

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

Spécialité : Electromécanique

## *Mémoire de fin d'études*

En vue de l'obtention du diplôme de Master en électromécanique

Thème :

*Étude et réalisation d'un onduleur  
monophasé*

Réalisé par :

✚ Mr Bakhouche abderrazek

✚ Mr Boufadene Idir

Encadré par :

Mr S.TARAFT

Année universitaire : 2021-2022

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

Spécialité : Electromécanique

## *Mémoire de fin d'études*

En vue de l'obtention du diplôme de Master en électromécanique

Thème :

*Étude et réalisation d'un onduleur  
monophasé*

Réalisé par :

✚ Mr Bakhouche abderrazek

✚ Mr Boufadene Idir

Encadré par :

Mr S.TARAFT

Année universitaire : 2021-2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# *Remerciements*

*Nos remerciements vont tout d'abord, à Dieu le Tout-Puissant de nous avoir donné le courage pour réaliser ce travail.*

*En préambule à ce mémoire, nous souhaiterions adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à son élaboration, ainsi qu'à la réussite de cette année universitaire des plus remplies.*

*La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes auxquelles nous voudrions témoigner toute notre reconnaissance.*

*Notre gratitude va tout d'abord à notre promoteur Monsieur **S. TARAFI**, qui nous a honorés de sa confiance, en nous acceptant d'être ses disciples.*

*Aussi, nous tenons à sincèrement remercier, Monsieur **B. FELLA**, s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de cette étude, ainsi que pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu nous consacrer.*

*Pour finir, il nous est plus qu'agréable de réserver l'expression de notre gratitude et nos remerciements les plus particuliers, aux membres de nos familles respectives qui ont su nous encourager et nous soutenir, durant toute cette année et celles d'avant. Peuvent-ils être fiers de nous*

*Enfin, nous tenons à remercier le président et les membres du jury pour nous avoir fait l'honneur d'évaluer notre travail.*

*- B. Abderrazak & B. Idir -*

# *Dédicace*

*Je tiens à dédier ce modeste travail avant tout :*

*À mes chers parents qui n'ont pas cessé de prier pour moi et m'ont aidé  
durant toute la durée de mes études, que dieu les garde pour nous.*

*À mes frères et toute la famille BAKHOUCHE sans oublier ma nièce  
Sarah.*

*À mes oncles, mes tantes.*

*À tous mes amis intimes et particulièrement : « Idir, Farid,  
Mohammed, abde elbahi ... ».*

*À mon binôme « Idir ».*

*À tous mes collègues de promotion ELM 1.*

*ET à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à accomplir ce travail.*

*- B. Abderrazak -*

# *Dédicace*

*Je tiens à dédier ce modeste travail avant tout*

*À la mémoire de mon père,*

*À ma mère, mes frères et sœurs qui ont su m'encourager tout  
au long de ma vie.*

*À tous les membres de la famille ainsi que nos amis.*

**B. Idir -**

# Sommaire

Introduction Générale.....	1
----------------------------	---

## **Chapitre I** **Généralités sur les onduleurs et leurs Commande**

Introduction.....	4
I.1. Définition de l'onduleur.....	4
I.2. Types d'onduleurs.....	4
I.3. Principe général de fonctionnement.....	5
I.4. Applications des onduleurs.....	6
I.5. Onduleur de tension.....	8
I.6. Onduleur de courant.....	10
I.7. Onduleur à résonance.....	11
I.8. Onduleur de tension triphasé.....	12
I.9. Stratégies de commande.....	12
I.10. Paramètre de performance de l'onduleur.....	15
Conclusion.....	16

## **Chapitre II** **Modélisation de l'onduleur monophasé et leurs commandes**

Introduction.....	18
II.1. Définition de l'onduleur monophasé.....	18
II.2. Principe de fonctionnement d'un onduleur.....	19
II.3. Commande de l'onduleur monophasée.....	24
Conclusion.....	28

## **Chapitre III** **Simulation des techniques de Commande des onduleurs** **Monophasés**

Introduction.....	30
III.1. Commande 180° d'un onduleur monophasé.....	30
III.2. Commande 120° d'un onduleur monophasé.....	32
III.3. Commande à Modulation de largeur d'impulsion (MLI).....	34
Conclusion.....	36

**Chapitre IV**  
**Réalisation et expérimentation de prototype d'onduleur  
monophasé**

Introduction.....	38
IV.1. Composants de l'interrupteur de puissance.....	38
IV.2. Réalisation de la carte de commande et la partie de puissance.....	38
IV.3. Réalisation de l'onduleur (circuit de puissance).....	62
IV.4. Les étapes de conception d'une carte électronique.....	64
IV.5. Résultats des circuits commande dans plaque essais.....	65
IV.6. Description du banc d'essais.....	65
IV.7. Résultats des essais expérimentaux au laboratoire.....	67
Conclusion.....	71
Conclusion Générale.....	73
Liste bibliographie	
Annexes	

## *Liste d'abréviation*

---

### **Liste d'abréviation**

**(V)  $I_{cmax}$**  : Courant maximale (A)

**(V).  $I_s$**  : Courant de sortie de l'onduleur (A).

**AC** : Alternatif Current (Courant Alternatif (CA)).

**C** : Capacité de condensateur (F)

**DC** : Direct Current (courant continu (CC)).

**DC/AC** : Convertisseur (Courant Continue/Courant Alternatif).

**DC/DC** : Convertisseur (Courant Continue/Courant Continue).

**F** : Fréquence (Hz)

**$I_c$**  : Courant efficace (A)

**ICC** : Courant de court-circuit (A).

**$I_{ch}$**  : Courant de la charge (A).

**IGBT** : Insulated Gate Bipolar Transistor (transistor bipolaire à grille isolée).

**MOSFET** : Métal-Oxyde Semi-conducteur Field Affect Transistor.

**$U_c=U_d$**  : Tension efficace (V)

**$U_{cmax}$**  : Tension maximale

**$V_{ch}$**  : Tension de la charge (V).

**$V_{co}$**  : Tension de circuit ouvert (V).

**$V_i=U=E$**  : Tension d'entrée de l'onduleur

**$V_{s+}$**  : Tension de sortie de l'onduleur (V).

**$\omega$**  : La pulsation du courant par rapport a la tension (Rad/s)

**$\varphi$**  : Le déphasage du courant par rapport a la tension (°)

## **Liste des tableaux**

Tableau 1 : Les configurations possibles.....	20
Tableau 2 : Représente les bouches dans un boîtier DIP.....	43
Tableau 3 : Les états logiques de fonctionnement de NE 555.....	45
Tableau 4 : Les différents schémas de base utilisable NE 555.....	49
Tableau 5 : Caractéristique d'optocoupleur.....	51
Tableau 6 : Tableau significatif du driver.....	54
Tableau 7 : Représentation l'Etat bloquée et passante d'une diode.....	59
Tableau 8 : Résistance thermique de IRGPC40F.....	61

## Liste des figures

Figure 1 : Schéma de principe de la conversion continu - Alternative (DC – AC).....	4
Figure 2 : Principe de fonctionnement de l'onduleur autonome.....	5
Figure 3 : K en position (1).....	5
Figure 4 : Tension avec K en position (1) et (2).....	6
Figure 5 : Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone.....	7
Figure 6 : Alimentation de secours.....	7
Figure 7 : Moteur asynchrone d'adhérence au rail.....	8
Figure 8 : Onduleur de tension en pont commande Monophasé.....	9
Figure 9 : Signaux de et forme d'onde des tensions de sortie.....	9
Figure 10 : Onduleur de courant en monophasé.....	10
Figure 11 : Signaux de commande et pont forment d'onde des courants.....	10
Figure 12 : Représentation d'un onduleur triphasé.....	12
Figure 13 : Commande 180°.....	13
Figure 14 : Commande 120°.....	13
Figure 15 : Onduleur monophasé : Symbole et structure de montage d'un onduleur en pont complet.....	18
Figure 16 : L'onduleur hybride ou intelligent.....	19
Figure 17: Les cas possibles de commutation de l'onduleur.....	22
Figure 18 : Le chronogramme de la commande.....	23
Figure 19: Le principe de commande du bras d'onduleur.....	24
Figure 20 : Signal de commande.....	25
Figure 21 : La commande décalée les relations pour les deux modes de fonctionnement sont .....	26
Figure 22 : Principe de la commande MLI interjective.....	27
Figure 23 : Schémas Block sur MATLAB de commande 180° d'un onduleur monophasé .....	30
Figure 24 : Tension de sortie et spectre de commande 180° d'un onduleur monophasé	31
Figure 25 : Courant de sortie et spectre de commande 180° d'un onduleur monophasé...	31
Figure 26 : Schémas Block sur MATLAB de commande 120° d'un onduleur monophasé .....	32
Figure 27 : Tension de sortie et spectre de commande 120° d'un onduleur monophasé...	32
Figure 28 : Courant de sortie et spectre de commande 120° d'un onduleur monophasé...	33

## *Liste des figures*

---

Figure 29 : Schémas bloc de Simulation de la commande MLI d'un onduleur monophasé.....	34
Figure 30 : Tension de sortie avec son spectre pour la commande MLI.....	34
Figure 31 : courant de sortie avec son spectre pour la commande MLI.....	35
Figure 32 : Schéma réel de l'alimentation stabilisée.....	40
Figure 33 : Schéma de l'alimentation proposée sur PROTEUS de 5v.....	40
Figure 34 : Schéma de l'alimentation stabilisé sur PROTEUS de 12v.....	41
Figure 35 : Régulateurs de tension 12V et 5V.....	42
Figure 36 : Schéma fonctionnel de Temporisateur NE 555.....	43
Figure 37 : Schéma bloc simplifié du NE555.....	44
Figure 38 : Le branchement du NE555 en astable.....	46
Figure 39 : Chrono diagrammes de temporisateur NE 555.....	47
Figure 40 : Image de l'optocoupleur HCPL-3120.....	50
Figure 41 : Diagramme fonctionnel d'Optocoupleur.....	51
Figure 42 : Le schéma de branchement d'un optocoupleur sur PROTEUS.....	52
Figure 43 : Brochage du driver IR2112.....	53
Figure 44 : Montage du driver.....	53
Figure 45 : Schéma interne du driver IR2112.....	54
Figure 46 : Brochage de l'inverseur 74CH04.....	55
Figure 47 : Schéma complet de la carte de commande sur PROTEUS.....	56
Figure 48 : Schéma de circuit réel de la carte de commande.....	56
Figure 49 : Représentation symbolique d'un transistor IGBT.....	57
Figure 50 : Symbole et caractéristique d'un transistor IGBT.....	58
Figure 51 : Représentation symbolique d'une diode.....	59
Figure 52 : Caractéristique réelle.....	60
Figure 53 : Caractéristique idéale.....	60
Figure 54 : Schéma et circuit électrique entre jonction silicium et ambiant.....	61
Figure 55 : Dissipateur de chaleur.....	62
Figure 56 : Schéma électrique de l'onduleur sur PROTEUS.....	62
Figure 57 : Images réelles de la carte de puissance.....	63
Figure 58 : Les étapes de conception d'une carte électronique.....	64
Figure 59 : Image réelle de la carte de commande.....	65
Figure 60 : Banc d'essai expérimental.....	66
Figure 61 : L'allure de gâchette 01 (5v/div ,2ms/div).....	67

## *Liste des figures*

---

Figure 62 : L'allure de gâchette 02 (5v/div ,2ms/div).....	67
Figure 63 : L'allure de gâchette 03 (5v/div ,2ms/div).....	68
Figure 64 : L'allure de gâchette 04 (5v/div ,2ms/div).....	68
Figure 65 : L'allure de tension à vide (5v/div ,2ms/div).....	69
Figure 66 : L'allure de tension en charge R (5v/div ,2ms/div).....	69
Figure 67 : L'allure de tension en charge RL (5v/div ,2ms/div).....	70
Figure 68 : L'allure de courant en charge RL (5v/div ,2ms/div).....	70
Figure 69 : L'allure de tension après transformateur (20v/div ,2ms/div).....	71

# *Introducción General*

## *Introduction Générale*

---

Avec le développement industriel, il est devenu une nécessité d'utiliser des machines électriques de puissance de plus en plus forte. Ces machines exigent une forte tension d'alimentation. Les machines électriques étant actuellement alimentées à travers des convertisseurs de puissance, ces dernières doivent être dimensionnées et commandées de manière à supporter des tensions d'alimentation élevées, de qualité convenable [1].

