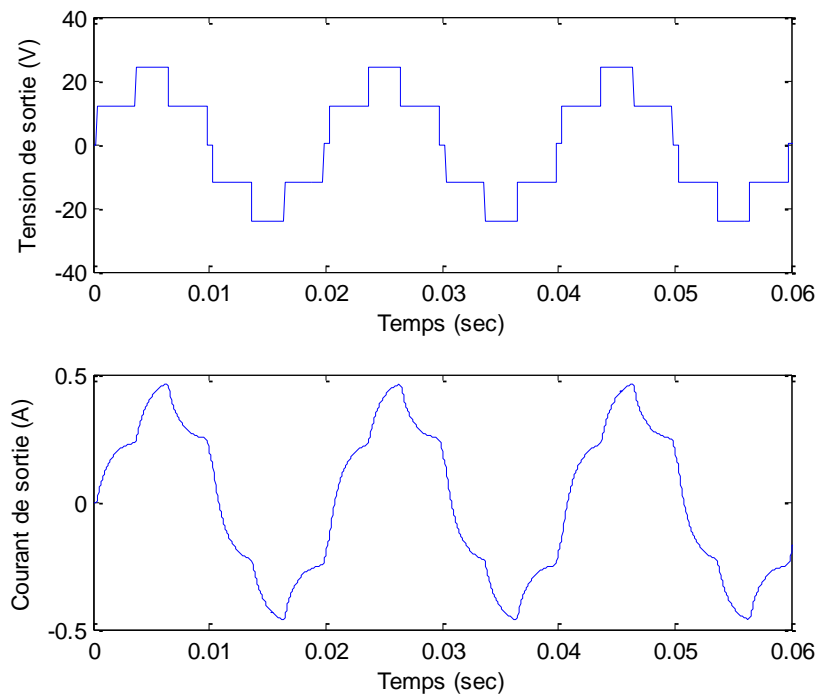


(b)

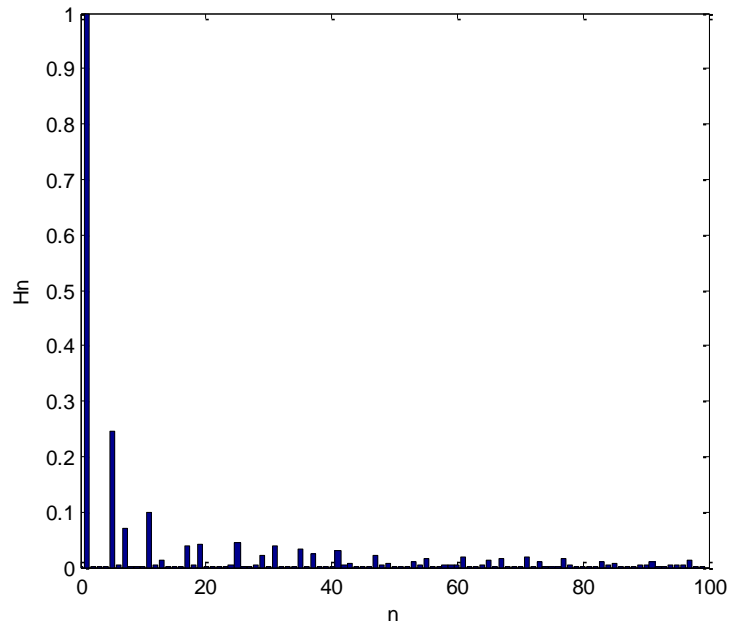
Figure. 3. 8 : Signaux de sortie pour $\theta_1 = 26$ et $\theta_2 = 34$

(a) Formes d'ondes de la tension et du courant de charge avec $r = 1.1$

(b) Spectre de la tension de sortie avec un THD = 0.2517



(a)

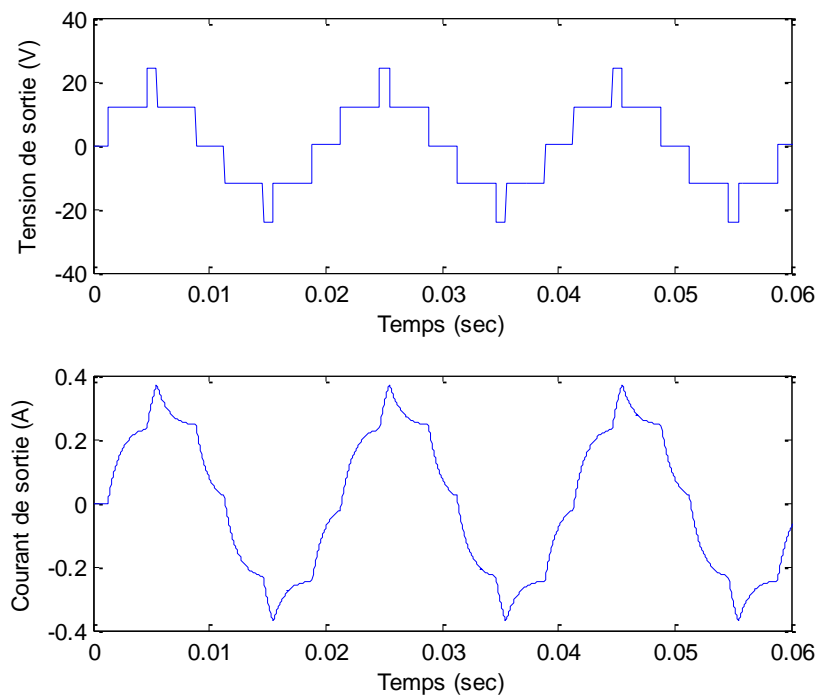


(b)

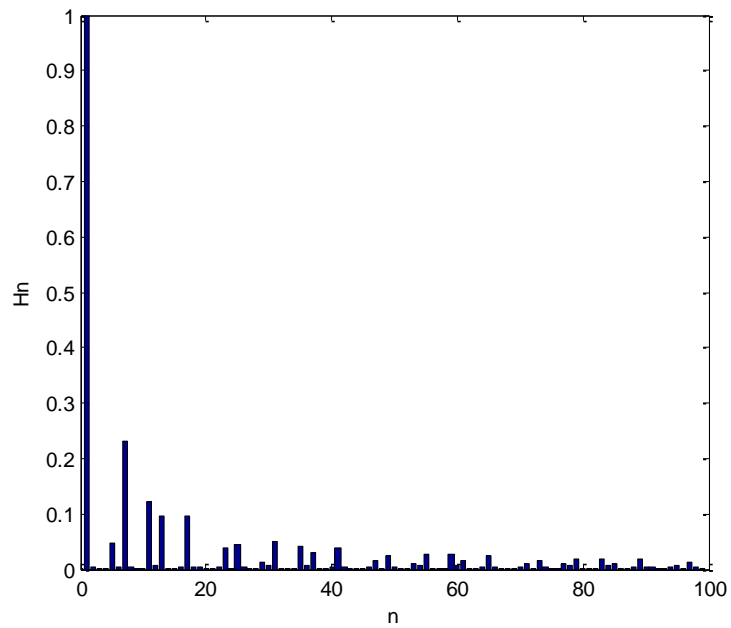
Figure. 3. 9 : Signaux de sortie pour $\theta_1 = 5$ et $\theta_2 = 65$

(a) Formes d'ondes de la tension et du courant de charge avec $r = 0.9$

(b) Spectre de la tension de sortie avec un THD = 0.2966



(a)



(b)

Figure. 3. 10 : Signaux de sortie pour $\theta_1 = 22$ et $\theta_2 = 82$ (a) Formes d'ondes de la tension et du courant de charge avec $r = 0.68$

(b) Spectre de la tension de sortie avec un THD = 0.3250

3. 3 Simulations Proteus

Avant de réaliser la plate forme matérielle de notre projet, il est préférable de tester d'abord le code CCS développé. Ceci est accompli par la programmation du PIC18F4431 et le branchement de différents composants électroniques des deux circuits électriques à savoir le circuit de commande et le circuit de puissance. Dans cette partie de notre travail, nos simulations ont été réalisées à l'aide de l'utilisation de trois logiciels (CCSPICC, MPLAB et ISIS Proteus).

- L'environnement CCSPIC est utilisé pour la création et la compilation du code C développé.
- L'environnement MPLAB est exploité pour le calcul du temps d'exécution et la programmation du PIC18F4431 via le programmeur PICkit 3
- L'environnement ISIS Proteus est fait pour la réalisation du circuit électrique et l'illustration des signaux simulés au moyen de l'oscilloscope virtuel ou autres.

3. 3. 1 Circuit de commande

Dans le but d'avoir seulement les résultats de simulation Proteus, la liste des composants du circuit de commande comme donnée par le **Tableau. 3. 3** est suffisante. Nous avons deux potentiomètres, l'un est utilisé pour la commande de la fréquence des signaux et l'autre sert à changer le taux de réglage (c'est-à-dire la valeur efficace de la tension de sortie). Dans ce projet, trois modes de fonctionnement sont assurés par un seul bouton poussoir.

- Mode 1 : Onduleur monophasé à commande décalée.
- Mode 2 : Onduleur monophasé à commande MLI en créneaux.
- Mode 3 : Onduleur monophasé à 5 niveaux.

L'installation de l'afficheur LCD est utile, puisqu'il nous montre le type du mode actuel, les mesures, les gradeurs de réglage, etc. La **Figure. 3. 11** montre le câblage des divers composants du circuit de commande à base du PIC18F4431. Ici, nous avons exploité les modules PWMX pour obtenir nos signaux de commande.

- Les modules PWM0 et PWM1 contrôlent le premier bras du pont en H.
- Les modules PWM2 et PWM3 contrôlent le deuxième bras du pont en H.
- Les modules PWM4 et PWM5 contrôlent les transistors auxiliaires.

Tableau. 3. 3 : Liste du circuit de commande à base du PIC18F4431

Ordre	Désignation	Référence	Quantité
1	Microcontrôleur	PIC18F4431	1
2	Afficheur LCD	LCD 2x16	1
3	Oscilloscope	Virtuel	1
4	Potentiomètre	1k	2
5	Bouton poussoir	Active	2
6	Résistance	4.7k	0

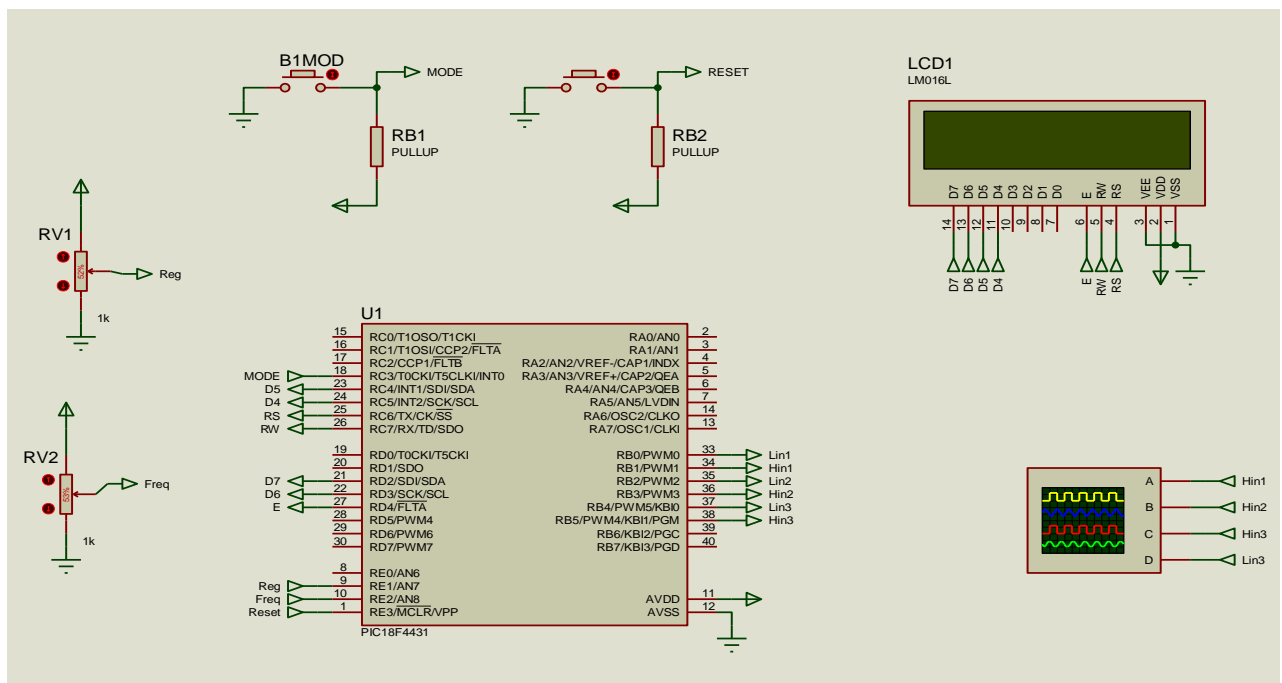


Figure. 3. 11 : Circuit électrique de la commande des onduleurs

3. 3. 2 Circuit de puissance

Ce circuit reçoit des signaux de commande à deux niveaux (haut et bas) auprès de circuit de commande. Nous avons 6 impulsions complémentaires et périodiques. La liste correspondante des composants nécessaires est donnée par le **Tableau 3. 4**. Chaque driver IR2112 commande un seul bras et génère deux signaux opposés mais avec des points de mass différents afin d'éviter le court circuit au niveau du transistor en haut (high-side transistor). La diode et le condensateur sont obligatoires pour créer une différence de potentielle supérieur à zéro aux bornes de la base/émetteur du transistor « high-side ». Notons que la tension base/émetteur du transistor « low-side » est toujours positive.

Le circuit de puissance avec la charge inductive ($R = 50\Omega$ et $L = 51\text{mH}$) est schématisé par la **Figure. 3. 12**. Les caractéristiques du transistor IRF4140 couvrent notre application dans ce projet, parce que le courant consommé dans la charge ne dépasse pas 1A et la tension maximale à ses bornes vaut 30V.

