



Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
République Algérienne Démocratique et Populaire
Université Saad Dahlab Blida 01
Département des énergies renouvelables
Faculté de technologie

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme Master en Énergies Renouvelables

Option : Conversion Photovoltaïque

Thème : Étude Et Conception D'un Onduleur Monophasé

Présenté par :

AIDOUN Sabrina
HADDOUCHE Djamila

Soutenu devant le jury composé par :

Monsieur <u>DOUMAZ Toufik</u>	MAA	USDB	Président
Monsieur <u>AIT SAHED Oussama</u>	MCB	USDB	Encadreur
Monsieur <u>BOUKENOUI Rachid</u>	MCB	USDB	Co-promoteur
Monsieur <u>BRADAI RAFIK</u>	MCA	USDB	Examineur
Monsieur <u>KHOUDJA FOUAD</u>	MCB	USDB	Examineur

'Juin 2022'

الملخص:

الهدف من هذا المشروع هو دراسة عاكس أحادي الطور، يعتمد على متحكم Arduino Uno الذي يضمن التحكم في العاكس ومراقبته.. تتكون هذه الأطروحة من أربعة فصول ، أول فصلين عبارة عن دراسة نظرية للمحول الساكن ، ومفاتيح تبديل أشباه الموصلات ، والعاكس ، واستراتيجيات التحكم المختلفة ، وخاصة حالة العاكس أحادي الطور بأمره PWM. الفصلان الآخران يتعلقان بالحاكاة والتصميم والوصف التفصيلي لمختلف المراحل والمكونات التي تم تنفيذها. خصصنا جزءًا واحدًا لشرح تشغيل مخطط Arduino وهو عبارة عن بطاقة تقييم تحتوي على متحكم دقيق (من عائلة AVR)، وطريقة تنفيذ برمجة هذا المخطط في بيئة برمجة Arduino منذ أن استخدمنا Proteus logistique إلى تخطيط العاكس والحصول على موجة جيبية في نهاية المحاكاة ، ثم من أجل بدء الإدراك العملي ، احتجنا إلى الدائرة المطبوعة للعاكس ، ولهذا السبب استخدمنا برنامج Eagle.

كان الإدراك العملي هو الجزء الأكثر أهمية؛ يتم سرد الصعوبات التي واجهتها خلال مراحل التنفيذ المختلفة والنتائج التجريبية هي التحقق من صحة أداء trigger أخيرًا، تلخص الخاتمة جميع الأعمال المقدمة وتقتراح آفاق العمل المستقبلي .

الكلمات الرئيسية: عاكس أحادي الطور، Eagle، Proteus، PWM، Arduino UNO.

Résumé :

L'objectif de ce projet est d'étudier, simuler et réaliser un onduleur monophasé, basé sur un microcontrôleur Arduino UNO qui assure le contrôle et la surveillance de l'onduleur. Cette thèse consiste en quatre chapitres, les deux premiers chapitres sont une étude théorique des convertisseurs statiques, des interrupteurs semi-conducteurs, de l'onduleur et des différentes stratégies de commande, et plus particulièrement le cas d'un onduleur monophasé avec une commande 'PWM'. Les deux derniers chapitres concernent la simulation sur le logiciel Proteus , la conception ainsi que la réalisation de prototype.

La réalisation pratique était la partie la plus importante, on a réalisé la carte de circuit imprimé à l'aide de logiciel Eagle. Les difficultés rencontrées lors des différentes étapes de mise en œuvre sont répertoriées et les résultats expérimentaux valident le fonctionnement et les performances d'onduleur. Enfin, une conclusion résume l'ensemble des travaux présentés et des perspectives de travaux futurs sont proposées.

Les mots clés : onduleur monophasé, Arduino UNO, PWM, Proteus, Eagle.

Abstract:

The objective of this project is to study a single-phase inverter, based on an Arduino Uno microcontroller which ensures the control and monitoring of the inverter. This thesis consists in four chapters; the first two chapters are a theoretical study of the static converters, the

semiconductor switches, the inverter, and the different control strategies, and especially the case of a single-phase inverter with its PWM control. The two last chapters concern the simulation with Proteus software. The various stages and the implemented components are discussed.

The experimental implementation was the most important part; in order to get the printed circuit we used Eagle. The difficulties encountered during the various stages of implementation are listed and experimental results are validating the functioning and performance of the trigger. Finally, a conclusion summarizes all the work presented and prospects for future work.

Key words: single phase inverter, Arduino UNO, PWM, Proteus, Eagle.

Remerciements

Avant tout, nous remercions le Bon Dieu, qui nous a donné le courage, la volonté, la patience et la santé nécessaire pour affronter les différentes épreuves de la vie durant nos années d'études. Notre gratitude va tout particulièrement à nos familles sœurs et frères, nos chers parents, qui ont été toujours derrière nous et sans eux nous ne serons pas ce que nous sommes devenus. Pour nos amis, qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde reconnaissance et profond respect.

Au terme de notre projet de fin d'études, on exprime notre profonde gratitude et vif remerciement à **Dr AIT SAHED OUSSAMA**, notre promoteur, sans qui, ce mémoire n'aurait pas eu lieu, on le remercie aussi pour son soutien scientifique et la confiance qu'il nous a accordée durant notre travail sur ce projet. Notre gratitude s'adresse également à notre Co-promoteur **Dr BOUKENOUI RACHID** pour son aide très consistante ainsi que pour l'intérêt avec lequel il a suivi la progression de notre travail. Nos sincères remerciements vont aussi au chef d'option **Mr DOUMAZ TOUFIK**, ainsi qu'aux membres de jury **Dr BRADAI RAFIK** ainsi que **Mr KHOUDJA FOUAD** d'avoir accepté d'évaluer notre projet. Un profond respect pour **Dr BEN RABEH** qui nous a bien dirigé et conseillé lors de la réalisation. Et **Mr ISMAIL** pour les moyens qu'il a mis à notre disposition matérielle pour la réussite de la partie pratique de ce travail. Vers la fin, il nous est très agréable d'exprimer toutes nos reconnaissances pour ceux qui nous ont entourés de près ou de loin pendant nos années d'études pour leur soutien, leur aide et, surtout, pour leur sympathie.

Dédicace

A la mémoire de mon père qui n'a pas eu la chance d'être avec moi.

A mes chers parents qui ont tant donné Pour leur immense soutien,

Leur grand amour, leurs sacrifices Et leurs prières.

Qu'ils acceptent ici l'hommage de mon gratitude, qui, si grande qu'elle puisse être, ne sera jamais à la hauteur de leur tendresse et leur dévouement.

A mon cher frère AZIZ. A mes chères sœurs (Lydia, Cyrine, Ahlem),

A mes amis(e) SABRINA, BILLAL, MOHAMED, SAHBI, LYDIA et

MINA.

Vous aviez toujours cru en moi, et c'est dans votre présence que j'ai puisé la volonté de continuer.

HADDOUCHE Djamila

Dédicace

A mes chers parents qui ont tant donné Pour leur immense soutien,

Leur grand amour, leurs sacrifices Et leurs prières.

Qu'ils acceptent ici l'hommage de mon gratitude, qui, si grande qu'elle puisse être, ne sera jamais à la hauteur de leur tendresse et leur dévouement.

A mon cher frère AKLI. A mes chères sœurs (WARDA, FADHILA, Karima, HAYET, et MALAK),

A mes petits princes (SAMY, FARES, AIMAD, et Yasser)

Et a ma petite princesse RIMASS.

A mes amis(e) SARAH, BILLAL, MOHAMED, SAHBI, LYDIA et

MINA.

Vous aviez toujours cru en moi, et c'est dans votre présence que j'ai puisé la volonté de continuer.

AIDOUN Sabrina

Sommaire

Résumés	I
Remerciements.....	III
Dédicaces	IV
Liste des figures	X
Liste des tableaux	XIII
Liste des abréviations	XIV

Chapitre I : Généralités sur les convertisseurs statiques.

1. Introduction	7
Les convertisseurs de puissance en électrotechnique	7
Les convertisseurs en électronique de puissance	8
2. Classification des convertisseurs statiques	9
3. Les redresseurs	10
3.1. Différents types de redresseurs	10
3.1.1. Redresseurs à commutation naturelle (non commandé)	10
3.1.2. Redresseurs à commutation Forcée (commandé)	11
3.1.3. Redresseurs à MLI	12
3.1.3.1. Applications modernes du redresseur MLI	12
3.1.3.2. Principe de fonctionnement des redresseurs à MLI	12
4. Les Gradateurs.....	13
4.1. Constitution d'un gradateur	13
4.2. Types des gradateurs	14
4.3. Principe de fonctionnement des gradateurs.....	14
4.3.1. Marche en interrupteur.....	14
4.3.2. Marche en gradateur monophasé.....	15
5. Les hacheurs	16
5.1. Principe de fonctionnement.....	17
5.2. Types des hacheurs	18
5.2.1. Hacheurs directs	18
Hacheur série	18
Hacheur parallèle	18
Hacheur réversible en courant :	19
Hacheur en pont	19

Hacheurs multi niveaux	20
5.2.2. Les hacheurs indirects	20
Hacheur à stockage inductif	20
Hacheur à stockage capacitif	20
1.6. Les onduleurs	21
1.6.1. Définition	21
Conclusion	21

Chapitre II : Généralités sur les onduleurs et leurs stratégies de commande.

1. Introduction	23
2. Généralité sur les onduleurs	23
3. Principe de fonctionnement	24
3.1. Le pont en H	24
Utilité du pont en H	25
Principe de fonctionnement d'un pont en H	25
4. Etude des interrupteurs électroniques	26
Thyristor	27
Transistor	28
MOSFET	28
IGBT	29
Comparaison entre MOSFET et L'IGBT	30
5. Classification des onduleurs	30
5.1. Selon la réversibilité	30
5.1.1. Onduleur autonome	30
5.1.2. Onduleur non autonome	31
5.2. Selon la nature d'alimentation	31
5.2.1. Les onduleurs de tension	31
5.2.2. Les onduleurs de courant	32
5.2.3. Les onduleurs à résonance	32
5.3. Selon la nature de charge	32
5.3.1. Les onduleurs monophasés	32
5.3.2. Les onduleurs triphasés	34
5.3.3. Les onduleurs multi-niveaux	34
6. Les applications des onduleurs	35

6.1. Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone	36
6.2. Alimentation de secours	36
6.3. Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes	37
6.4. Les applications relatives aux transports.....	37
6.4.1. Transports ferroviaires	37
6.4.2. Transports aériens.....	37
6.4.3. Applications dans le secteur des énergies renouvelables.....	37
7. Commandes des onduleurs	38
7.1. Commande 180°	38
7.2. Commande 120°	38
7.3. Commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI)	39
7.3.1. Modulation sinusoïdale (MLIS)	40
7.3.2. Modulation vectorielle (SVM)	40
8. Comparaison entre les trois commandes d'un onduleur	41
9. Technologies de génération de la PWM	41
STM32 - STMicroelectronics	41
Uno - Arduino.....	41
Pic - Microship	42
Conclusion.....	42

Chapitre III : Simulation et essais préliminaires.

1. Introduction.....	43
2. Schéma fonctionnel d'un onduleur monophasé	43
3. Les éléments de schéma fonctionnel	43
-Arduino UNO	43
-Opto-coupleur	43
-Driver TLP250	44
MOSFET	44
4. Simulation	44
4.1. Les étapes de la simulation.....	46
4.1.1. Arduino (générateur de circuit de commande).....	46
Trois alimentations de 15V	50
Une alimentation de 5V.....	51

3.4. Partie puissance	51
Driver TLP250.....	52
3.5. L'explication du circuit complet	54
Bloc1 : Onduleur	54
Bloc 2 : Alimentations.....	55
Bloc3 : Génération du signal de commande	55
Conclusion	56

Chapitre IV: Réalisation pratique d'un onduleur monophasé.

1. Introduction	55
2. Présentation de logiciel Eagle	55
3. La schématisation de circuit sur Eagle	55
4. Partie Réalisation	57
4.1. Les étapes de la réalisation	58
4.2. Interprétation des résultats	63
Conclusion	66

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Diagramme des divers types de convertisseurs statiques en électronique de puissance.....	9
FigureI.2 : schéma de principe de conversion Alternative continue (AC-DC).....	10
FigureI.3 : redressement monophasé non commandé.	10
FigureI.4 : redressement triphasé commandé.	11
FigureI.5: schéma de principe de conversion Alternative/ Alternative(AC/AC).....	13
FigureI.6 : schéma de principe de marche en interrupteur d'un gradateur.	14
Figure I.7 : Principe de fonctionnement d'un gradateur monophasé.	16
Figure I.8 : Circuit d'un hacheur deux quadrants réversible en tension.	17
Figure I.9 : Circuit d'un hacheur en série.	18
Figure I.10 : Circuit d'un hacheur en parallèle.	19
FigureI.8 : Schéma de principe de la conversion Continue-Alternative (DC-AC)	21

Chapitre II

Figure II.1 :schéma de principe de base d'onduleur.....	23
FigureII.2 : montage en pont H.	24
FigureII.3 : le circuit de commande pour le mouvement d'un moteur (tourne à droite et à gauche).....	25
FigureII. 4 : principe de fonctionnement d'une diode.	26
Figure II.5 : schéma de principe d'un thyristor.....	27
FigureII.6 : schéma de principe des transistors.....	27
Figure II.7 : Symbole d'un MOSFET.....	28
Figure II.8 : Symbole et circuit équivalent d'un IGBT.	28
FigureII.9: circuit d'un pont de Graetz.	30
FigureII.10: Onduleur monophasé avec transformateur à point milieu.....	32
FigureII.11: onduleur en demi-pont.	32
FigureII.12 : Onduleur monophasé en pont.	33
FigureII.13:Onduleur triphasé.....	33
FigureII.14 : onduleur NPC à trois niveaux.....	34
FigureII.15 : Réglage de la vitesse d'un moteur synchrone.	35

FigureII.16: Alimentation de secours.	35
FigureII.17 : transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes.	36
Figure II.18 : applications des onduleurs dans le secteur des énergies renouvelables (PV).....	37
FigureII.19: la commande 180° et 120° d'un onduleur.....	38

Chapitre III

Figure III.1 : le schéma fonctionnel d'un onduleur monophasé.	42
Figure III.2 : le schéma fonctionnel d'un opto-coupleur.	43
Figure III.3 : Driver TLP250.....	44
Figure III.4 : Interface principale de logiciel Proteus.....	45
Figure III.5 : la carte Arduino UNO.....	45
Figure III.6: programme et schéma de simulation d'une LED clignotante.	47
Figure III.7: clignotement d'une LED par une carte Arduino UNO.	47
Figure III.8 : schéma d'un redresseur sur Proteus.....	48
Figure III.9 : Signal PWM en vu de l'oscilloscope.....	49
Figure III.10 : circuit d'alimentation 15V.	50
Figure III.11 : circuit d'alimentation de 5V.....	51
Figure III.12: symbole et animation d'une MOSFET IRFZ44N.	52
Figure III.13: circuit de test d'un Driver TLP250.	53
Figure III.14: le schéma complet d'un onduleur monophasé sur ISIS.	54
Figure III.15: Signal de sortie de l'onduleur (aux bornes de la charge).....	55

Chapitre IV

Figure IV.1 : l'interface principale de logiciel Eagle.	55
Figure IV.2 : le circuit de l'onduleur sur Eagle.	56
Figure IV.3 : Schéma de circuit imprimé (la Board).....	57
Figure IV.4 : le matériel utilisé pour la réalisation d'un onduleur monophasé.	57
Figure IV.5 : la carte de circuit imprimé réalisé.	59
Figure IV.6 : perçage de la carte de circuit imprimé.....	60
Figure IV.7: le fer à souder.....	60
Figure IV.8 : photo de la carte électronique de commande.	61
Figure IV.9 : photo du banc d'essai de l'onduleur.....	62

Figure IV.10 : Tension alternative à la sortie d'onduleur (30V/50HZ) en vu de l'oscilloscope.
63

Figure IV.11 : Tension alternative à la sortie d'onduleur (30V/50HZ) affiché sur Matlab.63

Figure IV.12: Tension alternative (30V/40HZ) en vu de l'oscilloscope.....64

Figure IV.13 : Tension alternative (30V/40HZ) sur Matlab.....65

Figure IV.14 : Tension alternative (20V/25HZ) en vue de l'oscilloscope.....65

Figure IV.15 : Tension alternative (20V/25HZ) sur Matlab.....66

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau II.1 : la méthode de fonctionnement d'un pont en H.....23

Tableau II.2 : comparaison entre MOSFET et IGBT.....27

Liste des abréviations

<i>Symbole</i>	<i>Signification</i>
AC	Courant Alternative
DC	Courant Continu
EAGLE	Easily Applicable Graphical Layout Editor
GTO	Gate Turns Off
I	Courant aux bornes de la charge
IDE	Integrated Development Environment
IGBT	Insolated gate bipolar transistor
ISIS	Intelligent Schematic Input System
L	Inductance
MCC	machine à courant continu
MCU	Microcontrôleur UNO
PM3	Pont mixte triphasés
PT3	Pont triphasés
PV	Photovoltaïque
PWM	Pulse Width Modulation
R	Resistance
Th	Thyristor
U	Tension aux bornes de la charge
V	Tension de la source continue
α	Rapport cyclique

INTRODUCTION GENERALE

Entre l'électronique et l'électrotechnique s'est développée, au cours de la deuxième moitié du 20ème siècle, une nouvelle technique, l'électronique de puissance, parfois appelée à ses débuts l'électronique des courants forts. La mise au point de semi-conducteurs, diodes, thyristors et transistors au silicium, permettant le contrôle des courants et des tensions importants a donné un essor considérable à cette nouvelle technique, au point d'en faire aujourd'hui une discipline de base du génie électrique [1].

Il existe quatre types de convertisseurs statiques : les redresseurs qui réalisent une conversion alternative-continue utilisée généralement pour alimenter les appareils électroniques. Les hacheurs qui réalisent une conversion continue-continue. Les gradateurs qui réalisent une conversion alternative-alternative. Les onduleurs qui réalisent une conversion continue-alternative. Dans notre étude nous allons nous intéresser à ce quatrième convertisseur, plus précisément le type monophasé commandé par une carte Arduino UNO dont on a fait une étude détaillée en bien expliquant son principe de fonctionnement, son rôle dans l'électronique industrielle, ainsi que ses applications.

L'onduleur est un dispositif électronique important, voire indispensable, plusieurs problèmes dans nos vies quotidiennes nécessitent son utilisation parmi y la protection des appareils informatiques contre les risques électriques comme les coupures de courant, les surtensions, les sous-tensions.

Notre objectif principal derrière ce travail est de réaliser un onduleur monophasé avec une fréquence réglable, commandé par la commande PWM générée par une carte Arduino UNO, et pour y arriver on a passé tout d'abord par la simulation de circuit dans le but d'assurer son bon fonctionnement et ça en la effectuer en utilisant le logiciel 'PROTEUS', dont on a bien observé cette conversion de la tension continue en une tension alternative sinusoïdale.

Pour aboutir aux objectifs de ce travail, notre mémoire sera structuré en quatre chapitres présentés comme suit :

Le premier chapitre sera dédié aux généralités sur les convertisseurs statiques, leurs types, applications ainsi que leurs rôles, nous illustrons le fonctionnement de chacun pour montrer la différence entre eux.

Le deuxième chapitre sera consacré à la description et le rôle de l'onduleur monophasé et triphasé plus précisément dans le domaine des énergies renouvelables, leur principe de

fonctionnement, les différents types d'onduleurs, et les différents types de commande de l'onduleur monophasé.

Le troisième chapitre sera destiné à la simulation du circuit de tout le prototype et aux essais préliminaires qu'on a effectué à chaque étape de la simulation pour tester le bon fonctionnement des composants utilisés.

Le quatrième chapitre sera consacré pour l'étape la plus importante et le but principal de tout ce projet qui est la réalisation pratique de l'onduleur , dans laquelle on a consacré beaucoup de notre temps en réalisant la carte de circuit imprimé manuellement après avoir effectuer le schéma du circuit sur le logiciel EAGLE, et imprimer la Board sur l'éditeur de routage de circuit imprimé.

Enfin, on termine par une conclusion, mettant l'importance et l'intérêt de l'onduleur monophasé dans le domaine d'électronique de puissance ainsi que le secteur des énergies renouvelables.

CHAPITRE I

Généralités Sur

Les Convertisseurs Statiques

1. Introduction :

Dans ce premier chapitre, on va parler sur les quatre convertisseurs statiques développés en électronique de puissance, qui sont des systèmes permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donnée. En citant le fonctionnement, l'utilisation et les différents types de chaque un d'eux.

- **Les convertisseurs de puissance en électrotechnique :**

Depuis la fin du XIXe siècle, les chercheurs ont inventé en électrotechnique des « machines » utilisant les propriétés du magnétisme, et plus particulièrement du ferromagnétisme, pour réaliser les diverses conversions possibles des formes d'énergie électriques :

a) Pour convertir l'énergie provenant d'une source de tension continue U (dynamo ou batterie d'accumulateurs) en une source de tension U' réglable, on utilise une association de machines tournantes moteur à courant continu-dynamo. Cette association peut être réversible. Le contrôle du transfert de puissance s'effectue surtout en agissant sur le champ magnétique des deux machines et les systèmes mécaniques mis en jeu.

b) Pour convertir l'énergie provenant d'une source de tension continue U (dynamo ou batterie d'accumulateurs) en une source de tension alternative, monophasée.

c) Pour convertir l'énergie provenant d'une source de tension alternative monophasée ou triphasée, (alternateur) de valeur efficace V en une source de tension continue U , on utilise une association de machines tournantes moteur asynchrone-dynamo. Cette association peut être réversible. Le contrôle du transfert de puissance s'effectue surtout en agissant sur les systèmes mécaniques mis en jeu.

d) Un cas particulier de l'association : est le groupe de machines tournantes Ward Léonard qui est une association moteur asynchrone-dynamo où la dynamo alimente un moteur à courant continu MCC. Le réglage du champ magnétique de la dynamo assure la variation de la tension continue U' de sortie alimentant le moteur MCC, et sa variation de vitesse. La vitesse de rotation du moteur MCC est différente de celle du groupe moteur asynchrone-dynamo.

e) Pour convertir l'énergie provenant d'une source de tension alternative monophasée ou triphasée, (alternateur) de valeur efficace fixe V en une source de tension alternative de même

fréquence et de valeur efficace réglable V' , on utilise une machine non tournante, le transformateur ou l'autotransformateur.

f) Pour convertir l'énergie provenant d'une source de tension alternative monophasée ou triphasée, (alternateur) de valeur efficace fixe V en une source de tension alternative de fréquence f' et de valeur efficace V' réglables, on utilise deux groupes de machines tournantes :

- Un groupe Ward-Léonard où la dynamo fournit une tension continue réglable U' ;
- Un groupe où le moteur à courant continu MCC alimenté (à l'induit) par la tension U' , est à vitesse réglable. Il entraîne un alternateur. On obtient ainsi par le groupe « tournant » Ward-Léonard et le groupe « tournant » MCC-alternateur, un générateur alternatif à valeur efficace V' et à fréquence f' réglables.

L'avantage de ces convertisseurs est bien connu :

- Grande fiabilité et grande robustesse;
- Grande « durée de vie » (de nombreuses décennies);
- Facilité de réglage, même si les moyens mis en œuvre sont parfois imposants (rhéostats, autotransformateurs...) et lents;
- Assez bon rendement en général, même pour le groupe Ward-Léonard.

- **Les convertisseurs en électronique de puissance :**

Avec le développement de l'automatique, de l'électronique et de l'informatique, on peut remplacer les « **machines** » par des convertisseurs statiques utilisant des composants électroniques en commutation.

Les avantages de ces convertisseurs sont nombreux :

- Contrôle et même régulation électronique possible du transfert de puissance;
- Système moins lourd et moins encombrant;
- Excellent rendement;
- Facilité de mise en œuvre grâce à l'automatisation;

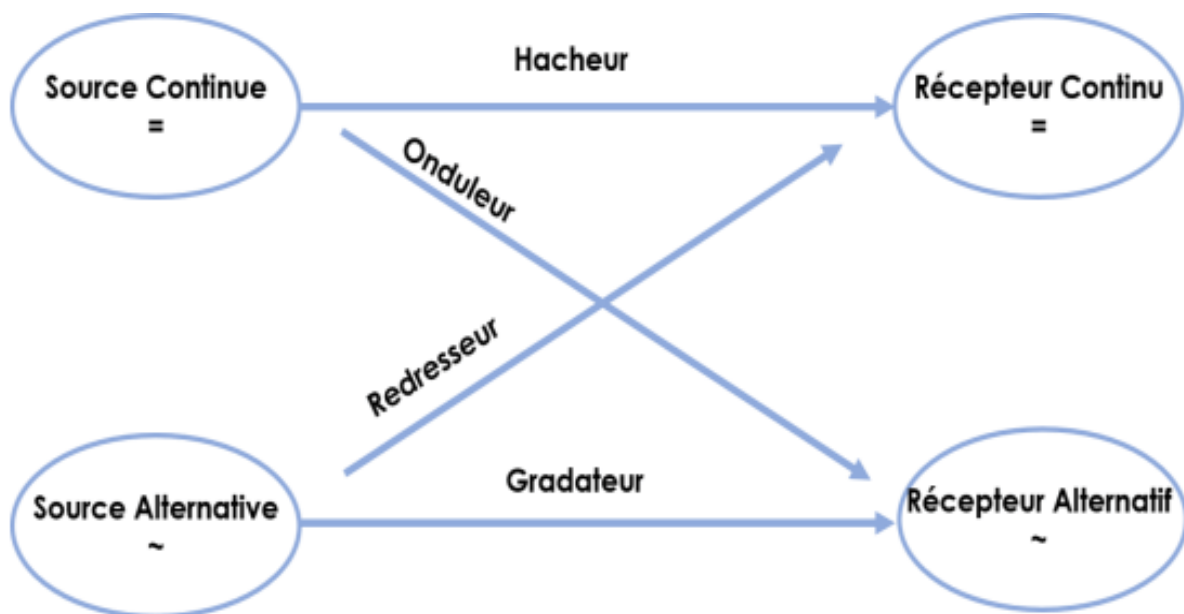
- Protections de plus en plus efficaces;
- Coût relatif en baisse, grâce aux progrès dans la fabrication et le montage des composants [2].