L'avènement de l'électronique de puissance s'est développé considérablement et offre un potentiel énorme pour la conversion d'énergie électrique. La recherche dans ce domaine considère plusieurs aspects, notamment les topologies des convertisseurs, les structures et les performances des interrupteurs de puissance et ainsi que les techniques de commande [2].

Les convertisseurs sont des appareils servant à transformer l'énergie d'une telle forme à une autre. Les convertisseurs continus alternatifs (onduleurs) sont largement utilisés dans les systèmes d'entraînement à vitesse variable surtout dans la commande des moteurs à courant alternatif. La fréquence et la tension de sortie peuvent être constantes ou variables. Ceux-ci peuvent être commandés par de différentes stratégies de commande, afin d'obtenir une meilleure approximation à un signal sinusoïdal [3].

L'amélioration de la forme de la tension de sortie des convertisseurs et la réalisation de l'onduleur triphasé sont l'axe de recherche très actif, qui ne cesse de se développer.

Dans le but de réaliser un onduleur monophasé qui sera bénéfique en pédagogie pour les étudiants de master du département de l'électrotechnique. Nous avons eu l'idée de le réaliser avec des IGBT et en utilisant une carte open source de commande pour le faire.

Afin d'atteindre l'objectif fixé, notre mémoire est organisée en quatre chapitres comme suit :

### ❖ **Le premier chapitre :**

Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à une présentation des structures de base des onduleurs ainsi que leurs types des onduleurs existants, et les applications sont utilisés. Nous rappellerons les stratégies de commande d'un onduleur.

### ❖ **Le deuxième chapitre**

## *Introduction Générale*

---

Dans le deuxième chapitre, nous avons exposé le principe général de fonctionnement de l'onduleur monophasé et l'onduleur triphasé, ainsi que nous avons cité les différentes techniques de commande.

### ❖ **Le troisième chapitre**

Dans le troisième chapitre, une simulation sous MATLAB/Simulink a permis de vérifier les techniques étudiées.

### ❖ **Le dernier chapitre**

Dans le dernier chapitre nous présenterons la partie expérimentale réalisée au laboratoire de l'université de **Bejaia** un onduleur monophasé.

Enfin nous terminerons par une conclusion générale.

# *Chapitre I*

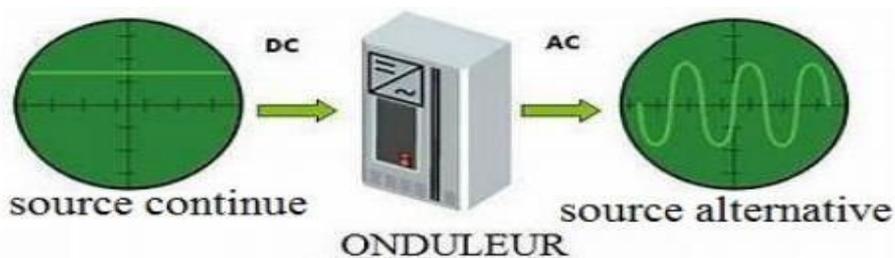
## *Généralités sur les onduleurs et leurs Commandes*

## Introduction

Les convertisseurs statiques (onduleur monophasé) sont utilisés pour transformer l'énergie électrique de manière à l'adapter aux différentes charges. Ces convertisseurs statiques sont constitués d'interrupteurs électroniques à base de semi-conducteurs et d'éléments passifs. Ils permettent le transfert d'énergie avec un bon rendement. Comme les puissances mises en jeu peuvent être importantes, la notion de rendement est essentielle, car plus les pertes sont importantes plus elles sont difficiles à réduire et plus les montages sont onéreux. Pour limiter les pertes, il faut fonctionner en commutation.

### I.1. Définition de l'onduleur

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 01** représente schéma de principe de l'onduleur.



**Figure 01 : Schéma de principe de la conversion continu - Alternative (DC – AC)**

Les onduleurs sont classés en deux grandes catégories :

### I.2. Types d'onduleurs

#### I.2.1. Onduleur autonome

Un onduleur est dit autonome s'il utilise l'énergie d'un circuit auxiliaire propre à lui pour la commutation des thyristors ou l'autre semi-conducteur dans ce cas nous commandons la fréquence la forme d'onde de la tension de sortie. On distingue deux types d'onduleurs autonomes : [4],[7]

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

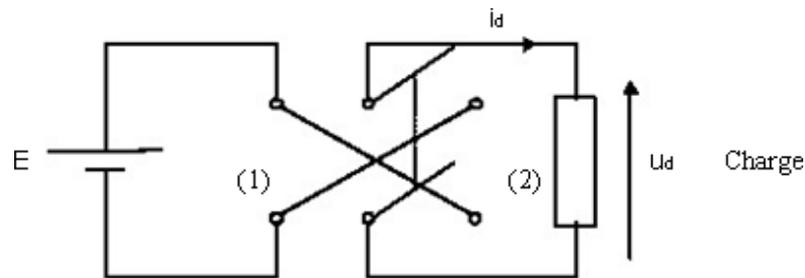
**I.2.2. Onduleur non autonome**

Les composants utilisés peuvent être de simples thyristors commandés uniquement 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, ce type de montage est progressivement supplanté, au profit de convertisseurs à IGBT ou GTO [4][7].

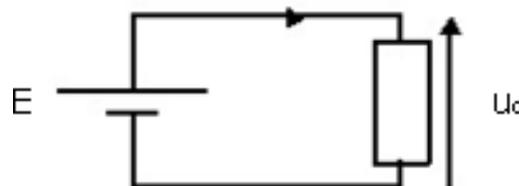
**I.3. Principe général de fonctionnement**

Pour réaliser un onduleur autonome, il suffit de disposer d'un interrupteur inverseur  $K$  et d'une source de tension continue  $E$  comme la montre la **figure 02** :



**Figure 02 : Principe de fonctionnement de l'onduleur autonome**

Lorsque  $K$  est en position (1), on obtient le montage de la **Figure 03** :

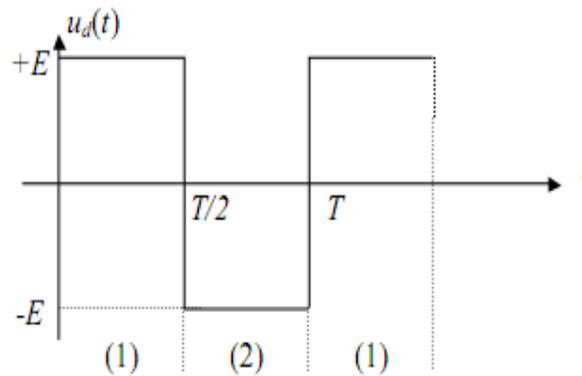


**Figure 03 : K en position (1)**

Soit :  $U_d = E$

Lorsque  $K$  est en position (2), on obtient :  $U_d = -E$ .

Sur la **Figure 04** est montrée la forme de  $U_d(t)$  sur une période complète de fonctionnement.



**Figure 04 : Tension avec  $K$  en position (1) et (2)**

## I.4. Applications des onduleurs

Parmi les nombreux domaines d'emploi des onduleurs autonomes, 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 débouclé actuel des onduleurs autonomes [4][7].

Les onduleurs à fréquence variable à commutation forcée : 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.

### I.4.1. Applications

#### I.4.1.1. 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, alors la **figure 05** est montrée comment réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone.

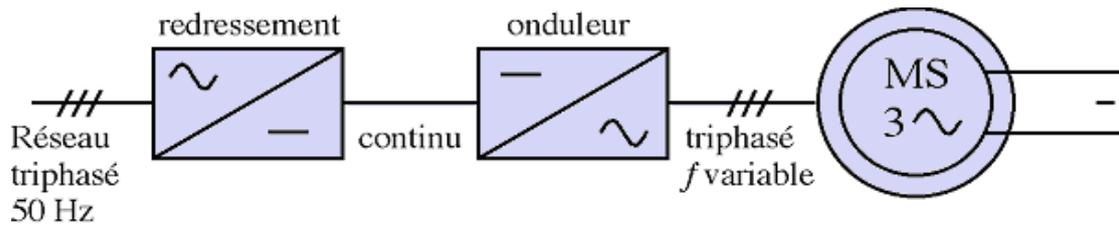


Figure 05 : Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone

**Remarque :** pour que la puissance du moteur reste nominale lorsque la fréquence varie, il faut en fait conserver le rapport  $(f / V)$  constant. (Si la fréquence augmente, il faut augmenter la tension d'alimentation proportionnellement).

#### I.4.1.2. 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 [6].

la Figure 06 représente exemple sur Alimentation de source :

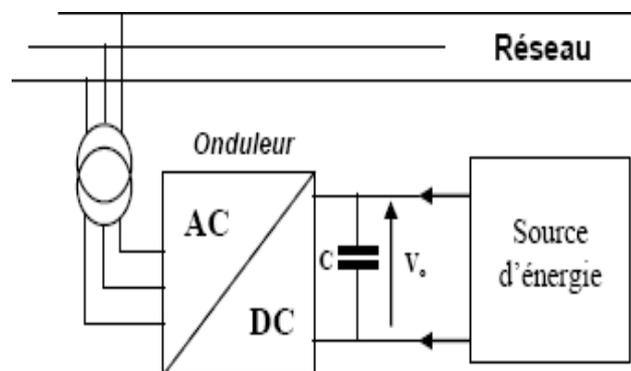


Figure 06 : Alimentation de secours

#### I.4.1.3. Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes

Dans ce cas, l'utilisation des onduleurs permet la connexion entre deux réseaux de fréquences différentes, Il faut donc adapter la fréquence par le billet d'un onduleur.

#### I.4.1.4. Applications relatives aux transports

##### I.4.1.4.1. Transports ferroviaires

Dans ce type de transport, le constituant principal qui crée le mouvement est la machine asynchrone. Pour contrôler la vitesse de rotation de ces dernières, on doit faire varier la fréquence de l'alimentation, cela est réalisé par un onduleur de tension par exemple : **la Figure 07** représente exemple utilisé dans le TGV ou tramway



**Figure 07 : Moteur asynchrone d'adhérence au rail**

##### I.4.1.4.2. Transports aériens

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

##### I.4.1.4.3. Transports maritimes

Comme les transports aériens la production d'énergie nécessaire aux équipements de bord.