Tableau. 3. 4 : Liste du circuit de puissance avec la charge inductive

Ordre	Désignation	Référence	Quantité
1	Transistor	IRF740	6
2	Driver	IR2112	3
3	Batterie	15VDC	2
4	Diode	1N4148	3
5	Condensateur	220uF	3
6	Inductance	51mH	1
7	Résistance	50	1

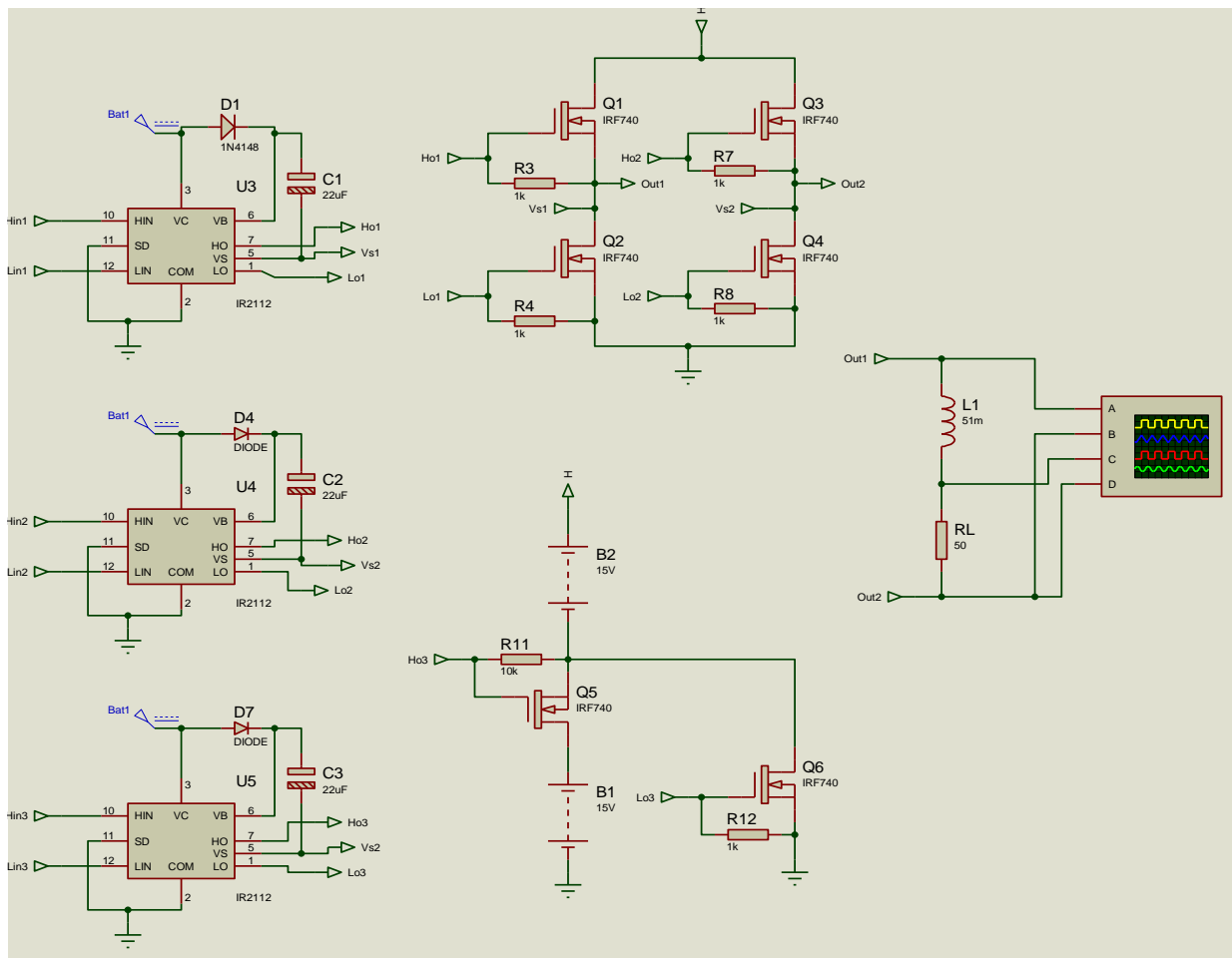
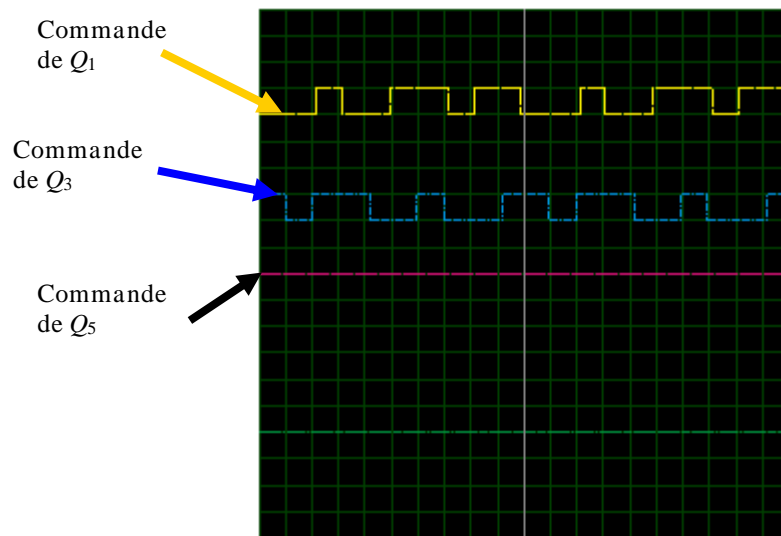


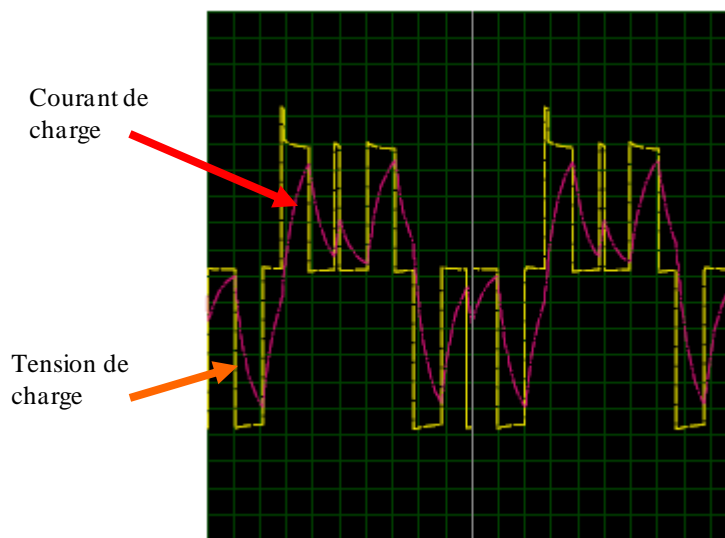
Figure. 3. 12 : Circuit électrique de puissance (onduleurs)

3. 3. 3 Simulations de l'onduleur MLI en créneau

Selon les circuits des Figures. 3. 11 et 3.12, on a lancé la simulation Proteus utilisant les mêmes paramètres que les Figures. 3. 4-3. 6. On a développé le code SSC comme montré dans l'Annexe E. A partir des Figures. 3. 13 (b)-3. 15 (b), nous avons trouvé presque les mêmes formes d'onde de courant et de la tension. Ceci permet de confirmer que notre code CCS est juste et il fonctionne correctement. Aussi, les commandes générées par le PIC18F4431 (voir Figures. 3. 13 (a)-3. 15 (a)) ont des formes semblables à celle présentée dans la Figure. 1. 8. Il est bien noté que la commande du transistor Q_5 est toujours active car l'onduleur fonctionne à 3 niveaux.



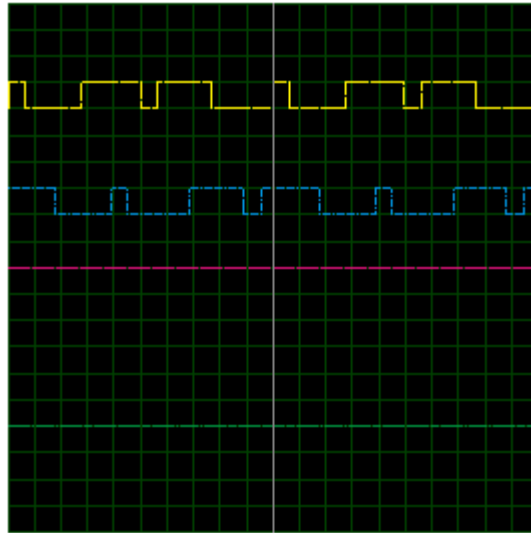
(a)



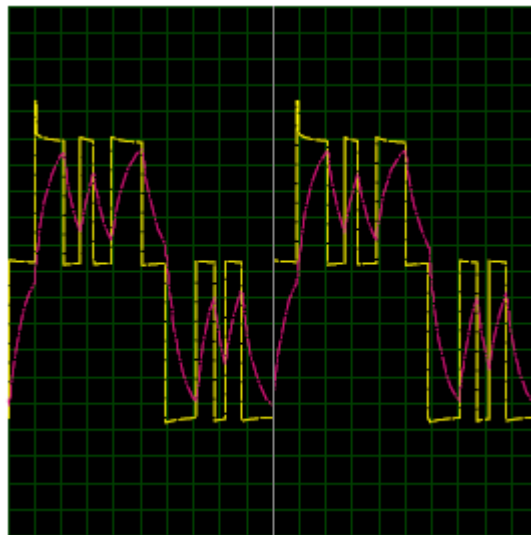
(b)

Figure. 3. 13 : Signaux de sortie pour $\alpha_1 = 13$, $\alpha_2 = 51$ et $\alpha_3 = 88$

- (a) Signaux de commande des transistors « high-side »
(b) Formes d'ondes de la tension et du courant de charge avec $r = 0$.



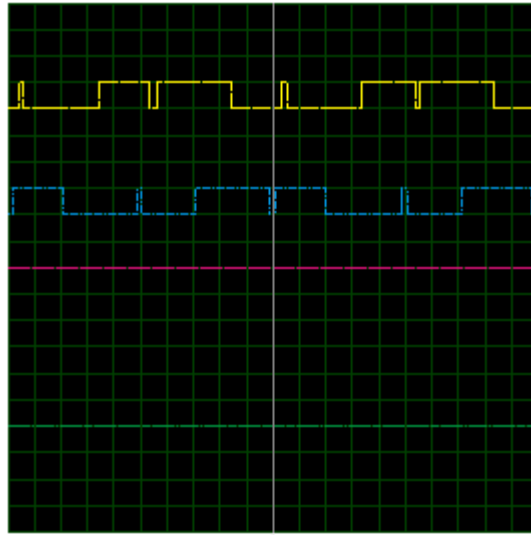
(a)



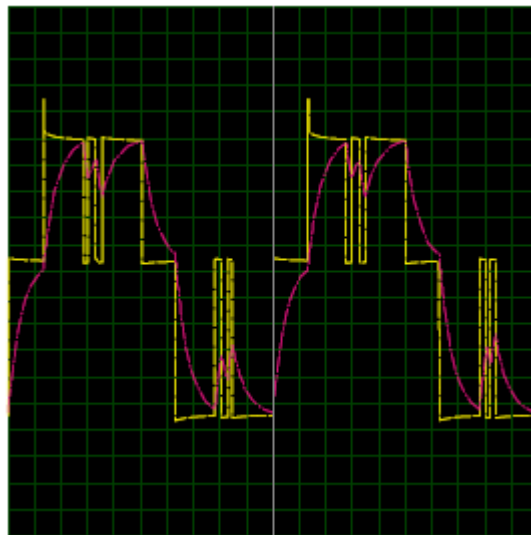
(b)

Figure. 3. 14 : Signaux de sortie pour $\alpha_1 = 17$, $\alpha_2 = 59$ et $\alpha_3 = 83$

- (a) Signaux de commande des transistors « high-side)
- (b) Formes d'ondes de la tension et du courant de charge avec $r = 0.86$



(a)



(b)

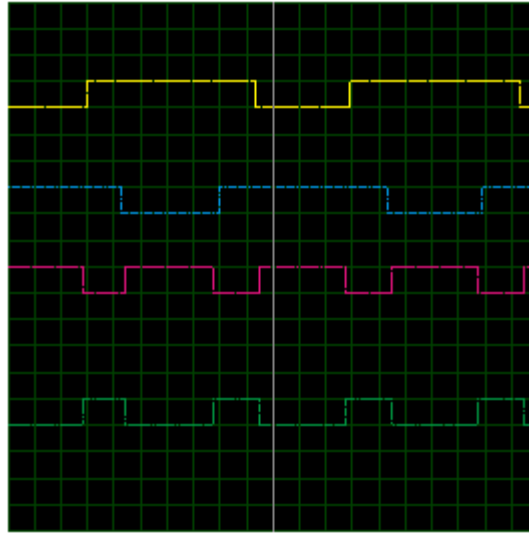
Figure. 3. 15 : Signaux de sortie pour $\alpha_1 = 24$, $\alpha_2 = 79$ et $\alpha_3 = 86$

(a) Signaux de commande des transistors « high-side »

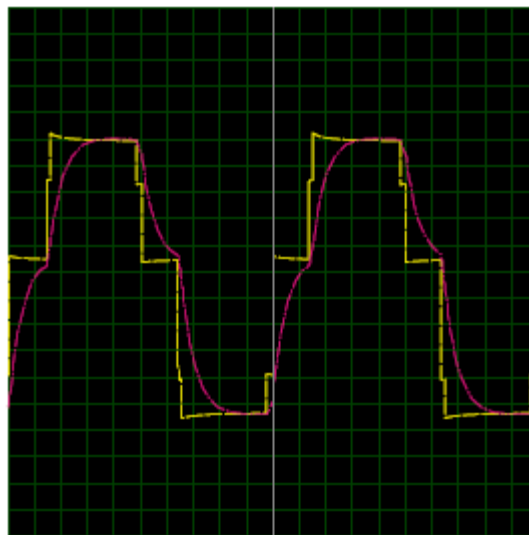
(b) Formes d'ondes de la tension et du courant de charge avec $r = 1$

3. 3. 4 Simulations de l'onduleur à 5 niveaux

On répète la même procédure de simulations que précédemment, mais avec le mode de fonctionnement de l'onduleur à 5 niveaux. Les résultats obtenus par les **Figures 3. 16 (b)-3. 18 (b)** montrent presque les mêmes illustrations obtenues par la simulation Matlab (voir **Figures 3. 8-3. 10**). Pareillement, les commandes données par les **Figures 3. 16 (a) -3.18 (a)** prennent les allures de la **Figure 1. 11**. Le Code CCS est donné dans l'Annexe E.