2. Classification des convertisseurs statiques:

Il est nécessaire de bien noter que l'énergie électrique s'utilise soit sous la forme de tensions et courants alternatifs (le plus souvent sinusoïdaux), soit sous la forme de tensions et courants continus (en régime permanent). Sachant que « l'électronique de puissance » s'intéresse au fait de relier une source d'énergie à un récepteur donné, On différencie quatre types de convertisseurs dont les schémas de principe sont donnés :

- Convertisseur Alternatif-Continu : Redresseur.
- Convertisseur Alternatif-Alternatif : c'est un Gradateur lorsque seule la valeur efficace de la tension Alternative est modifiée, sinon c'est un Cyclo convertisseur.
- Convertisseur Continu-Continu : Hacheur.
- Convertisseur Continu-Alternatif : Onduleur.

Les types de convertisseurs peuvent être représentés selon le diagramme présenté en dessus :



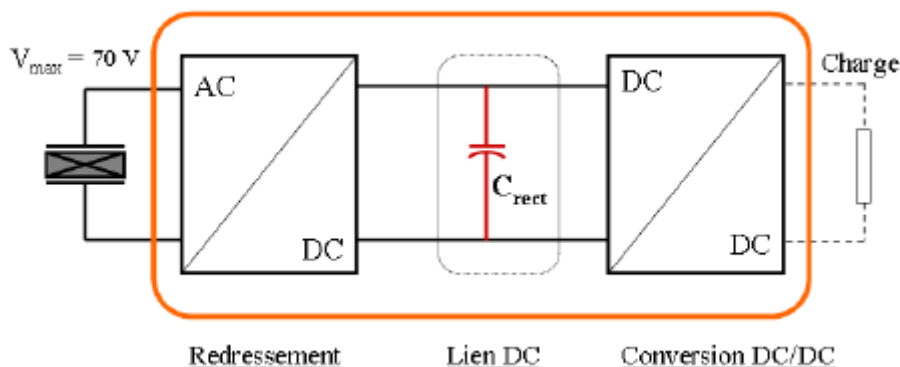
FigureI.1 : Diagramme des divers types de convertisseurs statiques en électronique de puissance.

3. Les redresseurs :

Les redresseurs à diodes et à thyristors assurent une conversion alternative-continue. Alimentés à partir du réseau monophasé ou triphasé, ils fournissent à leur sortie une tension continue de valeur fixe ou variable, soit pour alimenter directement un récepteur, soit pour alimenter un autre convertisseur. Lorsqu'on n'a pas à faire varier le rapport de transformation entre les tensions d'entrée et de sortie, on peut se contenter de redresseurs à diodes. Lorsqu'on veut faire varier ce rapport, on utilise des redresseurs à thyristors[3]. (Voir la figure I.2).

Il est utilisé par exemple pour :

- L'alimentation de moteur à courant continu(MCC).
- Chargeur de batteries d'accumulateur.
- Variateur de vitesse pour moteur à courant continu(MCC).



FigureI.2 : Schéma de principe de conversion Alternative continue (AC-DC)

1-3.1 Différents types de redresseurs :

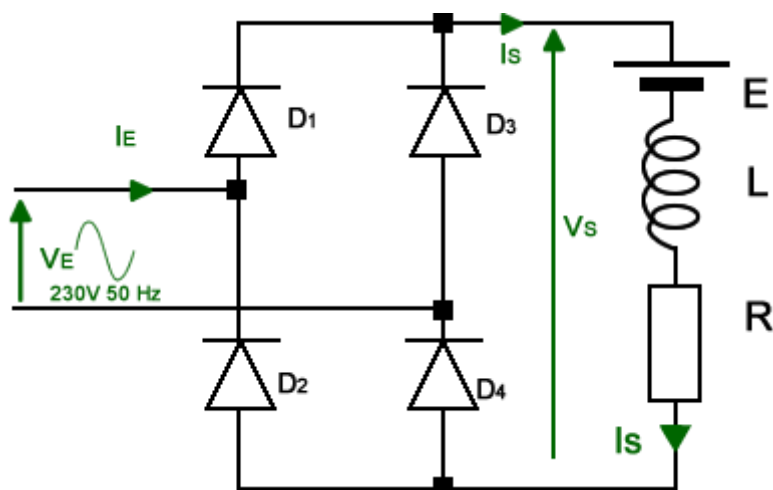
Du point de vue de la commutation électrique, on trouve deux grandes catégories de convertisseurs alternatif-continu (redresseurs).

3.1.1. Redresseurs à commutation naturelle (non commandé) :

Les redresseurs non commandés, essentiellement réalisés à partir de diodes, sont utilisés lorsque la tension de sortie n'a pas besoin d'être ajustée.

Ces ponts ne délivrent qu'une tension de sortie fixe, et ne seront donc pas utilisés pour faire la variation de vitesse pour les MCC.

La figure suivante montre le circuit de ce type de redresseur :



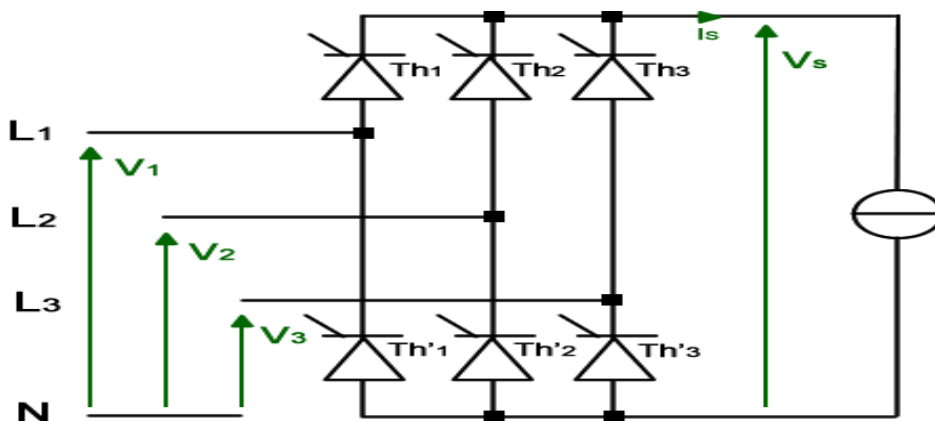
FigureI.3 : Redressement monophasé non commandé.

3.1.2. Redresseurs à commutation Forcée (commandé) :

On nomme « redresseur commandé » un montage redresseur dont une partie des diodes a été remplacée par un ensemble des thyristors pour obtenir une tension réglable aux borne du sortie. On distingue :

- Le pont tout thyristor triphasé PT3.
- Le pont mixte triphasé PM3.
- Le pont mixte symétrique monophasé.
- Le pont mixte asymétrique monophasé.

La figure suivante montre le circuit d'un redresseur à commutation forcée :



FigureI.4 : Redressement triphasé commandé.

3.1.3. Redresseurs à MLI :

C'est un convertisseur à modulation de largeur d'impulsion utilisant des composants à commutation forcée tel que les IGBT ou les thyristors GTO. L'emploi de cette technique permet non seulement une réduction de la perturbation harmonique ; en prélèvement des courants d'allure sinusoïdale mais aussi un contrôle des puissances actives et réactives on distingue deux structures : courant et tension.

Dans le souci de fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les redresseurs à MLI sont proposés comme solution avancée de dépollution.

3.1.3.1. Applications modernes du redresseur MLI :

L'étude de redresseur à MLI montre plusieurs avantages par rapport aux autres redresseurs classiques (à diode et à thyristor), qu'il est possible de fonctionner dans les quatre quadrants pour la commande des machines. Cette structure permet donc tous les types de transfert d'énergie possibles, alimenter une charge (passive ou active) en continu à partir d'un réseau alternatif, le courant prélevé sur ce réseau étant sinusoïdal. On peut donc avec un redresseur MLI, obtenir un facteur de puissance très proche de l'unité. On peut aussi régler, par le contrôle, l'énergie réactive absorbée ou fournie [4].

3.1.3.2. Principe de fonctionnement des redresseurs à MLI :

Le redresseur de tension fonctionne en gardant la tension du bus continu à une valeur de référence désirée, en utilisant une commande en boucle fermée. Pour accomplir cette tâche, la tension du bus continu est mesurée et comparée avec une référence U_{dc} , le signal d'erreur produit de cette comparaison est employé pour commuter les six interrupteurs du redresseur à la fermeture et à l'ouverture. De cette façon, la puissance peut s'écouler dans les deux sens selon les conditions sur la tension du bus continu U_{dc} mesurés aux bornes du condensateur.

Quand le courant I_{ch} est positif (fonctionnement redresseur), le condensateur c'est déchargé, et le signal d'erreur demande au bloc de commande de plus de puissance de la source alternative. Le bloc de commande prend la puissance de la source alternative en produisant un signal MLI approprié pour les six interrupteurs. De cette façon, un écoulement plus de courant de la source alternative au côté continu, et la tension de condensateur est récupérée. Inversement, quand I_{ch} devient négatif (fonctionnement onduleur), le condensateur

C est surchargé, et le signal d'erreur demande au block de commande pour décharger le condensateur, et la puissance retourne à la source alternative.

La commande MLI non seulement peut contrôler la puissance active, mais également la puissance réactive, ce type du redresseur permet la correction du facteur de puissance. En outre, les formes d'onde des courants de la source peuvent être maintenu comme presque sinusoïdales, ce qui réduit la distorsion de la source[5].

4.Les Gradateurs :

On désigne sous le nom de gradateur tous les convertisseurs statiques, alimentés par un réseau alternatif, fournissent une ou plusieurs tensions à valeur moyenne nulle, de même fréquence que celle du réseau d'alimentation, mais de valeur efficace différente, celle-ci étant habituellement réglable[6].

En outre les gradateurs sont les convertisseurs alternatif-alternatif servant à commander le débit d'une source alternative dans un récepteur alternatif sans changer de fréquence. Ils permettent d'assurer la liaison constante entre la source et la charge puis de l'interrompre ; c'est la marche en interrupteur. Ils permettent aussi de rendre intermittente cette liaison et, par là, de régler l'intensité du courant que la source débite dans le récepteur ; c'est le fonctionnement en gradateur[3] (Voir la figure I.5).

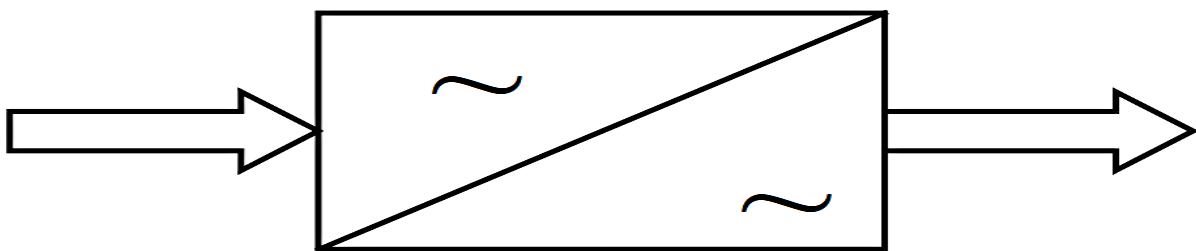


Figure I.5: Schéma de principe de conversion Alternative/Alternative (AC/AC).

4.1. Constitution d'un gradateur:

Il se compose d'une partie puissance et d'une partie commande intégrées dans le même bloc :

- La partie puissance est constituée de deux thyristors montés « tête-bêche » pour les fortes puissances ($> 10 \text{ kW}$) ou d'un triac pour les puissances inférieures.
- La partie commande est constituée de divers circuits électroniques permettant d'élaborer les signaux de commande des thyristors à partir d'un ordre de commande extérieur. Suivant les types de gradateur, ce signal de commande sera de type Tout Ou Rien ou bien analogique[7].

4.2. Types des gradateurs :

- GRADATEUR A ANGLE DE PHASE : C'est un appareil, alimenté sous une tension sinusoïdale de valeur efficace constante, fournit à la charge un courant alternatif non sinusoïdal de même fréquence que la tension d'alimentation, mais de valeur efficace réglable.
- GRADATEUR A TRAIN D'ONDES : C'est un appareil, alimenté sous une tension sinusoïdale de valeur efficace constante, fournit à la charge des salves de tension de manière à faire varier la valeur efficace de la tension aux bornes de la charge[7].

4.3. Principe de fonctionnement des gradateurs:

4.3.1. Marche en interrupteur :

Les deux thyristors T_{h1} et T_{h1}' qui vont couper et établir la liaison de type 'source-récepteur', sont montrées dans la figure suivante :

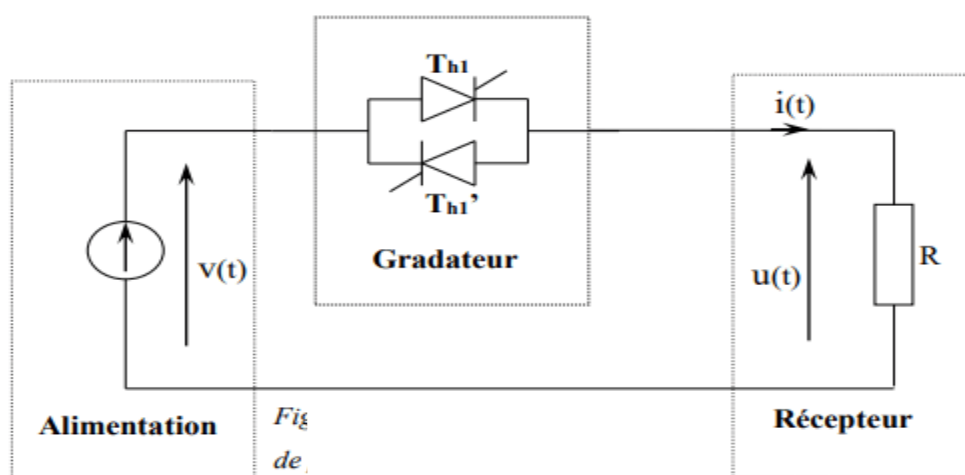


Figure I.6 : Schéma de principe de marche en interrupteur d'un gradateur.

À partir de l'instant où on veut fermer l'interrupteur, on envoie en permanence des signaux de déblocage sur les gâchettes des deux thyristors. À cet instant, T_{h1} conduit si V est positif ; c'est T_{h1} qui conduit si v est négatif. Quand le courant i change de signe, il passe d'un thyristor à l'autre. Si on néglige la chute de tension directe des thyristors, la tension U aux bornes de la charge est égale à v . Pour ouvrir l'interrupteur, on cesse d'envoyer des signaux de déblocage aux deux thyristors. Celui qui conduit continuera d'écouler le courant i jusqu'à ce que celui-ci s'annule, puis il reste nul[3].

Les gradateurs ont de nombreux avantages et inconvénients on cite parmi-y :

- Pas de risque de rebondissement.
- Etablissement du courant à un instant précis.
- Ouverture avec un retard égal au maximum à une demi-période.
- Ouverture sans rupture de courant, donc sans surtension.
- Possibilité de cadences de fonctionnement très rapides : on peut ne laisser passer le courant que pendant quelques alternances, ce qui est très intéressant pour le soudage par points par exemple. Mais cet « interrupteur » :
- Plus fragile en cas de surcharge qu'un interrupteur électromécanique.
- Il ne présente pas de coupure « visible ».
- Il produit une chute de tension « au contact » beaucoup plus élevée. Ce sont surtout l'absence de surtension de rupture et la possibilité de cycles ouverture-fermeture rapides et « calibrés » qui conduisent le plus souvent à adopter ces interrupteurs statiques[3].

4.3.2. Marche en gradateur monophasé :

Le fonctionnement en gradateur – on dit parfois en modérateur – ne diffère de celui en interrupteur que par le mode d'action sur les gâchettes : au lieu d'appliquer ou de supprimer les signaux de déblocage, on déphase ces signaux. On agit ainsi sur la durée des intervalles où, pendant chaque alternance de la tension d'entrée, les semi-conducteurs relient la source au récepteur[3], il permet aussi de régler la valeur efficace I qu'une source de tension alternative donnée débite dans un récepteur donné.

La figure I.7 présente le principe de fonctionnement d'un gradateur monophasé :

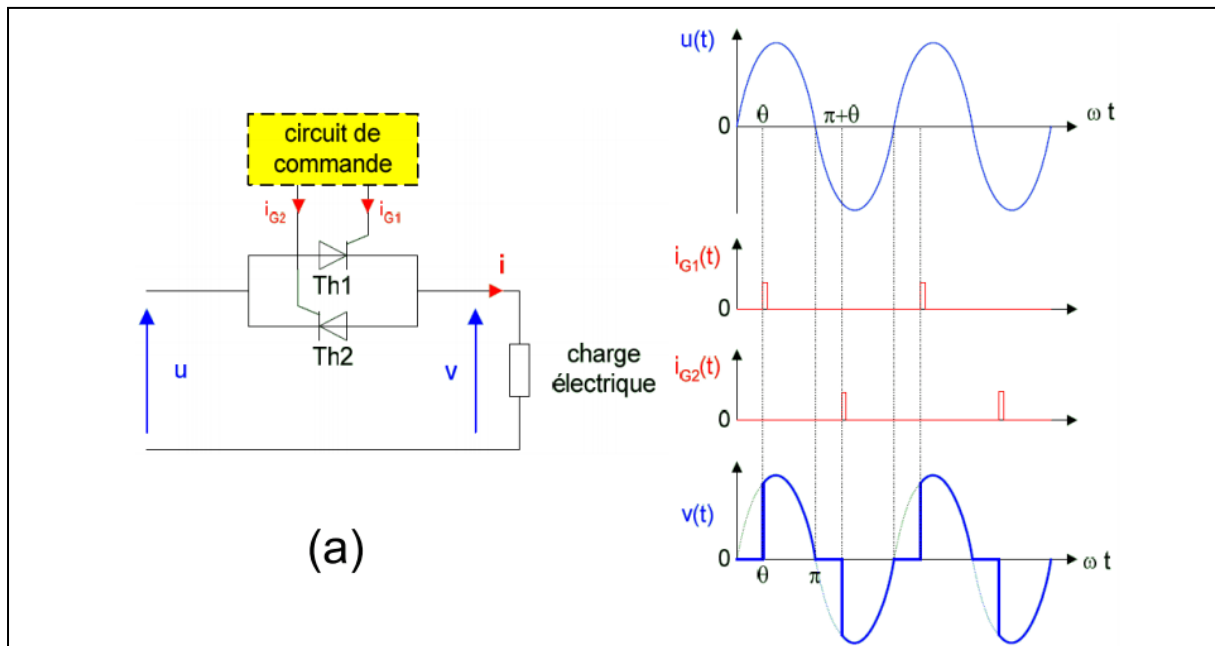


Figure I.7 : Principe de fonctionnement d'un gradateur monophasé.

5. Les hacheurs :

Un hacheur est un convertisseur statique, l'un des dispositifs de l'électronique de puissance qui permet de régler la tension ou le courant dans la charge, à partir d'une source de tension continue, en mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs commandés[8].

Il s'agit donc d'un convertisseur continu-continu, qui réalise une conversion continu-continu, de type $(U) \rightarrow (U')$, avec possibilité pour l'opérateur d'imposer la tension U' de sortie [2]. Et qui sert aussi dans les alimentations à découpage et pour commander (alimenter) les moteurs à courant continu dont on veut faire varier la vitesse (qui dépend de la tension de l'alimentation), en le faisant intercaler entre le réseau et le moteur.

La figure suivante représente le circuit d'un hacheur deux quadrants réversible en tension :

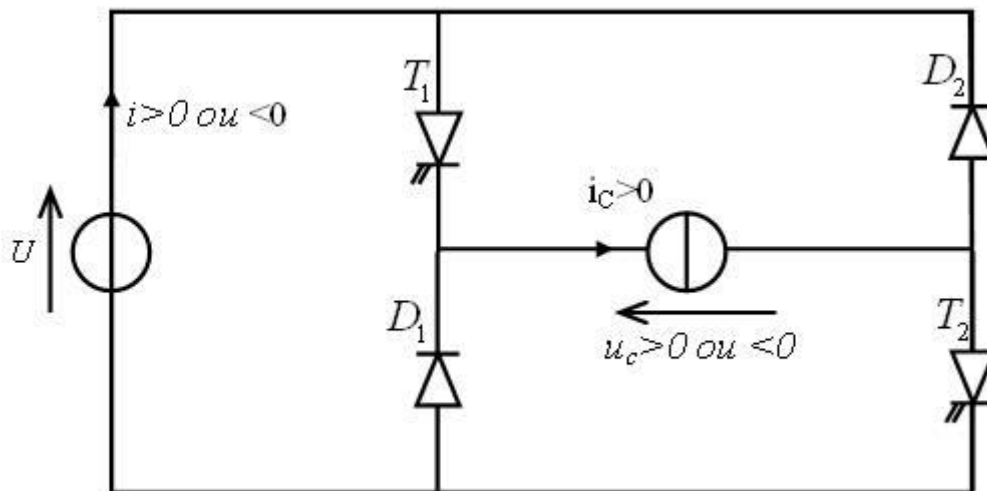


Figure I.8 : Circuit d'un hacheur deux quadrants réversible en tension.

5.1.Principe de fonctionnement :

Comme c'est cité auparavant, le hacheur met en œuvre des interrupteurs commandés pour établir son fonctionnement. Ces interrupteurs peuvent être des transistors ou (thyristors) commandés, qui fonctionnent en régime de commutation, ça veut dire parfois dans l'état passant ou l'état bloqué. Sa tension de commande est une tension carrée de fréquence et du rapport cyclique (α) variable indépendamment l'une de l'autre, et ça s'explique dans le fait que ce thyristor se met dans l'état bloqué si cette tension est nulle donc aucun courant sera passer dans la charge du coup la tension aux bornes de cette charge est nulle, et sera le cas contraire si cette tension est positive, le thyristor soit dans un état passant, donc un passage du courant dans la charge et une tension U a ses bornes apparaitre [8].

Donc si on veut jouer sur la tension moyenne de sortie (après l'élimination des coupures par un filtrage), il suffit de changer le rapport cyclique(α), soit par un montage analogique, généralement à amplificateur opérationnel, soit grâce à une commande numérique, généralement obtenue par un microcontrôleur[2].

Nb :

- on aura besoin d'une diode de roue libre pour continuer le passage de courant, dans l'état bloqué de transistor.
- $\alpha = \frac{\text{durée de fermeture}}{\text{période } T}$.

5.2.Types des hacheurs :

5.2.1.Hacheurs directs :

Relient un générateur et un récepteur qui se comportent l'un comme une source de tension, l'autre comme une source de courant, Ils ne comportent que des interrupteurs qui permettent d'agir sur les connexions entre le générateur et le récepteur.

Dont on distingue différents types des hacheurs directs :

- **Hacheur série :**

Le hacheur série, dit aussi abaisseur de tension, dévolteurou *Buck Converter*, dans ce type de hacheur, un générateur de tension fournit une tension U constante, et un récepteur de courant absorbe un courant i constant, en utilisant des interrupteurs H et \overline{H} , qui doivent être complémentaires (toujours un fermé, jamais les deux à la fois) pour que le générateur de tension ne soit pas court-circuité, et que le récepteur de courant ne soit pas mis en circuit ouvert. (Voir la figure I.9)

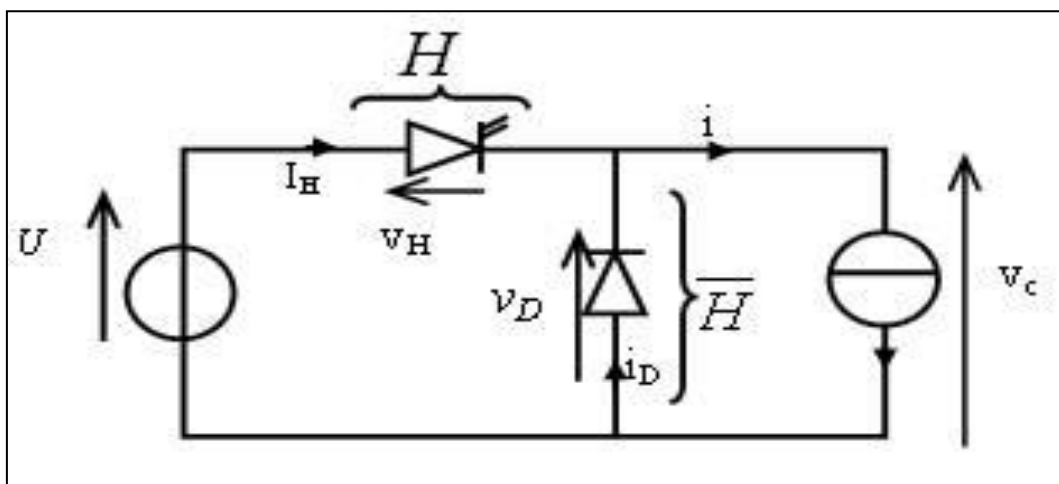


Figure I.9 : Circuit d'un hacheur en série.