#### I.5. Onduleur de tension

On appelle onduleur de tension, un onduleur qui est alimenté par une source de tension continue. Nous présentons le principe des onduleurs de tension dans le cas où la sortie est monophasée et utilisons l'onduleur en pont à quatre interrupteurs : Q1, Q2, Q3 et Q4.

La **Figure 08** représente le circuit de puissance d'un tel onduleur (pont monophasé) et la **Figure 09** représente les signaux de commande et les formes d'ondes des tensions :

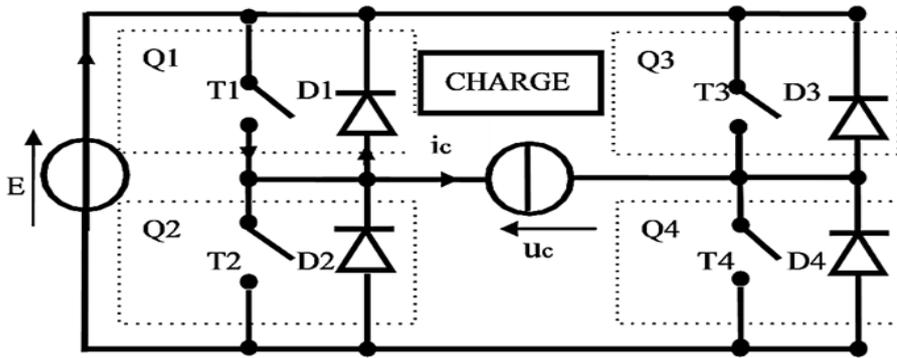


Figure 08 : Onduleur de tension en pont commande Monophasé

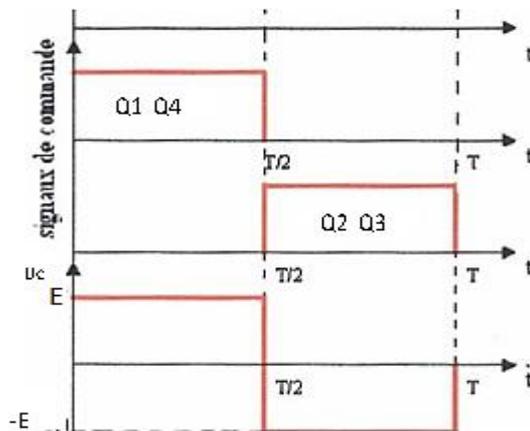


Figure 09 : Signaux de et forme d'onde des tensions de sortie

Les états des interrupteurs commandés nous permettent de donner l'expression de  $U_d(t)$  comme suit : Si la tension d'entrée de l'onduleur est constante et égale à  $U$ , quel que soit  $I$  on a :

Pour  $0 < t < T/2$  : les interrupteurs, Q1, Q4 sont fermés, Q2, Q3 sont et ouverts.  
 D'où  $U_c = +E$  ..... (1.1) :

Pour  $T/2 < t < T$  : les interrupteurs, Q2, Q3 sont fermés, et Q1, Q4 sont ouverts.  
 D'où  $U_c = -E$ ..... (1.2) :

Le courant de la sortie est donc le courant  $I$  à l'entrée, il dépend de la charge placée du côté alternatif

Notant que les interrupteurs  $Q_i$  de l'onduleur ; **figure 09** sont formés par la mise en parallèle d'un semi-conducteur  $T_i$  commandé à l'ouverture et à la fermeture et d'une

diode  $D_i$ . Cette dernière assure la continuité de courant permettant ainsi la conduction d'un courant négatif dans le cas où le courant est déphasé par rapport à la tension de sortie [5],[6].

### I.6. Onduleur de courant

On appelle onduleur de courant, un onduleur qui est alimenté par une source de courant continu. Comme exemple, on prend le montage de la figure ci-dessous illustrant le modèle d'un onduleur de courant monophasé, qui se compose de quatre interrupteurs de puissance  $Q_1, Q_2, Q_3,$  et  $Q_4$  sur la **figure 11** sont représentés les signaux de commande et les formes d'ondes des courants correspondants [5],[6]

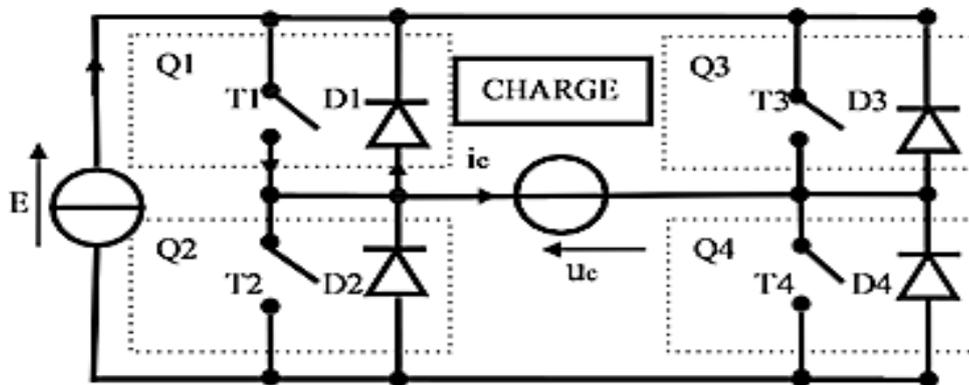


Figure 10 : Onduleur de courant en monophasé

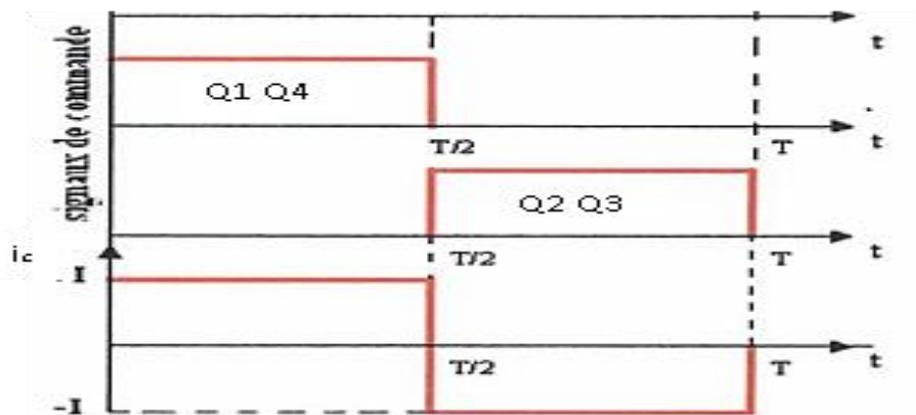


Figure 11 : Signaux de commande et pont forment d'onde des courants

De même, pour l'onduleur de courant, les états des interrupteurs commandés nous

permettent de donner l'expression de  $i_c$ . Si le courant d'entrée de l'onduleur est constant et égal à  $I$ , quel que soit  $U$  :

- Pour  $0 < t < T/2$  : les interrupteurs Q1, Q4 sont fermés, et Q2, Q3 **sont** ouverts

D'où :  $i_c = +I$ ..... (1.3)

- Pour  $T/2 < t < T$  : les interrupteurs, Q2, Q3 sont fermés, et Q1, Q4 sont ouverts

D'où :  $i_c = -I$  .....(1.4)

La tension  $U_d(t)$  de la sortie est donc la tension  $U$  à l'entrée, elle dépend de la charge placée dans le côté alternatif. Dans ce cas ; l'interrupteur est formé d'un semi-conducteur commandé à l'ouverture et la fermeture, il n'a pas à être réversible en courant, alors on n'a pas besoin de diode mise en parallèle.

Parmi les onduleurs de tension ou de courant, on trouve aussi les onduleurs à résonances :

**I.7. Onduleur à résonance**

Ces onduleurs permettent d'imposer le courant ou la tension et la fréquence. Alors, pour le cas particulier où la charge est constituée d'un circuit oscillant peu amorti, on peut commander les interrupteurs à une fréquence très proche de la fréquence de résonance de la charge. Si la charge varie, la fréquence de commande varie. Ce qui signifie que la fréquence de l'onduleur dépend de la charge, il n'est plus non autonome. On distingue deux modèles à résonance [5].[7]

**I.7.1. Onduleur à résonance série**

Celui-ci débite sur un circuit RLC résonant série peu amorti. Dans ce cas, on dispose d'une inductance placée en série dans la charge, pour s'opposer aux discontinuités du courant, donc l'onduleur doit être alimenté par une source de tension.[2].[3].[4]

**I.7.2. Onduleur à résonance parallèle**

Ce dernier débite sur un circuit RLC résonnant parallèle peu amorti. Pour cela, on dispose d'une capacité branchée entre les bornes de la sortie, pour s'opposer à la brusque variation de la tension, donc l'onduleur doit être alimenté par une source de courant continu.

## I.8. Onduleur de tension triphasé

On peut réaliser un onduleur triphasé en regroupant, en parallèle, trois onduleurs monophasés (en pont ou en demi-pont) et commander les interrupteurs de chacun pour obtenir à la sortie trois phases décalées de  $120^\circ$ . En fait, en regroupant trois demi-ponts monophasés, on obtient un onduleur en pont triphasé à six interrupteurs représentés par la **Figure 12** dont les interrupteurs du même bras de l'onduleur doivent être complémentaires pour que la tension continue  $E$  ne soit jamais en court-circuit et pour que les circuits des courants  $i_1$ ,  $i_2$  et  $i_3$  ne soient jamais ouverts.

Afin que les interrupteurs puissent imposer les tensions de sortie, quels que soient les courants de charge, il faut que ces derniers soient bidirectionnels en courant. Chacun d'eux est formé d'un semi-conducteur à ouverture et à fermeture commandées et d'une diode montée en antiparallèle. Ces interrupteurs peuvent être réalisés, suivant la puissance à contrôler, avec des transistors MOS ou bipolaires, des IGBTs ou des GTOS associés à une diode en antiparallèle pour obtenir la réversibilité en courant [5].[6].[7]

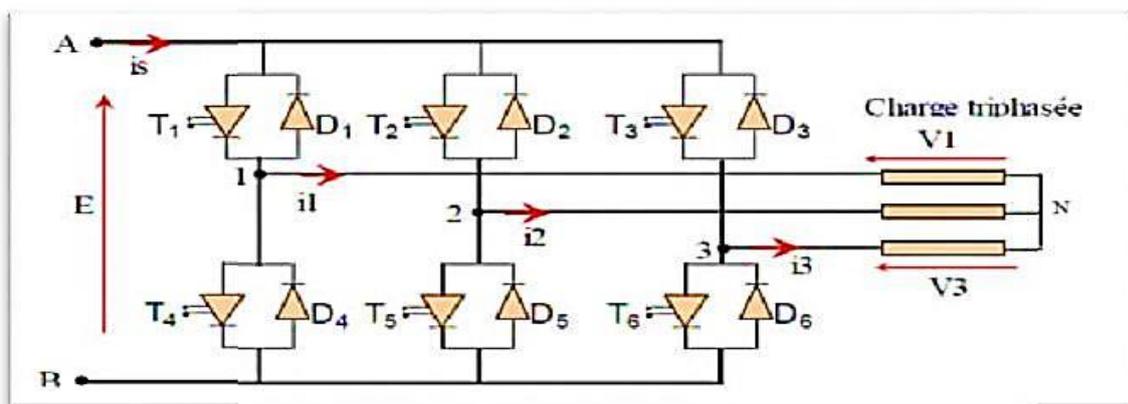


Figure12 : Représentation d'un onduleur triphasé

## I.9. Stratégies de commande

### I.9.1. Commande $180^\circ$

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  $180^\circ$ , **Figure 13**.