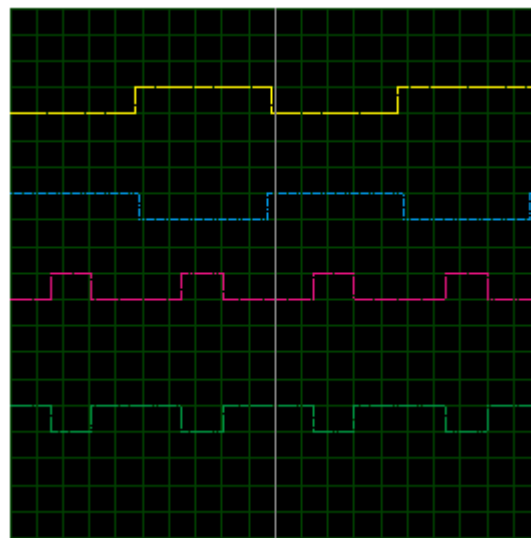
(a)



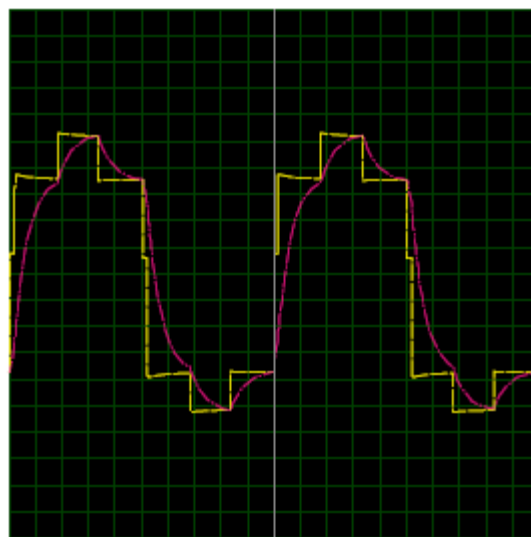
(b)

Figure 3. 16 : Signaux de sortie pour $\theta_1 = 24$ et $\theta_2 = 79$

- (a) Signaux de commande des transistors « high-side)
- (b) Formes d'ondes de la tension et du courant de charge avec $r = 1.1$



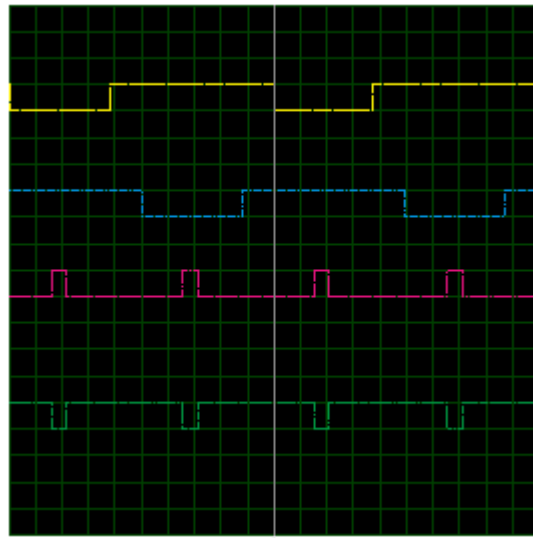
(a)



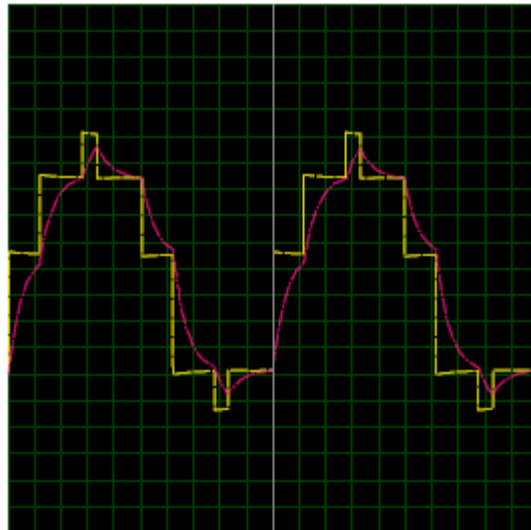
(b)

Figure. 3. 17 : Signaux de sortie pour $\theta_1 = 5$ et $\theta_2 = 65$

- (a) Signaux de commande des transistors « high-side)
- (b) Formes d'ondes de la tension et du courant de charge avec $r = 0.9$



(a)



(b)

Figure. 3. 18 : Signaux de sortie pour $\theta_1 = 22$ et $\theta_2 = 82$

- (a) Signaux de commande des transistors « high-side)
- (b) Formes d'ondes de la tension et du courant de charge avec $r = 0.68$

3. 4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté deux sortes de simulations des onduleurs monophasés à commande MLI en créneaux et la commande à 5 niveaux. Pour améliorer la qualité des signaux de sortie, l'optimisation des angles de conduction était effectuée en fonction du taux de réglage par la méthode de Newton-Raphson. La simulation Matlab et la simulation Proteus offrent des résultats quasiment similaires, ce qui nous confirme que notre code CCS développé est correct.

Résultats Expérimentaux

Sommaire du Chapitre :

4. 1 Introduction.....	70
4. 2 Conception logicielle	70
4. 3 Conception matérielle	74
4. 4 Résultats pratiques.....	84
4. 5 Conclusion.....	91

Résumé du Chapitre:

Dans ce chapitre, nous allons essayer de mettre en évidence l'aspect pratique de ce que nous avons vu dans les chapitres précédents. Ce qui fait que ce travail a été divisé en deux parties, la réalisation de la maquette matérielle et les résultats obtenus sur le système réel via un oscilloscope numérique. La conception logicielle concerne les techniques de configuration de quelques modules du microcontrôleur PIC18F4431. Puis, nous montrons les détails des étapes de réalisation de chaque étage à savoir le circuit d'alimentations, le circuit de puissance et le circuit de commande.

4. 1 Introduction

La plateforme matérielle sur laquelle nous comptons implémenter notre programme est un système à base de microcontrôleur PIC18F4431. Dans ce chapitre, nous allons essayer de mettre en évidence l'aspect pratique de ce que nous avons vu dans les chapitres précédents. Ce qui fait que ce travail a été divisé en deux parties essentielles; la réalisation de la maquette matérielle et les résultats obtenus sur le système réel à travers d'un oscilloscope numérique. Notre réalisation est consacrée par trois modes de fonctionnement dont la plateforme matérielle comporte les blocks suivants :

- Un étage de trois alimentations isolées de 15VDC.
- Un étage de puissance à 3 bras.
- - Un étage de commande à base du PIC18F4431.

4. 2 Conception logicielle

Dans cette section, nous allons montrer les détails de configuration de quelques modules intéressants qui se trouvent dans notre programme CCS présenté dans l'Annexe E.

4. 2. 1 Configuration du module ADC

Les deux entrées analogiques qui représentent les consignes de la fréquence et du taux de réglage doivent être discrétisées par le module ADC (analogue-to-digital converter) pour la génération des signaux de commande (PWM0-PWM5). A partir du langage CCS PICC, les instructions suivantes mènent à configurer les pins 'AN7' et 'AN8' comme un convertisseur A/D à 8bits. Alors, les sorties des potentiomètres qui sont entre 0 et 5V attaquent les entrées 'AN7' et 'AN8'.

```
#device ADC=8
setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL);
setup_adc_ports(ADC_CONT_A|ADC_WHEN_PPWM);
setup_adc_ports(sAN7,sAN8);
```

4. 2. 2 Configuration du module Timer2

Comme interruption interne, nous avons choisi le timer2. Le temps de cette interruption représente le temps d'échantillonnage, T_e . L'interruption interne sert à effectuer la mise à jour des commandes à chaque T_e . Le temps d'exécution des instructions à l'intérieur de cette interruption doit être inférieur au temps d'échantillonnage qui a été fixé à $T_e = 0.1ms$. En se basant sur la fréquence du service (CPU time) qui est 40MH, la configuration de timer2 est la suivante :

```
setup_timer_2(T2_DIV_BY_4,24,10);
enable_interrupts(INT_TIMER2);
enable_interrupts(GLOBAL);
```

Avec ces paramètres, T_e devient,

$$T_e = \frac{4.4(24 + 1)10}{40.1000} = 0.1ms \quad (4.1)$$

4. 2. 3 Configuration du module PWM

La commande MLI est un signal périodique de fréquence réglable. Le PIC18F4431 nous permet de fixer la fréquence et le type des commandes MLI soient complémentaires ou non. La configuration suivante montre une fréquence du signal MLI de 20kHz et la commande complémentaire des 3 bras.

```
Periode=125;
setup_power_pwm(PWM_CLOCK_DIV_16|PWM_UP_DOWN,1,0,period,0,1,0);
setup_power_pwm_pins(3,3,3,0);
```

Avec la fréquence du service 40 MHz, en fixant, periode = 125 pour trouver

$$f_{MLI} = \frac{40.1000}{16.125} = 20 kHz \quad (4.2)$$

Noter que la période des signaux MLI est inférieur à T_e .

4. 2. 4 Configuration du module LCD

Ici, 7 pins du microcontrôleur sont consommés après la configuration du LCD 16x2. On peut utiliser n'importe quel pin du PIC18F4431. La désignation de ces pins a une relation avec la plateforme matérielle choisie afin d'éviter les courts-circuits des pistes.

```
#define LCD_ENABLE_PIN PIN_D4
#define LCD_RS_PIN PIN_C6
#define LCD_RW_PIN PIN_C7
#define LCD_DATA4 PIN_C5
#define LCD_DATA5 PIN_C4
#define LCD_DATA6 PIN_D3
#define LCD_DATA7 PIN_D2
#include <lcd.c>
```

4. 2. 5 Réglage de la fréquence des signaux de commande

Dans notre projet, nous avons choisi une plage de fréquences entre 38Hz et 196Hz de la tension et du courant de charge. A cet effet, nous avons créé un compteur V2 en fonction de l'entrée analogique au niveau du pin A8.

```
set_adc_channel(8);
delay_us(10);
v2=51+0.8*read_adc();
```

Puisque $0 < \text{read_adc}() < 256$, les fréquences min et max pour les deux onduleurs, sont trouvées par

$$\begin{cases} f_{\max} = 1000 / 51 \times 0.1 \approx 196 \text{ Hz} \\ f_{\min} = 1000 / (51 + 0.8 \times 256) \times 0.1 \approx 38 \text{ Hz} \end{cases} \quad (4.3)$$

4. 2. Réglage de la tension efficace

Nous avons inséré les deux **Tableaux 3.1** et **3.2** présentés dans le Chapitre 3 dans le fichier source CCS. La commande de la tension efficace est obtenue par le changement de l'indice de ces tableaux qui correspondent aux angles de commutations en degrés. L'instruction 'ceil' est utilisée pour approximer l'entrée V1/12 à une valeur entière la plus proche.

```

set_adc_channel(7);
delay_us(10);
v1=read_adc();
i=ceil(v1/14);
if (i>19) i=19;
alph1=phi1[19-i];
alph2=phi2[19-i];
alph3=phi3[19-i];
a=0.002777*alph1*v2; //x=alpha1*v2/360
b=0.002777*alph2*v2;
c=0.002777*alph3*v2;

```

Pour la commande de l'onduleur MLI en créneau, les paramètres a , b et c représentent des sous compteurs. A partir de $V1 = \text{read_adc}()$ qui est entre 0 et 256, les indices min et max de **Tableau 3. 1** sont calculés par

$$\begin{cases} i_{\min} = 19 - \text{ceil}(0/14) = 19 \rightarrow \text{la dernière combinaison des angles} \\ i_{\max} = 19 - \text{ceil}(256/14) = 0 \rightarrow \text{la première combinaison des angles} \end{cases} \quad (4.4)$$

Pour la commande de l'onduleur à 5 niveaux, a et b sont aussi calculés par

```

set_adc_channel(7);
delay_us(10);
v1=read_adc();
i=floor(v1/11);
if (i>23) i=23;
alph1=theta1[23-i];
alph2=theta2[23-i];
a=0.002777*alph1*v2; //x=alpha1*v2/360
b=0.002777*alph2*v2;

```

Les indices min et max pour la commutation sont les suivants :

$$\begin{cases} i_{\min} = 23 - \text{ceil}(0/256) = 23 \rightarrow \text{la dernière combinaison des angles} \\ i_{\max} = 23 - \text{ceil}(256/11) = 0 \rightarrow \text{la première combinaison des angles} \end{cases} \quad (4.5)$$

Le **Tableau 4. 1** récapitule les fréquences utilisées dans notre projet.

Tableau 4. 1 : Fréquences considérées dans notre projet

Type de signal	Fréquence	Observation
Quartz	10 MHz	Oscillateur externe
Fréquence de service (CPU time)	40 MHz	Multiplieur de fréquence '#FUSES NOWDT, H4'
Signaux MLI (PWM0-PWM5)	20 kHz	Configuration soft
Timer2 (Interruption interne)	10 kHz	Configuration soft
Tension et courant de sortie	39Hz à 196 Hz	Configuration soft

4. 3 Conception matérielle

Trois sortes de cartes ont été réalisées dans ce projet. Des connecteurs de type 'SIL' et 'T-block' sont utilisés pour le câblage de ces cartes entre elles. Par la suite, on va donner les composants nécessaires pour la réalisation des différents étages.

4. 3. 1 La carte d'alimentations

Dans cette carte, nous avons installé 4 alimentations DC de 15V. Deux alimentations ont le même point de masse et les deux autres sont complètement isolées. Trois transformateurs externes 220V/17VAC alimentent la carte. Dans notre application, on a exploité seulement 3 sources. La liste des composants est montrée par le **Tableau. 4. 2**.

Tableau 4. 2 : Liste des composants de la carte d'alimentations

Ordre	Composant	Référence	Quantité	Observation
01	Connecteur	T-block 8	02	-
02	Diode	1N2448	04	-
03	Condensateur	470uF, 25V	08	chimique
04	Régulateur de tension	N7815	04	-
05	Résistance	1K	04	-
06	Led	Rouge, vert, ...	04	-

Les circuits électrique et imprimé réalisés sont montrés par les **Figures. 4.1 et 4.2**.