- **Hacheur parallèle :**

Le hacheur parallèle est un convertisseur statique réglant le transfert d'énergie entre un générateur de courant continu et un récepteur de tension continue.

Ce hacheur permet une « élévation » de tension. Il est parfois appelé « hacheur survolteur », car la tension E de la source réceptrice est supérieure à, tension moyenne de la source de courant I génératrice.

La figure suivante présente le circuit d'un hacheur en parallèle :

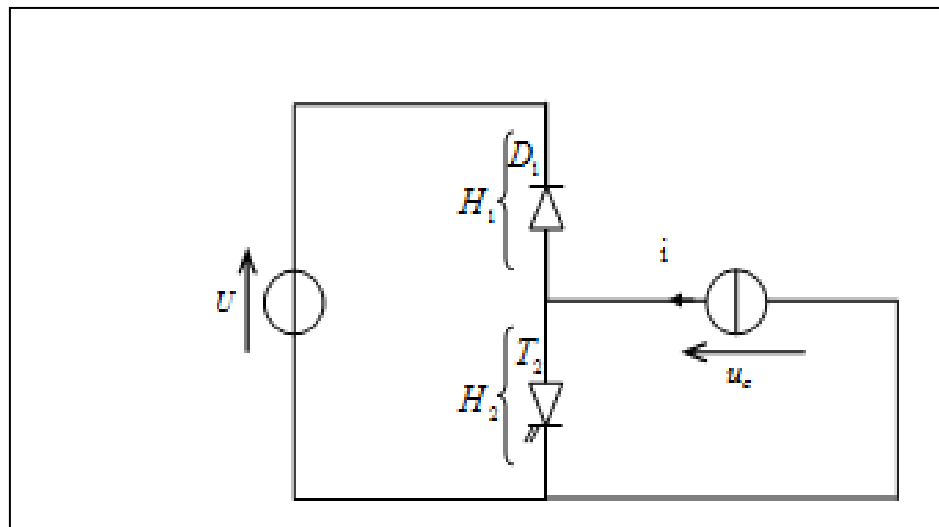


Figure I.10 :Circuit d'un hacheur en parallèle.

- **Hacheur réversible en courant :**

Avec un schéma à deux interrupteurs on peut commander le transfert de l'énergie dans les deux sens entre :

- une source de tension
- et une source de courant

A condition que les deux sources présentent la ou les mêmes réversibilités (toutes les deux réversibles en tension, ou en courant, ou en tension et en courant). Avec $K1$ permet de relier l'entrée et la sortie, $K2$ court-circuite la source de courant quand $K1$ est ouvert.

- **Hacheur en pont :**

La structure à quatre « interrupteurs » ou en pont offre plus de possibilités que celle à deux « interrupteurs » car elle permet de relier chacune des bornes de sortie à chacune des bornes d'entrée ou de les séparer. Ce type d'hacheur en pont permet, à partir d'une batterie d'accumulateurs, de faire fonctionner une machine à courant continu dans les quatre quadrants du plan couple-vitesse.

- **Hacheurs multi niveaux :**

Lorsque la tension d'alimentation d'un hacheur atteint une valeur trop élevée vu le calibre en tension des composants à semi-conducteurs utilisés, il faut réaliser les interrupteurs en mettant en série plusieurs composants à semi-conducteurs élémentaires. Il est alors intéressant de recourir à la structure multi niveau, non seulement elle permet le partage

statique et dynamique de la tension entre les différents composants, mais elle présente des avantages vis-à-vis du récepteur.

5.2.2. Les hacheurs indirects :

Relient un générateur et un récepteur de même nature. Ils comportent des interrupteurs et un élément de stockage d'énergie (inductance ou capacité), qui joue le rôle de source intermédiaire de courant ou de tension suivant que le générateur et le récepteur sont des sources de tension ou de courant. L'élément de stockage reçoit de l'énergie du générateur puis la transmet au récepteur en fonction des connexions établies par les interrupteurs. Dont on distingue deux types des hacheurs indirects selon l'élément de stockage qui sont :

- **Hacheur à stockage inductif :**

Lorsque le hacheur est monté entre un générateur de tension et un récepteur de tension, l'élément de stockage doit être une inductance. Celle-ci joue le rôle d'une source de courant reliée à l'entrée (phase de charge) ou à la sortie (phase de décharge). En utilisant deux interrupteurs $K1$ (étant une diode D) et $K2$ (semi conducteur à ouverture et fermeture commandée) de ce hacheur souvent appelé *abaisseur-élévateur* ou *Buck-boost Converter*. Les deux interrupteurs doivent être complémentaires pour que les deux sources de tension, ne soient jamais reliées directement et pour que l'inductance L ne soit jamais en circuit ouvert.

- **Hacheur à stockage capacitif :**

Si le hacheur doit relier deux sources de courant, l'élément d'accumulation doit être un condensateur ; celui-ci joue le rôle de source intermédiaire de tension. Ce convertisseur est connu sous le nom de hacheur *de Cùk* ou *Cùk Converter*. Avec l'utilisation de deux interrupteurs $K1$ (un semi conducteur à fermeture et ouverture commandée T) et $K2$ (une diode D). Ceux-ci doivent être complémentaires [8].

1.6. Les ondulateurs

1.6.1. Définition :

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.

La figure suivante présente le principe de fonctionnement d'un onduleur :



Figure I.8 : Schéma de principe de la conversion Continue-Alternative (DC-AC)

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exposé les différents types des convertisseurs statiques (Hacheurs, Gradateurs, Redresseurs, et Onduleurs), leurs principes généraux de fonctionnement, ainsi que leurs applications dans plusieurs secteurs. Dans le chapitre suivant nous allons nous concentrer sur les onduleurs d'une façon plus détaillée.

CHAPITRE II

Généralités Sur Les Onduleurs

Et Leurs Stratégies De

Commande

1. Introduction :

Dans ce chapitre nous donnons la définition et le principe de fonctionnement des onduleurs (monophasés et triphasés). Par ailleurs, le développement des techniques des stratégies de commande plus précisément celle de modulation de largeur d'impulsion PWM (Pulse Width Modulation).

2. Généralité sur les onduleurs :

Les convertisseurs de courant continu en courant alternatif sont appelés des onduleurs. La fonction d'un onduleur est de convertir une tension d'entrée continue en une tension de sortie alternative symétrique d'amplitude et de fréquence désirée. (Voir la figure II.1)

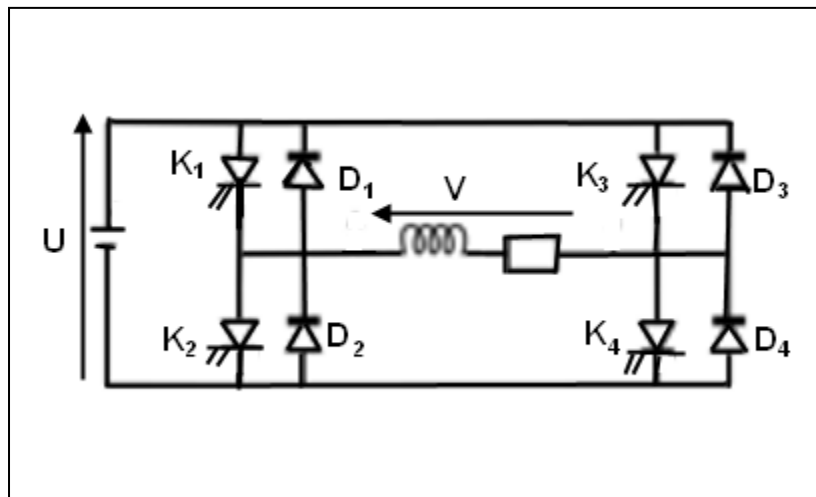


Figure II.1 : Schéma de principe de base d'onduleur.

2. Principe de fonctionnement :

Les onduleurs sont basés sur une structure en pont en H, constituée le plus souvent d'interrupteurs électroniques tels que les transistors de puissance ou thyristors. Par un jeu de commutations commandées de manière appropriée (généralement une modulation de largeur d'impulsion), on module la source afin d'obtenir un signal alternatif de fréquence désirée. Le pont en H est une structure électronique servant à contrôler la polarité aux bornes d'un dipôle. Il est composé de quatre éléments de commutation généralement disposés schématiquement en une forme de H d'où le nom. Les commutateurs peuvent être des relais, des transistors, ou autres éléments de commutation en fonction de l'application visée [9].

3.1. Le pont en H :

Le pont en H est une structure électronique servant à contrôler la polarité aux bornes d'un récepteur. Il est composé de quatre éléments de commutation généralement disposés schématiquement en une forme de H d'où le nom. Les commutateurs peuvent être des relais, des transistors, ou autres éléments de commutation en fonction de l'application visée. Il permet d'inverser le sens de rotation d'un moteur à courant alternatif. (Voir figure II.2)

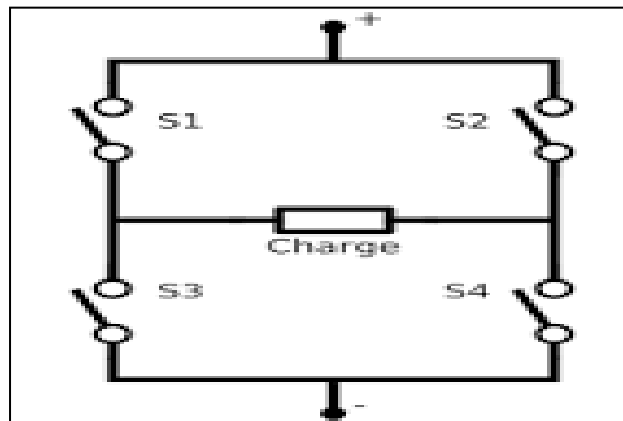


Figure II.2 : Montage d'un pont en H.

Utilité du pont en H :

Les moteurs électriques ont besoin de courants importants par rapport à la sortie maximale d'un microcontrôleur. Un moteur ne marcherait pas si on le branchait directement à la sortie d'un microcontrôleur. La première fonction du pont en H est fournir de forts courants aux moteurs en permettant leur contrôle par le microcontrôleur. Une autre fonction est de pouvoir inverser la tension aux bornes du moteur pour inverser le sens de rotation. Inverser le sens d'un courant est une tâche simple dans les circuits électriques, il est de bien placer quelques interrupteurs. On utilise des transistors à la place d'interrupteurs parce qu'un transistor peut aussi amplifier un courant et est plus facile à contrôler par des signaux numériques ou analogiques [9].

Chapitre II : Généralités Sur Les Onduleurs Et Leurs Stratégies De Commande

Principe de fonctionnement d'un pont en H :

Le pont en H est basé sur un simple principe de fonctionnement, qu'on peut expliquer via le tableau et la figure suivants :

S1	S2	S3	S4	
1	0	0	1	le moteur tourne à droite
0	1	1	0	le moteur tourne à gauche
0	0	0	0	le moteur tourne librement

Tableau II.1 : La méthode de fonctionnement d'un pont en H

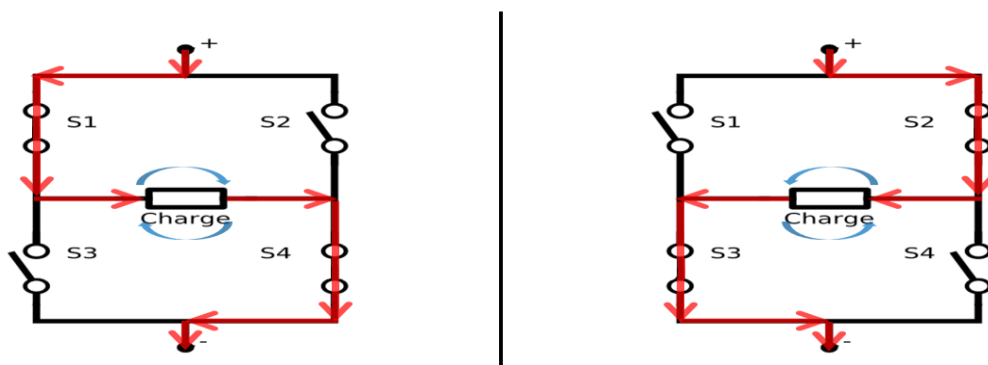


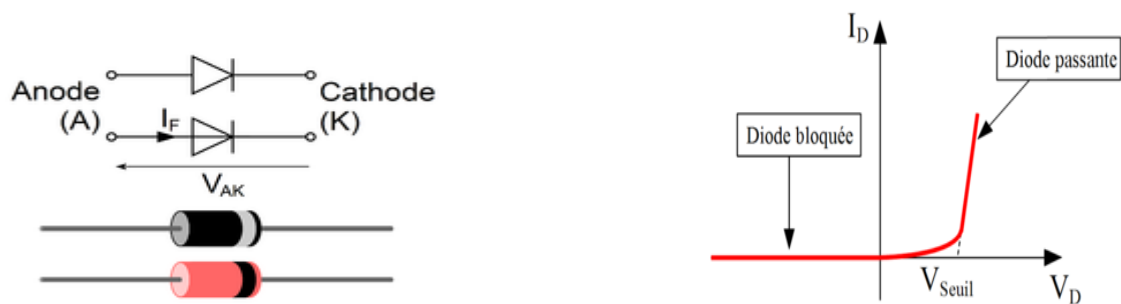
Figure II.3 : Les signaux de commande pour le mouvement d'un moteur (tourne à droite et à gauche).

3. Etude des interrupteurs électroniques :

Il est bien connu qu'un onduleur comporte en base quatre interrupteur, ces derniers sont soumis à des contraintes du courant (imposée par la charge) et de tension (imposée par la source).

En pratique il existe plusieurs types d'interrupteurs électroniques, chaque 'un fonctionne différemment, donc il faut bien choisir l'interrupteur selon le besoin, dans ce qui suit on va citer les trois modèles les plus couramment utilisés :

Diode : est un composant unidirectionnel en courant et unidirectionnel en tension. Cela signifie que le courant et la tension ne circule que dans un seul sens. C'est la source qui imposera généralement la valeur de la tension de blocage et la charge qui imposera généralement la valeur du courant de conduction : il ne faudra pas que ces valeurs sortent de la plage autorisée pour le type de diode choisie. (Voir figure II.4)



FigureII. 4 : Principe de fonctionnement d'une diode.

Thyristor:

Il possède une troisième électrode (broche) appelée gâchette et qui permet de le débloquent. Il reste donc bloqué si l'opérateur n'agit pas sur la gâchette (tension positive entre gâchette et cathode sous forme d'impulsions répétées de 1 V crête environ). Une tension V_K positive peut donc se développer à ses bornes, contrairement à ce qui était observé avec une diode, lorsque le thyristor est bloqué. Lorsque le thyristor est passant rien ne distingue d'une diode.

La figure ci-dessous représente le schéma de principe d'un thyristor :

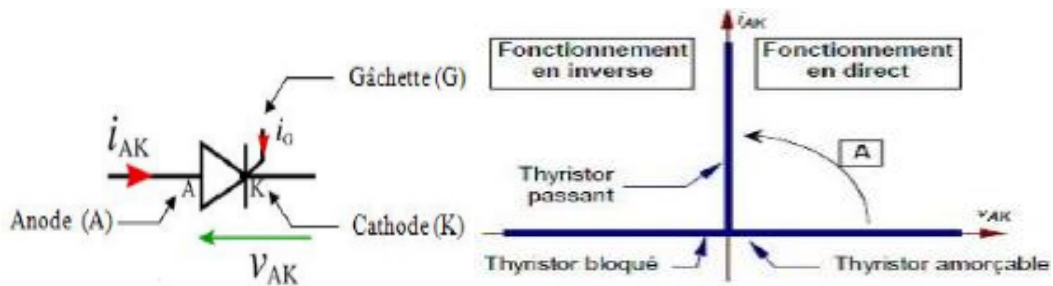


Figure II.5 : Schéma de principe d'un thyristor.

Transistor bipolaire :

Il possède également une troisième broche, comme le thyristor. Mais, contrairement à ce dernier, cette troisième broche appelée "base" permet non seulement de débloquent le transistor (tension base - émetteur de l'ordre de 0,7 V) mais aussi de le bloquer (tension base - émetteur nulle).

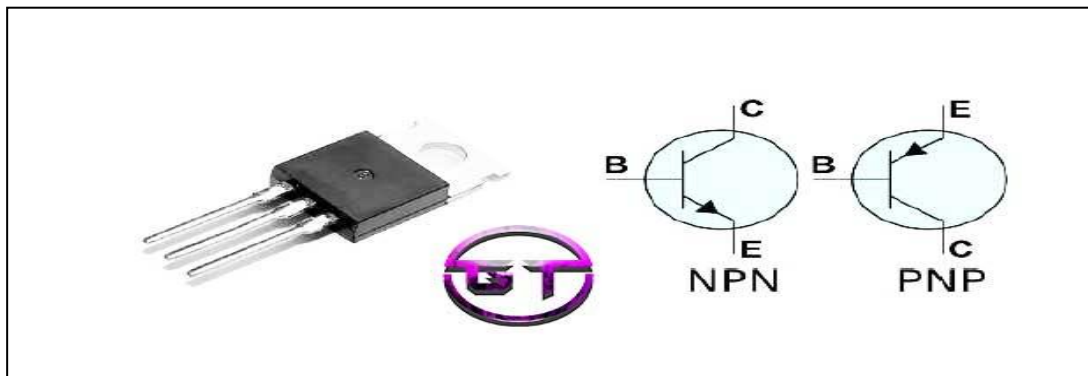


Figure II.6 : Schéma de principe des transistors.

MOSFET :

Est un type de transistor à effet de champ. Comme tous les transistors, le MOSFET module le courant qui le traverse à l'aide d'un signal appliqué sur son électrode nommée grille. Il trouve ses applications dans les circuits intégrés numériques en particulier en électronique de puissance.

Un transistor MOSFET se commande en appliquant une tension positive à sa grille. Lorsque cette tension dépasse une certaine valeur, il devient passant (entre drain et source) et permet le passage du courant. Entre drain et source, le transistor se comporte quasiment comme un fil. Lorsque la tension de grille est nulle, le transistor est un interrupteur ouvert [10].

La figure suivante présente le symbole d'un MOSFET :

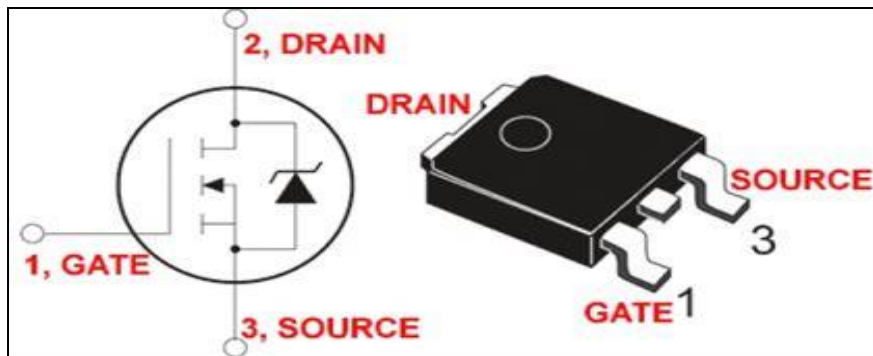


Figure II.7 : Symbole d'un MOSFET.

IGBT :

Le transistor bipolaire à grille isolée (IGBT, de l'anglais Insolated Gate Bipolar Transistor), est un dispositif semi conducteur de la famille des transistors, qui est utilisé comme interrupteur électronique, principalement dans les montages de l'électronique de puissance.

La fonction de base d'un IGBT est la commutation la plus rapide possible des courants électriques avec les pertes les plus faibles possibles. Un IGBT a une structure de grille isolée ; la grille elle-même est simplement un MOSFET. Par conséquent, l'IGBT combine les avantages des forts courants admissibles et des hautes tensions de blocage d'un transistor bipolaire avec le contrôle capacitif basse consommation d'un MOSFET. (Voir la figure II.8)

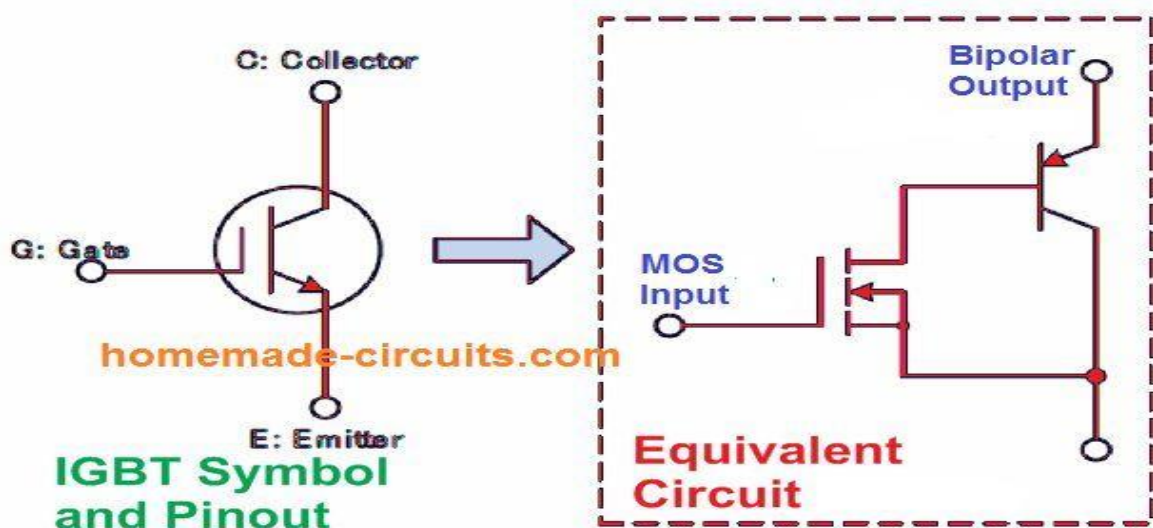


Figure II.8 : Symbole et circuit équivalent d'un IGBT.

Comparaison entre MOSFET et L'IGBT:

On donne une comparaison des caractéristiques entre MOSFET et L'IGBT utilisés dans les cellules de commutation des onduleurs.

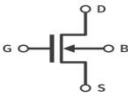
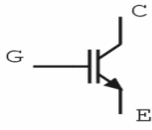
Composant	MOSFET	IGBT
Caractéristiques		
Symbole		
Commutation	la vitesse de fermeture et d'ouverture très rapide	la vitesse de fermeture et d'ouverture rapide
Les pertes de commutation	Faibles	Moyennes
Conductivité courant	faible	Elevée
Les pertes de conduction	Elevée	Faible
Puissance consommée	Faible	Faible
Commande	Tension	Tension

Tableau II.2 : Comparaison entre MOSFET et IGBT.

5. Classification des onduleurs :

Il existe plusieurs centaines de schémas d'onduleurs, chacun correspondant à un type d'application déterminé ou permettant des performances recherchées. Les onduleurs sont en général classés selon les modes de commutation de leurs interrupteurs ; on peut les classés en prenant en compte ces considérations :

5.1. Selon la réversibilité

5.1.1. Onduleur autonome :

Un onduleur est dit autonome s'il utilise l'énergie d'un circuit auxiliaire propre a lui pour la commutation des thyristors ou l'autre semi conducteurs, dans ce cas nous

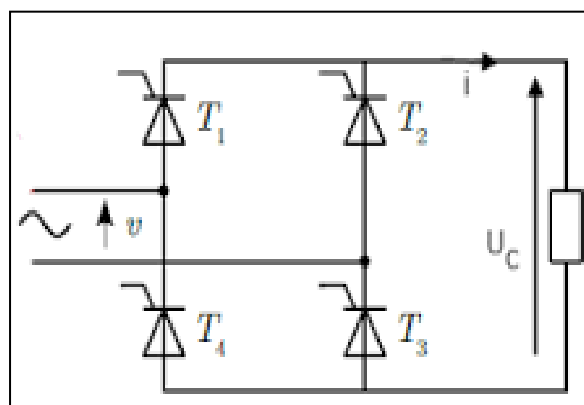
commandons la fréquence et la forme d'onde de la tension de sortie. On distingue deux types d'onduleurs autonomes [6,10] :

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

5.1.2. Onduleur non autonome :

Un onduleur non autonome est un montage redresseur tout thyristors (pont de Graetz) qui, en commutation naturelle assistée par le réseau, auquel il est raccordé, permet un fonctionnement en onduleur. Les thyristors sont commandés juste à la fermeture et la commutation est "naturelle" contrairement à l'onduleur autonome. L'application principale de ce type d'onduleur se trouve dans les variateurs pour moteurs synchrones de très forte puissance où les thyristors sont souvent les seuls composants utilisables.

La figure si dessous montre le schéma électrique d'un pont de Graetz.



FigureII.9: Circuit d'un pont de Graetz.