Pour le premier bras de l'onduleur, l'interrupteur  $K_1$  est fermé pendant une demi-

période ( $180^\circ$ ), et  $K'_1$  est fermé pendant l'autre demi de la période. Pour les deux autres bras de l'onduleur, on applique la même procédure, mais avec un décalage de  $2\pi/3$  et  $4\pi/3$  par rapport au premier bras [4].[7]

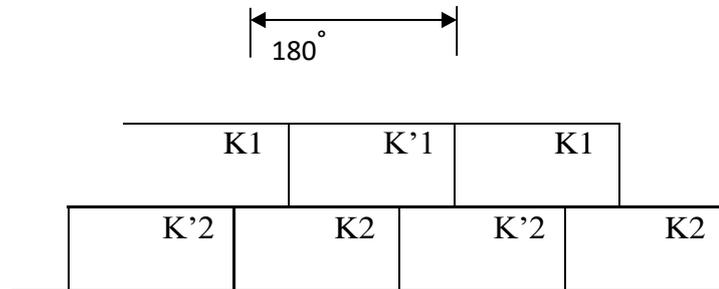


Figure 13 : Commande  $180^\circ$

En appliquant ce type de commande pour l'onduleur, on obtient un système de tensions alternatives triphasées caractérisées par l'absence des harmoniques de rangs multiples de trois.

### I.9.2. Commande $120^\circ$

Dans ce cas la **Figure 14**, 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 de type  $120^\circ$ .

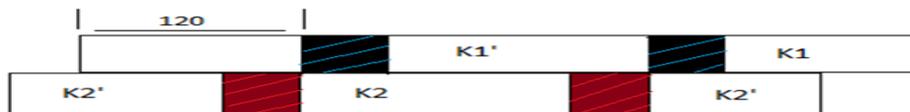


Figure 14 : Commande  $120^\circ$

Avec cette technique de commande, chaque interrupteur fonctionne pendant  $120^\circ$ , telle que la séquence est  $K_1, K_2$ . De même pour les interrupteurs  $K'_1, K'_2$  avec un décalage de  $60^\circ$  par rapport à  $K_1, K_2$ .

### I.9.3. Commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI)

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 cela 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 [5].[6]

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 importants à savoir :

- 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 :

### **I.9.3.1. 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) [6], [8].

### I.9.3.2. 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.

## I.10. Paramètre de performance de l'onduleur

Les sorties d'un onduleur (courant, tension) contiennent certaines harmoniques, et la qualité de l'énergie fournie par un onduleur est évaluée suivant les paramètres de performances suivant :

### I.10.1. Le taux de distorsion

Encore appelé distorsion harmonique totale est défini comme le rapport de la valeur efficace globale des harmoniques (c'est-à-dire leur somme quadratique) à la valeur efficace de la composante fondamentale. Il peut s'appliquer soit au courant ou à la tension.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_{neff}^2}}{V_{1eff}} \quad (1.1)$$

### I.10.2. Le facteur de la n<sup>ième</sup> harmonique HF<sub>n</sub>

C'est la mesure de la contribution individuelle des harmoniques défini comme suit :  
 $V_{effn}/V_{eff1}$

$V_{effn}$  : valeur efficace de la n<sup>ième</sup> harmonique.  $V_{eff1}$  : valeur efficace de la fondamentale.

**Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté la théorie sur les onduleurs, sa constitution physique élémentaire, leurs principales applications et nous avons présentées différentes structures des onduleurs.

Nous avons consacré notre étude aux onduleurs de tension et courant, et les différentes stratégies de commande d'un onduleur.

## *Chapitre II*

### *Modélisation de l'onduleur monophasé et leur commande*

## Introduction

Dans le domaine de l'électronique de puissance, il y a un dispositif important. Il est le constituant principal de la plupart des variateurs de vitesse des machines à courant alternatif, il s'appelle l'onduleur.

Dans ce chapitre nous allons étudier le principe de fonctionnement de l'onduleur monophasé.

Dans le cadre de cette étude, nous établissons le modèle mathématique de l'onduleur monophasé.

Par ailleurs, le développement des techniques plaines ondes et modulation de largeur d'impulsion MLI comme stratégie de commande des onduleurs.

### II.1. Définition de l'onduleur monophasé

L'onduleur est un convertisseur statique permettant de fabriquer un échange d'énergie entre une source de tension continue fournie par une batterie ou un redresseur, et une source de tension alternative pour alimenter des charges en courant alternatif. Cette fonction est schématisée sur la **Figure 15**. [10] La forte évolution de cette fonction s'est appuyée, d'une part sur le développement des composants à semi-conducteur entièrement commandable, puissant et robuste et rapide, et d'autre part, sur l'utilisation quasi-généralisée des techniques dites de modulation de largeur d'impulsion [10], ainsi que le progrès réalisé dans le domaine du micro-informatique.

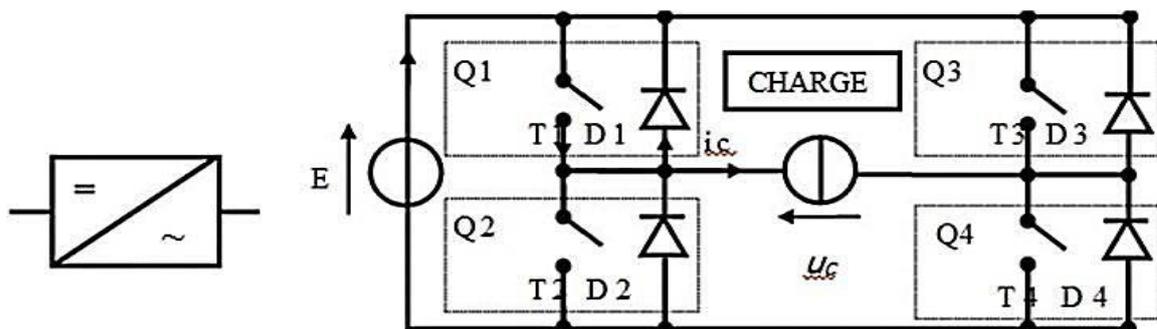


Figure 15 : Onduleur monophasé : Symbole et structure de montage d'un onduleur en pont complet

On notera que :

T1, T2, T3, T4 : Transistors de puissance. D1, D2, D3, D4 : Diodes de puissance.

Q1, Q2, Q3, Q4 : Transistors avec une diode antiparallèle.

E : Tension continue.

$u_c, i_c$ : La tension et le courant de la charge.

La **Figure 15** rappelle le schéma symbolique de l'onduleur et le montage d'un onduleur en pont complet. Le montage consiste deux bras chaque bras est composé de deux étages d'interrupteurs. Chaque étage comporte deux composants semi-conducteurs (transistors IGBT ou MOSFET) avec une diode en antiparallèle. Les diodes antiparallèles sur les transistors assurent la réversibilité des courants dans la charge. À partir de la source principale de tension continue, l'onduleur permet d'avoir une tension plus proche de la sinusoïde à la sortie.

## **II.2. Principe de fonctionnement d'un onduleur**

Un onduleur est un dispositif électronique assurant la conversion statique d'une tension/courant continu en tension /courant alternatif. Il est dit autonome s'il assure de lui-même sa fréquence et sa forme d'onde. Deux types d'onduleurs sont donc utilisés pour assurer une telle conversion Onduleur monophasé. Onduleur triphasé.

### **II.2.1. Onduleurs hybrides ou intelligents**



**Figure 16 : L'onduleur hybride ou intelligent [11]**

Les onduleurs hybrides ou intelligents sont une nouvelle génération dédiée aux applications d'énergie renouvelable pour l'autoconsommation et en particulier pour les panneaux solaires photovoltaïques (onduleur solaire). L'énergie des panneaux solaires photovoltaïques est active seulement pendant la journée et essentiellement lorsque le Soleil est au zénith [11].

**II.2.2. Principe de fonctionnement d'un onduleur monophasé**

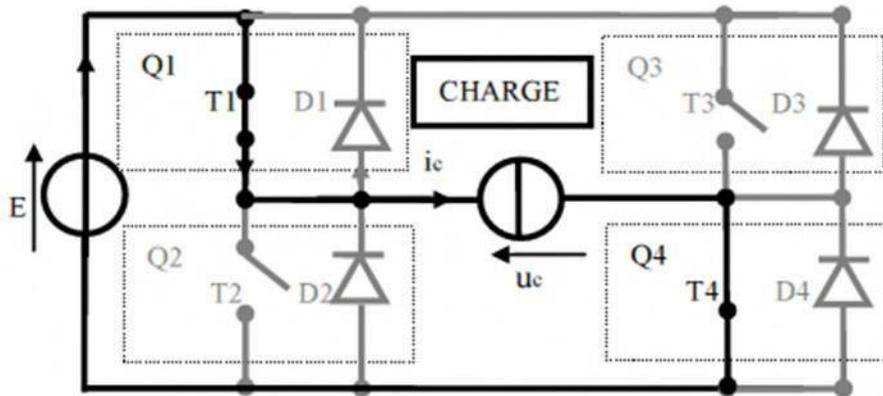
L'onduleur en pont est représenté en Tableau 1, il comporte quatre interrupteurs de puissance désignés par Q1, Q2, Q3 et Q4. L'analyse de cette structure montre à l'évidence qu'il est possible d'imposer aux bornes de la source de courant  $i$  une tension aussi bien positive que négative. Le tableau des données I. 1 permet d'en infliger ou ils ne sont considérés que les états respectifs des interrupteurs qui ne violent aucune des règles fondamentales définissant les états bloqués ou passent des interrupteurs au sein d'un bras de commutation.

**Tableau 1: Les configurations possibles**

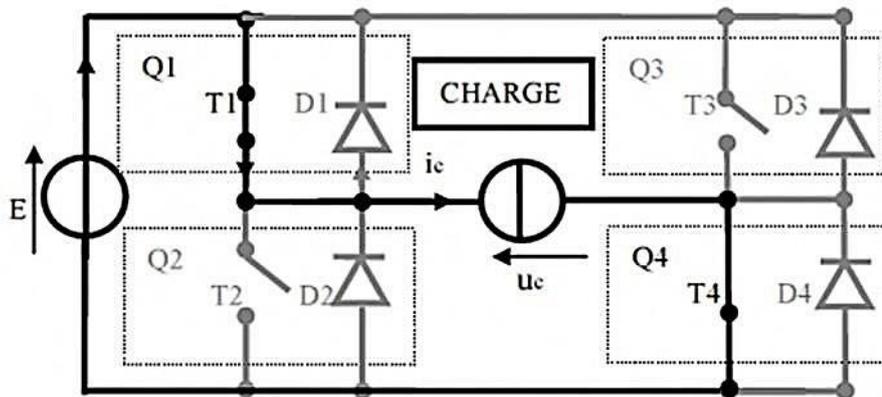
	Bras 1		Bras 2		Tension $U_c$
	Q1	Q2	Q3	Q4	
<b>Cas 1</b>	Passent	Bloqué	Passent	Bloqué	$U_c=0$
<b>Cas 2</b>	Passent	Bloqué	bloqué	Passent	$U_c=E$
<b>Cas 3</b>	Bloqué	Passent	Passent	Bloqué	$U_c=-E$
<b>Cas 4</b>	Bloqué	Passant	bloqué	Passent	$U_c=0$

On doit noter qu'une telle structure permet d'imposer en fait trois niveaux de tension, à savoir  $u_c= E$ ,  $u_c= -E$  ainsi que,  $u_c= 0$ , ce dernier niveau de tension correspond à une phase de roue libre, sans échange d'énergie entre les deux sources. Suivant le type de commande adopté, ce troisième niveau peut être ou non mis à contribution [10] (Tableau 1).