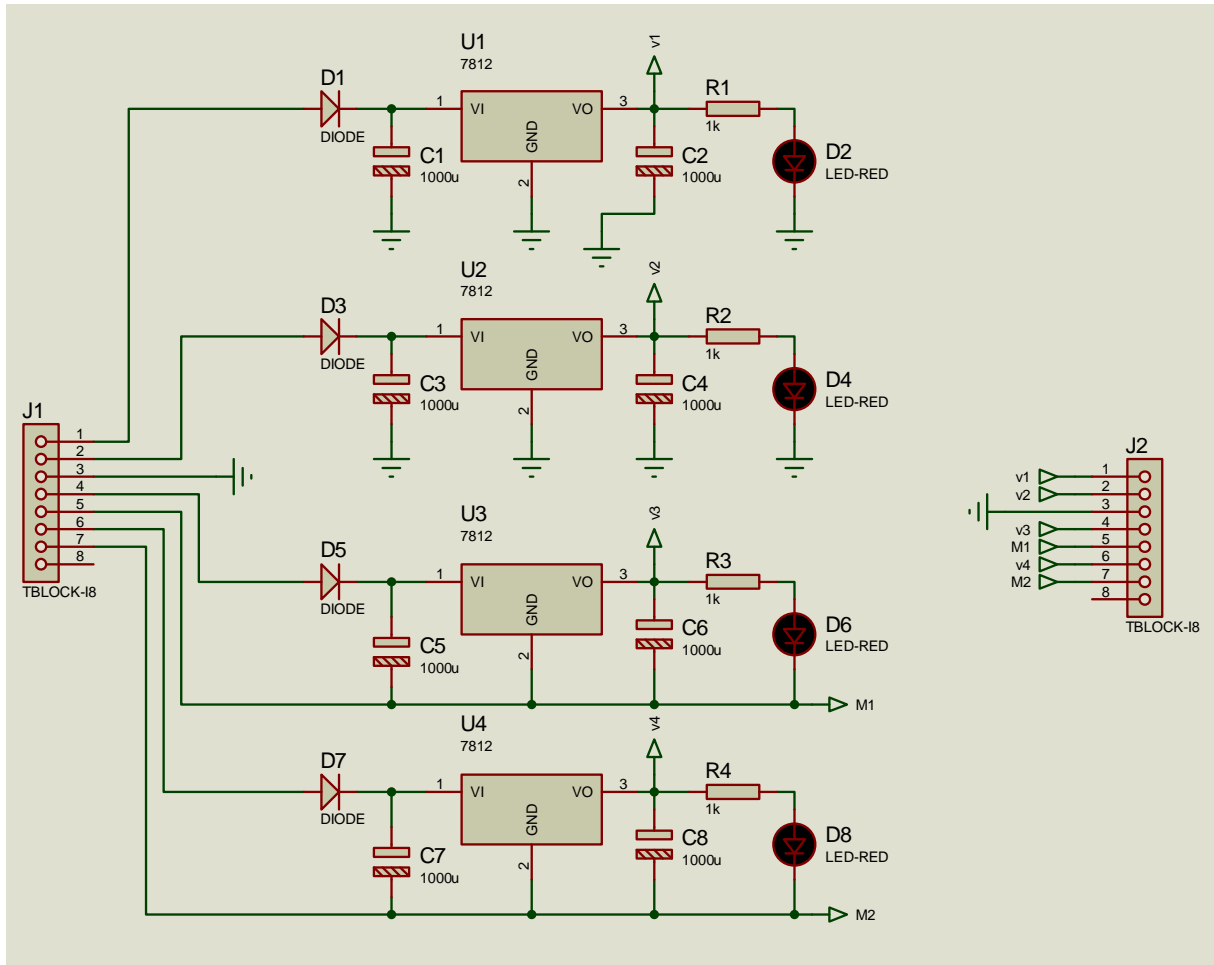


Figure. 4. 1 : Circuit électrique de la carte des alimentations

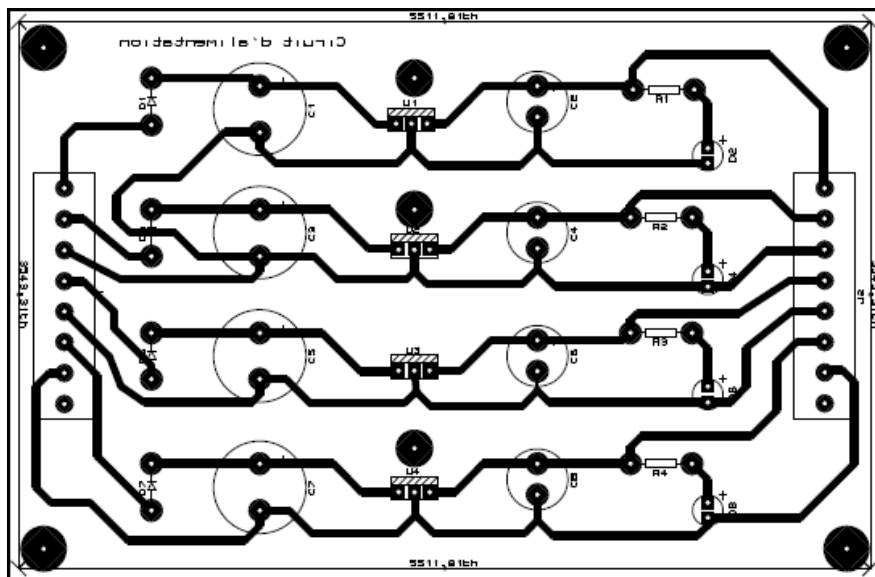




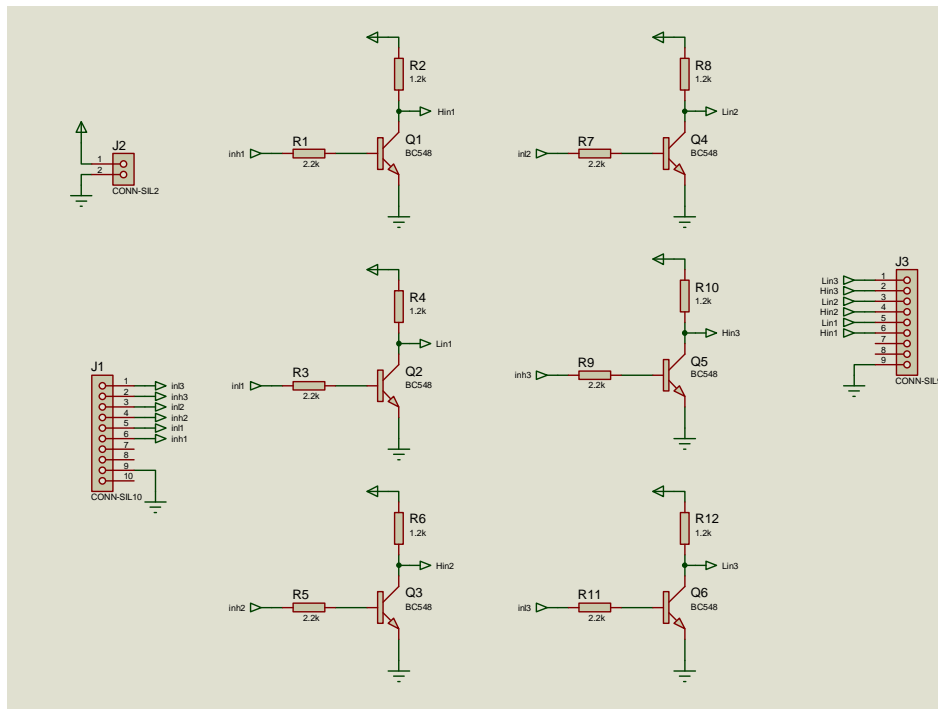
Figure. 4. 2 : Circuit imprimé (Typo) de la carte d'alimentations

4. 3. 2 La carte de commande

Cette carte contient principalement le cerveau de la commande PIC18F4431. Ce dernier reçoit des entrées analogiques et numériques et envoie des signaux numériques. Les composants utilisés pour obtenir les signaux de commande sont offerts par le [Tableau. 4. 3](#).

Tableau. 4. 3 : Liste des composants de la carte de commande

	Composant	Référence	Quantité	Observation
01	Microcontrôleur	Pic18F4431	01	-
02	Crystal	10MHz	01	-
03	Condensateur	22pF	02	Céramique
04	Afficheur LCD	2x16	01	-
05	Diode	1N4148	01	-
06	Bouton poussoir	NO	04	-
07	Resistance	4.7k Ω	04	-
08	Potentiomètre	10K	02	-
09	Régulateur de tension	N7805	01	-
10	Condensateur	470uF, 16V	02	Chimique
11	Resistance	1k Ω	01	-
12	Connecteur	SIL09	01	-

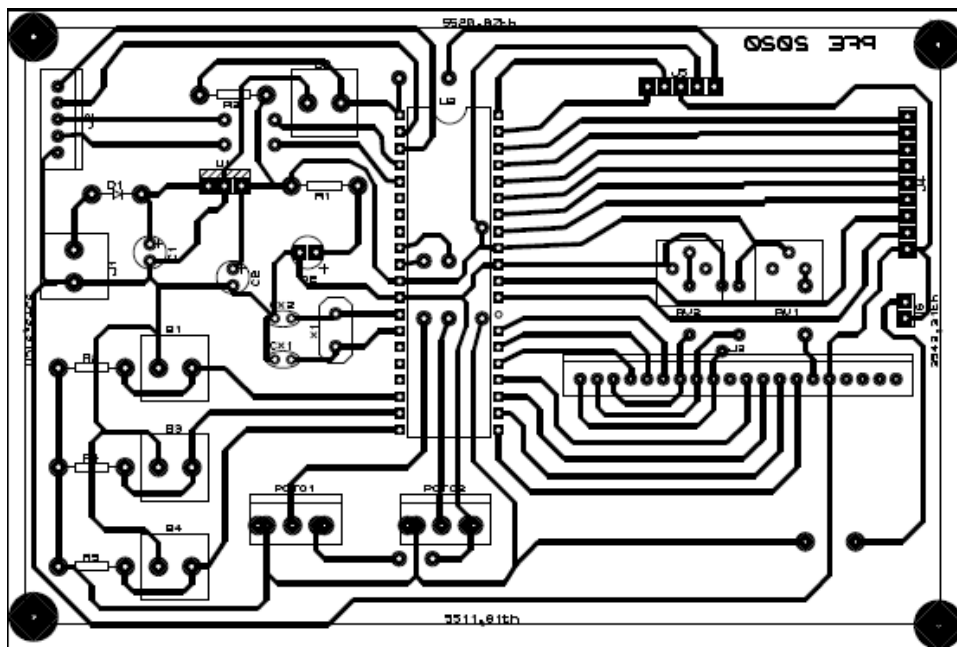


(b)

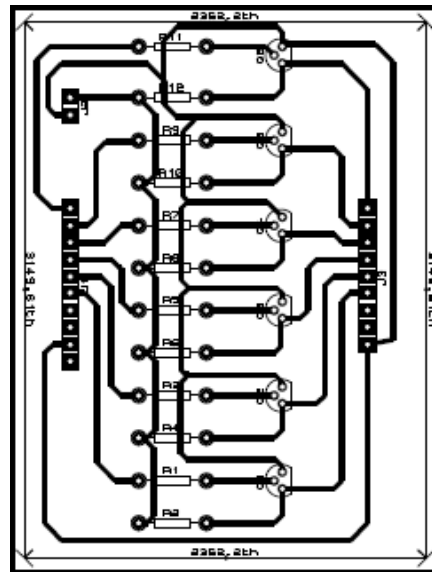
Figure. 4.3 : Circuits électriques de la carte de commande

(a) Circuit électrique de la carte de commande

(b) Circuit électrique de l'amplificateur



(a)



(b)



Figure. 4. 4 : Typos de la carte de commande

- (a) Carte de commande
- (b) Circuit amplificateur

4. 3. 3 La carte de puissance

La carte de puissance contient les onduleurs MLI en créneaux et à 5 niveaux. Il y a trois bras qui reçoivent 6 signaux de commande. Cette carte est connectée avec la carte des alimentations pour appliquer les deux sources de tension et la carte de commande pour

recevoir les impulsions de commande. Les bras sont commandés par les drivers IR2112. Le

Tableau. 4. 4 éclaire la liste des différents composants utilisés.

Tableau. 4. 4 : Liste des composants de la carte de puissance

	Composant	Référence	Quantité	Observation
01	Transistor	IRF740	06	-
02	IR2112	10MHz	01	-
03	Condensateur	220uF	03	Chimique
04	Diode	1N4148	03	-
12	Connecteur	SIL09	01	-
13	Connecteur	SIL02	02	-
14	Connecteur	T-block05	01	-
15	Connecteur	T-block02	01	-

Le schéma de la Figure. 4. 5 explique le montage détaillé du driver IR2112 avec le PIC18F4431 et un bras du pont en H. Le pin SD de chaque driver est relié à la masse. La Figure. 4. 6 montre le brochage des circuits intégrés et les connecteurs de type SIL et T-Block. Le typo de la carte de puissance que nous avons réalisé est donné par la Figure. 4. 7.

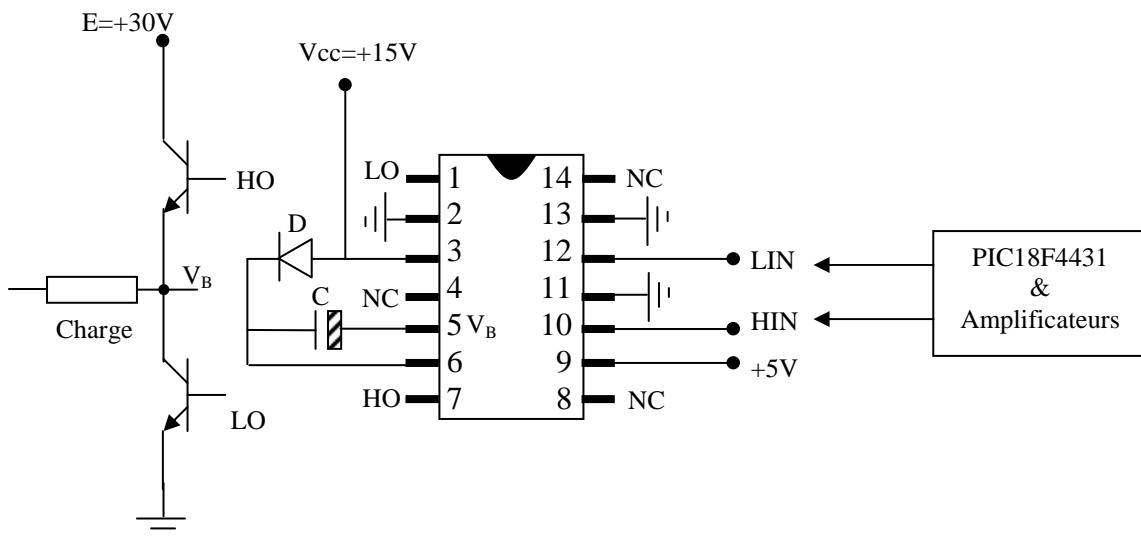


Figure. 4. 5 : Connexion détaillé du circuit driver IR2112 avec le PIC et le bras de l'onduleur