Un pont de diodes ou pont de Graetz est un assemblage de quatre diodes montées en pont (montage similaire à celui d'un pont de Wheatstone) qui, en régime monophasé, redresse le courant alternatif en courant continu, c'est-à-dire ne circulant que dans un seul sens [9].

5.2. Selon la nature d'alimentation :

La structure d'un onduleur dépend essentiellement de la nature des sources entre lesquelles il est monté. Comme il faut respecter l'alternance des sources à ses accès, on distinguera donc :

5.2.1. Les onduleurs de tension :

Un onduleur de tension est un onduleur qui est alimenté par une source de tension continue, la tension « U_{dc} » n'est pas affecté par les variations du courant « i_{dc} » qui la traverse, la source continue impose la tension à l'entrée de l'onduleur et donc à sa sortie. Le courant à la sortie « i_{ch} » et le courant à l'entrée « i_{dc} » dépendent de la charge placée du côté alternatif. Cette charge peut être quelconque à la seule condition qu'il ne s'agisse pas d'une autre source de tension (capacité ou f. e. m alternative) directement branchée entre les bornes de sortie [10].

5.2.2. Les onduleurs de courant :

Un onduleur de courant (souvent appelé commutateur de courant) est alimenté par une source de courant continu, c'est-à-dire par une source d'inductance interne si grande que le courant « i_{dc} » qui la traverse ne peut être affecté par les variations de la tension « U_{dc} » à ses bornes [10].

5.2.3. Les onduleurs à résonance :

Les onduleurs à résonance sont des onduleurs de tension ou de courant à un créneau par alternance fonctionnant dans des conditions particulières. La charge doit être un circuit oscillant peu amorti. On commande les interrupteurs par une fréquence voisine de la fréquence de résonance de la charge. Si celle-ci varie, il faut faire varier la fréquence de commande. L'onduleur doit donc être piloté par la charge, il n'est plus autonome [11].

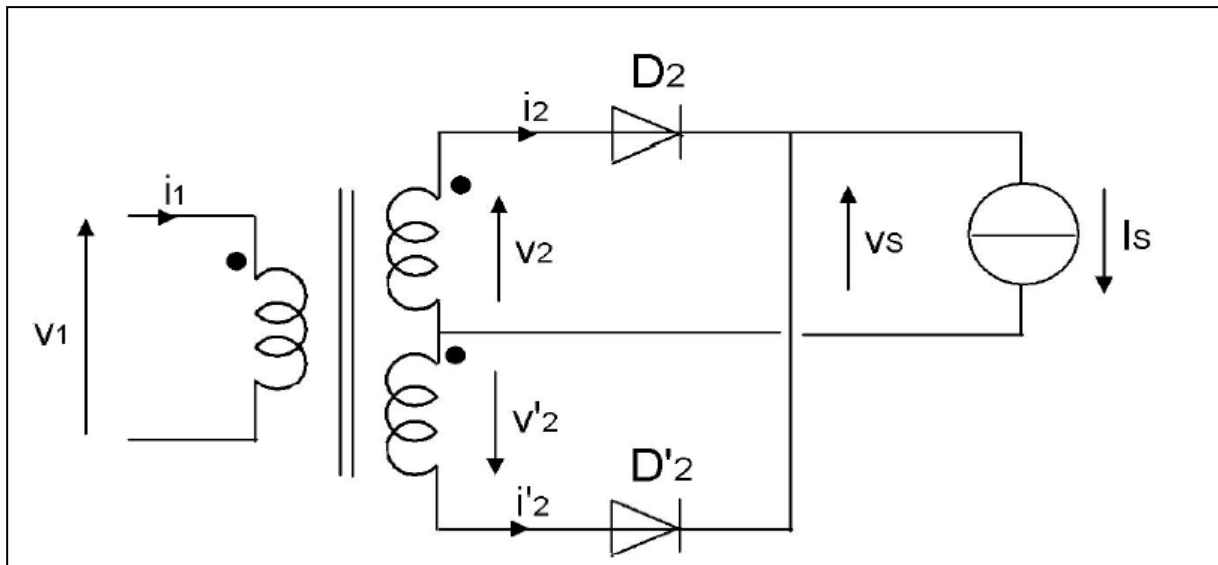
La nature des sources est définie du point de vue des commutations. La fréquence des grandeurs de sortie d'un onduleur peut, suivant l'application, être fixe ou variable, être librement imposée ou dépendre des caractéristiques de la source alternative alimentée.

5.3. Selon la nature de charge

5.3.1. Les onduleurs monophasés :

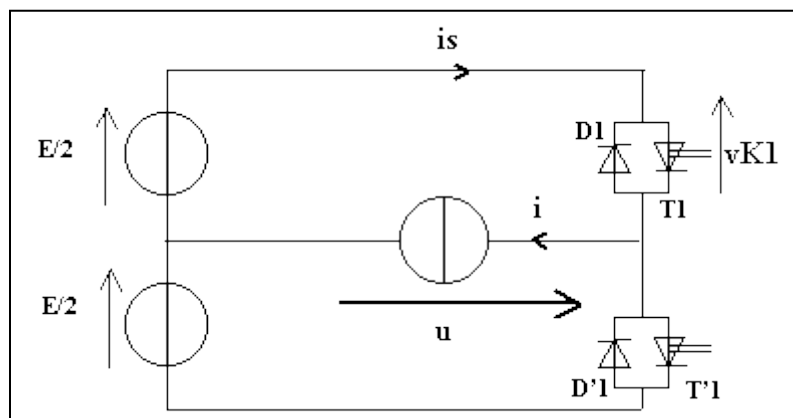
Pour obtenir une tension alternative à partir d'une tension continue en utilisant deux interrupteurs, il faut un point milieu, soit du côté de la sortie alternative, soit du côté de l'entrée continue, cela correspond à :

-L'onduleur monophasé avec transformateur de sortie à point milieu appelé onduleur push-pull (Figure II.10).



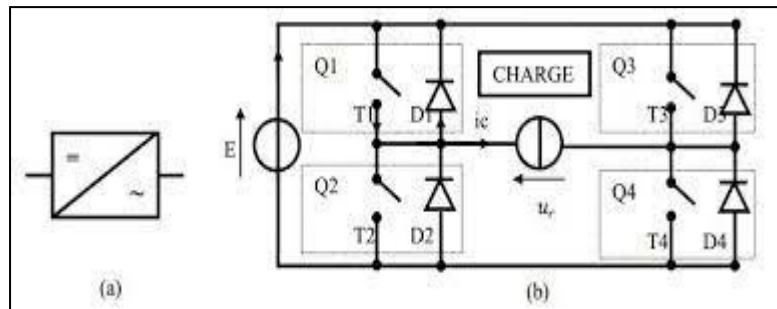
FigureII.10: Onduleur monophasé avec transformateur à point milieu.

- l'onduleur monophasé avec diviseur capacitif à l'entrée appelé onduleur en demi pont (Figure II.11).



FigureII.11: onduleur en demi-pont.

Si on veut varier la largeur relative des créneaux formant les alternances de la tension de sortie, il faut quatre interrupteurs c'est : l'onduleur monophasé en pont (FigureII.12) [10].

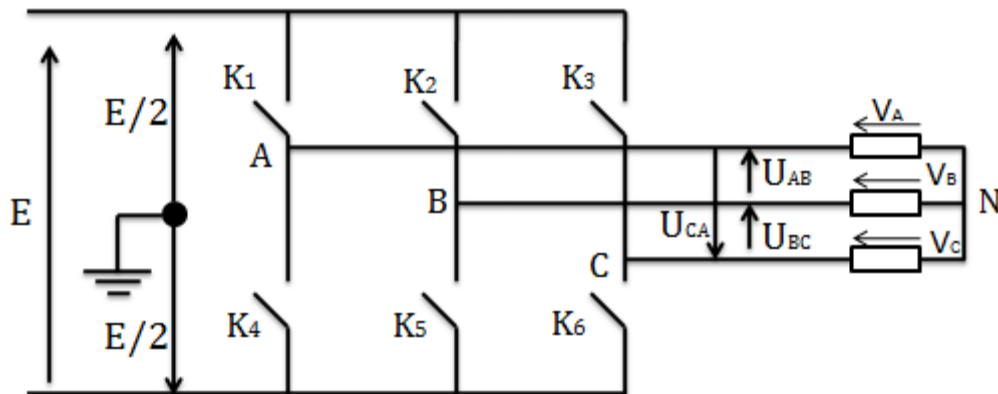


FigureII.12 : Onduleur monophasé en pont.

5.3.2. Les onduleurs triphasés :

L'onduleur de tension triphasé découle immédiatement de trois demi pont monophasé, on obtient l'onduleur triphasé à six interrupteurs, chaque demi pont comprend un thyristor (ou un transistor) et une diode. Pour assurer la continuité des courants de sortie alternatives les interrupteurs doivent être complémentaires deux à deux.

La figure suivante présente le schéma d'un onduleur triphasé :



FigureII.13: Onduleur triphasé.

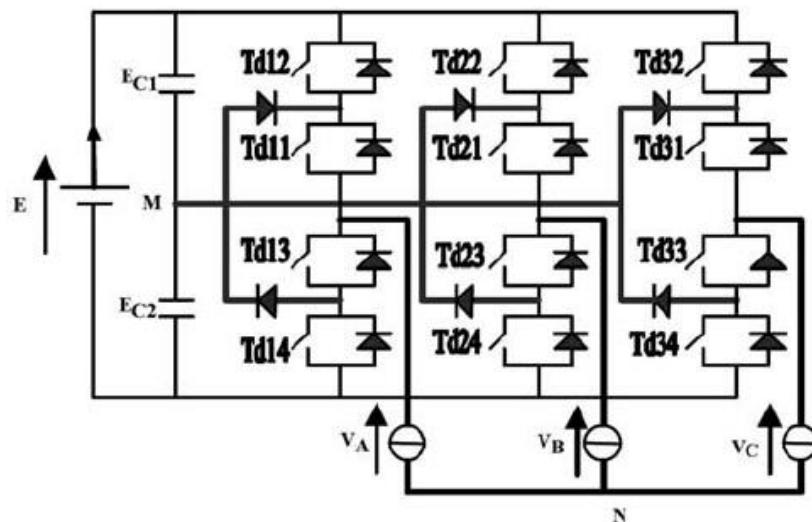
5.3.3. Les onduleurs multi-niveaux :

Les onduleurs multi niveaux permettent d'augmenter la tension de sortie des convertisseurs statiques au-delà des limites des semi-conducteurs. Pour les réaliser on doit

disposer de plusieurs sources de tension continue (obtenue par exemple à partir d'un diviseur capacitif) [3], on peut faire apparaître autant de cellules de commutation élémentaires et les associer en les superposant ou en les mettant en cascade. Cela permet de multiplier le nombre de niveau que l'on peut donner à la tension de sortie. Ces onduleurs sont utilisés pour l'entraînement des moteurs asynchrones de grande puissance, d'autres applications sont possibles pour des moteurs qui tournent à vitesse élevée (> 5000 tr/mn).

Onduleur NPC (Neutral Point Clamped Converter) : cette structure d'onduleur multi-niveau a été introduite par A. Nabae et H. Akagi en 1981 dans [12] L'objectif était de réduire l'amplitude des harmoniques injectés par l'onduleur dans la charge pour des applications de type alimentation de moteur.

La figure qui suit montre un onduleur NPC à trois niveaux :



FigureII.14 : Onduleur NPC à trois niveaux.

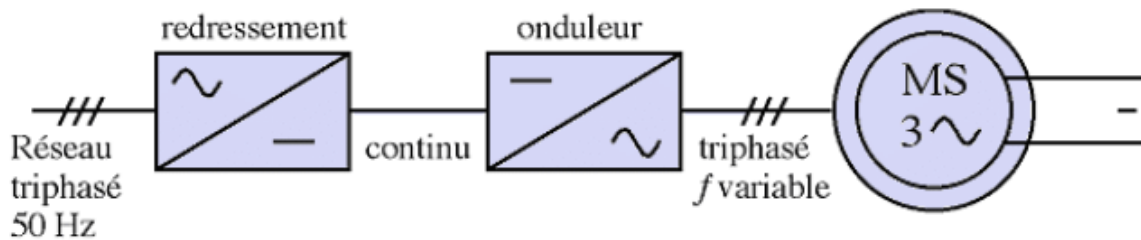
6. Les applications des onduleurs :

Parmi les nombreux domaines d'emploi des onduleurs, on trouve principalement Les onduleurs à fréquence fixe à commutation forcée : Alimentés le plus souvent par une batterie d'accumulateur, ils jouent d'ordinaire le rôle d'alimentation de sécurité, ils constituent à ce titre, le principe déboucle actuel des onduleurs [6,10]. Les onduleurs à fréquence variable à commutation forcés : Alimentés à partir du réseau industriel par l'intermédiaire d'un montage redresseur, ils délivrent une tension de fréquence et de valeur efficace nécessaires pour faire tourner à vitesse variable un moteur à courant alternatif.

6.1. Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone :

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

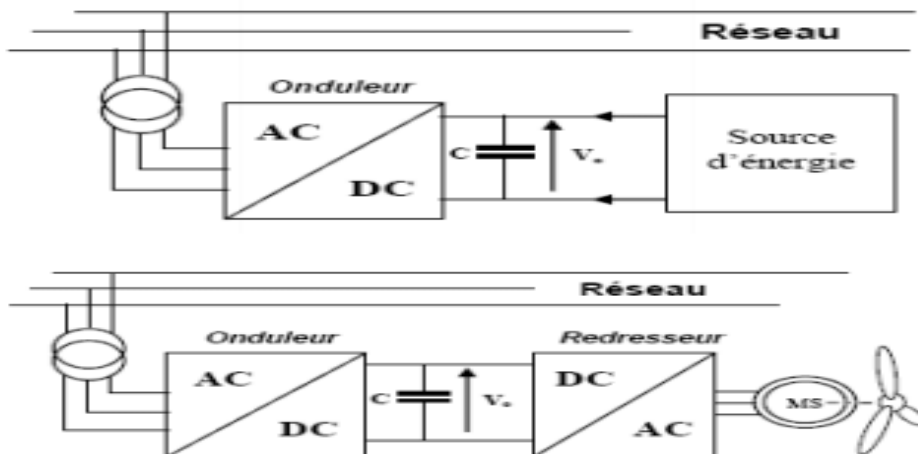
La figure suivante présente le réglage de la vitesse d'un moteur synchrone :



FigureII.15 : Réglage de la vitesse d'un moteur synchrone.

6.2. Alimentation de secours :

Lors d'une panne d'électricité, un onduleur assure la continuité de l'alimentation des machines à partir de batteries. En informatique professionnelle, un onduleur est indispensable pour éviter la perte d'informations en cas de panne du secteur [13]. (Voir figure II.16)



FigureII.16: Alimentation de secours.

6.3. Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes :

On prend l'exemple de la France qui fournit de l'énergie électrique à la Grande-Bretagne, mais la fréquence du réseau anglais est 60 Hz. Il faut donc adapter la fréquence. (Voir figure II.17)

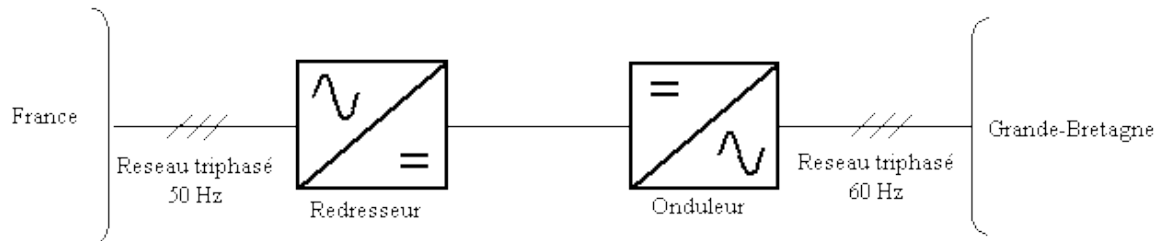


Figure II.17 : transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes.

6.4. Les applications relatives aux transports:

6.4.1. Transports ferroviaires:

Dans ce type de transport le constituant principal qui crée le mouvement sont les machines asynchrone. Pour contrôler la vitesse de rotation de ces dernière, on doit faire varier la fréquence de l'alimentation, cela est réalisé par un onduleur de tension par exemple: le TGV ou tramway [14].

6.4.2. Transports aériens:

Tout avion produit lui-même l'énergie électrique dont il a besoin pour le fonctionnement de ces équipements de bord. Par exemple, AIRBAS 380 met en œuvre un réseau de bord la fréquence entre 380Hz et 800Hz. Cela est réalisé par des onduleurs [14].

6.4.3. Applications dans le secteur des énergies renouvelables :

La fonction des onduleurs dans les systèmes PV ne se limite plus seulement à transformer la puissance continue générée (DC) par les modules solaires en puissance alternative (AC) sous forme d'une tension sinusoïdale de fréquence souhaité (230V-400V-50HZ), mais ils exploitent également la puissance délivrée par les générateurs PV en le forçant à fonctionner à son point de puissance maximum. (Voir figure II.18)

De plus ils assurent une surveillance fiable de réseau pour protéger ce dernier contre les pannes, et interrompre l'alimentation en cas de problèmes survenant soit du réseau soit de l'installation.

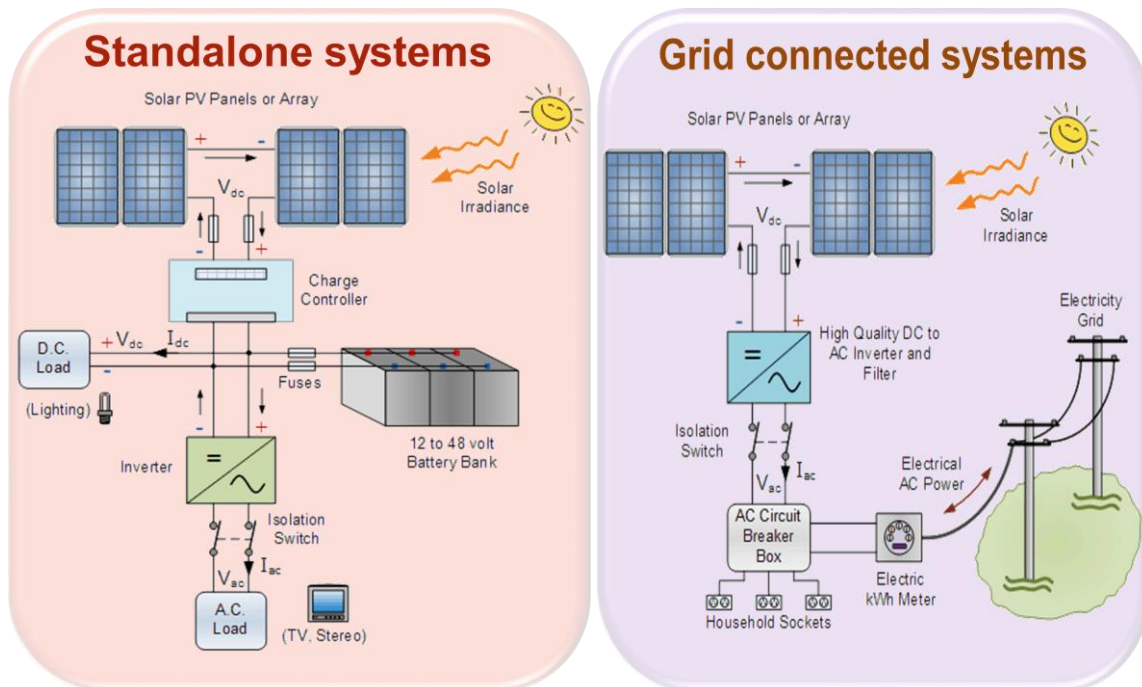


Figure II.18 : applications des onduleurs dans le secteur des énergies renouvelables (PV).

7. Commandes des onduleurs :

En ce qui concerne la commande, il faut distinguer la nature de la grandeur de sortie (tension ou courant) dont la commande assure la régulation : un onduleur de tension peut être régulé en tension ou en courant suivant la grandeur de référence utilisée pour établir les ordres de commande des interrupteurs. De même un onduleur de courant peut être régulé en tension ou en courant.

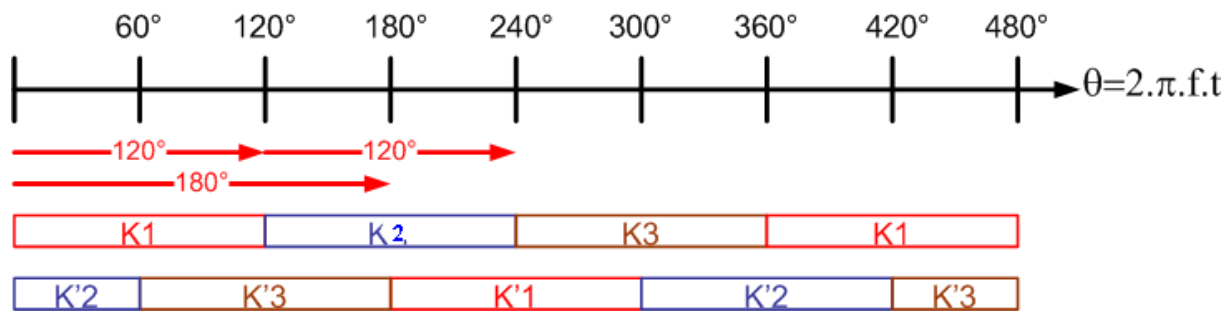
7.1. Commande 180° :

Lorsque la séquence de commande de fermeture d'un interrupteur coïncide avec la commutation d'ouverture de l'interrupteur situé sur le même bras, on parle dans ce cas, d'un onduleur de type 180°.

7.2. Commande 120° :

La commande de fermeture d'un interrupteur ne coïncide plus avec la commande d'ouverture de l'interrupteur placé sur le même bras, on parle dans ce cas d'un onduleur 120°. Avec cette technique de commande, Chaque interrupteur fonctionne pendant 120°.

La figure ci-dessous présente la commande 180° et 120° d'un onduleur :



FigureII.19: la commande 180° et 120° d'un onduleur.

7.3. Commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI) :

La tension ou le courant de sortie d'un onduleur de tension ou de courant peut être formé d'un seul créneau par alternance. On dit alors que l'onduleur est commandé en pleine onde. Mais, grâce aux progrès sur les semi-conducteurs de puissance et sur leur commande, on utilise le plus souvent la modulation de largeur d'impulsions (MLI).

Chaque alternance est formée de plusieurs créneaux dont la largeur et la position imposent les caractéristiques du spectre des grandeurs alternatives. Dans la mesure où l'on vise à produire une tension ou un courant aussi sinusoïdal que possible, la commande MLI s'impose car elle facilite beaucoup le filtrage des grandeurs alternatives [3].

Les tensions obtenues aux bornes du récepteur (la charge) pour les onduleurs triphasés conventionnels présentent plusieurs harmoniques, il est donc nécessaire de chercher à se rapprocher d'une forme d'onde sinusoïdale. Pour ce la on fait appel à la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI). Dans ce contexte, nous savons bien qu'avec la possibilité d'avoir des transistors de puissance à un coût moindre, il est devenu possible d'utiliser la technique MLI pour améliorer la forme d'onde du courant du moteur, et par la conséquence, la minimisation des harmoniques provoquant l'échauffement de la machine et les ondulations du couple [13,15]. En fait l'onduleur de tension à MLI est toujours choisi pour avoir une réponse rapide et des performances élevées. Dans ce type d'onduleur, la tension redressée alimentant l'onduleur peut être fixée par l'utilisation d'un redresseur à diodes. Dans ce cas, la tension et la fréquence de sortie sont contrôlées par l'onduleur en utilisant la technique MLI. Elle consiste à adopter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie, et à former chaque alternance de la tension de sortie d'une succession de créneaux de largeurs convenables. La manipulation de nombre des impulsions

formant chacune des alternances d'une tension de sortie d'un onduleur à MLI présente deux avantages importantes à s'avoir :

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

7.3.1. Modulation sinusoïdale (MLIS) :

Cette stratégie est héritée des techniques analogiques. Elle consiste à calculer la largeur d'une impulsion de manière à obtenir la tension de référence en moyenne sur une période de commutation. Elle repose sur la génération des signaux de commande en comparant deux ondes ; la première triangulaire d'amplitude fixe et de fréquence très élevée ; appelée porteuse ou onde de modulation. La deuxième sinusoïdale d'amplitude variable et de fréquence f qui détermine la fréquence de la tension de sortie ; appelée référence. Les instants de commutation sont déterminés par l'intersection de ces deux signaux. Le réglage en amplitude et en fréquence de la tension de sortie de l'onduleur est défini par le coefficient de réglage en tension (représentant le rapport de l'amplitude de la tension de référence à la valeur crête de la porteuse), et l'indice de modulation (donnant le rapport des fréquences de la porteuse et de la référence) [13,16].

7.3.2. Modulation vectorielle (SVM) :

L'utilisation des technologies numériques permet le recours à des stratégies de modulation triphasée spécifiques, non déduites des techniques analogiques initialement conçues en monophasé. Parmi ces technologies numériques on trouve la modulation vectorielle (Space Vector Modulation). Qui représente la méthode de modulation ou de commande la plus adoptée au contrôle des machines à courant alternatif beaucoup plus les machines asynchrones. En effet, contrairement à la modulation sinusoïdale, la MLI vectorielle ne s'appuie pas sur des calculs séparés des modulations pour chacun des bras de l'onduleur. Mais elle traite les signaux directement dans le plan diphasé de la transformée de Concordia. Donc le principe de base de cette modulation consiste à reconstruire le vecteur de tension de sortie de l'onduleur à partir des huit vecteurs de tension correspondant aux huit états possibles de l'onduleur de tension [17].