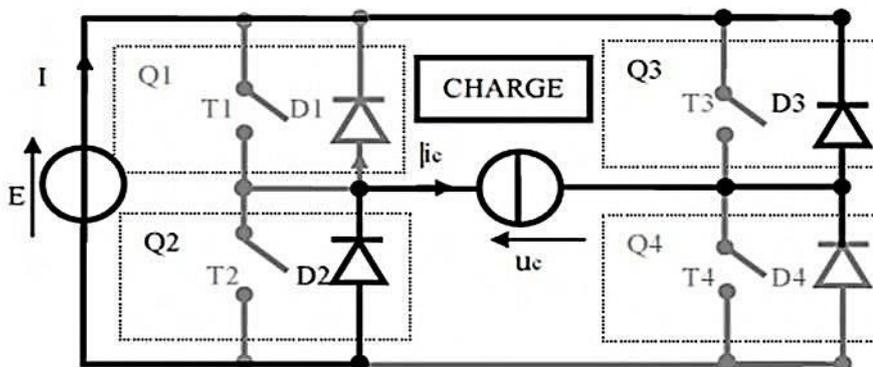
Avec cette commande, il y a enchaînement de quatre mailles de conduction :



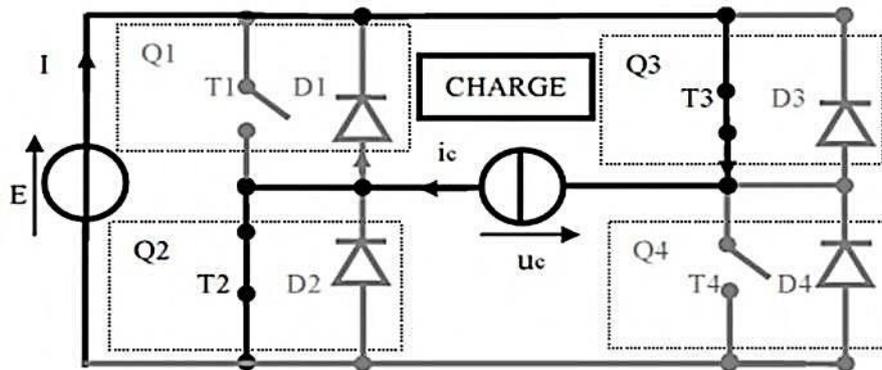
Cas n°1 : Accumulation alternance positive



Cas n°2: Restitution alternance négative



Cas n°3: Accumulation alternance négative



Cas n°4 : Restitution alternance positive

Figure 17 : Les cas possibles de commutation de l'onduleur

On notera d'emblée la différence de notation suivant que l'on considère les grandeurs électriques sottes continues ou bien côtés alternatifs :

- Côté continue : les grandeurs (E et I) sont notées en lettre majuscule pour caractériser leur nature continue.
- Côté alternatif : les grandeurs (uc, ic) sont notées en lettre minuscule pour Caractériser leur nature alternative.

$$uc = U_{cmax} \sin \omega t \quad (2.1)$$

tel que :  $U_{cmax} = \sqrt{2}uc$

$$ic = I_{cmax} \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.2)$$

tel que :  $I_{cmax} = \sqrt{2}ic$

Avec :

**Ucmax, Icmax:** Les valeurs max de la tension et courant.

**uc,ic:** Les valeurs efficaces de la tension et courants.

**$\omega, \varphi$  :** la pulsation et le déphasage du courant par rapport à la tension.

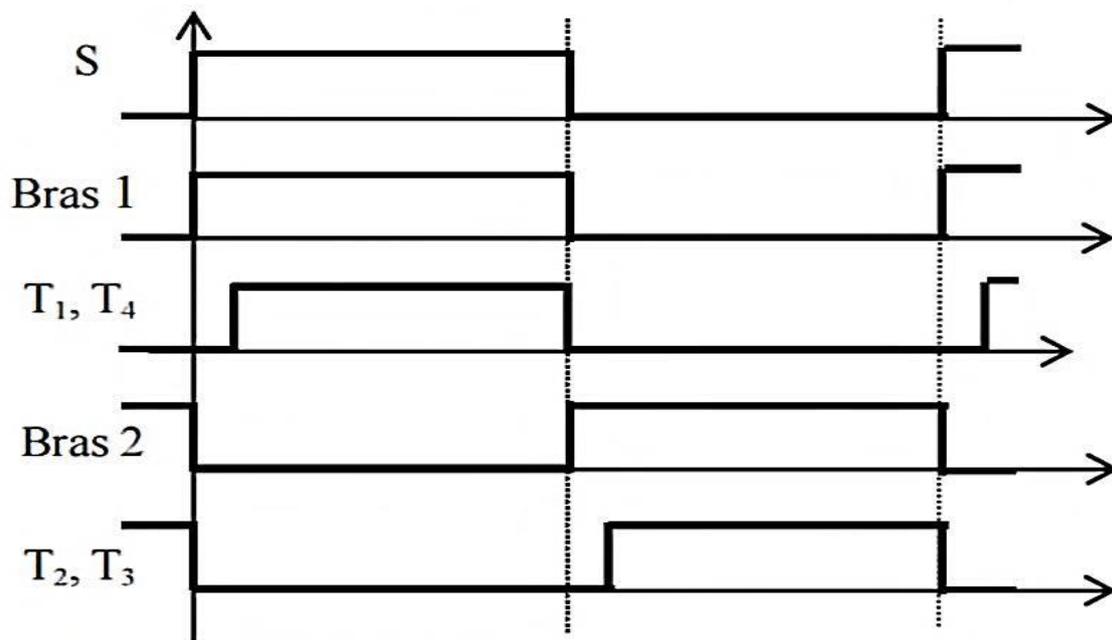
On utilise pour l'explication de la commande plaine onde, T2 et T3 sont commandés en même temps, saturés pendant l'alternance positive et bloqués pendant l'alternance négative. De même pour T1 et T4, bloqués pendant l'alternance positive et saturés pendant l'alternance négative.

**Remarque :**

L'état de l'interrupteur Q1 est lié à l'état de l'interrupteur Q4 : ils seront passants et bloqués simultanément.

L'état de l'interrupteur Q2 est lié à l'état de l'interrupteur Q3 : ils seront passants et bloqués simultanément.

En reprenant les notations ci-dessus, on peut écrire :  $S = \text{Bras 1} = \text{l'inverse du Bras 2}$ , où S est le signal de synchronisation. On obtient le chronogramme de commande **Figure 18** ci-dessous :



**Figure 18 : Le chronogramme de la commande**

- On remarque que, c'est une commande complémentaire.
- On remarquera, en début d'alternance un temps mort (retard à la saturation des transistors) permettant au transistor conduisant précédemment de se bloquer.
- On remarquera que ce sont les blocages des transistors qui délimitent les alternances.

Le signe de l'alternance est déterminé par le signe de  $u_c$ .

- Chaque alternance débute par une phase de restitution et se termine par une phase d'accumulation.

– Les mailles dans les cas 1 et 4 ont même équation :

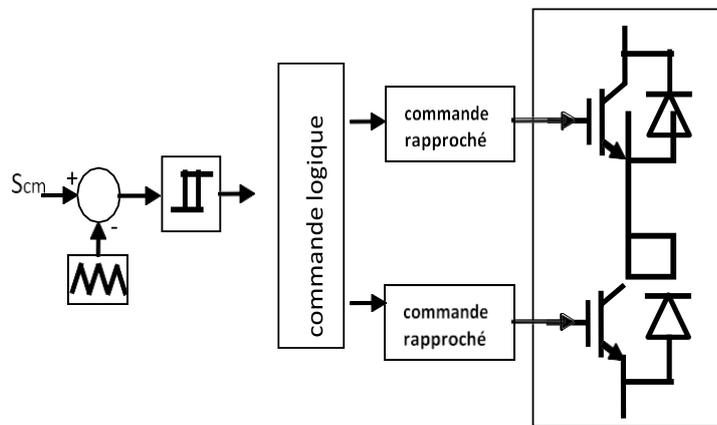
$$L \frac{di}{dt} + R.i = uc = +E1 \quad (2.3)$$

– Les mailles dans les cas 2 et 3 ont même équation

$$L \frac{di}{dt} + R.i = uc = -E1 \quad (2.4)$$

### II.3. Commande de l'onduleur monophasée

On peut, à présent, envisager les différentes commandes possibles pour un onduleur de tension monophasée. Le principe de commande d'un onduleur monophasée présenté sur la **Figure 19** valable pour un bras de commutation.



**Figure 19 : Le principe de commande du bras d'onduleur**

Le principe de la commande est de comparer un signal de modulation à un signal de type « triangle » ou « dent de scie » notée  $S_p$  appelé la porteuse. Le résultat de cette comparaison crée un signal de commande pour les gâchettes des interrupteurs (MOSFET ou IGBT) d'une façon complémentaire. Dans ce cas, doit donc être selon tout logique de doubler la chose pour obtenir la commande de deux bras de commutation. La commande décrite ici est sous sa forme la plus complexe, dans la mesure où les deux bras de commutations de convertisseur peuvent être commandés de manière indépendante. Quand bien même la porteuse est identique pour les deux bras, deux signaux de commandes indépendants sont générés pour commander les deux bras.

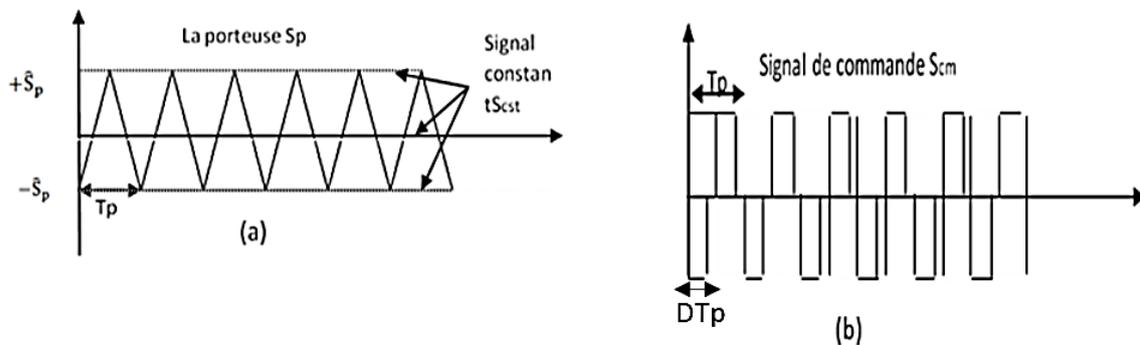
Pour un onduleur de tension monophasée, on distingue principalement deux types de modulation :

- Les modulations à rapport cyclique fixe (plaine onde, décalée), ou le rapport cyclique de chacune des cellules de commutation est maintenu constant.
- Les modulations de largeur d'impulsion (MLI), où le rapport cyclique est variable, sinusoidalement pour un grand nombre d'applications [14].