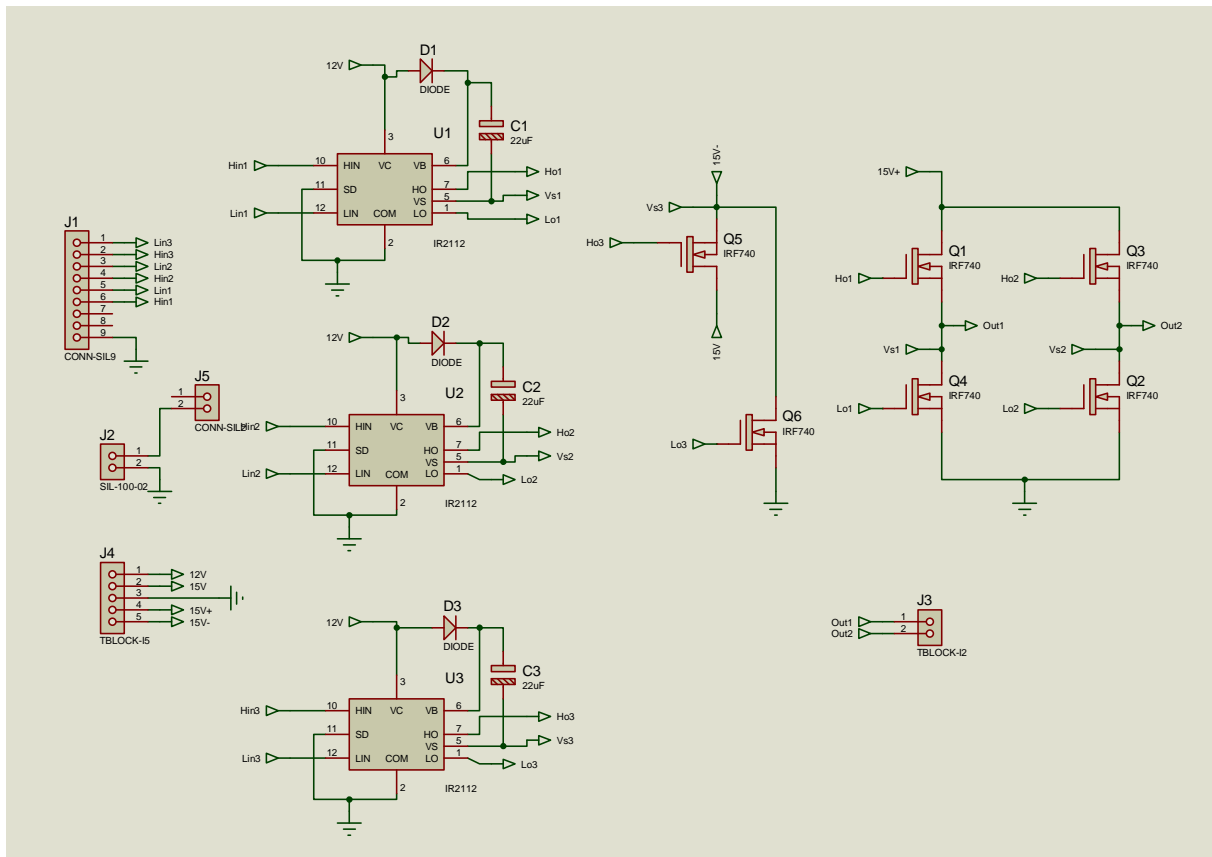
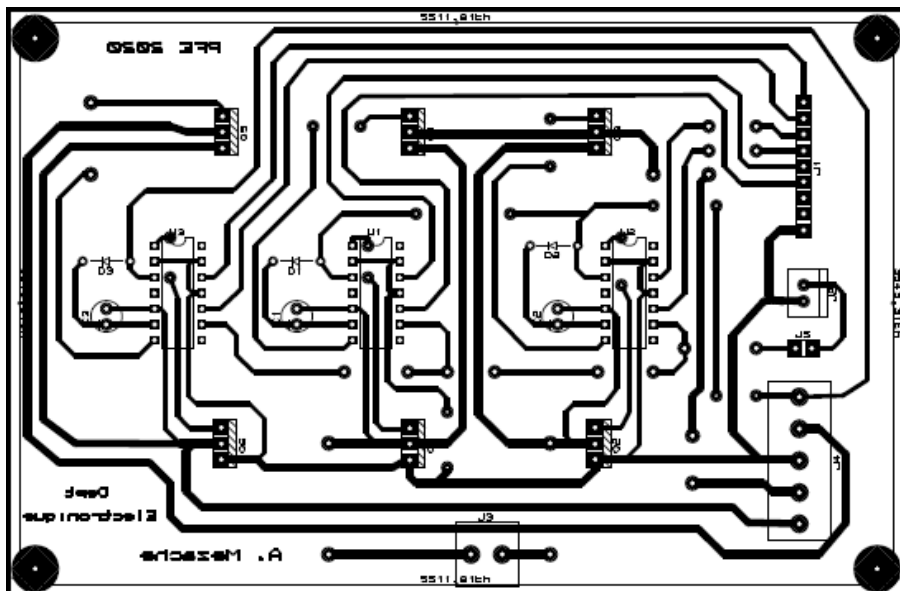


Figure. 4. 6 : Circuits électriques de la carte de puissance



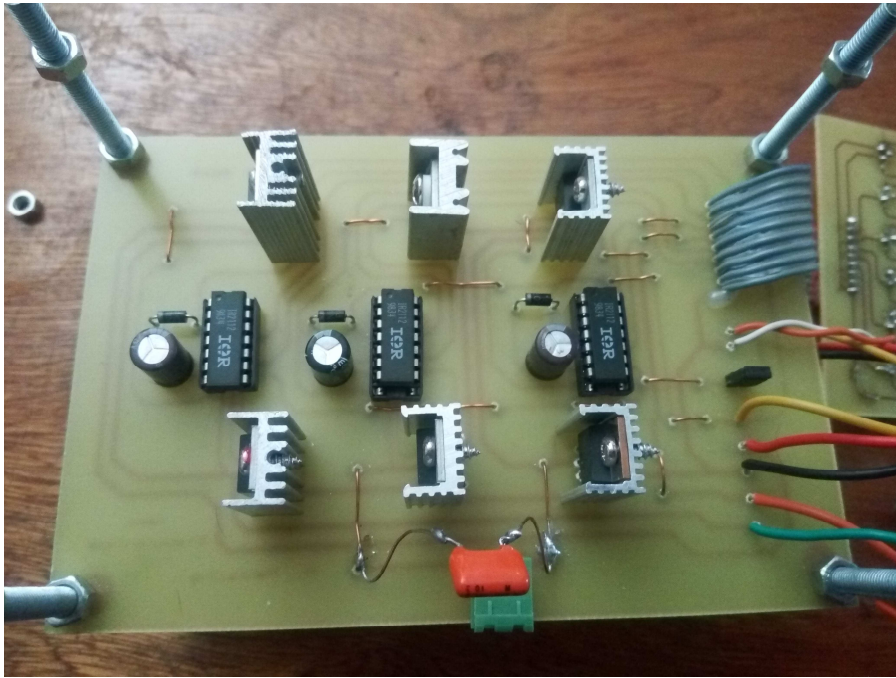


Figure. 4. 7 : Typos de la carte de puissance

4. 3. 4 La charge inductive

Le récepteur est constitué d'une inductance de 51mH en série avec une résistance de 50Ω comme indiqué dans la Figure. 4. 8. Ces valeurs permettent de visualiser clairement l'évolution d'une façon exponentielle du courant de charge pour des fréquences entre 39 et 196 Hz. Nous avons utilisé le programmeur PICkit3 de Microship pour charger le code en 'hexa' obtenu après la compilation du fichier CCS développé (Voir Figure. 4. 9).



Figure. 4. 8 : Charge inductive

Les 5 pins de programmation sont les suivants :

- MCLR (pin 1).
- VDD (pins 11 et 32).
- VSS (pins 12 et 31).
- PGD (pin 40).
- PGC (pin 39).

Un oscilloscope numérique RIGOLE DS1054 à quatre sondes est utilisé dans les phases de tests et de mesures (voir [Figure. 4. 10](#)). Il est utile où il consiste de plusieurs modes de mesures et de stockage.



Figure. 4. 9 : Programmeur PICkit 3 de Microship

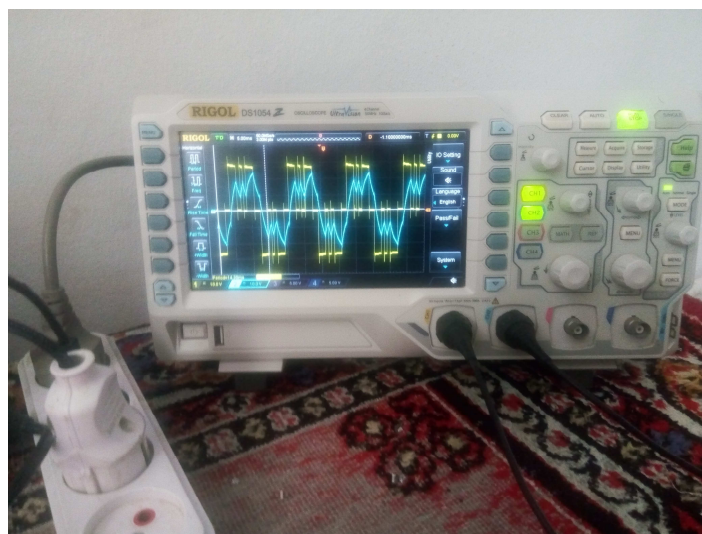


Figure. 4. 10 : Oscilloscope RIGOLE DS1054

4. 4 Résultats pratiques

Notre projet est finalement assemblé, le PIC18F4431 est programmé et la charge est connectée comme donné dans la **Figure. 4. 11**. Par la suite, nous prenons des mesures des allures de la tension et du courant de sortie. En jouant sur les positions angulaires des deux potentiomètres pour obtenir les réglages de la fréquence et la valeur efficace des grandeurs du récepteur. Ces mesures sont comparées à celles obtenues en simulations Matlab et Proteus présentées dans le Chapitre 3.

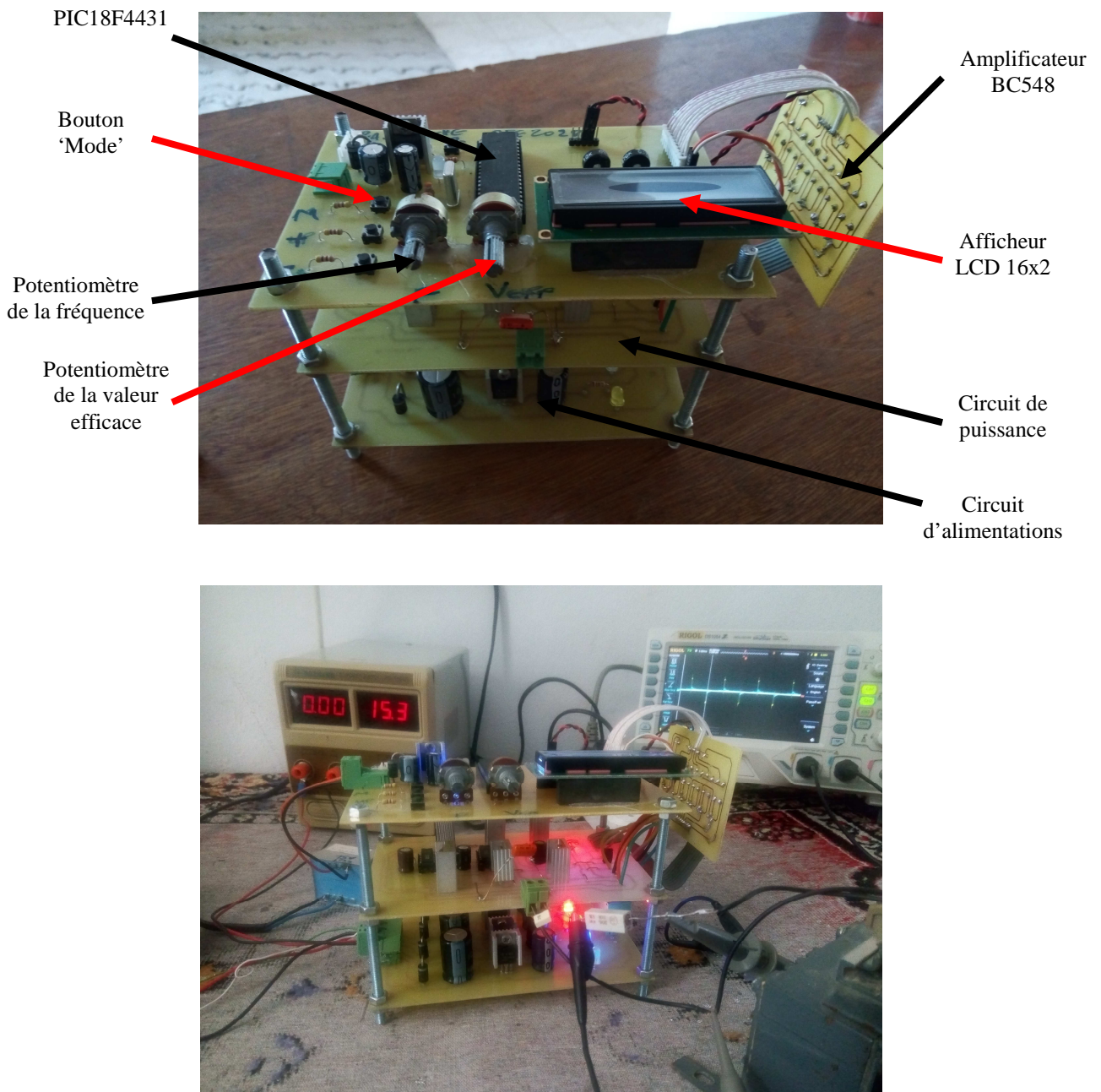


Figure. 4. 11 : Assemblage des cartes réalisées

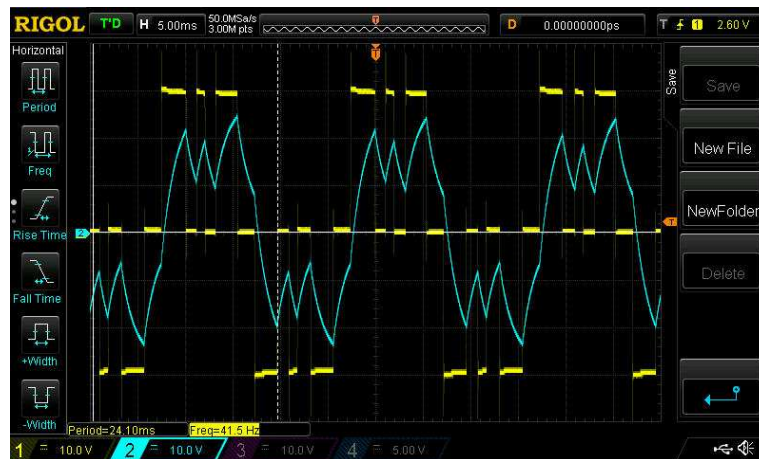
4. 4. 1 Signaux de sortie

Dans la première série de mesures, nous avons pris en compte le cas de mode de fonctionnement de l'onduleur MLI en créneaux. En commençant par la fixation d'une fréquence basse de 53 Hz et en variant le rang du tableau des angles de commutation. Il est bien remarqué dans la [Figure. 4. 12](#) que les valeurs efficaces de la tension et du courant de charge augmentent quand le coefficient de réglage augmente. Maintenant, on prend le cas d'une fréquence élevée, $f = 111\text{Hz}$. Notre circuit fonctionne d'une manière normale qui s'adapte avec la variation de la fréquence (voir [Figure. 4. 13](#)). A partir de ces mesures, il y a une grande concordance avec les résultats de simulations du Chapitre 3. Dans ces figures, les pics sont remarqués dans chaque intervalle de commutation de la tension de sortie. Ce phénomène est dû aux régimes transitoires du convertisseur qui représente un système non linéaire.

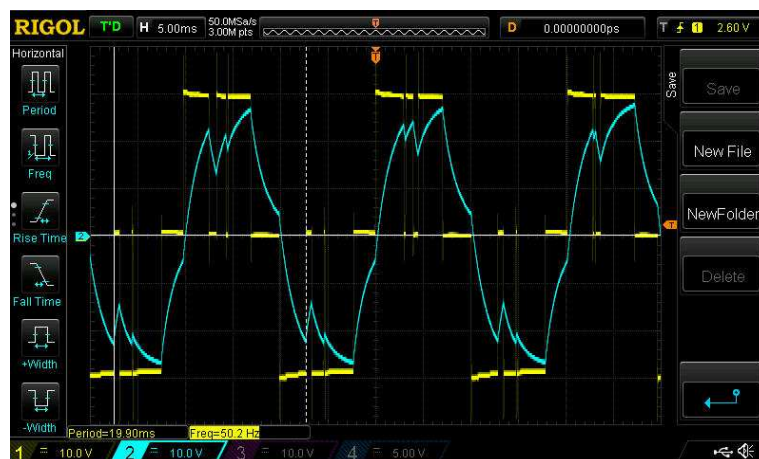
Dans la deuxième série de mesures, nous avons appuyé sur le bouton poussoir 'Mode' pour orienter le fonctionnement du convertisseur vers l'onduleur à 5 niveaux. Dans ce cas, les signaux de commande des transistors Q1 - Q6 sont modifiés. Pour une fréquence de 64 Hz, la [Figure. 4. 14](#) montre la forme en escalier de la tension de sortie et le courant de charge qui a une forme presque sinusoidale. Les différents niveaux de la valeur efficace de courant sont aussi remarquables, puisque les angles de commutations sont changés en fonction du taux de réglage. La [Figure. 4. 15](#) illustre la même stratégie de commande sauf que la fréquence des grandeurs de sortie est maintenue à 105 Hz. En comparant avec les résultats obtenus en simulations (voir Chapitre 3), on trouve les mêmes formes, mais il y a un certain nombre de pics au niveau des instants de commutation des transistors. Ce phénomène est toujours produit puisque le convertisseur et sa commande se sont des systèmes physiques non linéaires qui ont un certain temps de réponse.