8. Comparaison entre les trois commandes d'un onduleur :

-Parmi les trois commandes précédentes, la commande PWM ou bien pulse Width Modulation est la plus adaptables en point de vue d'élimination des harmoniques.

Les harmoniques peuvent générer dans les machines tournantes des oscillations du couple, des bruits et des résonances électromagnétiques ; ou encore elles injectent du bruit sur la commande et introduit des non linéarités qui peuvent déstabiliser le système.

-La commande décalée est plus sophistiquée dans sa conception, est une première étape vers l'obtention d'un courant sinusoïdale.

-Alors que la commande symétrique, le courant et la tension sont riches en harmoniques ce qui pose des problèmes pour une utilisation avec des moteurs(pertes joules, couples pulsatiles..).

-Les deux techniques (Décalée et Symétrique,) ne réduisent pas de façon significative ce problème d'harmoniques.

- La MLI permet dese rapprocher du signal désiré (Sinusoïdal) [9].

9. Technologies de génération de la PWM :

Il existe différents familles de microcontrôleurs pour la génération de signal PWM comme 8051, PIC, AVR ARM, mais les modèles les plus couramment utilisés sont :

STM32 - STMicroelectronics

Les microcontrôleurs STM32 de STMicroelectronics représentent une gamme complète de produits 32 bits conçus pour exécuter en temps réel le traitement du signal numérique à basse tension. Ils s'accompagnent d'un vaste choix d'outils et de logiciels, faisant de cette famille de produits la plateforme reconnue comme d'excellence.

Uno - Arduino

Construite autour de l'ATmega328, cette carte à MCU contient tout ce qui est nécessaire au fonctionnement du microcontrôleur. Elle possède 14 broches d'entrée et de sortie numériques (certaines en MLI ou PWM), 6 entrées analogiques, 1 oscillateur à quartz de 16 MHz, 1 connecteur USB. La carte Uno s'utilise simplement via la liaison à un ordinateur. Elle s'alimente également à l'aide d'un bloc secteur externe, ou avec des piles.

Pic - Microship

Famille de MCU dérivés du PIC1650, les PIC (Programmable Intelligent Computer, anciennement Peripheral Interface Controller) existent depuis 1976. Les PIC sont surtout utilisés dans les Smartphones. On les retrouve également dans les accessoires audio, les périphériques de jeux vidéo et les dispositifs médicaux avancés.

Conclusion :

On a consacré ce chapitre pour les onduleurs, dont on a bien expliqué leurs types, principe de fonctionnement, applications, ainsi que leurs stratégies de commande. Nous allons opter le chapitre qui suit pour la simulation et les essais préliminaires d'un onduleur monophasé commandé par une carte Arduino Uno.

CHAPITRE III

Simulation Et Essais

Préliminaires

1. Introduction :

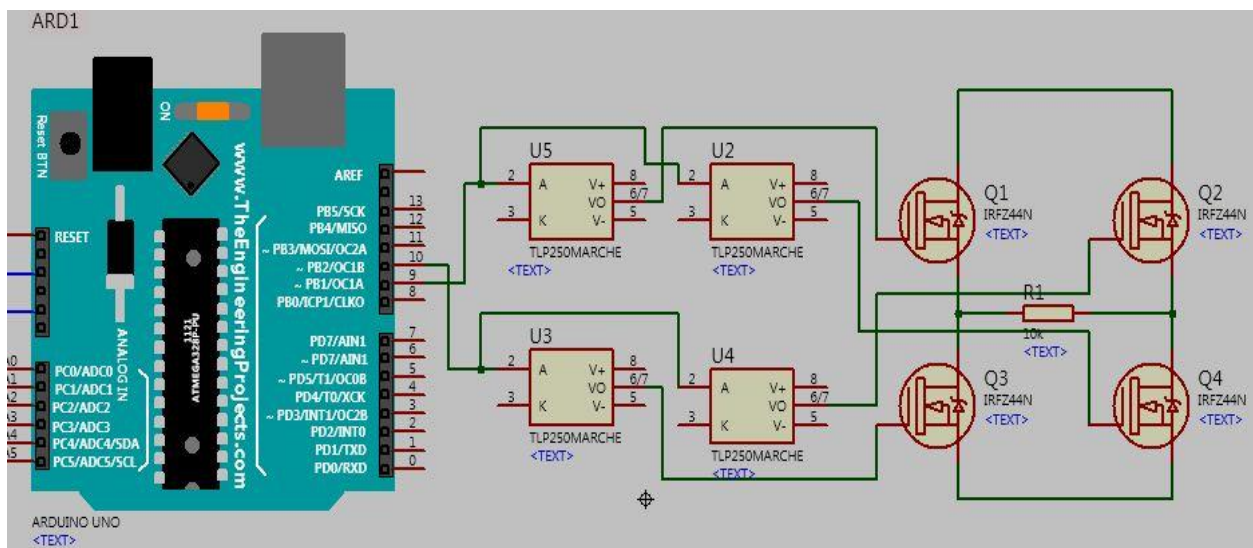
Dans ce troisième chapitre, on va en discuter sur une étape très importante dans n'importe quelle réalisation qui est la simulation.

Dans le cadre de notre projet, on a opté à utiliser le simulateur de circuit électrique et électronique Proteus, pour la simulation de notre circuit en entier.

Par la suite, on va procéder à réaliser quelques tests préliminaires pratiques nécessaires pour s'assurer du bon fonctionnement du circuit final.

2. Schéma fonctionnel d'un onduleur monophasé :

L'onduleur monophasé est composé de quatre circuits fondamentaux, représenté sur la Figure III.1.



Circuit de commande(PWM1,PWM2)

Drivers pour MOSFET.

MOSFET.

Figure III.1 : Schéma fonctionnel d'un onduleur monophasé.

Le signal de commande (5V) se dirige vers l'optocoupleur qui assure l'isolation entre la carte ARDUINO et le circuit de commande. Les drivers(TLP250) ont le rôle d'augmenter le signal de commande et l'envoi vers les MOSFET.

3. Les éléments de schéma fonctionnel :

-Arduino UNO : Elle contient le programme nécessaire pour la génération des signaux de commande PWM, ces signaux sont très importants pour la génération de la forme sinusoïdale de signal de sortie.

-Optocoupleur : Un coupleur optique est un composant de l'électronique de commande permet de transmettre un signal d'un circuit électrique à un autre sans qu'il y ait de contact galvanique entre eux. Il s'appelle un coupleur optique ou photo coupleur (optocoupleur ou opto isolation).

Voici le schéma fonctionnel d'un opto coupleur :

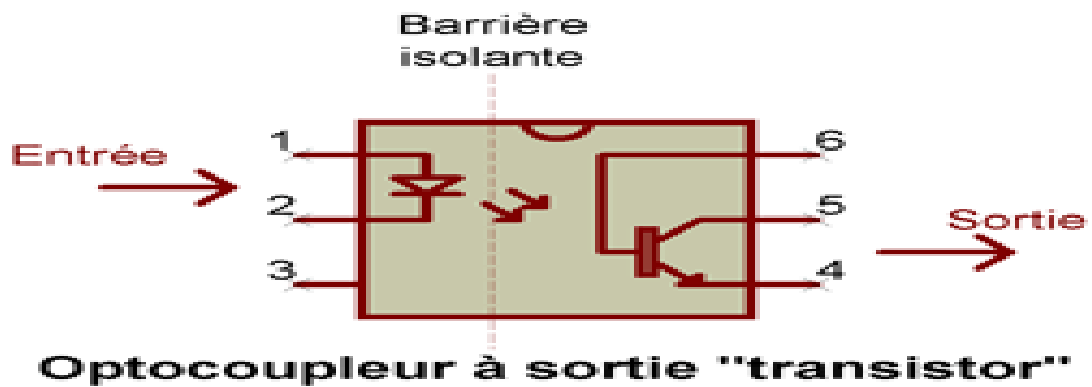


Figure III.2 : Schéma fonctionnel d'un opto-coupleur.

-Driver TLP250 : est un circuit intégré, constitué de 8 pins, ya des pins utilisés pour garantir une impulsion suffisante pour commander un transistor MOSFET ou un IGBT de la parte puissance, c'est-à-dire faire élever la tension VGs (la tension entre la source et gate) des MOSFET. (Voir la figure III.3).



Figure III.3 : Driver TLP250.

MOSFET : Le transistor MOSFET (Metal Oxyd Semi-Conductor Field Effect Transistor) enrichi à grille isolée, est utilisé en électronique de puissance pour alimenter des charges en commutation [18,19].

4. Simulation :

Dans cette partie, on a utilisé le logiciel Proteus, développé par la société Labcenter Electronics.

Deux logiciels principaux composent cette suite logicielle : ISIS, ARES, dans notre simulation on a opté seulement pour ISIS qui est principalement connu comme éditeur de schémas électriques. Par ailleurs le logiciel permet également de simuler ces schémas ce qui permet de déceler certaines erreurs de conception. Indirectement, les circuits électriques conçus grâce à ce logiciel peuvent être utilisés aussi dans des documentations car le logiciel permet de contrôler la majorité de l'aspect graphique des circuits.

La figure suivante montre l'interface principale de logiciel Proteus :

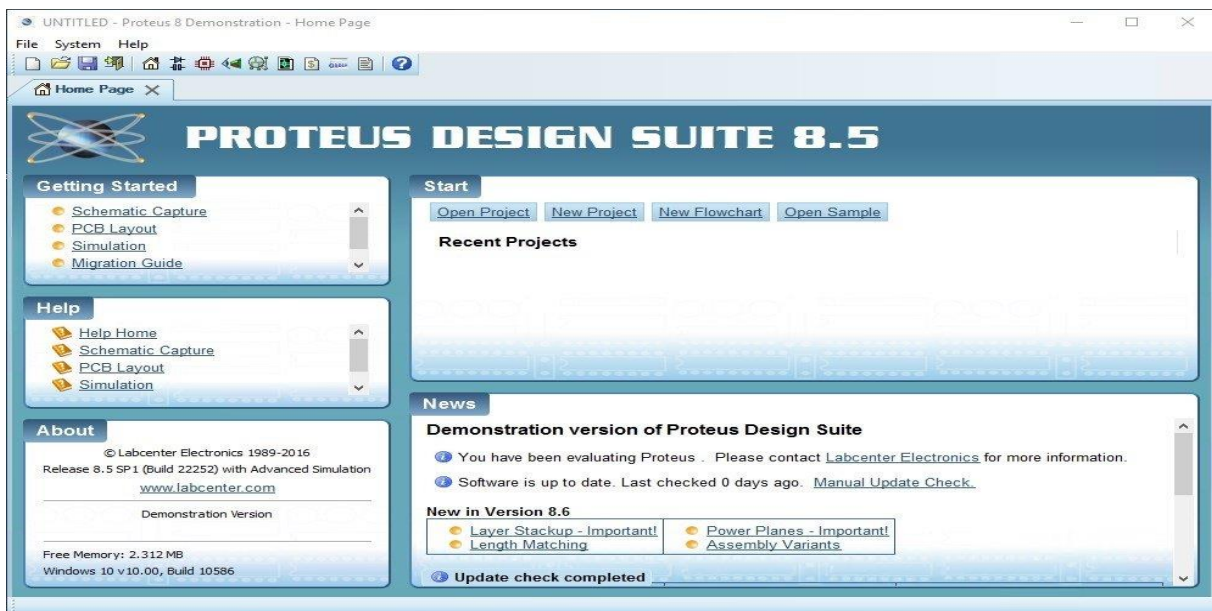


Figure III.4 : Interface principale de logiciel Proteus.

Afin de commander les MOSFETs, nous choisissons la carte Arduino, qui est composée de deux parties principales la partie matérielle représente la carte électronique,

Et la partie logicielle représente l'environnement de programmation Arduino (Voir la figure III.5).

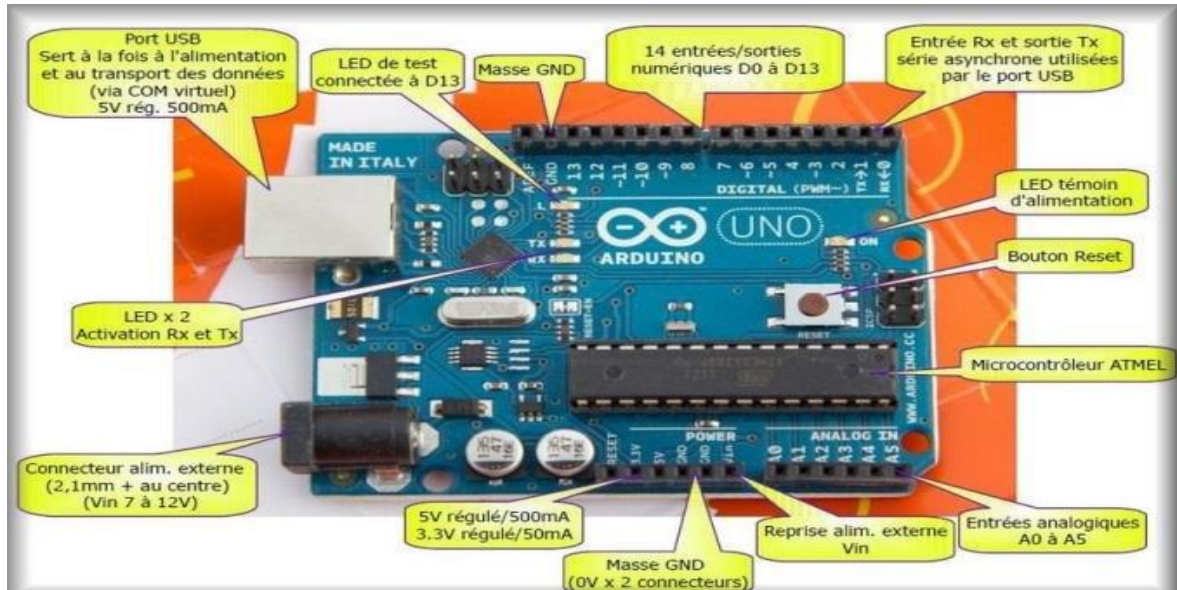


Figure III.5 : la carte Arduino UNO.

4.1. Les étapes de la simulation :

4.1.1. Arduino (générateur de circuit de commande):

Avant d'entamer la simulation globale du circuit de l'onduleur, on a commencé par la simulation des circuits simples afin de se familiariser avec le logiciel Proteus et l'environnement de développement de l'Arduino.

Le premier a pour objectif de faire clignoter une LED.

Le programme établi, ainsi que le schéma sont présentés dans la figure ci-dessous :

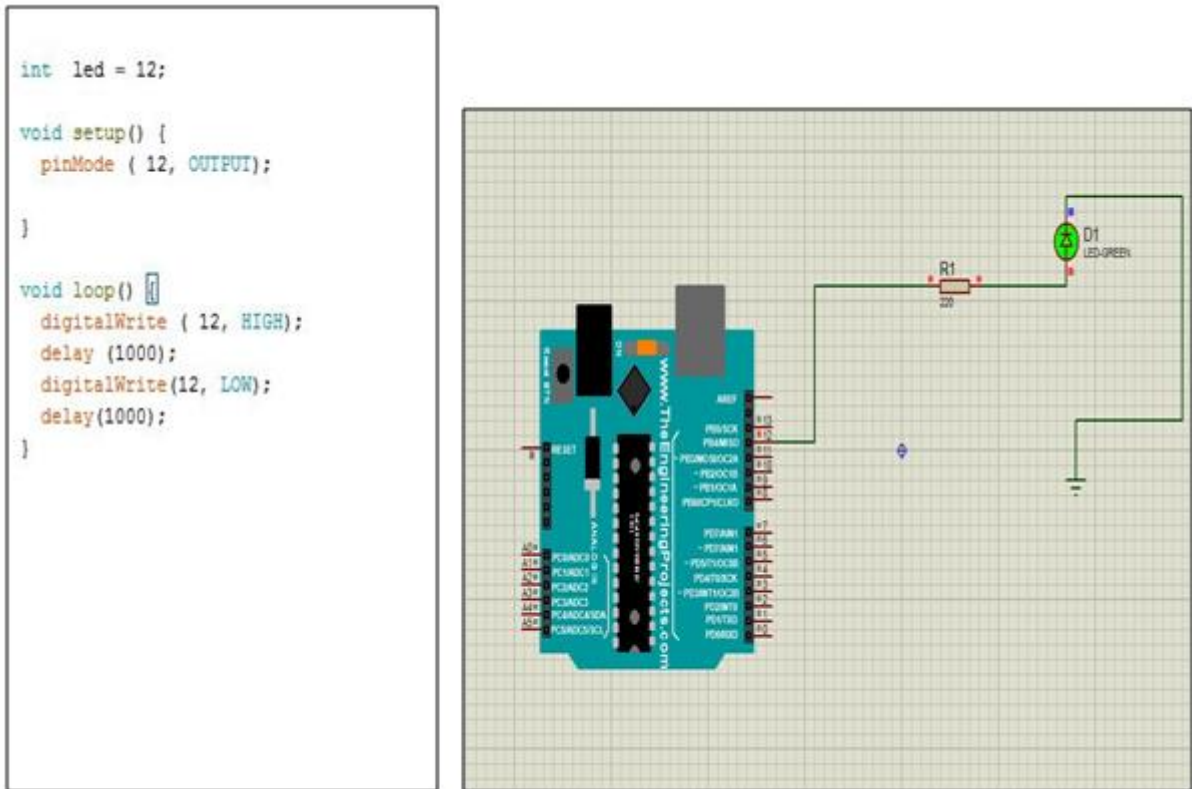


Figure III.6: Programme et schéma de simulation d'une LED clignotante.

En plus de sa simulation, ce test illustré par la figure III.7 a été réalisée pratiquement avec la carte Arduino.

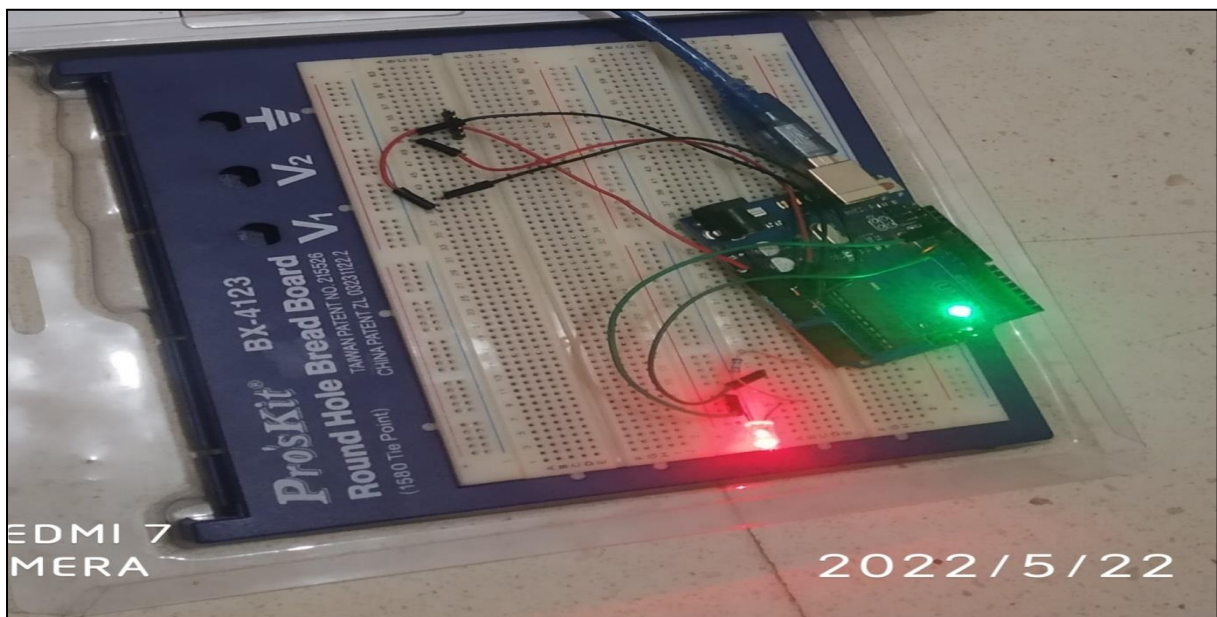


Figure III.7: Clignotement de la part LED r une carte Arduino UNO.

Comme deuxième circuit, on a procédé à simuler le circuit redresseur, présenté dans la figure III.8, qui nous a permis de bien découvrir l'emplacement des composants ainsi que leurs symboles sur ISIS.

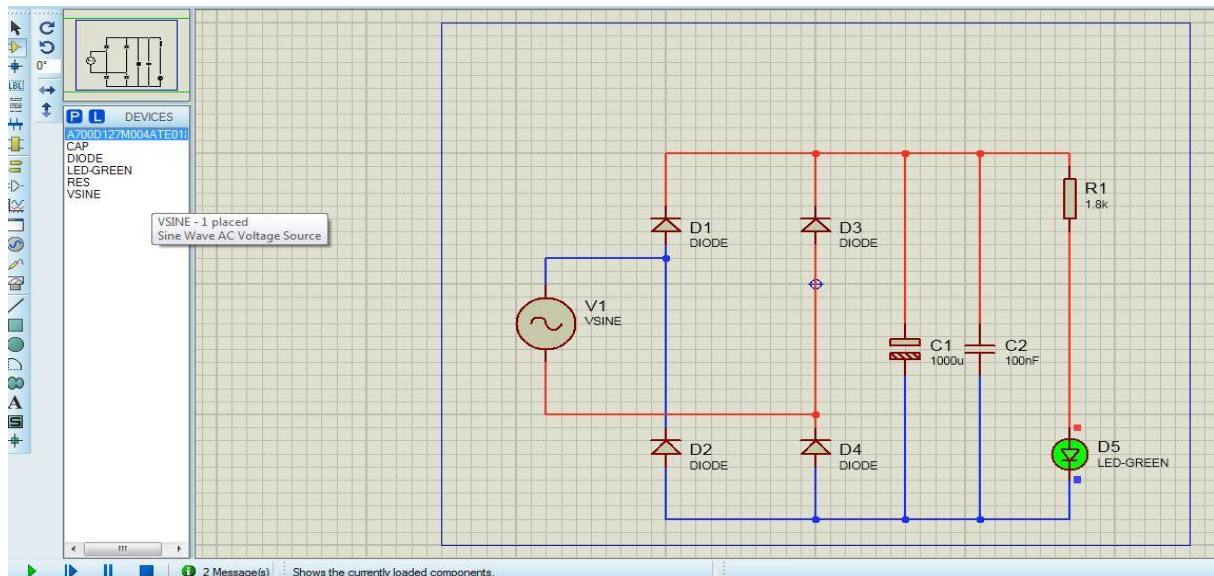


Figure III.8 : Schéma d'un redresseur sur Proteus.

Dans le but d'y arriver à simuler le circuit complet de l'onduleur monophasé commandé par Arduino UNO, on a exécuté des simples programmes pour cette carte.

Un autre circuit de teste concerne, la génération des signaux PWM (signaux de commandes), par l'Arduino.

Pour commencer on a programmé la carte Arduino par un simple programme, on a opté pour la pince '9' dans le but de générer le signal PWM avec une fréquence de 20KHZ, et pour ce qui concerne le changement de rapport cyclique on l'a effectué en fonction des tensions d'entrée (V_e), et de sortie (V_s) on utilisant l'équation suivante $V_s = (1 - 2\alpha) * V_e$.

Nb : on note que pour la génération de signal PWM, on peut utiliser différentes pinces '3, 5, 6, 9, 10, 11'.

La figure III.9 présente l'allure de signal PWM en vue de l'oscilloscope :

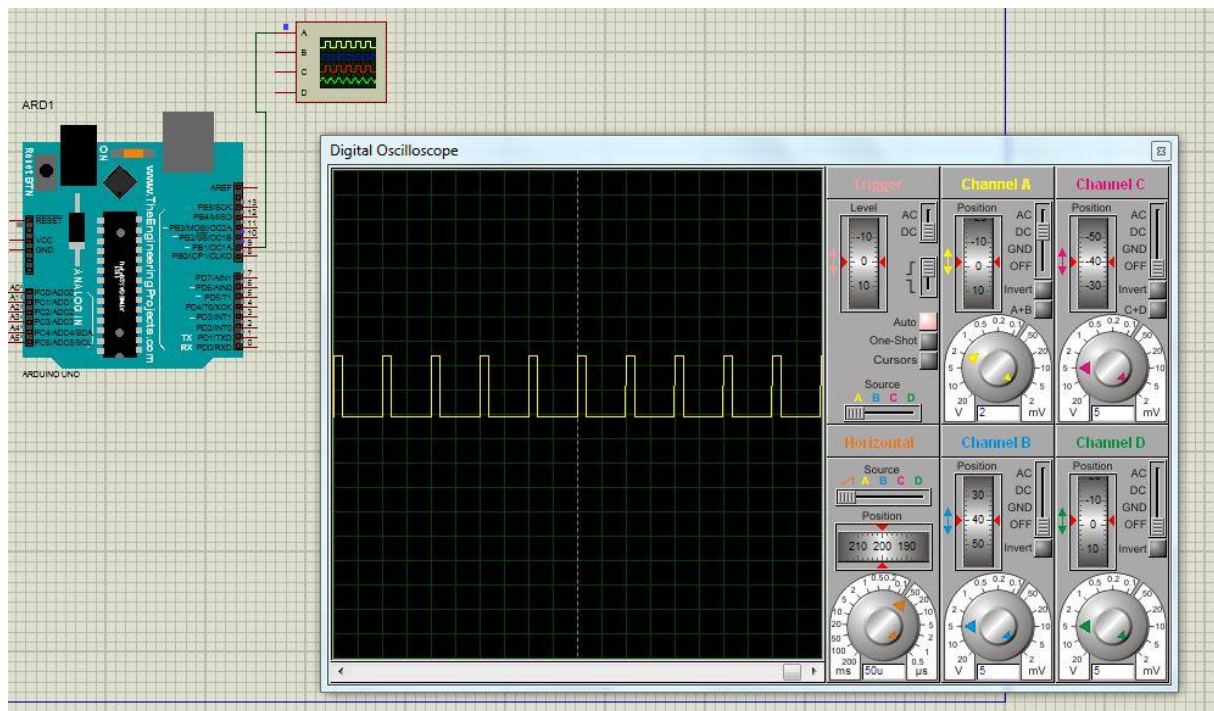


Figure III.9 : Signal PWM en vue de l'oscilloscope.