**II.3.1. Commande à rapport cyclique fixe**

**II.3.1.1. Commande plaine onde**

Les commandes sont déduites de la comparaison entre le signal constant  $S_{cst}$  et de porteuse  $S_p$  **Figure 20** (a), Le résultat de cette comparaison donne un signal de commande  $S_{cm}$  **Figure 20** (b).



**Figure 20 : Signal de commande**

Tout croisement des signaux de  $S_{cst}$  avec la porteuse  $S_p$  se traduit par un changement de l'état des interrupteurs du bras de commutation.

$S_{cst} \geq S_p$  l'interrupteur Q1 amorcé, Q2 bloqué.  $S_{cst} \leq S_p$  l'interrupteur Q2 amorcé, Q1 bloqué.

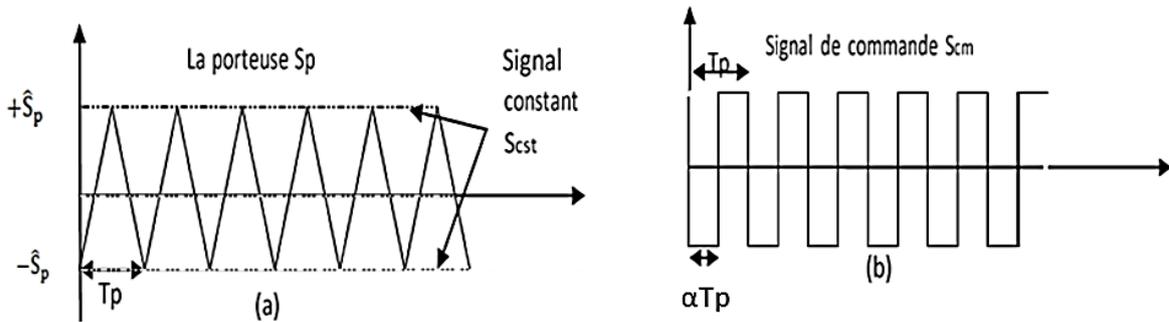
On donne la tension de la charge  $u_c$  a pour valeur moyenne :

$$u_{cmoy} = T[E\alpha T - E(1 - \alpha)T] = (2\alpha - 1)E \tag{2.5}$$

Avec  $\alpha$  = rapport cyclique, détermine donc, la valeur moyenne de la tension  $u_c$ .

**II.3.1.2. Commande décalée**

La **Figure 21** représente la modulation  $+E/0 (+\alpha)$  et la modulation  $-E/0 (-\alpha)$



**Figure 21 : La commande décalée les relations pour les deux modes de fonctionnement sont :**

$$u_{cmoy} = +E\alpha \quad (2.6)$$

$$u_{cmoy} = -E\alpha \quad (2.7)$$

Ces relations traduisent bien que le fonctionnement dans les quatre quadrants soit obtenu par le mode de contrôle de la grandeur  $\alpha$ .

### II.3.2. Commande à rapport cyclique variable

#### II.3.2.1. MLI interjective (sinus-triangle)

Les commandes sont déduites de la comparaison entre le signal variable  $S_{var}$  (sinusoïdale d'amplitude variable et de fréquence  $f$  qui détermine la fréquence de la tension de sortie) et de porteuse  $S_p$  (triangulaire d'amplitude fixe et de fréquence très élevée). Le résultat est un chronogramme de commande  $S_{cm}$  (**Figure 22**).

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) [15].[16]

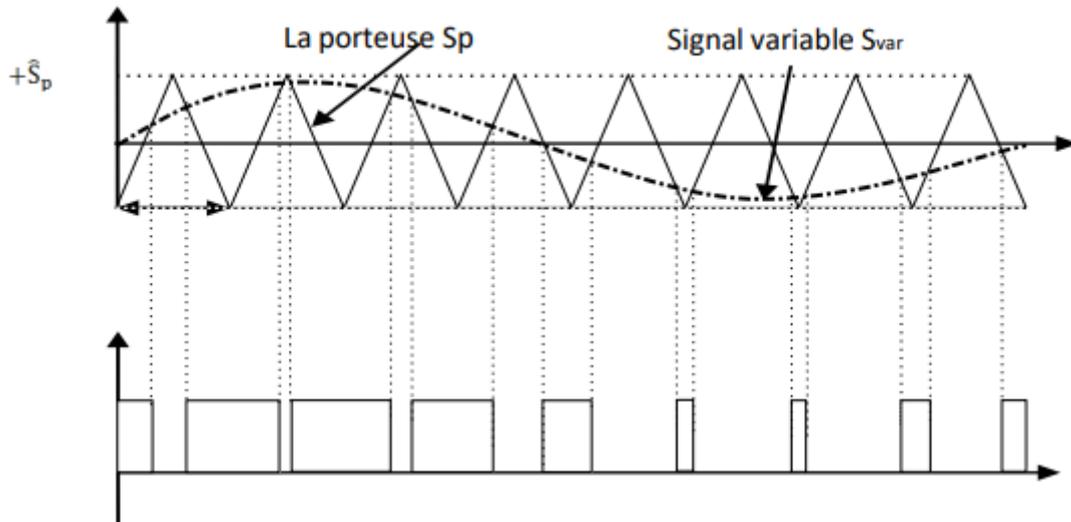


Figure 22 : Principe de la commande MLI interjective

- Les paramètres caractérisant de la commande MLI

L'indice de modulation  $m$  :  $m = \frac{f_p}{f_r}$

$f_p$  : fréquence de la porteuse,  $f_r$  : fréquence de la référence.

L'indice de modulation  $m$  est choisi de telle manière que l'amplitude du fondamental de la tension de sortie se rapproche de celui du signal de référence.

Le coefficient de réglage  $r$  :  $r = \frac{U_{rmax}}{U_{pmax}}$ . la valeur de  $r$  est choisie pour maximiser le fondamental et minimiser les harmoniques.

$f_p, U_{pmax}$  : La fréquence et l'amplitude de la porteuse.

$f_r, U_{pmax}$  : La fréquence et l'amplitude de référence

Tension efficace :  $U = r \times \frac{E}{2 \times \sqrt{2}}$

Résidu d'harmonique de la tension composée :  $THDU = \sqrt{1 - \frac{r^2}{2}}$

## **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons étudié le modèle mathématique de l'onduleur monophasé, ainsi que nous avons exposé le principe général de fonctionnement de l'onduleur monophasé.

Dans le chapitre suivant nous allons faire la simulation de l'onduleur monophasé.

## *Chapitre III*

# *Simulation des techniques de Commande des onduleurs monophasés*

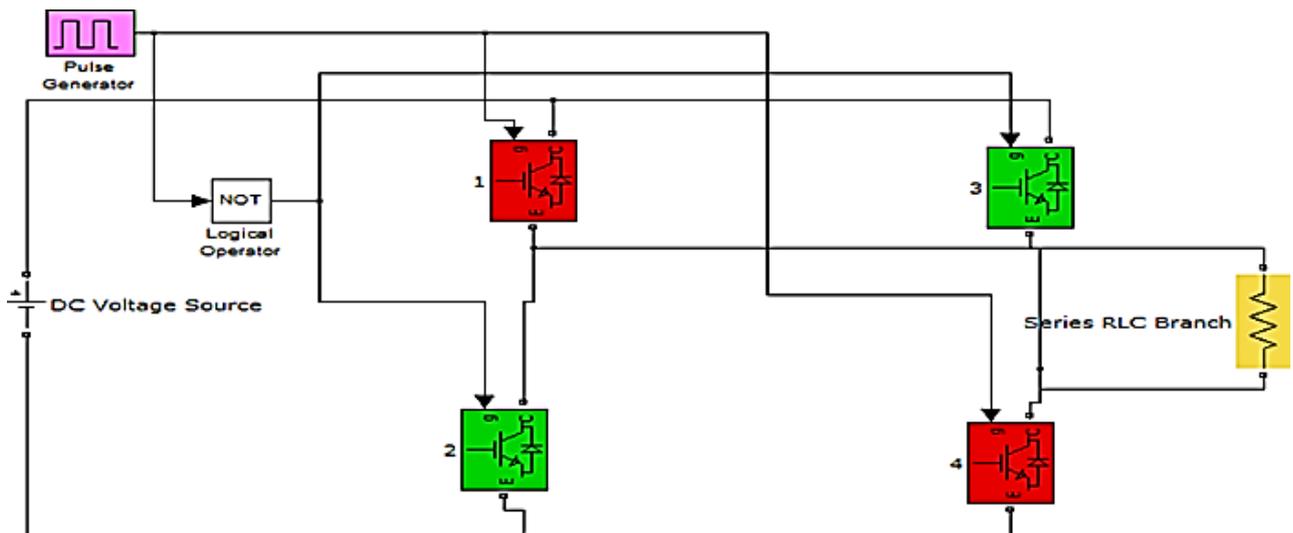
## Introduction

Dans ce chapitre nous utilisons la partie de programme Matlab/Simulink pour simuler l'ondeur avec commande 180 et commande 120 et commande Modulation de Largeur D'impulsion (PWM) avec l'objectif de générer à la sortie de l'ondeur une tension sinusoïdale ayant le moins d'harmoniques possible.

La simulation du système à J'aide de MATLAB/SIMUUNK est tout à fait justifiable en raison de ses divers

Avantages uniques comme la facilité et l'efficacité de programmation élevées, l'interface graphique élégante et son architecture ouverte permettant l'adaptation à un grand nombre de cas.