(a)



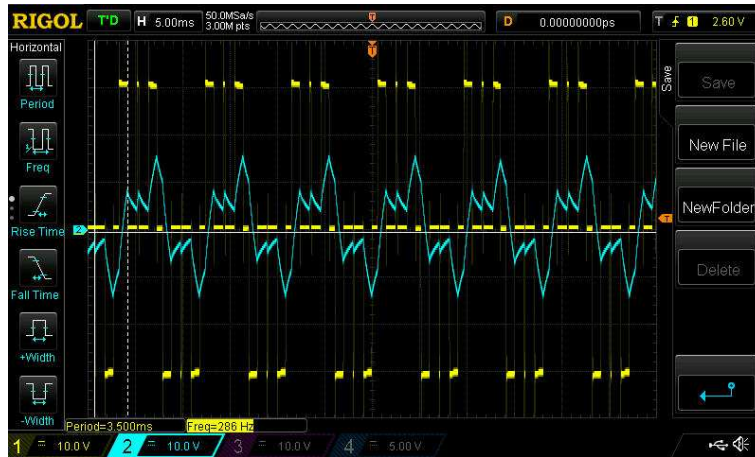
(b)



(c)

Figure. 4. 12 : Tension et courant mesurés de l'onduleur MLI avec une fréquence $f = 53\text{Hz}$

- (a) Niveaux faibles
- (b) Niveaux moyens
- (c) Niveaux élevés



(a)



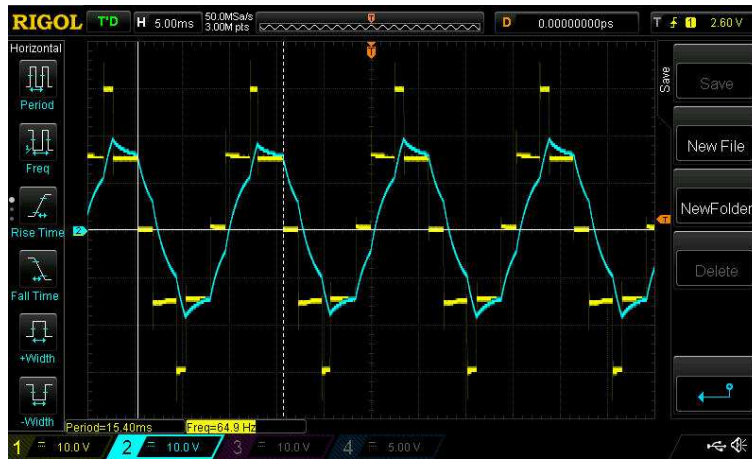
(b)



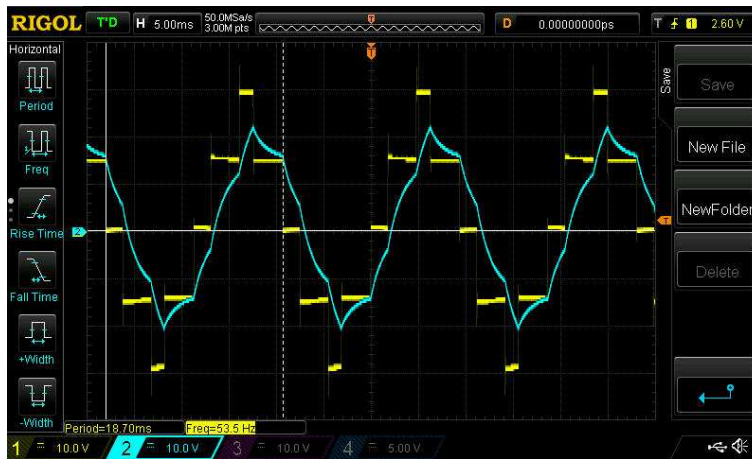
(c)

Figure. 4. 13 : Tension et courant mesurés de l'onduleur MLI avec une fréquence $f = 111\text{Hz}$

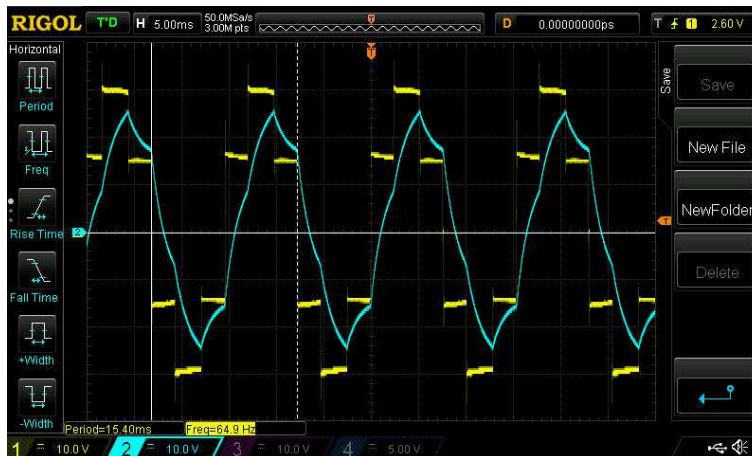
- (a) Niveaux faibles
- (b) Niveaux moyens
- (c) Niveaux élevés



(a)



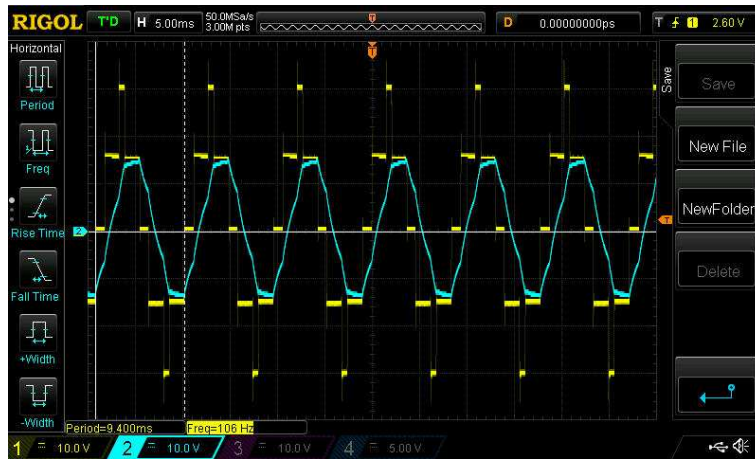
(b)



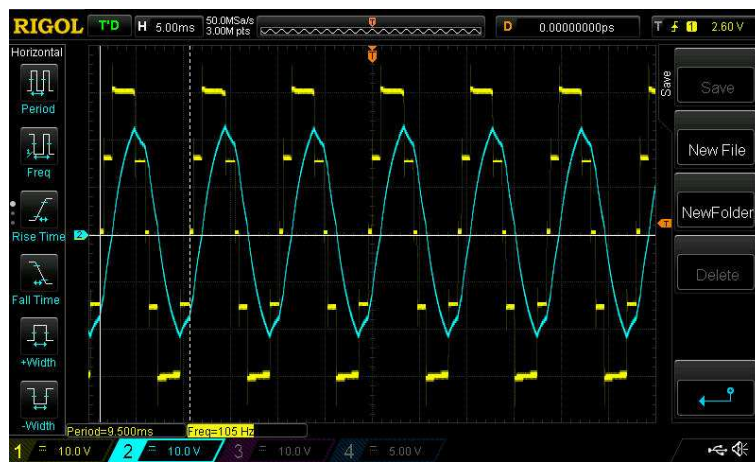
(c)

Figure. 4. 14 : Tension et courant mesurés de l'onduleur à 5 niveaux avec $f = 64\text{Hz}$

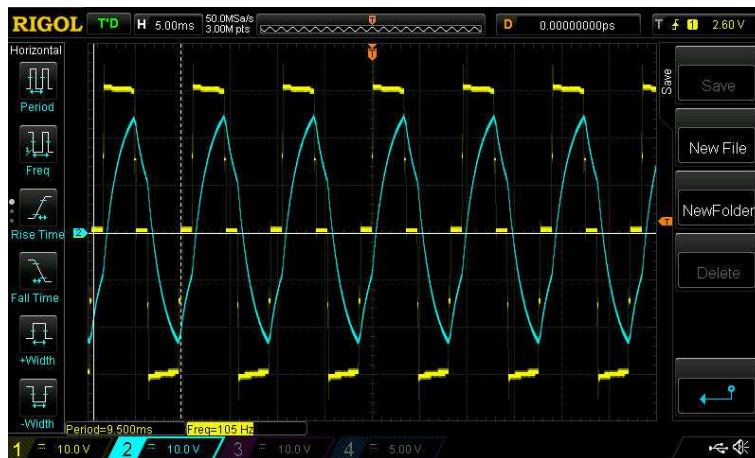
- (a) Niveaux faibles
- (b) Niveaux moyens
- (c) Niveaux élevés



(a)



(b)

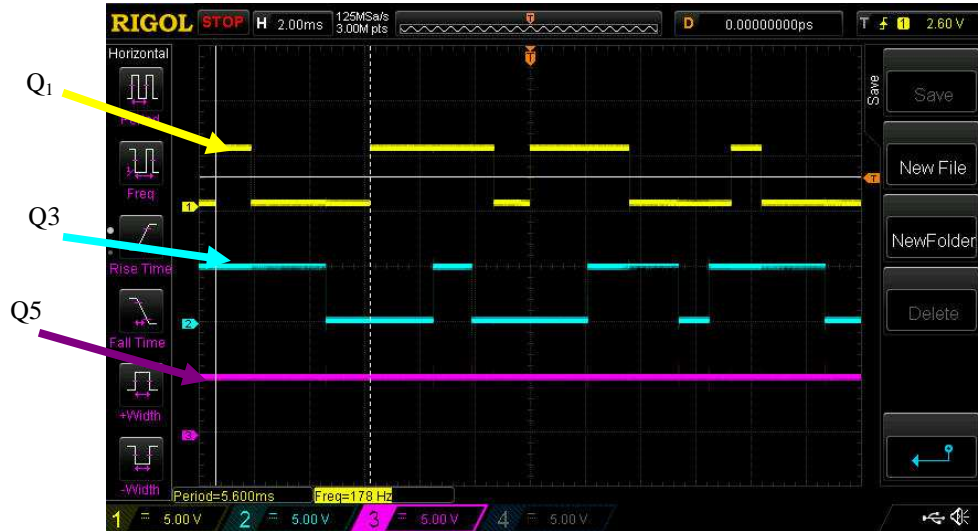


(c)

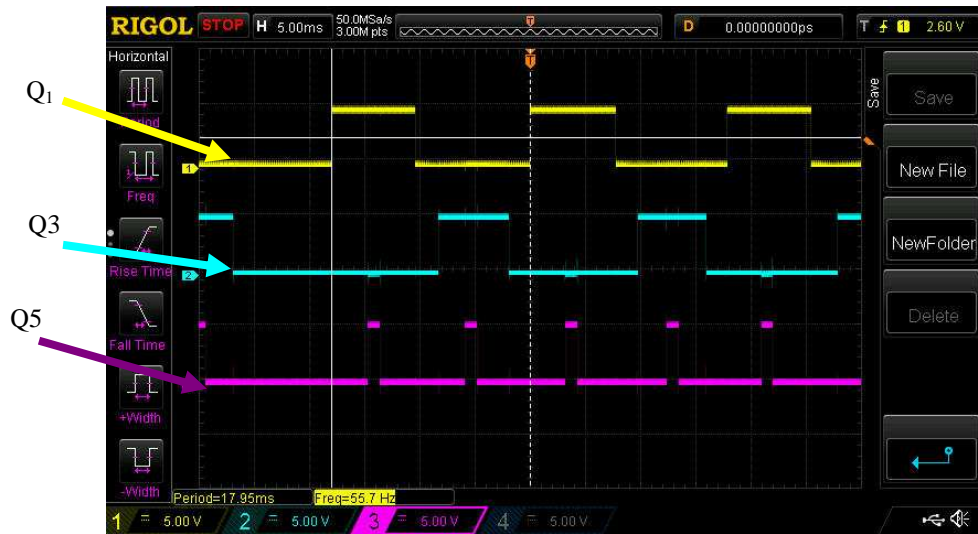
Figure. 4. 15 : Tension et courant mesurés de l'onduleur à 5 niveaux avec $f = 105$ Hz

- (a) Niveaux faibles
- (b) Niveaux moyens
- (c) Niveaux élevés

Nous montrons dans la **Figure. 4. 16** les signaux de commande obtenus à la sortie du microcontrôleur PIC18F4431. Il est clair que nous avons les mêmes formes d'ondes présentées en théorie et en simulations.



(a)



(b)

Figure. 4. 16 : Signaux de commande réels

(a) Onduleur MLI en créneaux

(b) Onduleur à 5 niveaux

4. 4. 2 Etude de spectre

Dans cette section, nous nous sommes intéressés à comparer le THD expérimental et le THD simulé. A cet effet, nous avons enregistré par l'oscilloscope de la **Figure. 4. 10** les données de la tension de charge à partir de l'onduleur à 5 niveaux. Nous avons enregistré des fichiers Excel avec une fréquence d'échantillonnage de 20 KHZ et la fréquence fondamentale est 50 Hz. Le **Tableau. 4. 5** donne les valeurs de THD à partir des données simulées et réelles. Le code Matlab de l'Annexe C est exécuté après la sélection des angles de commutation. Pour ce faire, quelques exemples sont illustrés dans le **Tableau. 4. 5**. On observe que les valeurs des THDs obtenus sont plus proches. Cette petite différence peut être due aux erreurs de mesures.

Tableau. 4. 5 : Valeurs de THD utilisant des données simulées et réelles

$r = V_1 / 2E$	θ_1 en (degrés)	θ_2 en (degrés)	THD (%) simulé	THD (%) expérimental
0.68	22	82	32.50	29.96
0.74	18	78	31.46	28.66
0.82	12	72	29.62	28.71
0.90	5	65	29.66	30.26
1.06	14	46	16.56	17.80

4. 4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les étapes de réalisation de notre plateforme matérielle. Les configurations des modules nécessaires pour la génération des signaux de commande ont été détaillées. Nous avons présentées les différentes fréquences utilisées dans le code CCS développé. Les circuits électrique et imprimé de chaque étage ont été illustrés. Les mesures de la tension et du courant de charge ont montrées une grande concordance avec les signaux trouvés en simulation Matlab et Preteus. Nous avons parlé que les pics ou parasites dans les signaux réels sont dus au phénomène de régimes transitoires lors de commutation des transistors de puissance. Les mesures de THD par l'algorithme FFT ont été effectuées via des données réelles et simulées.