Lors de la simulation, on a bien observé sur l'oscilloscope la variation de la largeur d'impulsion des signaux numériques tel qu'elle peut varier de 0% jusqu'à 100%, et qu'elle s'exprime par une valeur comprise entre 0 et 255 au niveau de l'Arduino.

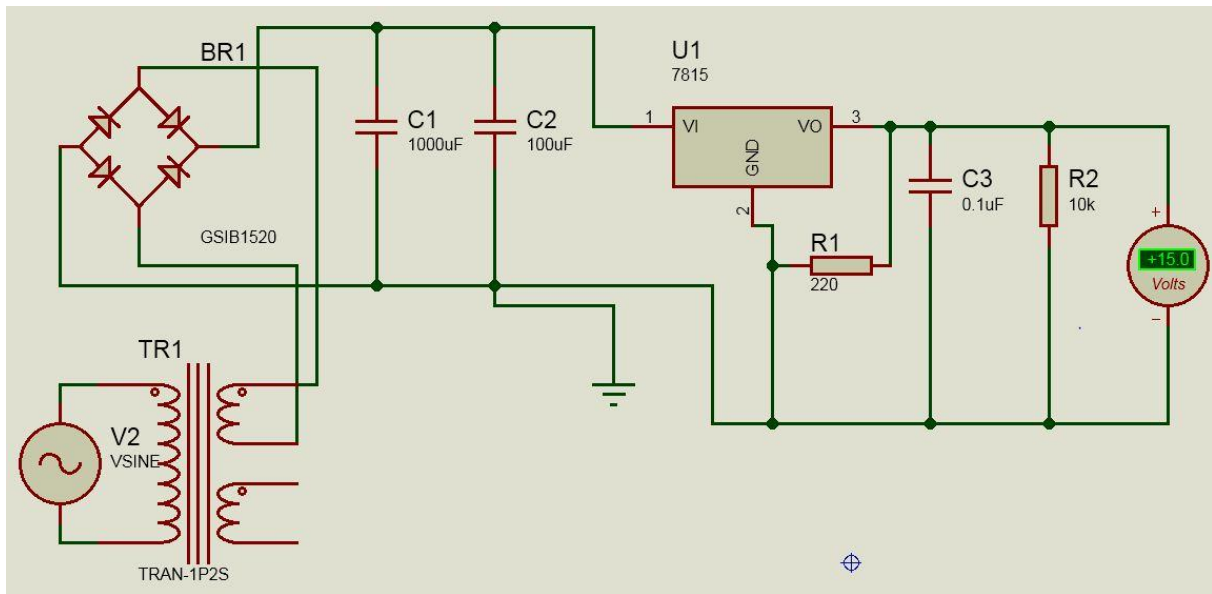
Le rapport cyclique est configuré comme suit :

'rapport Cyclique = 255.0 * rapportCycliquePercentage;'

Ce qui implique : 255↔100%.

Maintenant après avoir terminé avec la programmation de la carte Arduino dédiée à la commande de l'onduleur monophasé, et l'avoir simulé sur Proteus dont on a assuré sa bonne compilation, on passe à la schématisation du circuit complet sur l'éditeur ISIS, en commençant par des sous-circuit pour y arriver au circuit final.

Premièrement, on a réalisé les quatre circuits d'alimentation nécessaires :

Trois alimentations de 15V : (voir figure II.10)**Figure III.10 :** circuit d'alimentation 15V.

Le circuit est réalisé en utilisant un pont redresseur, plus des condensateurs de filtrage et le circuit intégré 7815 pour bien stabiliser la tension à 15V ; dans le but d'alimenter les MOSFETs.

On a branché un voltmètre pour mesurer la tension de sortie (15V).

Une alimentation de 5V : (voir la figure II.11)

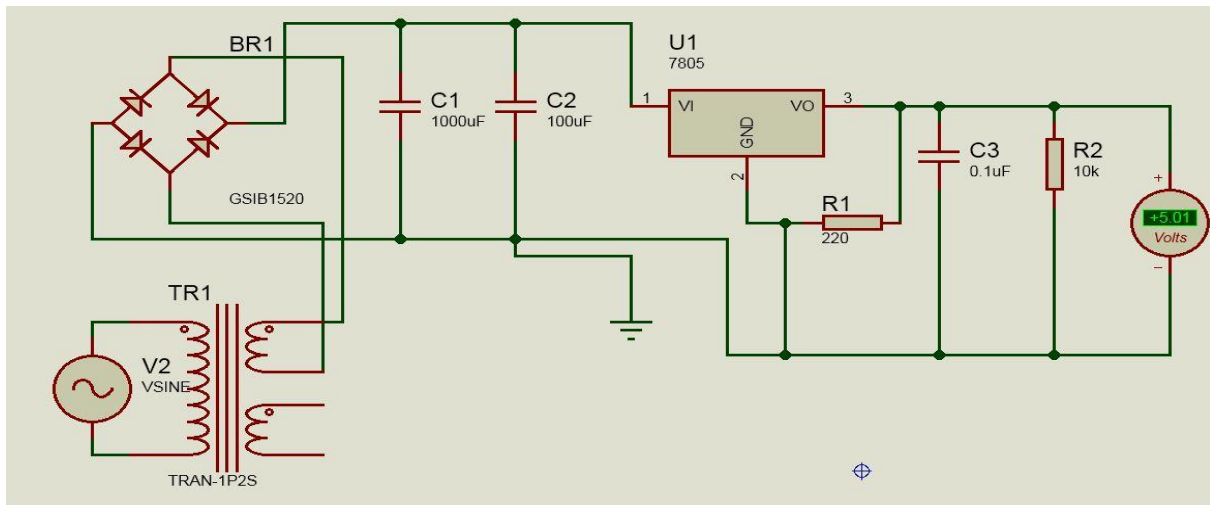


Figure III.11 : circuit d'alimentation de 5V.

Le circuit est réalisé en utilisant un pont redresseur, plus des condensateurs de filtrage et le circuit intégré 7805 pour bien stabiliser la tension à 5V ; dans le but d'alimenter les MOSFETs.

3.4. Partie puissance :

Chaque alimentation est raccordée à un DRIVER de type TLP250, qui est un circuit intégré a pour fonction d'augmenter le signal de commande PWM et l'envoi ensuite vers les MOSFETS.

MOSFET IRFZ44N : est un transistor, il a un emballage de type TO-220-3, bien qu'il puisse être présenté dans d'autres formats, et avec un brochage assez simple avec les trois broches typiques pour la porte, le drain et la source .Ce MOSFET a un canal de type N comme son nom l'indique. En plus de cela il a d'autres détails techniques tels que :

- Le signal de commande va attaquer directement le Gate de ce MOSFET, avec une valeur comprise entre 12V et 15V.
- La tension entre le drain et la source peut aller jusqu'à 55V maximum autrement dit ces bornes (drain et source) peuvent supporter une tension de 55V, et un courant de 49A.

La figure III.12 montre bien le symbole de MOSFET IRFZ44N.

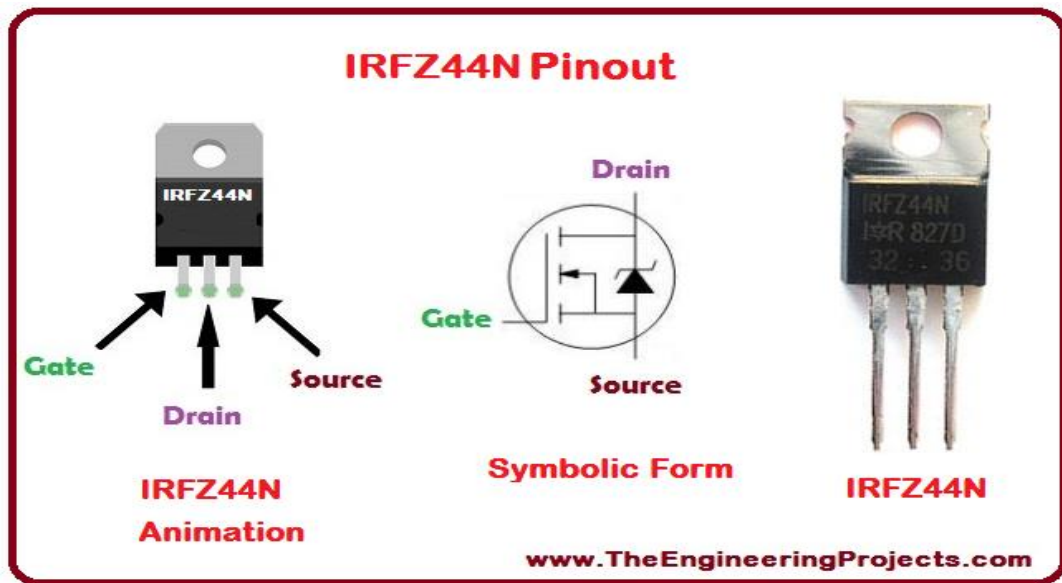


Figure III.12: Symbole et animation d'une MOSFET IRFZ44N.

Le signal PWM généré par la carte Arduino est de 5V, et comme il est cité auparavant que le signal de commande de l'IRFZ44N doit être compris entre 12V et 15V, du coup on a besoin des drivers, pour amplifier la valeur de ce signal de commande (5V) à la valeur exigée (15V).

Driver TLP250 :

Le choix de TLP250 est effectué par rapport à sa bonne adaptation avec notre circuit. Autrement dit pour bien expliquer le TLP250 est le bon choix pour un MOSFET de type IRFZ44N, tel qu'il augmente la tension V_G s entre la porte et la source de ce MOSFET en bien respectant la marge de tension ($\pm 20V$), indiquée sur le Datasheet.

-Avant de raccorder les alimentations aux drivers, on a testé tout d'abord le bon fonctionnement de TLP250 par le circuit montré dans cette figure :

La figure suivante montre le circuit de test d'un driver TLP250 :

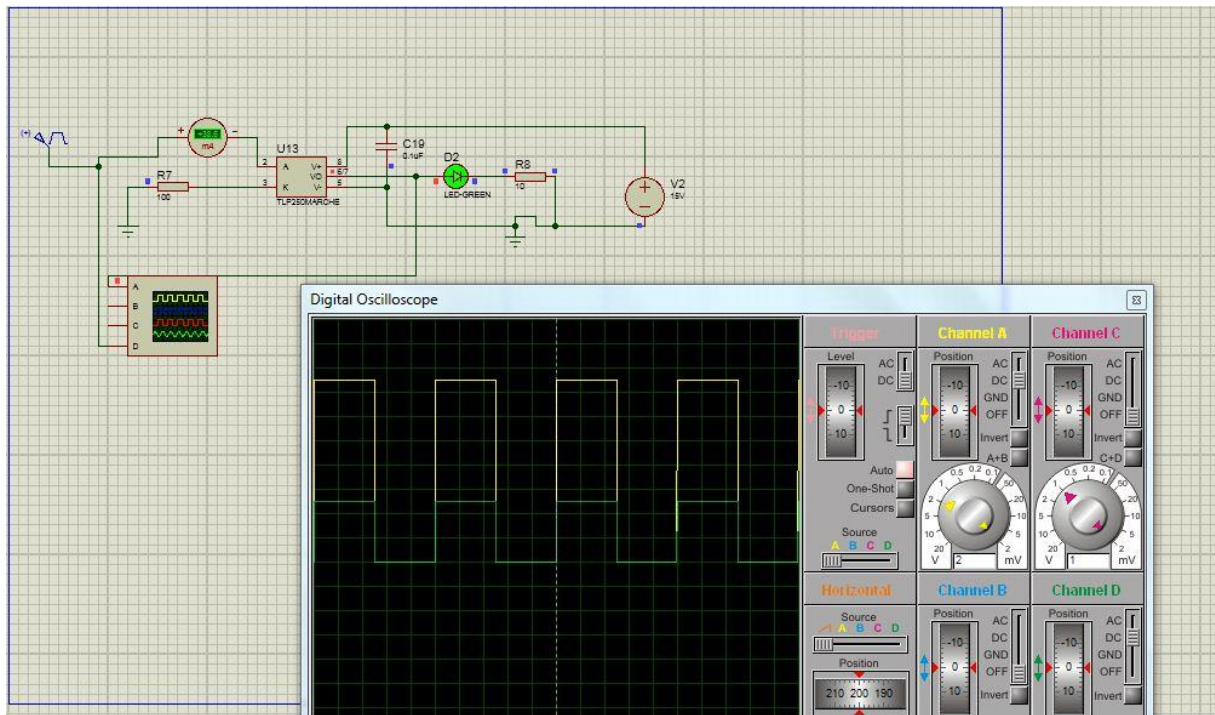


Figure III.13: circuit de test d'un Driver TLP250.

La figure III.13 illustre le signal de commande PWM généré par l'Arduino, et le signal généré par le driver, il est clair que le signal du driver est une copie identique de signal de l'Arduino avec une amplitude de 15V au lieu de 5V.

Pour faire la commande des quatre MOSFET, on aura besoin des deux signaux PWM. Le premier signal sera utilisé pour générer l'alternance positive, du signal sinusoïdal, tandis qu'un deuxième signal PWM sera utilisé pour générer l'alternance négative.

Le schéma de simulation de l'onduleur en entier est illustré dans la figure III.14.

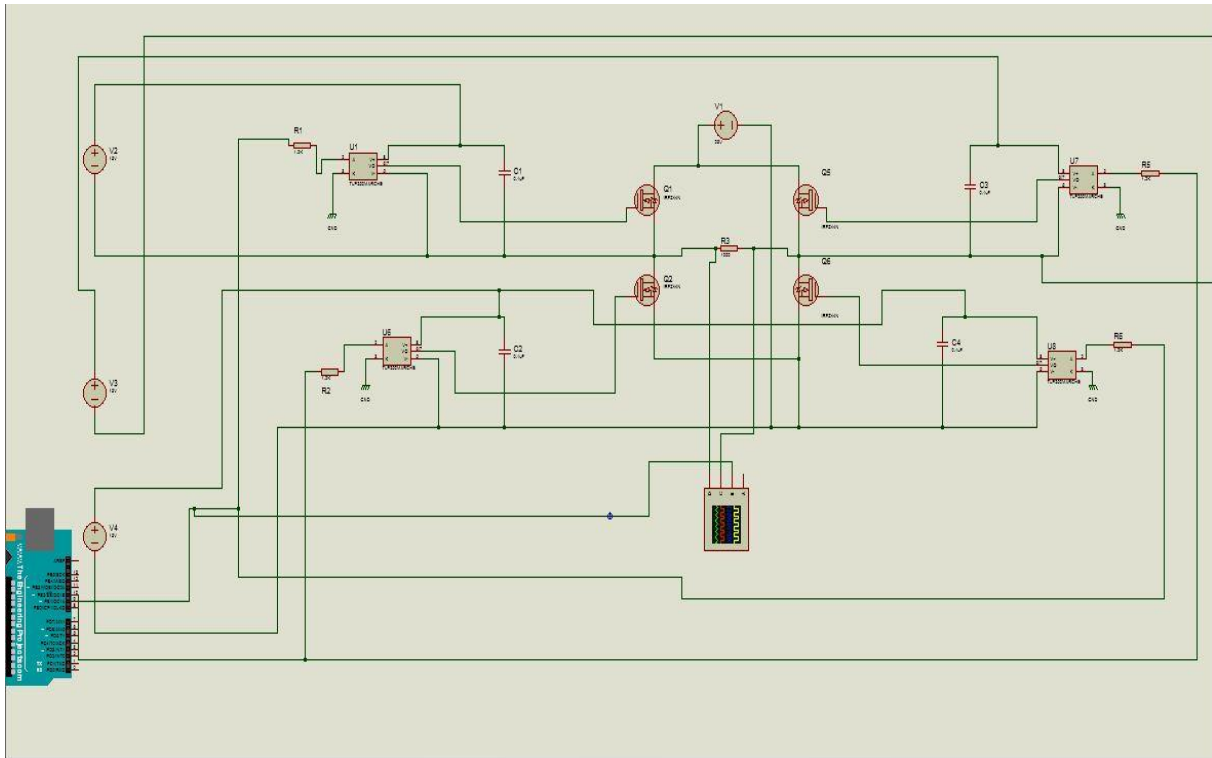


Figure III.14: Schéma complet d'un onduleur monophasé sur ISIS.

3.5. L'explication du circuit complet :

Bloc1 : Onduleur

Le principe d'un onduleur monophasé en pont H est basé sur la conversion d'une tension continue à une tension alternative (sinusoïdale), cette conversion se fait de la manière suivante :

Le pont est constitué principalement de deux bras chaque un contient deux MOSFET IRFEZ44N, qui fonctionnent par un jeu de commutation, tel que l'état de l'interrupteur Q1 est liée à l'état de l'interrupteur Q4 (ils sont passants ou bloqués simultanément selon l'état de PWM1 et de même pour les interrupteurs Q2 et Q3, avec le signal PWM2.

Cette structure (pont H) montre à l'évidence qu'il est possible d'imposer aux bornes de la charge une tension une fois positive avec Q1 et Q4 actives et une fois négative (alternative), avec Q2 et Q3 actives.

La tension alternative aux bornes de la charge ne peut jamais dépasser la tension de la source continue. Elle est soit égale ou inférieure selon le besoin.

Bloc 2 : Alimentations

Les alimentations de 15V, sont dédiées principalement aux drivers, pour qu'ils puissent commander les MOSFET, en amplifiant la puissance de signal PWM d'amplitude originale de 5V, à une amplitude de 15V, afin de pouvoir activer les MOSFET qui nécessitent une tension $V_{GS} > 12V$.

Bloc3 : Génération du signal de commande

Les MOSFET constituant notre onduleur fonctionnent par un jeu de commutation commandé à l'aide de deux signaux générés par une carte Arduino UNO, tel que la pin '9' génère le signal PWM1 qui a pour rôle de commander Q1 et Q4 ce qui impose la génération de l'alternance positive aux bornes de la charge et la pin '10' qui génère le signal PWM2 afin de commander les MOSFET Q2 et Q3, ce qui impose la génération de l'alternance négative.

Les résultats obtenus lors de la simulation de l'onduleur sont illustrés dans la figure III.15.

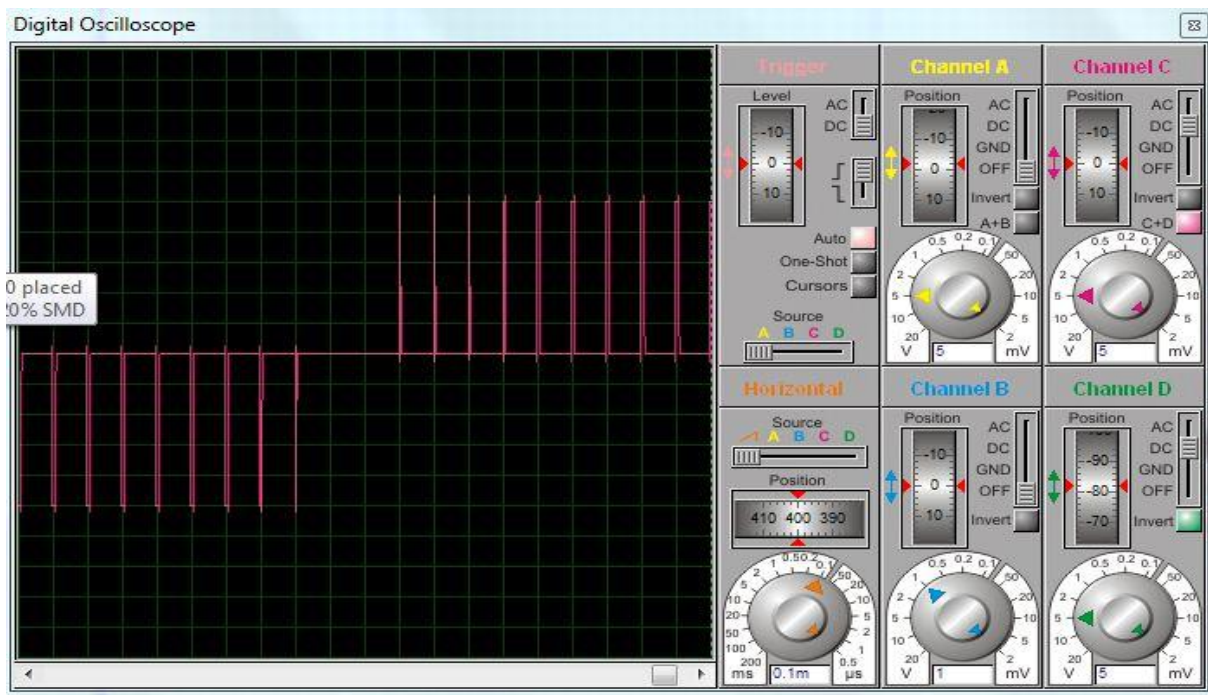


Figure III.15: Signal de sortie de l'onduleur (aux bornes de la charge).

Le résultat de l'oscilloscope montre bien l'authenticité du principe de fonctionnement de l'onduleur. A partir de la source continue et via les signaux de commande de PWM1 et PWM2, on a pu générer une tension alternative.

Conclusion :

Dans ce chapitre on a assuré le bon fonctionnement d'un onduleur monophasé par sa simulation sur le logiciel Proteus, dont on a bien arrivé à générer un signal proche de la sinusoïde à la sortie de l'onduleur, par la suite on va entamer le quatrième qu'on va consacrer pour la réalisation pratique de notre onduleur.

CHAPITRE IV

Réalisation Pratique d'un Onduleur Monophasé

1. Introduction :

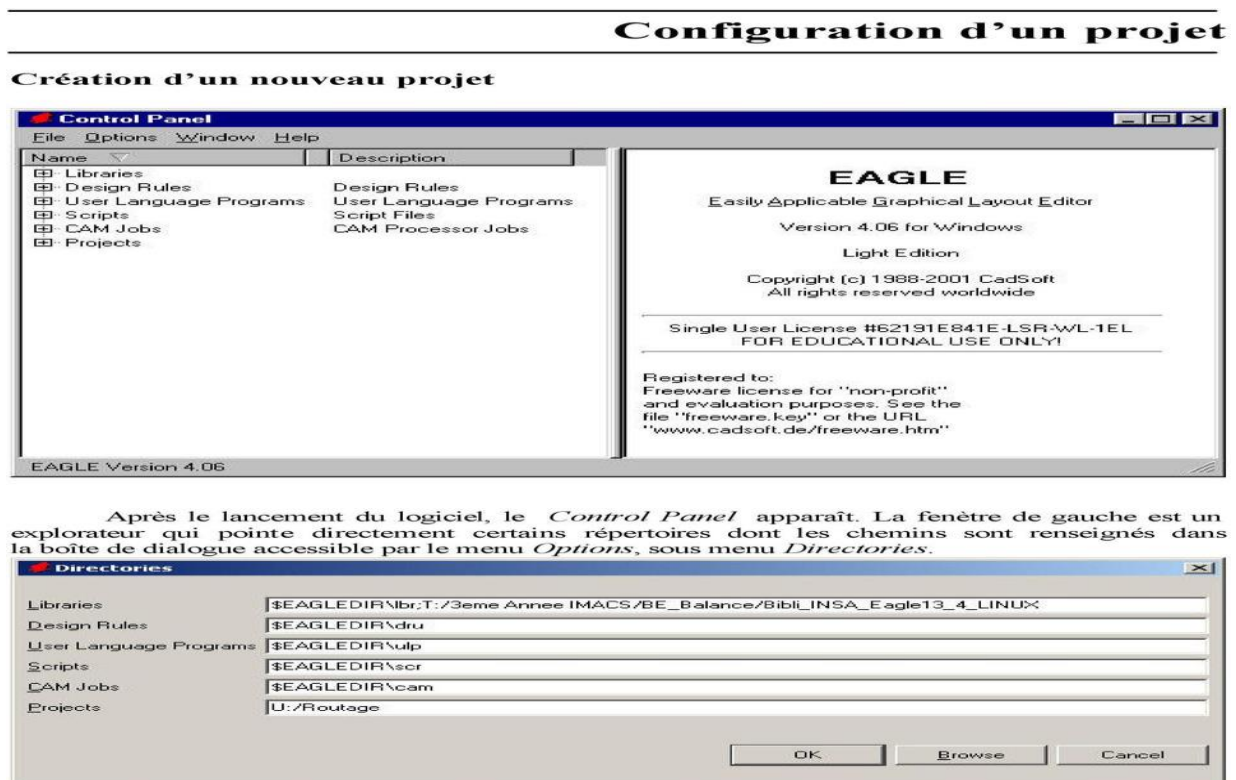
Dans ce chapitre on va présenter les étapes qu'on a suivi pour la réalisation d'un onduleur monophasé avec une fréquence variable après avoir validé sa simulation sur le logiciel Proteus.