### III.1. Commande 180° d'un onduleur monophasé



**Figure 23 : Schémas Block sur MATLAB de commande 180° d'un onduleur monophasé**

Avec une charge résistive : Nous avons choisi  $R = 100\Omega$  et  $E = 100V$

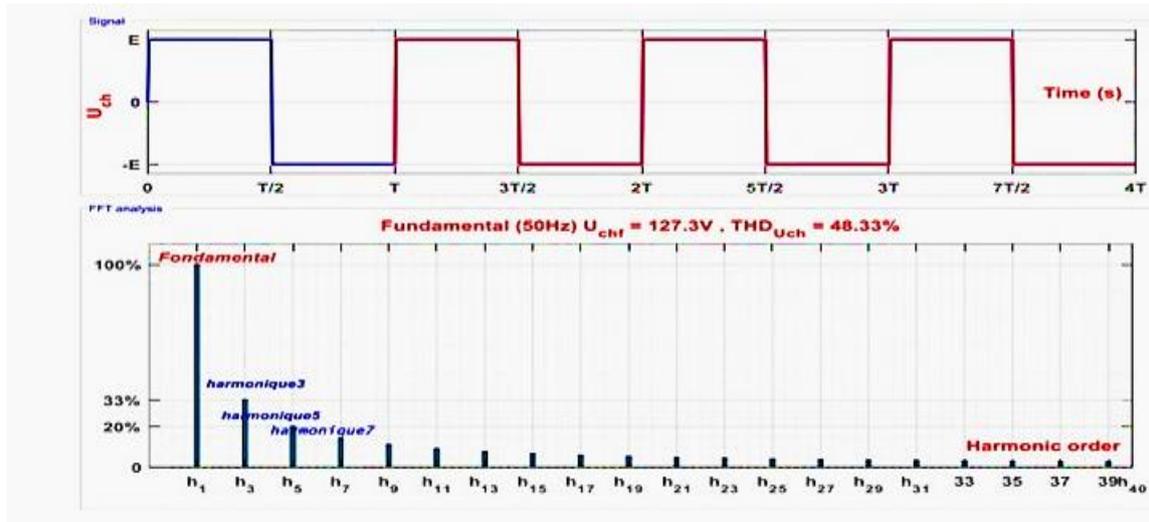


Figure 24 : Tension de sortie et spectre de commande 180° d'un onduleur monophasé

**Interprétation des résultats :** La tension de sortie est très riche en harmoniques de rang faible et donc de fréquence basse, la composante fondamentale selon son expression  $U_{chmax} = 127.32V = 4E/\pi$  Mais le taux de distorsion  $THDV_{ch} = 48.33\%$ . Puisque la charge est purement résistive, alors que le THD de courant de la charge a la même valeur 48.33%, Comme le montre la figure ci-dessus.

**Avec une charge inductive RL :** On ajoute maintenant une bobine  $L=5H$  pour cette charge, comme illustré à la figure ci-dessous.

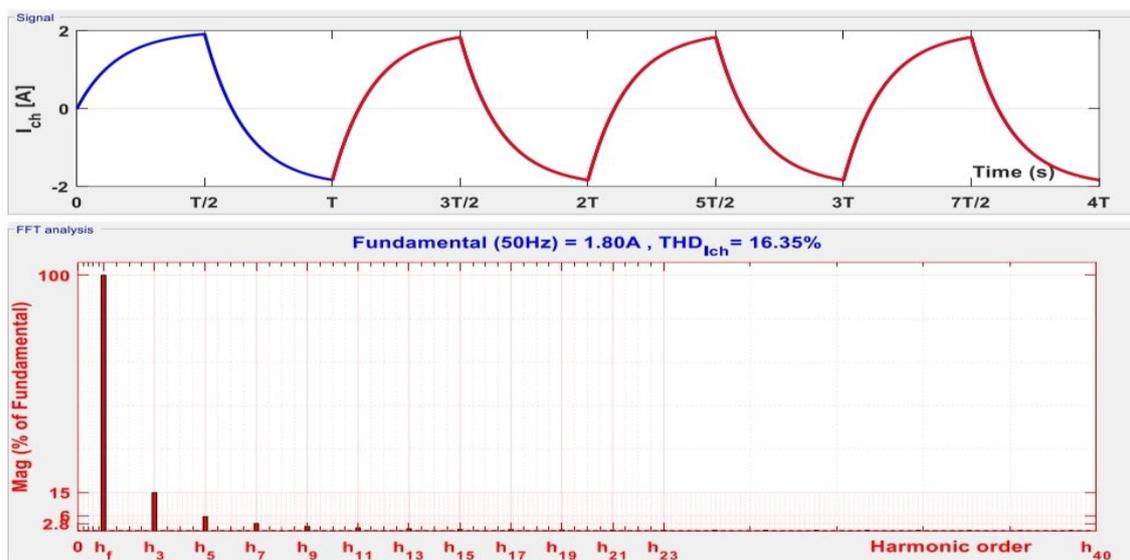


Figure 25 : Courant de sortie et spectre de commande 180° d'un onduleur monophasé

**Interprétation des résultats :** Pour l'allure de courant, la courbe ne prend pas la forme des créneaux, mais il a une forme exponentielle. Pour le THD =16.35%, Comme le montre la figure ci-dessus.

### III.2. Commande 120° d'un onduleur monophasé

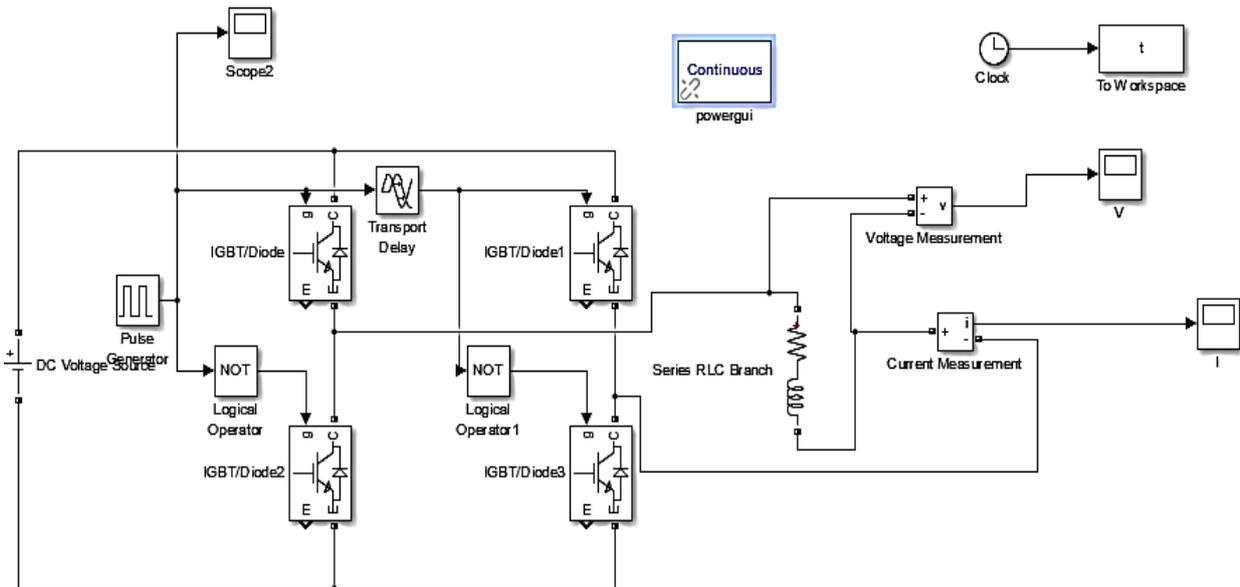


Figure 26 : Schémas Block sur MATLAB de commande 120° d'un onduleur monophasé

- Avec une charge résistive : Nous avons choisi  $R = 100\Omega$   $L=5H$  et  $E = 100V$

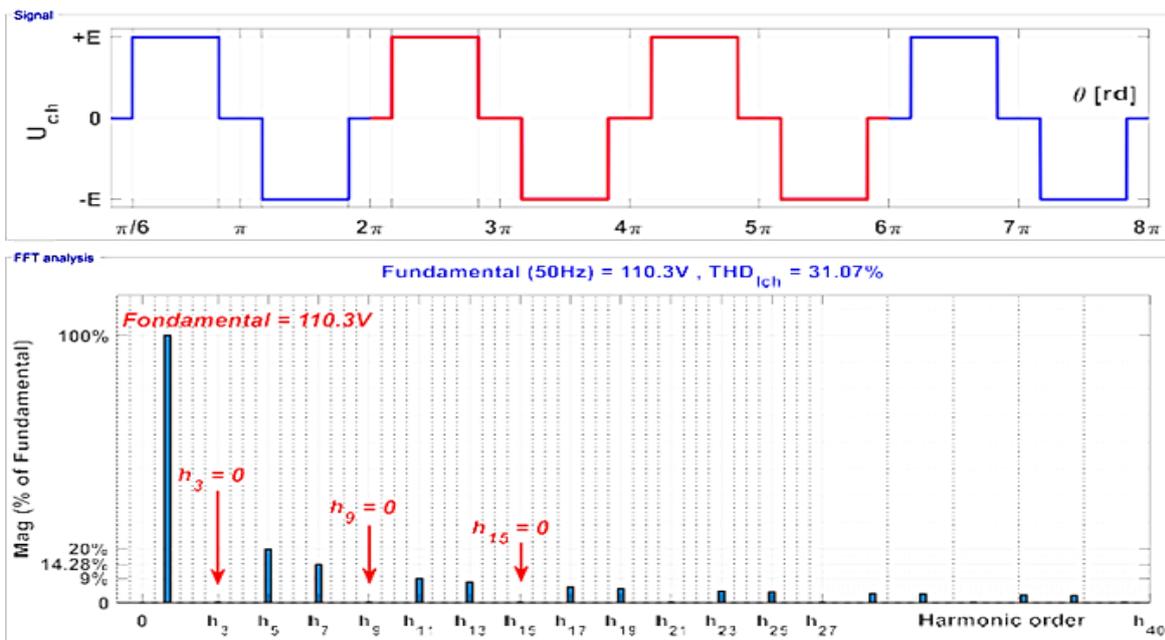


Figure 27 : Tension de sortie et spectre de commande 120° d'un onduleur monophasé

**Interprétation des résultats :**

La tension de sortie est très riche en harmoniques de rang faible et donc de fréquence basse, la composante fondamentale selon son expression  $U_{chfmax} = 110.3V$ , mais le taux de distorsion  $THDV_{ch} = 31.07\%$ , Comme le montre la figure ci-dessus.

Puisque la charge est purement résistive, alors que le THD de courant de la charge a la même valeur 31.07%. L'allure de la tension, le fondamental et le taux de distorsion ne changent pas.

- Avec une charge RL

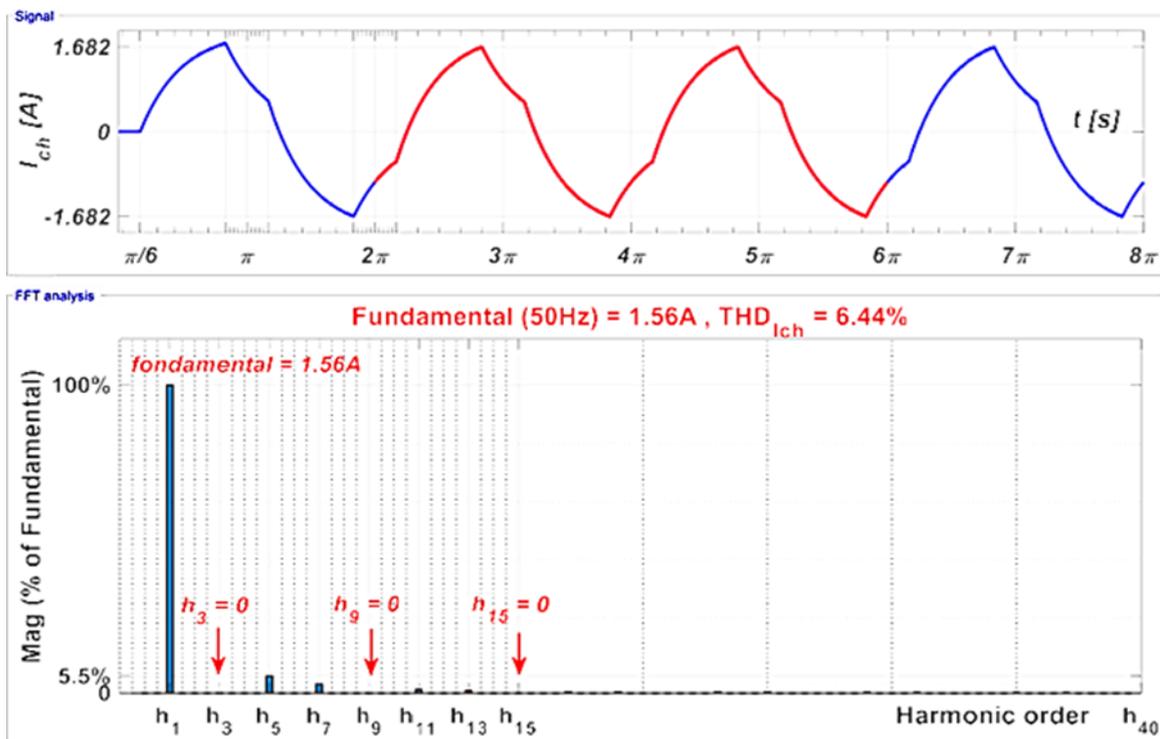


Figure 28 : Courant de sortie et spectre de commande 120° d'un onduleur monophasé

**Interprétation des résultats :**

Pour l'allure de courant, la courbe ne prend pas la forme des créneaux, mais il a une forme exponentielle. Pour le THD, il y a une nette amélioration par à l'onde pleine de 16.35 % à 6.44%, Comme le montre la figure ci-dessus.