Conclusion Générale

Dans ce mémoire, nous avons achevé aux nos objectifs de réalisation des onduleurs monophasé MLI en créneaux et à 5 niveaux tracés dans l'introduction générale. Nous avons confirmé la concordance entre les signaux de la tension et du courant réels et simulés. La plateforme matérielle est constituée principalement par le microcontrôleur PIC18F4431. Ce dernier est utile puisque, il travaille avec une fréquence de 40MHz et il comporte des modules intéressants surtout le module 'PWM' qui a été exploité dans la commande des onduleurs. Notre projet a été réalisé après l'effectuation des différentes parties suivantes :

Dans la première partie de ce travail, nous avons intitulé les différentes topologies des onduleurs monophasés multiniveaux et nous avons étudié les onduleurs à élimination d'harmoniques avec deux méthodes différentes de commande ; la commande MLI précalculée et la commande à pleine onde de l'onduleur monophasé. La méthode d'optimisation de Newton-Raphson a été considérée pour résoudre les systèmes d'équations non-linéaires. Ensuite, nous avons donné l'expression explicite du calcul de THD à partir des mesures des signaux de sortie. Enfin, l'outil FFT était introduit pour la détermination des coefficients de Fourier ainsi que le THD.

Dans la deuxième partie de ce projet, nous avons présenté en premier temps les définitions, les familles et la classification des microcontrôleurs. En particulier, nous avons choisit le microcontrôleur PIC18F4431 comme un outil de commande numérique, car les caractéristiques et les modules internes que dispose ce dernier s'adaptent mieux au notre projet. Cette cible qu'elle offre de modules dédiés pour la commande des moteurs électriques, mais elle reste insuffisante pour cadencer des stratégies de commande avancées des machines électriques.

Dans la troisième partir de notre travail, nous avons présenté deux sortes de simulations des onduleurs monophasés à commande MLI en créneaux et la commande à 5 niveaux. Pour améliorer la qualité des signaux de sortie, l'optimisation des angles de conduction était effectuée en fonction du taux de réglage par la méthode de Newton-Raphson. La simulation Matlab et la simulation Proteus offrent des résultats quasiment similaires, ce qui nous confirme que notre code CCS développé est correct.

Dans la dernière partie de ce projet, nous avons présenté les étapes de réalisation de notre plateforme matérielle. Les configurations des modules nécessaires pour la génération

des signaux de commande ont été détaillées. Nous avons présentées les différentes fréquences utilisées dans le code CCS développé. Les circuits électrique et imprimé de chaque étage ont été illustrés. Les mesures de la tension et du courant de charge ont montrées une grande concordance avec les signaux trouvés en simulation Matlab et Preteus. Nous avons parlé que les pics ou parasites dans les signaux réels sont dû au phénomène de régimes transitoires lors de commutation des transistors de puissance. Les mesures de THD par l'algorithme FFT ont été effectuées via des données réelles et simulées.

Comme perspectives, il est souhaitable de réaliser dans le futur des onduleurs à 7 et 9 niveaux.

Les références :

[1] Hidri.Imed, *Support de cours D'électronique de puissance Les convertisseurs DC-DC et DC-AC*, Institut supérieur des études technologiques de Nabeul, Département : Génie Electrique.

[2] MANSOURI Abdallah, *Commande des Onduleurs Multiniveaux*, UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA FACULTE DE TECHNOLOGIE DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE,2015/2016.

[3] ZEROUAL Yamina, *Techniques de commande des convertisseurs appliquées aux onduleurs multiniveaux*, Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, Domaine : SCIENCE ET TECHNOLOGIE Filière : GENIE ELECTRIQUE. Spécialité : Commande des Systèmes Electriques 2015/2016

[4] Kumara Swamy¹, R.Pradeepa², *A NEW TOPOLOGY OF CASCADED MULTILEVEL INVERTER WITH SINGLE DC SOURCE*, G, Dept of EEE, Rajeev Gandhi Memorial College, Nandyal, A.P, India ,2016.

[5] DELLALOU KHEIREDDINE, *Stratégies De Commande Des Onduleurs Multiniveaux (MLIST et MLI Vectorielle)*, Faculté : Sciences de L'Ingéniorat Département : Électromécanique, UNIVERSITÉBADJIMOKHTARANNABA,2019.

[6] Zergoune Mohamed Abdelaziz, Hideb Abdelrahmane, *commande d'un onduleur multi niveaux a structure en cascade par strategie d'elumination d'harmonique selective*, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, Domaine : Sciences et techniques Filière : Electrotechnique Spécialité : électrotechnique industrielle ,2017.

[7] BRIK YUCEF, OUAGUENI FAYSSAL, *RÉALISATION D'UN ONDULEUR MONOPHASÉ CASCADÉ À SEPT NIVEAUX*, DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE, OPTION CONTROLE, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF DE M'SILA,2007.

[8] Hamaizia Noura, *Commande optimale d'un onduleur monophasé sous l'environnement Matlab/Simulink*, Université Larbi Ben M'hidi, Oum El-Bouaghi, Spécialité : Génie Electrique (GE), 2016/2017.

[9] Ph. Ferracci, *Cahier technique n° 199 La qualité de l'énergie électrique*.

[10] Pr. Amar Mezache, *support de court Electronique de puissance avancée « Conversion de l'énergie électrique »*, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF M'SILA FACULTE DE TECHNOLOGIE DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE, 2018/2019.

[11] Adjimi Nadia, Belaidi Wahiba, *Modélisation et commande d'un onduleur MLI*, Universitaire Larbi Ben M'hidi Oum El-Bouaghi, Option : Génie Electrique (GE), 2008/2009

- [12] Amina MERHOUM, Optimisation Des Techniques De MLI Pour Les Equipements FACTS A Base D'onduleur, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran « Mohamed Boudiaf », Faculté de Génie Electrique, Département d'Electrotechnique,2013.
- [13] Marie Postel, Introduction au logiciel Matlab, Laboratoire Jacques-Louis Lions, Université Pierre et Marie Curie, Version révisée septembre 2004.
- [14] Paolino Tona, Introduction à MATLAB et SIMULINK Un guide pour les élèves de l'École Nationale Supérieure d'Ingénieurs Electriciens de Grenoble, Laboratoire d'Automatique de Grenoble.
- [15] Ludek Slosarcik, FFT-Based Algorithm for Metering Applications, Freescale Semiconductor, Inc, Document Number: AN4255 Rev. 4, 07/2015.
- [16] Khaled Atoub, optimisation de la FFT à virgule fixe basée sur les algorithmes génétiques, université du Québec en génie électrique, novembre 2013.
- [17] Jlassi Khaled, support de cours Microprocesseurs et Microcontrôleurs Les microcontrôleurs, Université Virtuelle de Tunis.
- [18] E. AGOURIANE, Cours Microcontrôleurs PIC, Université Sultan Moulay Slimane LST Ingénierie Electronique et Télécommunication Département de Physique.
- [19] Microship fiche technique, « PIC18F2331/2431/4331 Datasheet ».
- [20] Christian Dupaty, support de cours PIC18Fxxxx, Ecole Nationale Supérieure des Mins, génie électrique Académie d'Aix-Marseille.
- [21] www.newnespress.com, Cours PIC18F Microcontroller Series.
- [22] Mr. Nizar TOUJENI, Leçon N°2 INTRODUCTION SUR LES MICROCONTROLEURS, Iset de Nabeul.
- [23] Dogan Ibrahim, Advanced PIC Microcontroller Projects in C From USB to RTOS with the PIC18F Series.
- [24] www.Microchip.com, CCP Module Implementation and Functionality.
- [25] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Microcontr%C3%B4leur>.
- [26] BENHADJER Abdeslam, Etude, simulation et réalisation d'un onduleur triphasé pour les trains électro-diesel, ECOLE SUPERIEURE EN SCIENCES APPLIQUEES T L E M C E N, Filière : Electrotechnique, Spécialité : Energie et Environnement, 2018 / 2019.
- [27] Gi. Segulier, « Electronique de puissance ».

[28] Cyril W. Lande, "Electronique de puissance" Cours et exercices-205 problèmes résolus, Ecole de génie électrique et électronique, Leicester Polytechnique, MpcGraw-Hill Inc., Paris.

[29] Muhammad Harunur Rashid, "Power electronics, Circuits, Devices and applications", Prentice-Hall. Inc, New Jersey 07632, 1988

[30] K. El-Naggar and T. H. Abdelhamid, "Selective harmonic elimination of new family of multilevel inverters using genetic algorithms", Energy Conversion and Management 49 (2008) 89–95.

[31] A. Ben arroudj et A. Ben zebboudj, « Implémentation des régulateurs numériques dans le PIC18F4431, Application sur les moteurs à courant continu », Mémoire de Master en Electronique option commande des systèmes électriques, Département d'Electromécanique, Université de Bordj Bou Arréridj, 2016.

[32] S. Dechoucha et O. Bourezg, "Conception des techniques MLI dédiées à la commande des convertisseurs DC/DC et DC/AC à base du microcontrôleur PIC18F4431 " Mémoire de Master en Electronique option contrôle industriel, Département d'Electromécanique, Université de Msila, 2017.

Annexes

Annexe A :

Méthode de Newton-Raphson :

Code Matlab pour l'optimisation des angles de l'onduleur MLI en créneaux :

```
% Methode de Newton-Raphson appliquée pur l'optimization de la commande
% de l'onduleur monophasé MLI en créneau:

clear all; close all; clc;

r_range=100;
dr=0.01;
r=1;
angle1=[];%la matrice de la variation des valeurs des angles de commutation
alpha=[];
rr=[];
resultat=0;
precision=[];

for j=1:r_range
    % Intialisation des angles
    if resultat==1
        alpha1=alpha(1); alpha2=alpha(2); alpha3=alpha(3);
    else
        alpha1=rand*pi/2; alpha2=rand*pi/2; alpha3=rand*pi/2;
    end;
    resultat=0;
    alpha=[alpha1;alpha2;alpha3];
    t=[r*2*pi/4;0;0];
    df=1;
    iteration=1;

    while (abs(df) > 1e-10) & (iteration < 40)

        % Le système non lineaire
        f=[cos(alpha1)+cos(alpha2)-cos(alpha3);
          cos(3*alpha1)+cos(3*alpha2)-cos(3*alpha3);
          cos(5*alpha1)+cos(5*alpha2)-cos(5*alpha3)];

        % La matrice Jacobienne
        delf=[-sin(alpha1) -sin(alpha2) +sin(alpha3);
              -3*sin(3*alpha1) -3*sin(3*alpha2) +3*sin(3*alpha3);
              -5*sin(5*alpha1) -5*sin(5*alpha2) +5*sin(5*alpha3)];

        % L'erreur
        df=inv(delf)*(t-f);
        alpha=alpha+df;
        alpha1=alpha(1,:);
        alpha2=alpha(2,:);
        alpha3=alpha(3,:);
        iteration=iteration+1;
    end;
end;
```

```

    angle=alpha*180/pi;
    Erreur=abs(min(df));
    if (angle > 0) & (angle < 90) & (angle(1) < angle(2)) & (angle(2) <
angle(3))
        precision=[precision;Erreur];
        rr=[rr r];
        r=r-dr;
        angle1=[angle1 angle];
        resultat=1;
    end;
end;
n=length(rr);

r_alpha1_alpha2_alpha3_Error=[rr',angle1(1,:) ',angle1(2,:) ',angle1(3,:) ',pr
ecision],

r_alpha1_alpha2_alpha3_Error=[rr(1:2:n) ',round(angle1(1,1:2:n) ') ',...
    round(angle1(2,1:2:n) ') ',round(angle1(3,1:2:n) ') ',precision(1:2:n) ],

subplot(2,1,1);
plot(rr,angle1(1,:),rr,angle1(2,:),rr,angle1(3,:));
xlabel('Taux de modulation, \itr = V_1 /E');
ylabel('Angles de commutation (Degrés)');
legend('\alpha_1', '\alpha_2', '\alpha_3');
grid;

subplot(2,1,2);
plot(rr,precision);
xlabel('Taux de modulation,\itr = V_1 /E');
ylabel('Erreur');
grid;

```

Annexe B :

Code Matlab pour la commande de l'onduleur MLI en créneaux :

```
%load ond4.mat;load
ond5.mat;subplot(2,1,1);plot(V(1,:),V(2,:));xlabel('Temps
(sec)');ylabel('Tension de sortie
(V)');subplot(2,1,2);plot(I(1,:),I(2,:));xlabel('Temps
(sec)');ylabel('Courant de sortie (A)');

function [sys,x0,str,ts]=CommandeMLI(t,x,u,flag)
Fs=100e3;
Ts=1/Fs;
T=0.02;
w=314.16;

%Angles:
%r=V1/2E;
% r=[1.00 0.98 0.96 0.94 0.92 0.90 0.88 0.86 0.84 0.82 0.80 0.78 0.76 0.74
0.72 0.70 0.68 0.66];
% phi1[18]={13,13,14,14,15,15,16,17,17,18,19,19,20,21,21,22,23,24},
% phi2[18]={51,52,53,54,56,57,58,59,60,62,63,64,66,68,69,72,74,79},
% phi3[18]={88,87,86,86,85,84,84,83,83,82,82,81,81,81,81,82,83,86};

alpha1=24;
alpha2=79;
alpha3=86;

if flag==0
    sys=[0;0;3;0;0;0;1];
    str=[];
    x0=[];
    ts=[Ts 0];
elseif flag==3
    t1=alpha1*pi/(180*w);
    t2=alpha2*pi/(180*w);
    t3=alpha3*pi/(180*w);

    tt=mod(t,T);
    if ((tt > t1 && tt <= T/2-t3) || (tt > T/2-t2 && tt <= T/2+t1) || (tt >
T-t3 && tt <= T-t2))
        S1=1;
    else
        S1=0;
    end
    if ((tt > t2 && tt <= t3) || (tt > T/2-t1 && tt <= T/2+t2) || (tt >
T/2+t3 && tt <= T-t1))
        S2=1;
    else
        S2=0;
    end
    S5=1;
    sys=[S1;S2;S5];
else
    sys=[];
end
```

Annexe C :