2. Présentation de logiciel Eagle :

Eagle est un logiciel de conception assistée par ordinateur de circuits imprimés, il comprend un éditeur de schéma, un logiciel de routage de circuit imprimé, avec une fonction d'auto-routage, et un éditeur de bibliothèques.

Le logiciel est fournie avec une série de bibliothèques de composants de bases.

L'interface principale du logiciel Eagle est montré dans la figure suivante :



Après le lancement du logiciel, le *Control Panel* apparaît. La fenêtre de gauche est un explorateur qui pointe directement certains répertoires dont les chemins sont renseignés dans la boîte de dialogue accessible par le menu *Options*, sous menu *Directories*.

Eagle sait par exemple que les projets seront rangés dans **U/Routage**. De même *Eagle* sait que 2 répertoires (**lbr** et **Bibli_INSA_Eagle13_4_LINUX**) sont les bibliothèques à utiliser.

Figure IV.1 : l'interface principale de logiciel Eagle.

3.La schématisation de circuit sur Eagle :

On a établi le même montage de l'onduleur sur le logiciel Eagle, dans le but de passer par la suite à la deuxième partie de logiciel qui est l'éditeur de routage de circuit imprimé(BOARD)(Voir la figure IV.2).

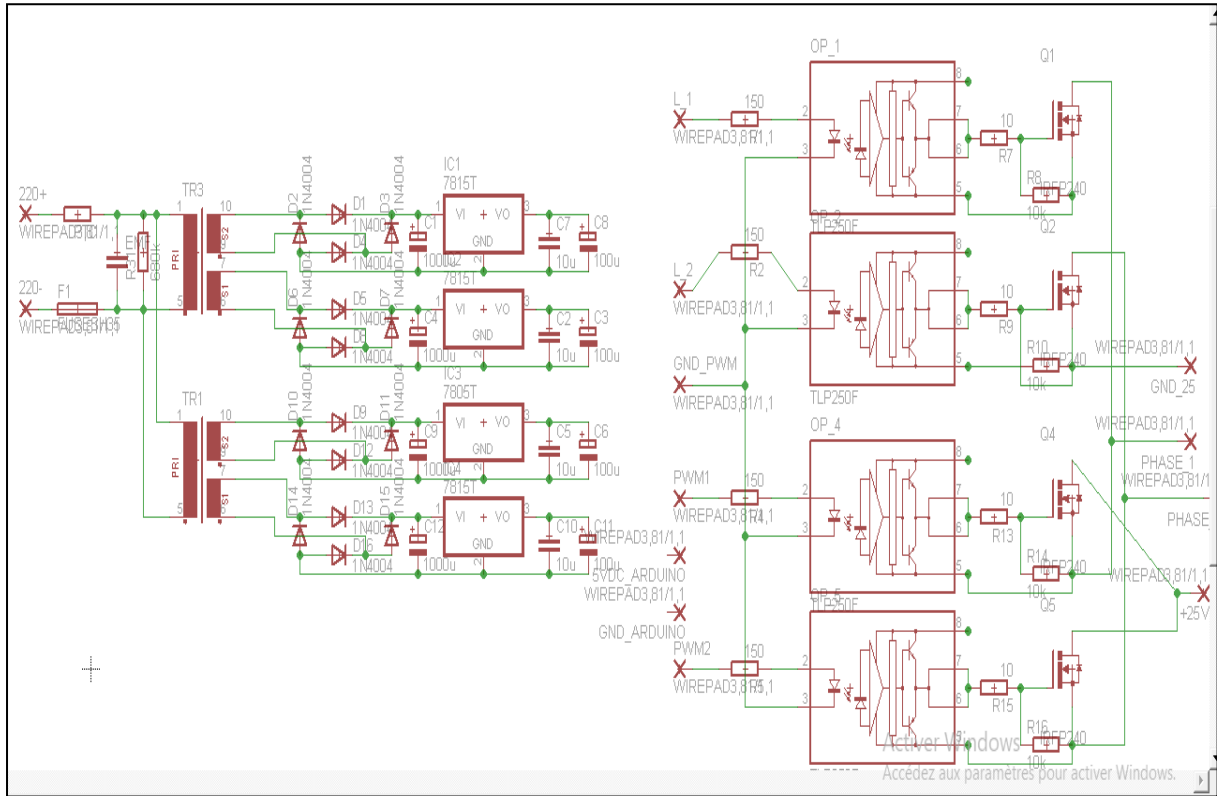


Figure IV.2 :Circuit de l'onduleur sur Eagle.

Par la suite, on a tracé le circuit imprimé sur l'éditeur de routage, comme le montre la figure suivante :

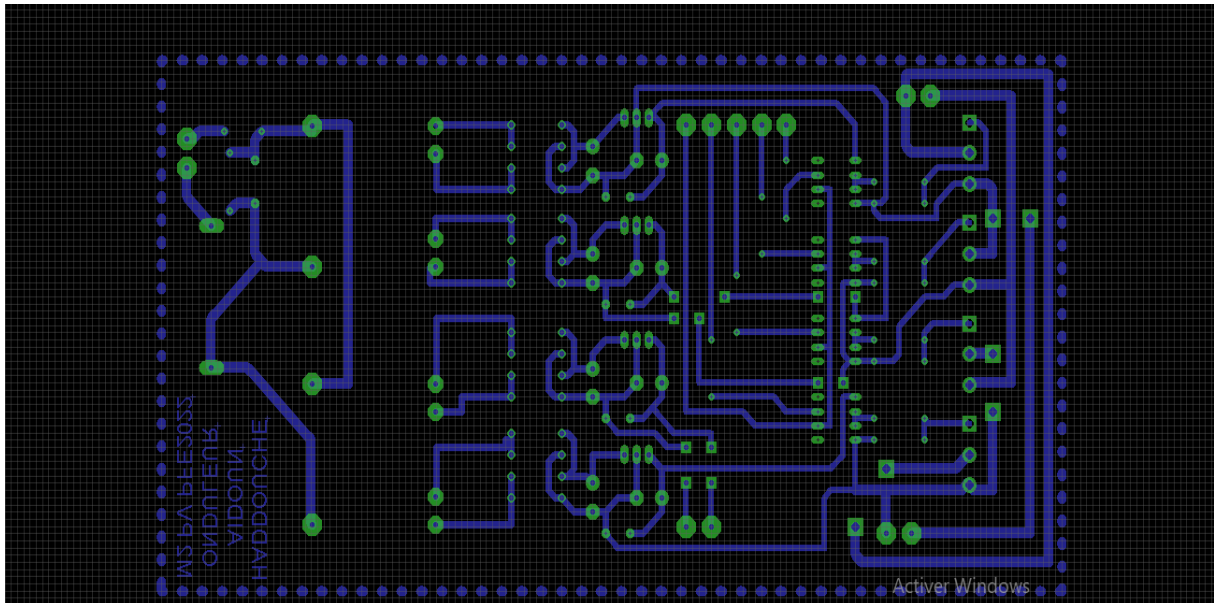


Figure IV.3 :Schéma de circuit imprimé(la Board).

4. Partie Réalisation :

La mise en place de banc d'essai expérimental, au niveau de laboratoire LABSET du département d'automatique du pavillon 24.

Les composants utilisés pour effectuer la réalisation pratique sont montrés dans la figure suivante :

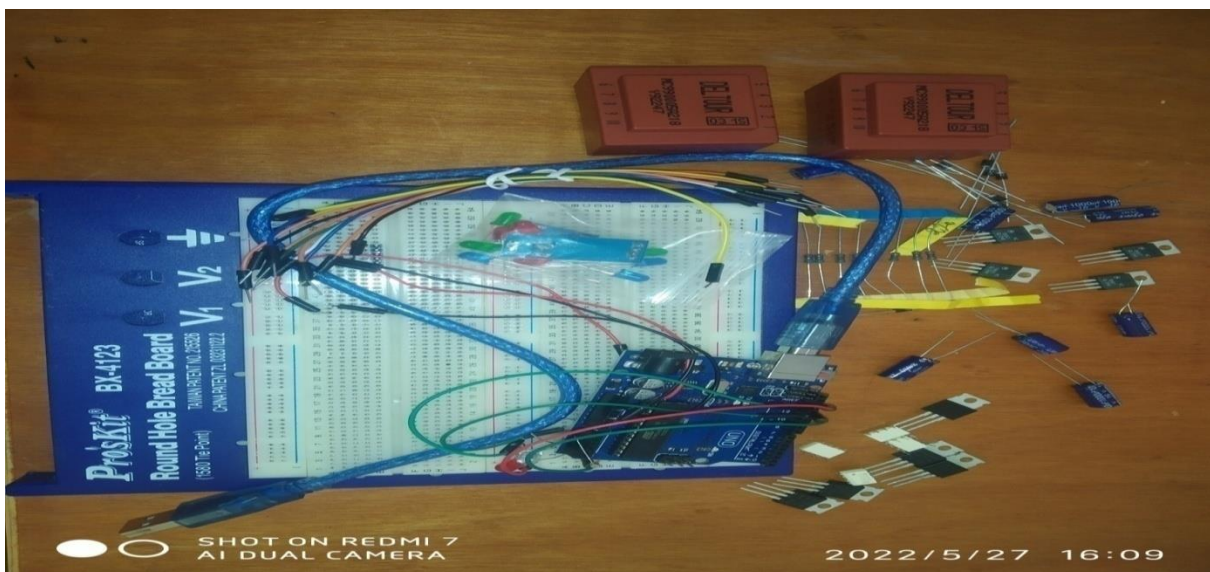


Figure IV.4 : Matériels utilisés pour la réalisation d'un onduleur monophasé.

4.1. Les étapes de la réalisation :

La première étape consiste à préparer une plaque époxy présensibilisée selon les dimensions de notre circuit.

Deuxièmement, on a imprimé le circuit sur une page avec une imprimante LASER puis, on a collé cette page en appliquant une température élevée pendant 20 minutes, afin de transmettre l'encre de la page vers la plaque.

Après un nettoyage attentif, le circuit dessiné peut être retrouvé sur notre plaque époxy.

Dans la troisième étape on a rempli une cuvette de perchlore, puis on a plongé la carte, en exposant la face cuivre à l'air.

Et on a remué la bassine avec un mouvement de balancier, en surveillant régulièrement la gravure, cette opération a duré dans les environs de 25 minutes.

Après la gravure on a enlevé les traces de résine qui subsistent sur les pistes, pour obtenir à la fin un circuit avec des pistes bien nettes et sans aspérités.

Nb : le perchlore de fer suractivé est un liquide de couleur marron très foncé, on l'utilise pour graver les circuits imprimés, car il a la particularité de détruire par réaction chimique le cuivre, cela a pour conséquence de ne laisser sur la plaque que les pistes qui nous intéressent.

Le résultat final de la plaque de circuit imprimé est montré dans la figure ci-dessous :

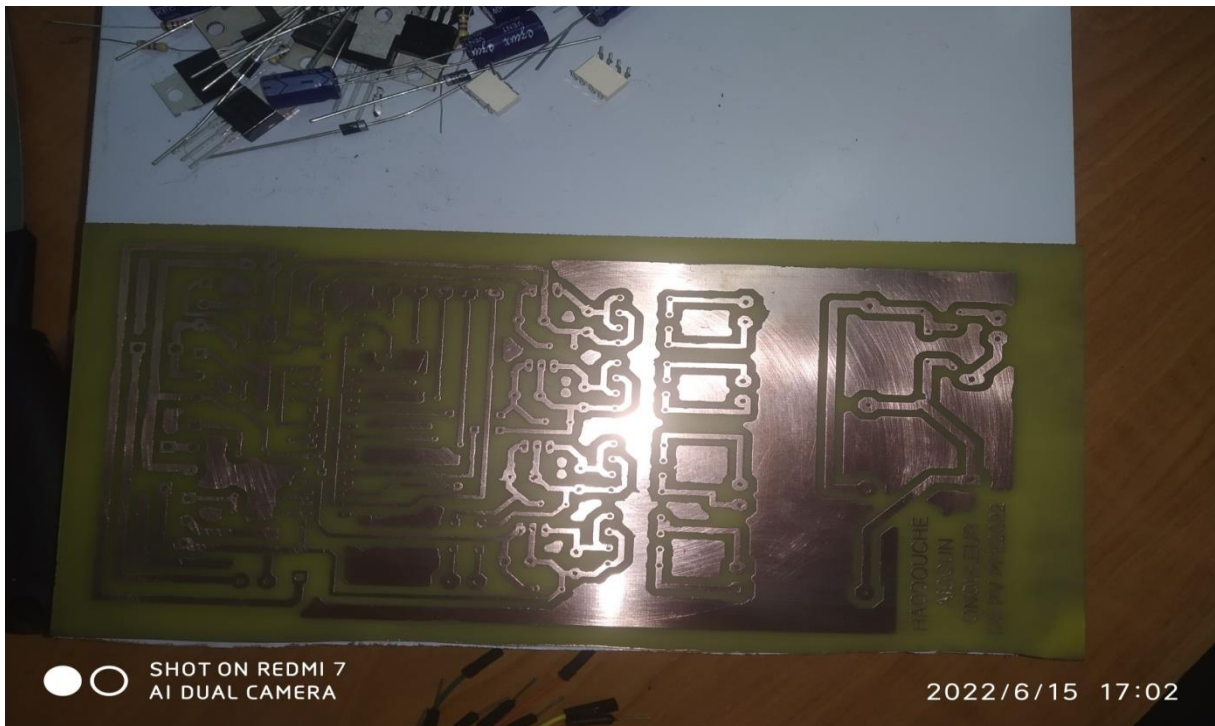


Figure IV.5 : la carte de circuit imprimé réalisé.

Dans la quatrième étape, on a passé au perçage des trous avec une perceuse à main pour pouvoir par la suite placer les composants.

Pour ce qui concerne les diamètres des forêts, on a opté pour les dimensions suivantes : 0.6mm pour les petits composants comme les résistances, les condensateurs, les supports des drivers. 0.8mm et 1mm pour les composants normaux comme les transistors et les régulateurs, et 1.5mm pour tout le reste (transformateurs, Wire pad...).

La figure VI.6 montre la méthode de perçage de la carte du circuit imprimé.

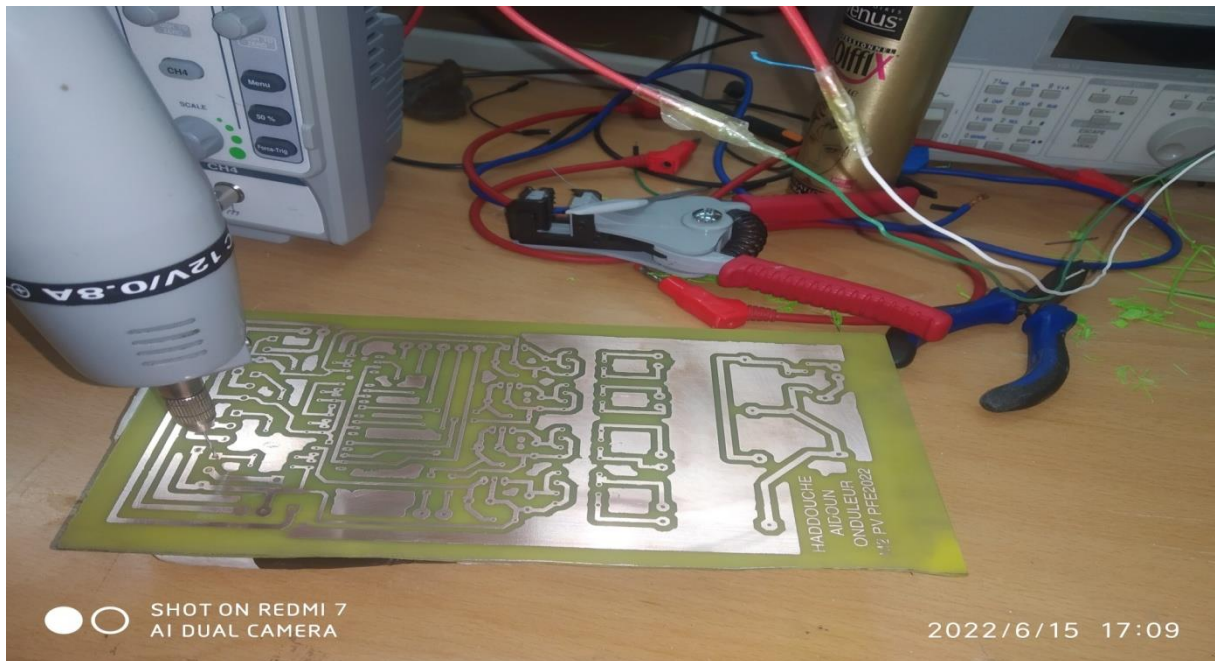


Figure IV.6 : Perçage de la carte de circuit imprimé.

Ensuite on a passé à l'étape de **placement etsoudage des composants** on a commencé à placer les composants à profil bas comme les circuits intégrés, les petits condensateurs, les résistances, transistors, puis on a passé au plus grand (transformateurs), puis les souder en utilisant un fer à souder.

La figure IV.7 présente le fer à souder :



Figure IV.7: Fer à souder.

Après avoir terminé la soudure, une étape très importante et indispensable suit qui est la vérification et le nettoyage de circuit en le comparant au plan d'implantation et la vérification que tout les pistes ne sont pas coupées ou court-circuitées et que les soudures sont propres.

Le résultat est montré dans la figure suivante en ajoutant les impulsions(le signal PWM) produit du circuit de commande (la carte Arduino UNO), pour attaquer les MOSFETs de circuit de puissance.

La figure IV.8 montre la photo de la carte électronique de commande :

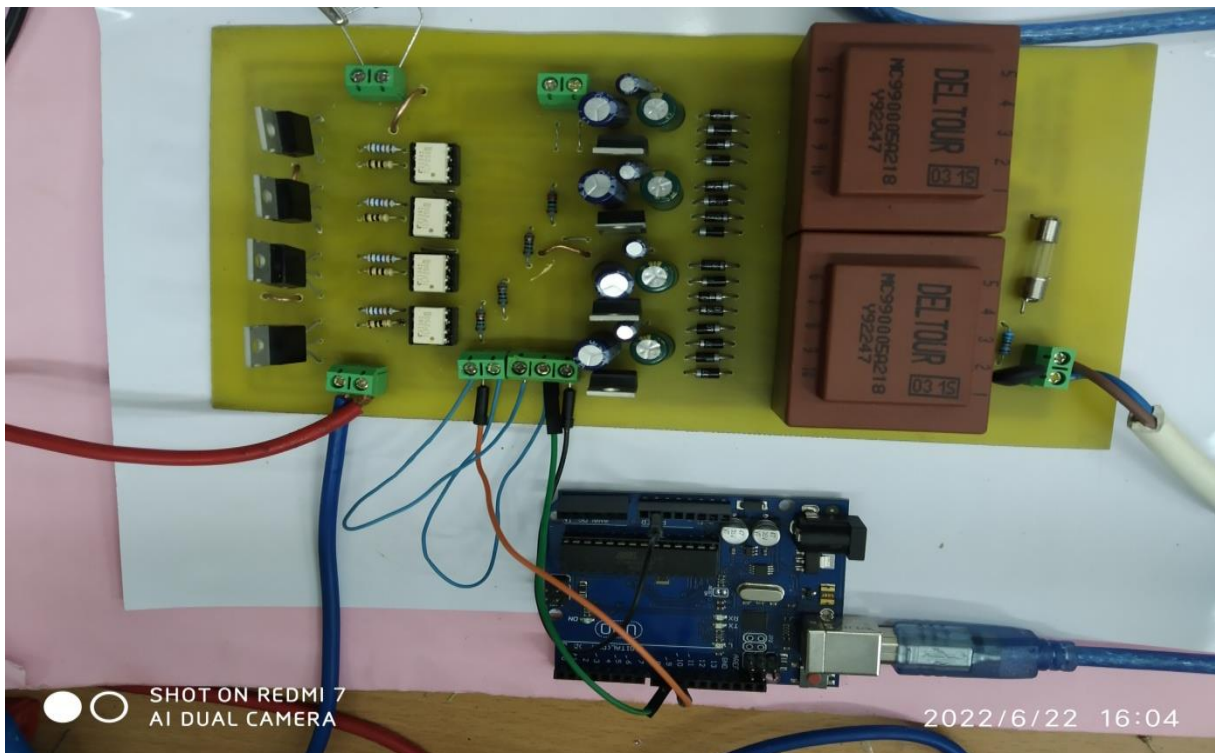
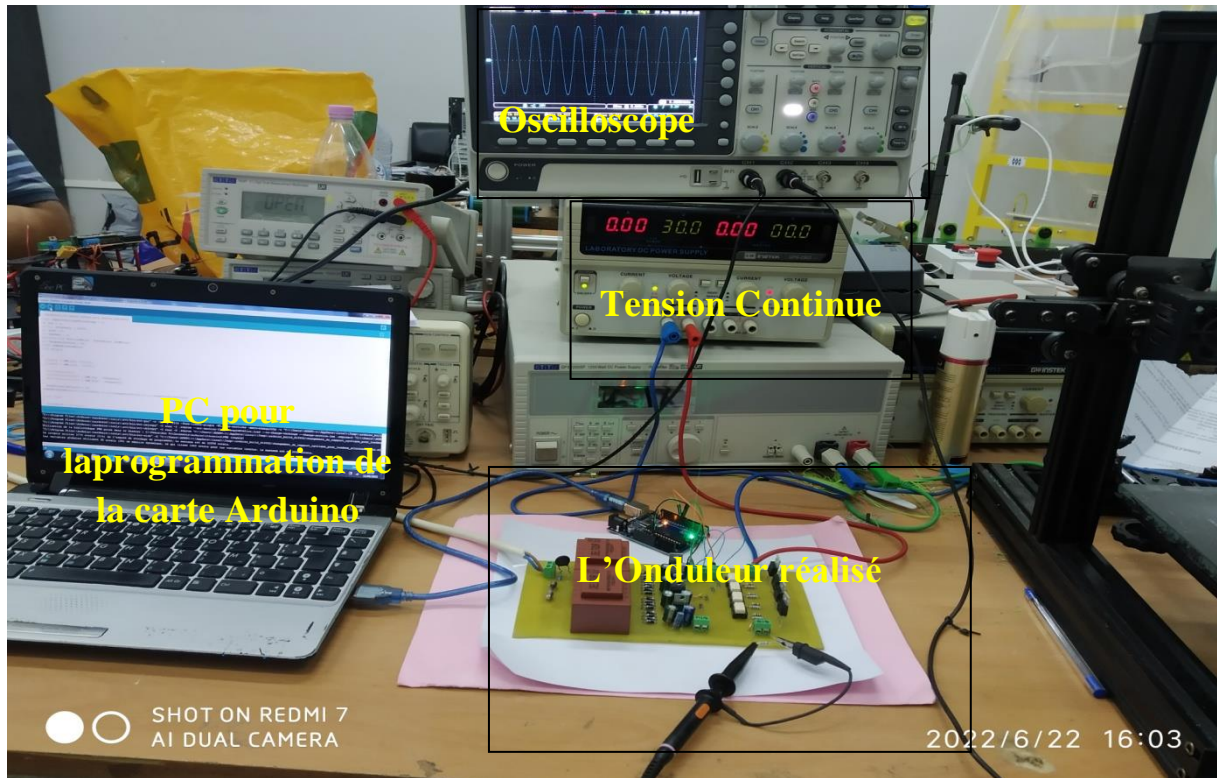


Figure IV.8 :Photo de la carte électronique de commande.

Notre circuit d'Onduleur est illustré dans la figure IV.8, où on peut voir en plus de la carte réalisée, le circuit Arduino responsable de la génération des signaux de commande PWM1 et PWM2.