Calcul du spectre par l'algorithme FFT :

```
clear all;clc;

pas=5e-2;
i=1:1200;          % Nombre d'échantillons
t=5e-5:5e-5:5e-5*1200; % Temps discret
% figure(1);plot(i,V(i),i,I(i));grid
% pause;
% V1=V(210:610);I1=I(210:610);j=1:400;
%
subplot(2,1,1);plot(pas*j,V1(j),pas*j,I1(j),' ','LineWidth',2);legend('Tension','Courant');
% ylabel('Grandeurs'); xlabel('t, ms'); grid;

load ond4.mat;load ond5.mat;
% subplot(2,1,1);plot (V(1,:),V(2,:));grid;
V1=V(2,400:800);I1=I(2,400:800);j=1:400;
%
subplot(2,1,2);plot(pas*j,V1(j),pas*j,50*I1(j),' ','LineWidth',2);legend('Tension','Courant');
% ylabel('Simulés'); xlabel('Temps, ms'); grid;

% pause;

%Analyse FFT:
nombre_harmoniques=100;
[Ordre_Harmoniques,Amplitudes_Normalises]=fun_fft(nombre_harmoniques,V1);
%subplot(2,1,2);
bar(Ordre_Harmoniques,Amplitudes_Normalises);
xlabel('n');ylabel('Hn');grid;axis([0 nombre_harmoniques 0 1]);
VH=Amplitudes_Normalises;
THDV=sqrt(sum(VH.^2)-1), % THD de la tension de charge

% [Ordre_Harmoniques,Amplitudes_Normalises]=fun_fft(nombre_harmoniques,I1);
% figure(4); bar(Ordre_Harmoniques,Amplitudes_Normalises);
% xlabel(' Order des Harmoniques');ylabel('Amplitudes des Harmoniques (I1)');grid;axis([0 nombre_harmoniques 0 1]);
% IH=Amplitudes_Normalises;
%
% THDI=sqrt(sum(IH.^2)-1), % THD du courant de charge

function [Ordre_Harmoniques,Amplitudes_Normalises] =
fun_fft(nombre_harmoniques,X)
%nombre_harmoniques=100;
Fourier=fft(X);
Ordre_Harmoniques=(0:nombre_harmoniques-1);
Amplitudes=abs(2*Fourier(1:nombre_harmoniques)/length(X));
Fondamentale=Amplitudes(2);
Amplitudes_Normalises=Amplitudes/Fondamentale;
```

Annexe D :

Méthode de Newton-Raphson :

Code Matlab pour l'optimisation des angles de l'onduleur à 5 niveaux :

```
% Methode de Newton-Raphson appliquée pour l'optimization de la commande
% de l'onduleur monophasé à cinq niveaux:

clear all; close all; clc;

r_range=65;
dr=0.01;
r=1.1;
angle1=[];          %la matrice de la variation des valeurs des angles de
commutation
alpha=[];
rr=[];
resultat=0;
precision=[];

for j=1:r_range
    % Intialisation des angles
    if resultat==1
        alpha1=alpha(1); alpha2=alpha(2);
    else
        alpha1=rand*pi/2; alpha2=rand*pi/2;
    end;

    resultat=0;
    alpha=[alpha1;alpha2];
    t=[r*2*pi/4;0];
    df=1;
    iteration=1;

    while abs(df) > 1e-10 & iteration < 300

        % Le système non lineaire
        f=[cos(alpha1)+cos(alpha2);
           cos(3*alpha1)+cos(3*alpha2)];

        % La matrice Jacobien
        delf=[-sin(alpha1) -sin(alpha2);
              -3*sin(5*alpha1) -3*sin(5*alpha2)];

        % L'erreur
        df=inv(delf)*(t-f);
        alpha=alpha+df;
        alpha1=alpha(1,:);
        alpha2=alpha(2,:);
        iteration=iteration+1;

    end;

    angle=alpha*180/pi;
    Erreur=abs(min(df));
    if (angle > 0) & (angle < 90) & (angle(1) < angle(2))
        precision=[precision;Erreur];
        rr=[rr r];
        r=r-dr;
        angle1=[angle1 angle];
        resultat=1;
    end;
end;
```

```

    end;
end;
n=length(rr);
r_theta1_theta2_Error=[rr',angle1(1,:) ',angle1(2,:) ',precision],

r_theta1_theta2_Error=[rr(1:2:n) ',round(angle1(1,1:2:n) ') ',round(angle1(2,1:
2:n) ') ',precision(1:2:n)],

subplot(2,1,1);plot(rr,angle1(1,:),rr,angle1(2,:));
xlabel('Taux de modulation, \itr = V_1 /2E');
ylabel('\it{\alpha_i} en (Degrés)');
legend('\alpha_1','\alpha_2');
grid;
subplot(2,1,2);plot(rr,precision);
xlabel('Taux de modulation, \itr = V_1 /2E');
ylabel('Erreur');
grid;

```

Annexe E :

Code CCS développé pour la commande des deux onduleurs

```
//*****inverters*****  
#include <18F4431.h>  
#device ADC=8  
  
#FUSES NOWDT,H4           //No Watch Dog Timer  
#FUSES WDT128            //Watch Dog Timer uses 1:128 Postscale  
#FUSES NOBROWNOUT        //No brownout reset  
#FUSES NOLVP             //No low voltage prgming, B3(PIC16) or B5(PIC18) used for  
I/O  
  
#use delay(clock=40MHz,crystal=10MHz)  
  
//#bit C1 = 0xf81.0 // PIN B0  
  
//LCD 16/2 configuration  
#define LCD_ENABLE_PIN PIN_D4  
#define LCD_RS_PIN PIN_C6  
#define LCD_RW_PIN PIN_C7  
#define LCD_DATA4 PIN_C5  
#define LCD_DATA5 PIN_C4  
#define LCD_DATA6 PIN_D3  
#define LCD_DATA7 PIN_D2  
#include <lcd.c>  
  
#include <math.h>  
  
int i,mode,u1=0,u2=0,u3=0,u4=0,v1,v2,a,b,c,alph1,alph2,alph3,  
alpha[19]={ 175,170,160,150,140,130,120,110,100,90,80,70,60,50,40,30,20,10,5},  
  
//r={ 0.68,0.70,0.72,0.74,0.76,0.78,0.80,0.82,0.84,0.86,0.88,0.90,0.92,0.94,0.96,0.98,1.00,1.02  
,1.04,1.06,1.08,1.10};  
theta1[24]={ 85,80,22,21,19,18,16,15,13,12,10,9,7,5,3,2,1,3,5,8,11,14,18,26},  
theta2[24]={ 88,85,82,81,79,78,76,75,73,72,70,69,67,65,63,62,59,57,55,52,49,46,42,34},  
  
//r={ 0.66,0.68,0.70,0.72,0.74,0.76,0.78,0.80,0.82,0.84,0.86,0.88,0.90,0.92,0.94,0.96,0.98,1.00  
,1.04,1.06,1.08,1.10};  
phi1[20]={ 80,75,24,23,22,21,21,20,19,19,18,17,17,16,15,15,14,14,13,13},  
phi2[20]={ 85,80,79,74,72,69,68,66,64,63,62,60,59,58,57,56,54,53,52,51},  
phi3[20]={ 88,85,86,83,82,81,81,81,81,82,82,83,83,84,84,85,86,86,87,88};  
  
float T,f;  
  
int16 period=125,k=0;  
  
#define PIN_MODE PIN_C3
```

```

#int_TIMER2
void TIMER1_isr(void) //Chaque 0.1 ms
{
    k++;
    switch(mode)
    {
        /*
        case 0: //Onduleur à 2 niveaux
            if (u1>v2) u1=0;
            if (u1<=v2/2)
                { set_power_pwm0_duty(504);set_power_pwm2_duty(0);}
            else
                { set_power_pwm0_duty(0);set_power_pwm2_duty(504);}
            u1++;
            set_power_pwm4_duty(504);
            break;
        */
        case 0: //Onduleur à 3 niveaux
            if (u2>v2) u2=0;
            if (u2<=v2/2)
                { set_power_pwm0_duty(0);}
            else
                { set_power_pwm0_duty(504);}
            if (u2>=a && u2<(a+v2/2))
                { set_power_pwm2_duty(0);}
            else
                { set_power_pwm2_duty(504);}
            u2++;
            set_power_pwm4_duty(0);
            break;

        case 1: //Onduleur MLI en créneau
            if (u3==v2) u3=0;
            if ((u3>a && u3<=v2/2-c)||u3>v2/2-b && u3<=v2/2+a)||u3>v2-c && u3<=v2-b))
                { set_power_pwm0_duty(0);}
            else
                { set_power_pwm0_duty(504);}
            if ((u3>b && u3<=c)||u3>v2/2-a && u3<=v2/2+b)||u3>v2/2+c && u3<=v2-a))
                { set_power_pwm2_duty(0);}
            else
                { set_power_pwm2_duty(504);}
            u3++;
            set_power_pwm4_duty(0);
            break;

        case 2: //Onduleur à 5 niveaux

            if (u4==v2) u4=0;
            if ((u4>a && u4<=v2/2-a))
                { set_power_pwm0_duty(0);}

```

```

else
    {set_power_pwm0_duty(504);}

if ((u4>a+v2/2 && u4<=v2-a))
    {set_power_pwm2_duty(0);}
else
    {set_power_pwm2_duty(504);}
if ((u4>=b && u4<=v2/2-b)||(u4>=v2/2+b && u4<=v2-b))
    set_power_pwm4_duty(0);
else
    set_power_pwm4_duty(504);
u4++;

break;

}

}

void main()
{
//ADC configuration:
setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL);
setup_adc_ports(ADC_CONT_A|ADC_WHEN_PPWM);
setup_adc_ports(sAN7,sAN8);

//Timer2 configuration:T=(4*4*(24+1)*10)/(40*1000)=0.1 ms
setup_timer_2(T2_DIV_BY_4,24,10);
enable_interrupts(INT_TIMER2);
enable_interrupts(GLOBAL);

//PWM frequency: Freq=(40*1000)/(16*125)=20kHz
setup_power_pwm(PWM_CLOCK_DIV_16|PWM_UP_DOWN,1,0,period,0,1,0);
setup_power_pwm_pins(3,3,3,0);

set_tris_c(0x08);
set_tris_d(0x00);

output_float(PIN_MODE);
mode=0;
lcd_init();
lcd_gotoxy(1,1);lcd_putc("Onduleurs multiniveaux");
lcd_gotoxy(1,2);lcd_putc("39Hz<freq<200Hz");
delay_ms(1000);

while(1)
{

if(!input(PIN_MODE))
{

```

```

mode++;
if(mode==3) mode=0;
delay_us(10);
while(!input(PIN_MODE));
}

switch(mode)
{
/*
case 0: //Onduleur à 2 niveaux
    set_adc_channel(8);
    delay_us(10);
    v2=255-0.8*read_adc(); //39Hz<frequency<196Hz
    lcd_gotoxy(1,1);lcd_putc("Ond 2 niveaux: ");
    break;
*/
case 0: //Onduleur à 3 niveaux
    set_adc_channel(7); delay_us(10);
    v1=read_adc();
    i=ceil(v1/14);
    if(i>18) i=18;
    set_adc_channel(8); delay_us(10);
    v2=51+0.8*read_adc();
    alph1=alpha[i];
    a=0.002777*alph1*v2; //x=alpha1*v2/360
    lcd_gotoxy(1,1);lcd_putc("Ond 3 niveaux: ");
    break;

case 1: //Onduleur MLI en créneu
    set_adc_channel(7);
    delay_us(10);
    v1=read_adc();
    i=ceil(v1/12);
    if(i>19) i=19;
    set_adc_channel(8);
    delay_us(10);
    v2=51+0.8*read_adc();
    alph1=phi1[19-i];
    alph2=phi2[19-i];
    alph3=phi3[19-i];
    a=0.002777*alph1*v2; //x=alpha1*v2/360
    b=0.002777*alph2*v2;
    c=0.002777*alph3*v2;
    lcd_gotoxy(1,1);lcd_putc("Ond_MLI en cren: ");
    break;

case 2: //Onduleur à 5 niveaux
    set_adc_channel(7); delay_us(10);
    v1=read_adc();
    i=floor(v1/11);

```

```

    if(i>23) i=23;
    set_adc_channel(8);
    delay_us(10);
    v2=51+0.8*read_adc();
    alph1=theta1[23-i];
    alph2=theta2[23-i];
    a=0.002777*alph1*v2; //x=alpha1*v2/360
    b=0.002777*alph2*v2;
    lcd_gotoxy(1,1);lcd_putc("Ond 5 niveaux: ");
    break;

}
T=0.1*v2;
f=10000/v2;
if (k>10000)
{lcd_gotoxy(1,2);printf(lcd_putc," F=%3.0f Hz ",f);k=0;}
}
}

```

Résumé :

L'électronique de puissance représente un domaine de recherche important qui traite la commande et la conversion d'énergie électrique en d'autre forme d'énergie selon les applications désirées. Dans ce travail, l'étude et la réalisation de deux types d'onduleurs à élimination d'harmoniques à savoir l'onduleur MLI en pont en H et l'onduleur à 5 niveaux sont présentées. Les signaux de la commande des transistors associés aux bras des onduleurs sont générés via le microcontrôleur PIC18F4431 qui contient des modules MLI (Modulation de la Largeur d'Impulsion). La partie théorique de ce travail concerne l'optimisation des angles d'amorçage ainsi que les simulations des deux onduleurs. Dans la partie pratique, trois cartes sont réalisées à savoir la carte d'alimentation, la carte de puissance et la carte de commande. Les signaux de la tension et du courant de sortie ont la même concordance avec les signaux de simulations. Les valeurs du THD (Total Harmonic Distortion) simulées et pratiques sont aussi comparées pour le cas d'un onduleur à 5 niveaux.

Mots clés :

Onduleur de tension, Microcontrôleur PIC18F4431, Pont en H, Angles d'amorçage, MLI.

Abstract :

Power electronics represents an important area of research which deals with the control and conversion of electrical energy to other form of energy according to desired applications. In this work, the study and the design of two types of inverters with harmonic elimination named H-bridge PWM inverter and 5-level inverter are presented. The control signals of the transistors associated with each inverter are generated via the PIC18F4431 microcontroller which contains PWM (Pulse Width Modulation) modules. The theoretical part of this work concerns the optimization of the firing angles as well as the simulations of the two inverters. In the practical part, three cards are made; the power card, the power card and the control card. The output voltage and current signals have the same agreement with those obtained in simulations. Simulated and experimental THD (Total Harmonic Distortion) values are also compared for the case of a 5-level inverter.

Keywords:

Inverter, PIC18F4431 Microcontroller, H-bridge, Firing angles, PWM.

ملخص:

تمثل إلكترونيات الطاقة مجالاً مهماً للبحث الذي يتعامل مع التحكم في الطاقة الكهربائية وتحويلها إلى شكل آخر من أشكال الطاقة وفقاً للتطبيقات المرغوبة. في هذا العمل، تم تقديم دراسة وتحقيق نوعين من محولات الطاقة التوافقية وهي المحول H-bridge PWM والمحول ذو المستوى الخامس. يتم إنشاء إشارات التحكم في الترانزستورات المرتبطة بأذرع المحول عبر متحكم PIC18F4431 الذي يحتوي على وحدات PWM (تعديل عرض النبض). يتعلق الجزء النظري من هذا العمل بتحسين زوايا التحكم وكذلك محاكاة اثنين من العاكسين. في الجزء التطبيقي من هذا العمل، تم صنع ثلاث بطاقات، وهي بطاقة التغذية، بطاقة الطاقة وبطاقة التحكم. إشارات التوتر والتيار الناتجة لها نفس الاتفاق مع إشارات المحاكاة. تم أيضاً مقارنة قيم THD (إجمالي التشوه التوافقي) المحاكاة والعملية لحالة المحول ذي المستوى الخامس.

الكلمات المفتاحية:

المحول، متحكم PIC18F4431، جسر H، زوايا التحكم، PWM.