Le banc d'essai considéré pour pouvoir tester notre onduleur, est illustré par la figure IV.9. Le banc est composé d'un oscilloscope pour observer les différents signaux notamment le signal sinusoïdal généré par une source continue. Et d'un PC pour programmer la carte Arduino



4.2. Interprétation des résultats :

Signal alternatif sinusoïdal de 30V /50HZ :

La figure IV.10 présente le signal sinusoïdal de fréquence 50HZ et d'amplitude 30V affiché sur l'oscilloscope:

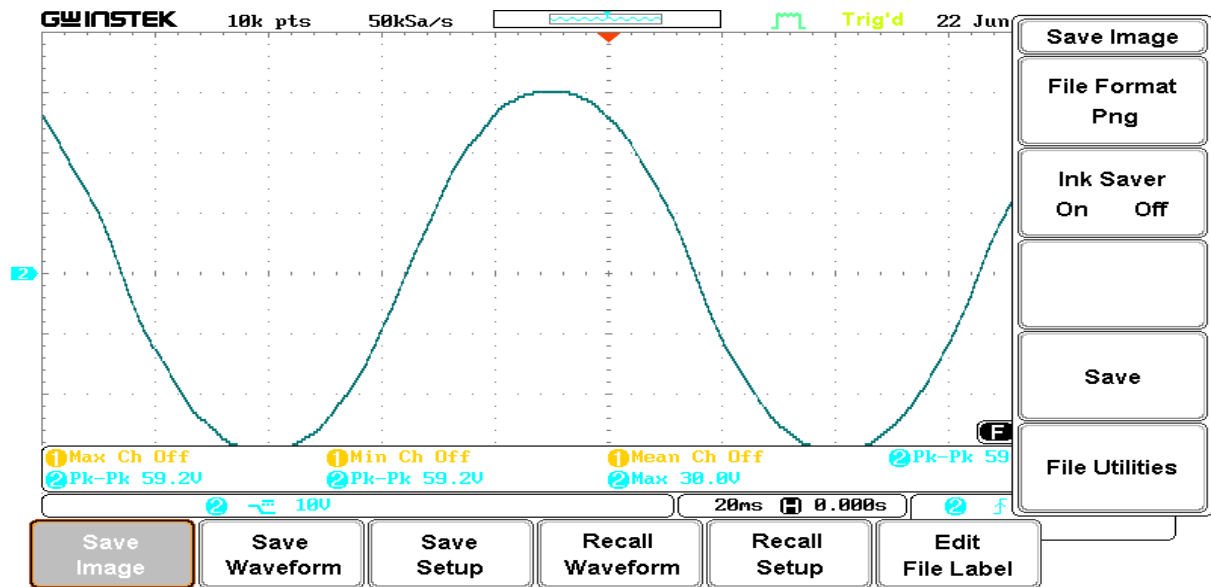


Figure IV.10 : Tension alternative à la sortie d'onduleur(30V/50HZ) en vue de l'oscilloscope.

La figure IV.11 présente le signal sinusoïdal de fréquence 50HZ et d'amplitude 30V sur Matlab:

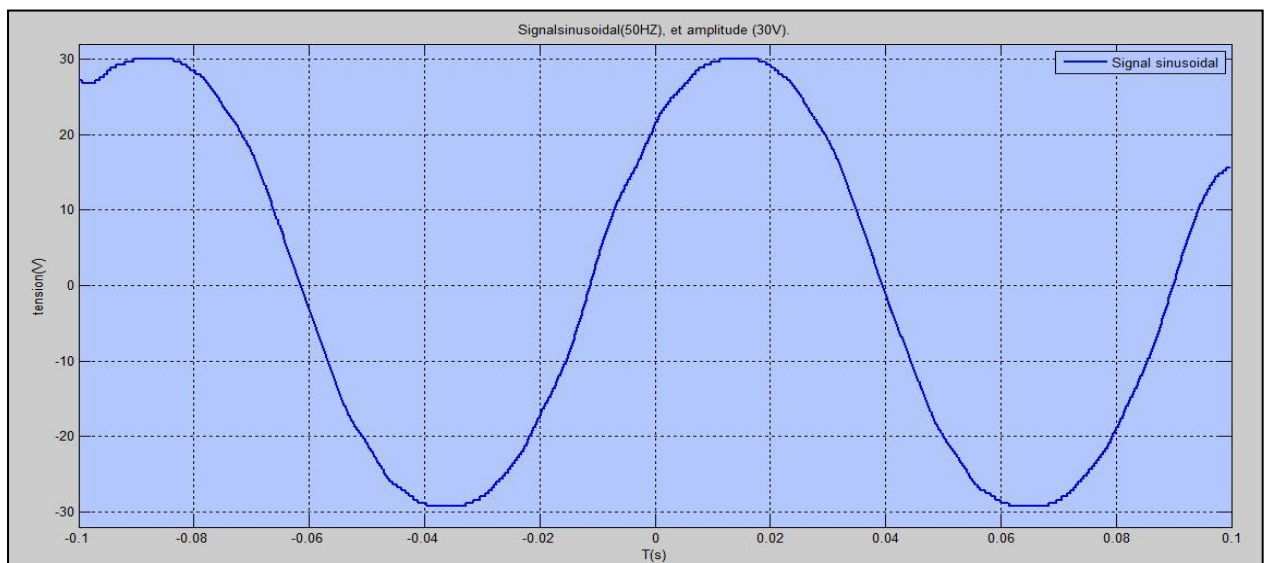


Figure IV.11 : Tension alternative à la sortie d'onduleur(30V/50HZ) affiché sur Matlab.

Les deux premières figures présentent le résultat de signal de sortie aux bornes de la charge (une résistance de 10K Ohm), avec une tension maximale de 30V et une fréquence de 50HZ, comme il est bien observé le signal est alternatif et de forme sinusoïdale.

La figure IV.10 représente l'image affichée par l'oscilloscope, tandis que la figure IV.11 à été obtenu en récupérant les données de l'oscilloscope et on les traçant par Matlab pour une présentation plus claire.

Signal de sortie alternatif sinusoïdal 30V/40HZ :

La figure IV.12 présente le signal sinusoïdal de fréquence 40HZ et d'amplitude 30V affiché sur l'oscilloscope:

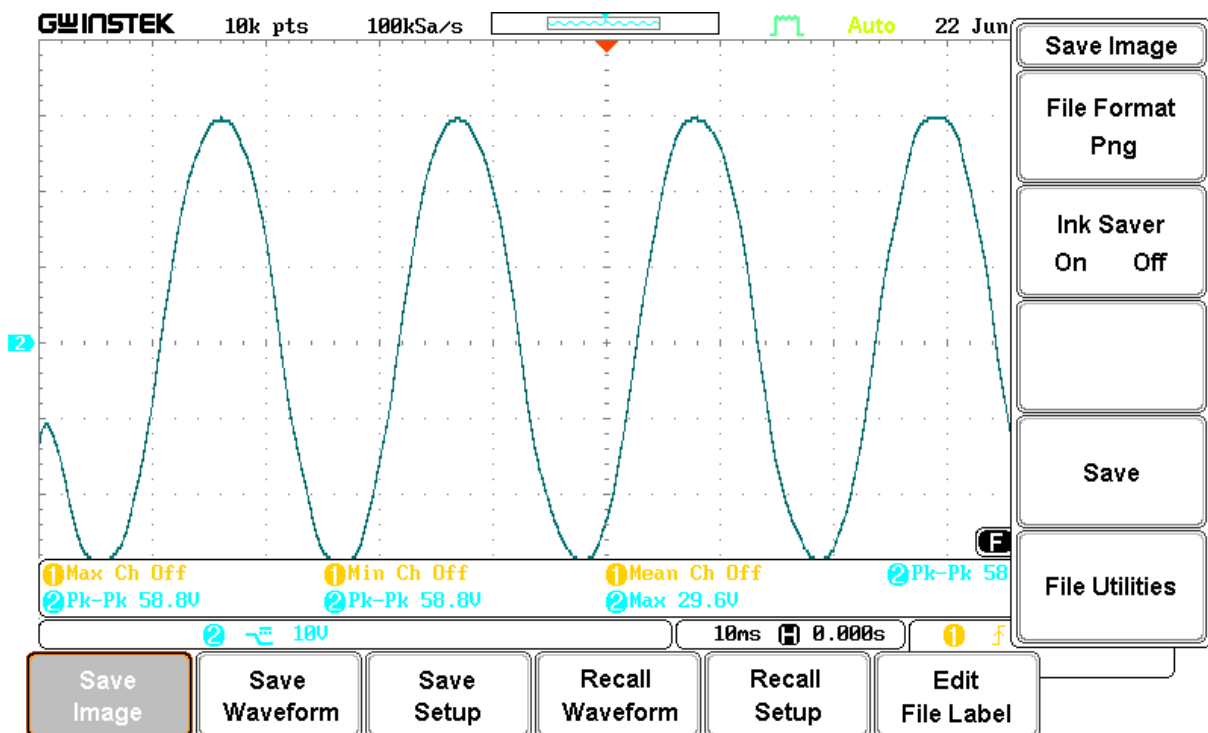


Figure IV.12: Tension alternative (30V/40HZ) en vue de l'oscilloscope.

La figure IV.13 présente le signal sinusoïdal de fréquence 40HZ et d'amplitude 30V affiché sur Matlab:

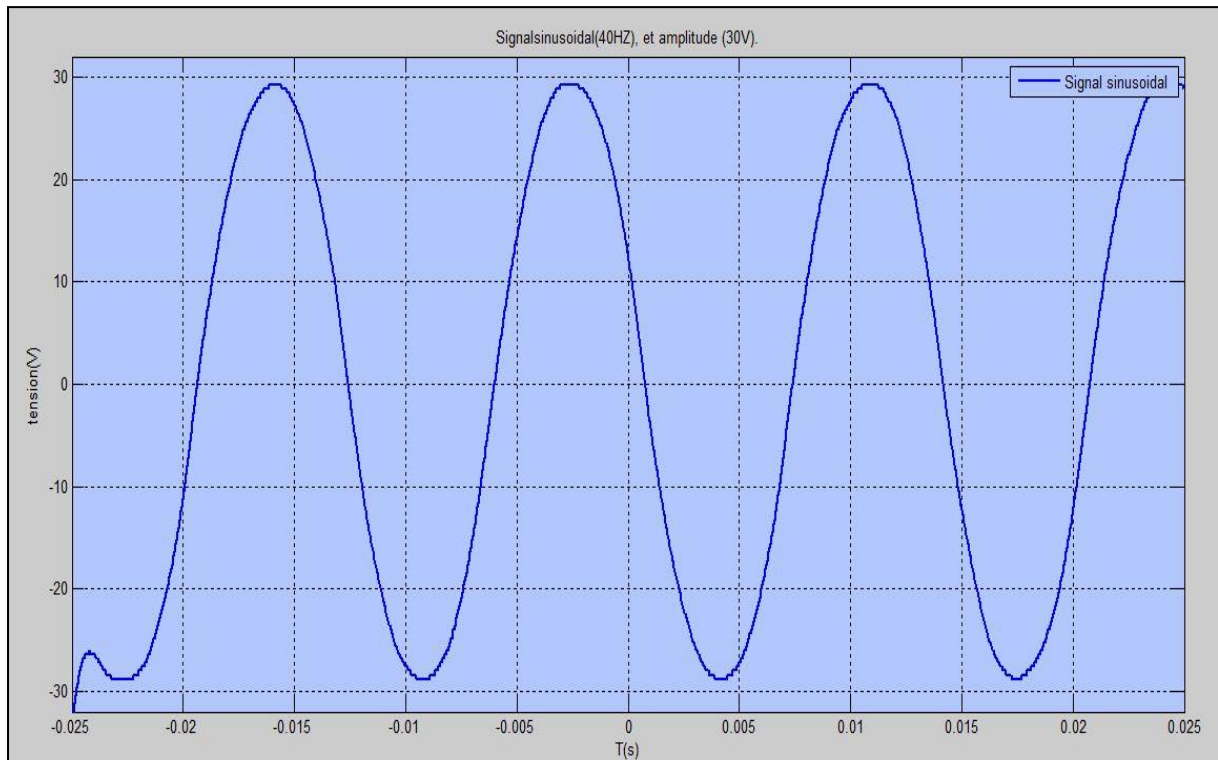


Figure IV.13 : Tension alternative (30V/40HZ) sur Matlab.

On a considéré un autre scenario avec un signal sinusoïdal généré d'amplitude maximale de 30V et une fréquence de 40HZ. Les résultats obtenus sont présentés dans les figures IV.12 et IV.13.

Signal de sortie alternatif sinusoïdal 20V/25HZ :

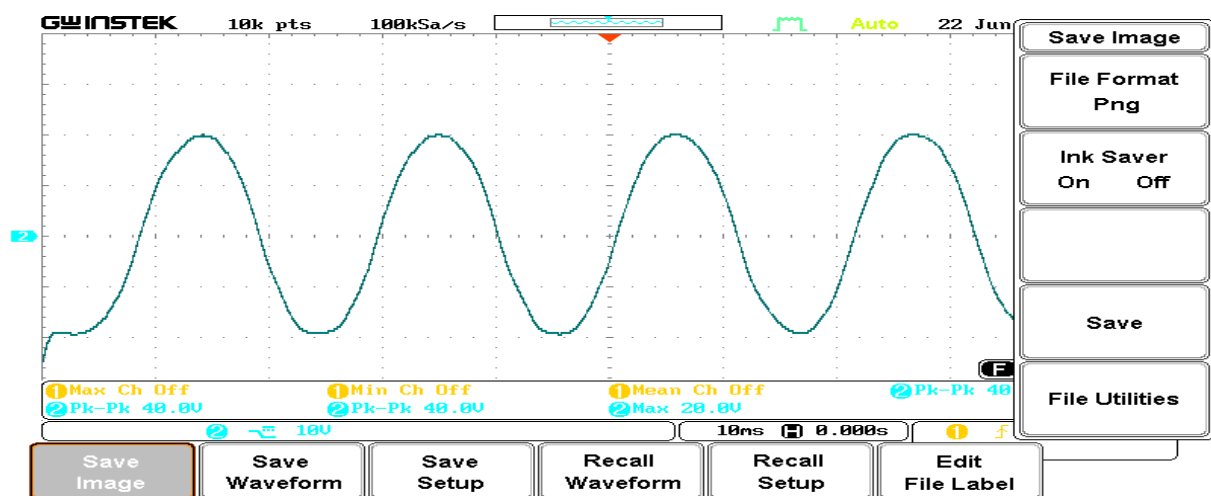


Figure IV.14 : Tension alternative (20V/25HZ) affichée sur l'oscilloscope.

La figure IV.15 présente le signal sinusoïdal de fréquence 25HZ et d'amplitude 20V affiché sur Matlab:

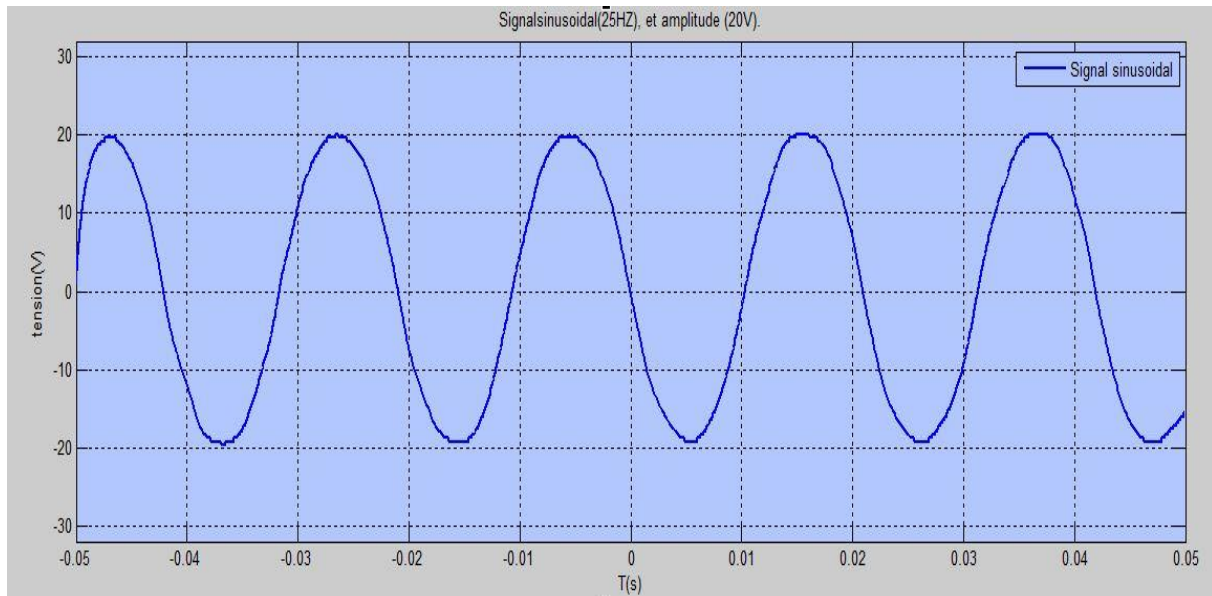


Figure IV.15 :Tension alternative (20V/25HZ) affichée sur Matlab.

On a considéré un autre scenario avec un signal sinusoïdal généré d'amplitude maximale de 20V et une fréquence de 25HZ. Les résultats obtenus sont présentés dans les figures IV.14 et IV.15.

NB : Les résultats des signaux de sortie de l'onduleur présentés dans ce mémoire ont été numériquement filtrés au niveau de l'oscilloscope pour mieux voir la forme des signaux. L'onduleur réalisé ne contient pas de filtre analogique pour filtrer la tension de sortie.

Conclusion :

Ce chapitre a mis en évidence l'importance de la réalisation pratique de l'onduleur, le résultat de cette réalisation confirme bien le principe de fonctionnement de l'onduleur(conversion DC/AC), et ainsi qu'elle montre la validité des résultats de simulation.

Cette étude nous a montré que la connaissance est basée sur l'expérience.

Conclusion Générale

Le système PV nécessite l'utilisation des convertisseurs électriques (Redresseur, Gradateur, Hacheur et Onduleur) afin de transformer la forme continue de générateur PV à une forme alternative (sinusoïdale) exploitable par les utilisateurs.

Ce travail vise à présenter une étude théorique, simulation et réalisation pratique d'un onduleur monophasé commandé par un signal PWM, généré à l'aide d'une carte Arduino UNO. La mise en place de bancs d'essais expérimentaux, au niveau de laboratoire LABSET du Département d'automatique à l'Université Saad DAHLAB Blida 01.

La structure de ce projet de fin d'étude, est organisée en quatre chapitres, dont on a consacré le premier aux généralités sur les convertisseurs statiques, qui sont regroupés en quatre types, chacun d'eux a pour fonction spécifique différente de l'autre, et nous dans notre travail on s'est intéressé par l'onduleur.

Le deuxième chapitre est dédié aux onduleurs et leurs stratégies de commande, dont on a cité les différentes classifications des onduleurs, leurs rôles, ainsi que leurs applications.

Le troisième chapitre, est opté pour la simulation de l'onduleur monophasé, commandé par un signal PWM généré par une carte Arduino UNO, qu'on a effectué sur le logiciel Proteus ISIS, et afin de générer ce signal de commande on a programmé la carte sur l'environnement de programmation IDE (Integrated Development Environment). Et aussi on a présenté quelques essais préliminaires d'un côté pour tester le bon fonctionnement de programme et ainsi que de l'Arduino, et de l'autre côté ces essais ont été comme une introduction et un début pour aborder la réalisation de notre convertisseur qui est d'ailleurs notre but principal.

Comme c'est on a mentionné auparavant que notre objectif est d'arriver à réaliser un onduleur monophasé d'une fréquence réglable, pour cela on a consacré tout un chapitre. Pour élaborer cette réalisation, on a tout d'abord schématisé notre prototype sur le logiciel Eagle, puis passer au routage du circuit (BOARD), pour pouvoir commencer la pratique manuellement et à la fin de ce travail on a pu atteindre notre but et réalisé l'onduleur monophasé comme s'est bien voulu.

On conclut que l'onduleur est un élément indispensable dans le domaine des Energies renouvelables, et nul ne peut nier son importance et indispensabilité, pour pouvoir bénéficier de l'énergie générée par ce secteur, plus précisément celle générée par les champs photovoltaïque.

A la fin, nous proposons comme perspectives :

- Inclure la réalisation du filtre analogique pour le filtrage de la tension de sortie.
- Réaliser un onduleur pour les charges non purement résistive (charge capacitive ou inductive)
- L'étude et la réalisation d'un onduleur en utilisant d'autres stratégies de commande.
- Etude et réalisation d'un onduleur triphasé.

Références Bibliographiques

- [1] *Soltani Ali*, « *Etude et réalisation d'un hacheur Buck destiné à l'implémentation des commandes à base de DSP* », mémoire de master, UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI DE OUM EL BOUAGHI, 2016.
- [2] *Michel Pinard* *convertisseurs et électroniques de puissance ; série /EEA gestion industrielle conception froid et génie climatique mécanique et matériaux chimie environnement et sécurité EEA*. Dunod ; Paris 2007
- [3] *Guy Séguier ; Francis Labrique ; Philippe Delarue ; livre d'Electronique de puissance (structure, commande, application) ; Dunod, Paris, 2004, 2011, 2015 5 rue Laromiguière, Paris 5e ISBN 978-2-10-073975-2.*
- [4] *KEDDARI B. et KOT Y.* « *Modélisation et simulation d'un convertisseur AC-DC triphasé* », mémoire de Master ; université EL OUED ; 2014.
- [5] *A. BOULAHIA* « *étude des convertisseurs statiques destinés à la qualité de l'énergie électrique* »Mémoire de Master ; université de Constantine ; 2009.
- [6] *T. Wildi : Electrotechnique, 3eme édition, éditions de Boeck université (1999)*
- [7] *BABAI HANI BOUALAM* « *commande non linéaire d'un convertisseur multicellulaire* »Mémoire de Master ; université de Biskra ; 2019.
- [8] *AIT SAHED OUSSAMA* « *Fuzzy Predictive Control Using Meta-Heuristic Algorithmes* »Thèse de Doctorat en génie électrique, Université BLIDA1, Décembre 2015.
- [9] *EL IDRISSE Ramzi et SEMLALI Amine AGHMADI Ahmed* « *Réalisation d'un onduleur monophasé autonome commandé par PIC 16F877* » ; école supérieure de technologie Berrechid ; 2014.
- [10] *S. Guy, B. Robert, Labrique Francis, Les convertisseurs de l'électronique de puissance la conversion alternaif (volume 4). Edition tec&doc, 1995.*
- [11] *Guy Séguier, Electronique de puissance « Les formation de base et leurs principales application » 7eme édition Dunod, paris, 1999.*
- [12] *Sébastien Mariéthoz, ingénieur en électronique « Mesure et amélioration des performances des modulateurs multi niveaux » Conférence JCG]*
- [13] *Onduleurs et harmoniques, Cahiers techniques Merlin Gerin N°159*

- [14] *M.Rahal RHAROUSS « cours de Architecture et programmation des Microcontrôleurs BTS ELT »*
- [15] *Onduleur de tension: mise en œuvre et Structures-principes-applications. Techniques d'ingénieur, Traité de génie électrique D.3176-3177.*
- [16] *C. Canudas de Wit, Modélisation, Contrôle vectoriel et DTC. Commande des moteurs asynchrones 1 Editions Hermès.*
- [17] *Commande numérique, régimes intermédiaires et transitoires, Techniques d'ingénieur, traité de génie électrique D.3643-3.*
- [18] *A.P.Malvino, D.J.Bates, Electronic Principles, (Mc Graw-Hill, 2016).*
- [19] *L.Lasne, Electronique de puissance,(Dunod,2015).*

Annexe

```
#include <PWM.h>

Char PWM_Pin = 9;
Char PWM_PinC = 10;

int rapportCyclique = 0;
float stepSinusoid = 0;
float stepSinusoidFinale;
float SortieDesiree = 0;
float tensionEntree = 20;
float rapportCycliquePercentage = 0;
int pas = 1;
int32_t frequency = 20000;
int dead = 5;
int UsePwm1 = 0;
unsigned long PreviousMicro, StartMicro, EndMicro;
int frequenceSortie = 50;
float tempsAttenteMicro;
void setup()
{
    pinMode ( PWM_Pin, OUTPUT);
    pinMode ( PWM_PinC, OUTPUT);

    InitTimersSafe();
    SetPinFrequencySafe ( PWM_Pin , frequency);
    SetPinFrequencySafe ( PWM_PinC , frequency);

    stepSinusoideFinale = 50;
    tempsAttenteMicro=(float)1000000/(float)frequenceSortie/(float)stepSinusoideFinale;
}
```

```

void loop()
{
  StartMicro = micros();

  stepSinusoid = stepSinusoide + 1;
  if (stepSinusoide == stepSinusoidFinale)
  {
    stepSinusoide = 0;
  }
  SortieDesiree = tensionEntree * sin(6.28 * (float)stepSinusoide/ stepSinusoidFinale );

  if (SortieDesiree < 0)
  {
    SortieDesiree = -1 * SortieDesiree;
    UsePwm1 = 1;
  }
  else
  {
    UsePwm1 = 0;
  }
  rapportCycliquePercentage = (SortieDesiree;) / (tensionEntree);

  rapportCyclique = 255.0 * rapportCycliquePercentage;
  if (rapportCyclique > 255)
  {
    rapportCyclique = 255;
  }
}

```

```
if (rapportCyclique < 0)
{
    rapportCyclique = 0;
}
if (UsePwm1 == 1)
{
    pwmWrite (PWM_Pin, rapportCyclique ); //rapportCyclique);
    pwmWrite (PWM_PinC, 0); //, rapportCyclique-dead);
}
else
{
    pwmWrite (PWM_Pin, 0); //rapportCyclique);
    pwmWrite (PWM_PinC, rapportCyclique); //, rapportCyclique-dead);
}
EndMicro = micros ();

While (EndMicro - STARTMicro < tempsAttenteMicro)
{
    EndMicro = micros ();
    DelayMicroseconds(1);
}
```

Liste des composants

Transformateur (220V/18V).

Pont de diodes (1N4007).

Condensateurs (1000 μ F 50V et 100 μ F 50V).

Régulateurs 7815 et 7805.

Résistances (10KOhm ,680KOhm, 220Ohm).

Drivers TLP250.

MOSFET IRFZ44N.

Fusible 1A.

Arduino UNO.

Files électriques.