### III.3. Commande à Modulation de largeur d'impulsion (MLI)

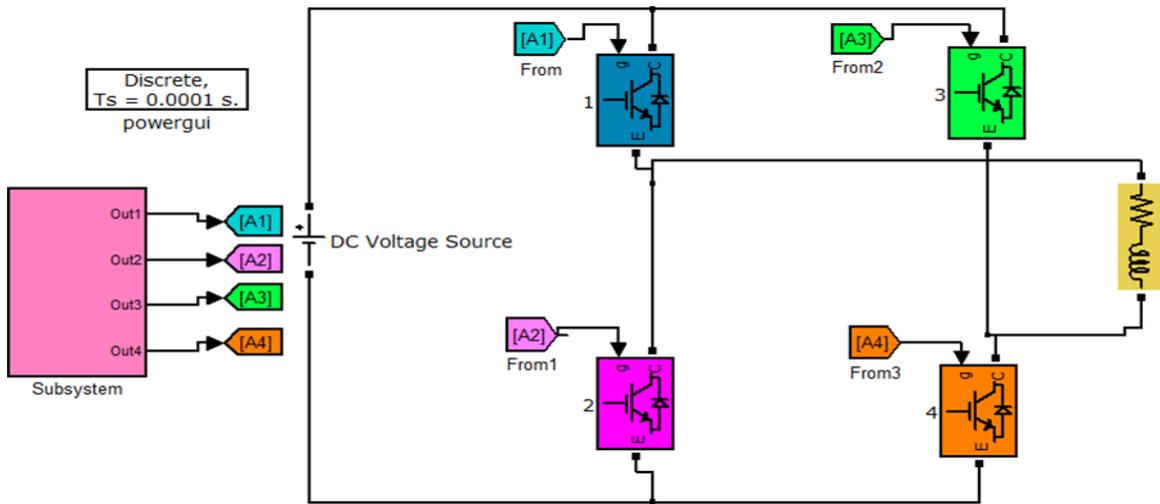


Figure 29 : Schémas bloc de Simulation de la commande MLI d'un onduleur monophasé

Avec une charge résistive inductive : Nous avons choisi  $R = 100\Omega$   $L=0.5$  et  $E = 100V$

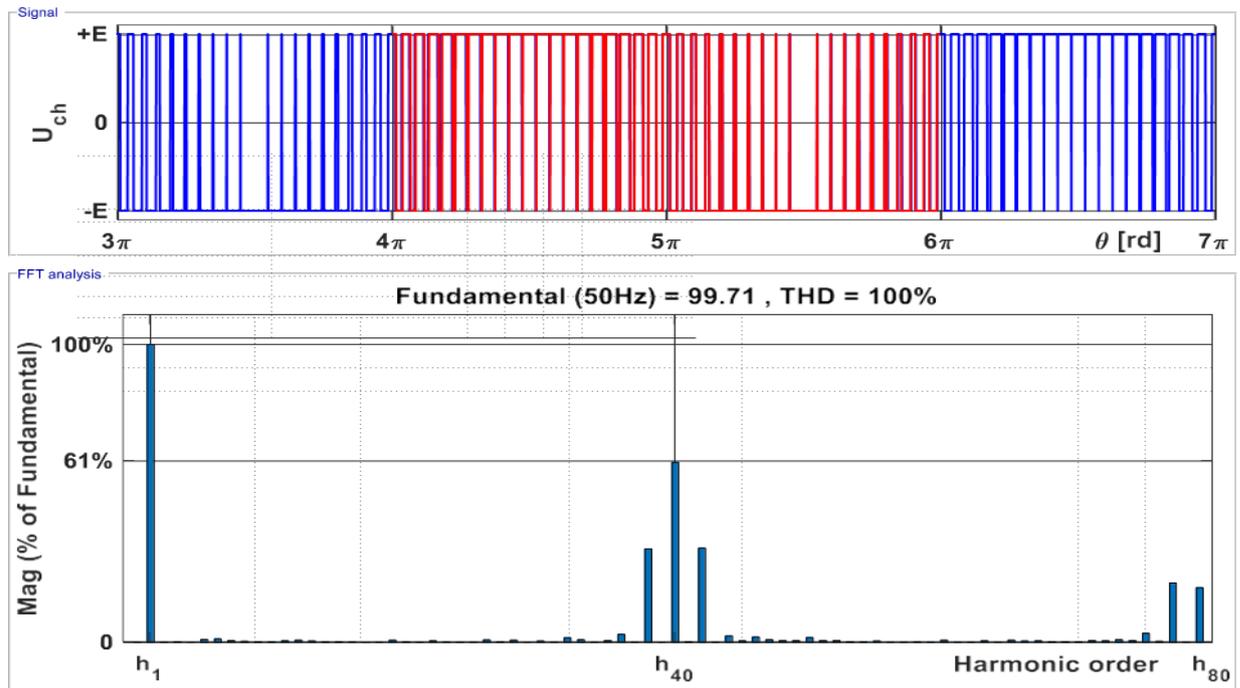


Figure 30 : Tension de sortie avec son spectre pour la commande MLI

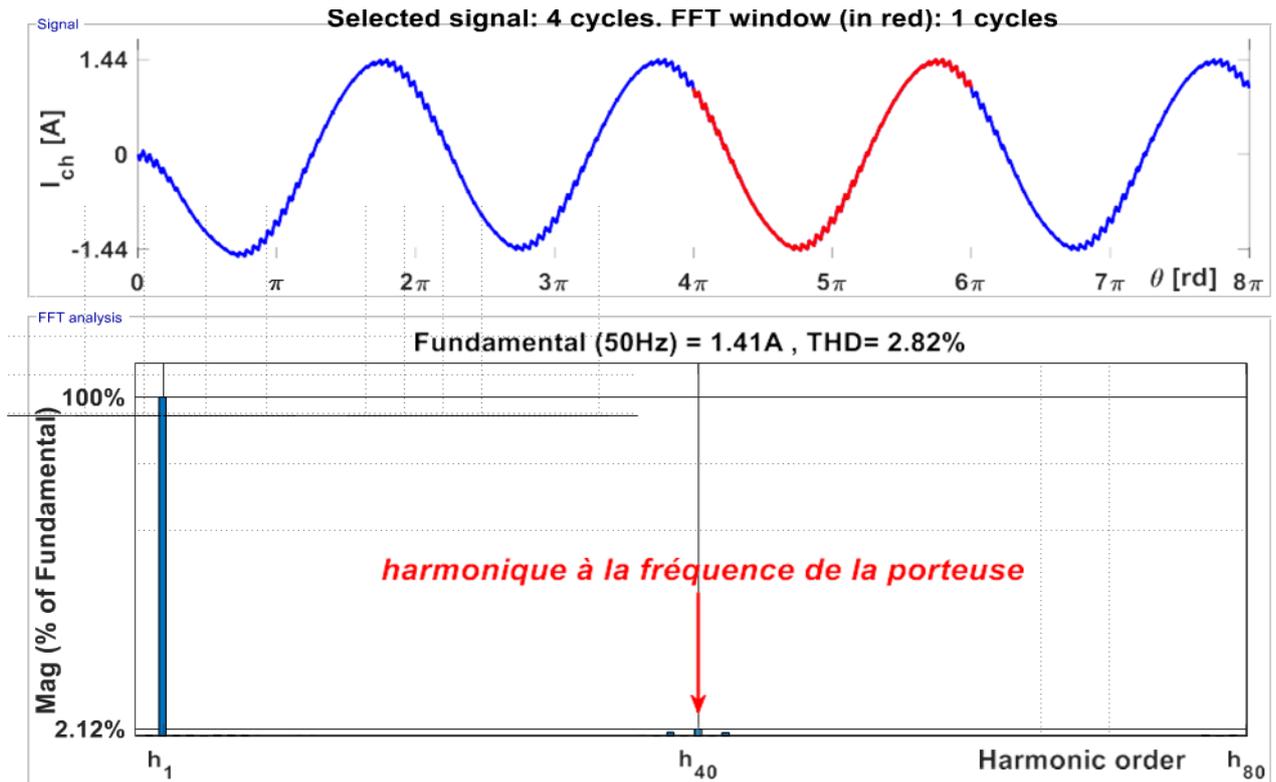


Figure 31 : courant de sortie avec son spectre pour la commande MLI

#### Interprétations des résultats :

L'augmentation de l'indice de modulation  $m$  rejette les premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées et facilite donc le filtrage.

Malheureusement  $m$  est limité par les temps de commutation des interrupteurs des convertisseurs mentionnée par les constructeurs des semi-conducteurs.

Le résidu d'harmonique ne dépend pas de  $m$  pour la tension, mais il diminue lorsque  $m$  augmente pour le courant. Le THD obtenu pour  $m=40$  est de 2.82% ce qui est meilleur que celui de pleine onde et celui décalé. La valeur de  $r$  est choisie pour maximiser le fondamental et minimiser les harmoniques, Comme le montre les deux figures ci-dessus.

## **Conclusion**

Dans ce chapitre, on a simulé plusieurs types de commande. La commande pleine onde et décalée, une tension comportant des harmoniques qui sont proches du fondamental avec une amplitude importante qui se traduit par une mauvaise qualité d'énergie, mais la commande décalée est mieux que la pleine onde, c'est pour si raison qu'on est passé à la commande MLI sinus triangle. Avec cette technique, on a constaté que les harmoniques seront repoussées vers de hautes fréquences, mais plus on augmente la fréquence de commutation plus la valeur efficace de la tension de sortie diminue.

*Chapitre IV*

*Réalisation et  
expérimentation de  
prototype d'onduleur  
monophasé*

## Introduction

L'objectif de ce travail est l'étude et réalisation d'un convertisseur DC/AC (onduleur de tension monophasé), dont la présence s'est avérée primordiale dans une stratégie de puissance.

Dans ce chapitre, on va procéder à l'étude théorique en vue de la réalisation étape par étape du circuit de commande du convertisseur statique (**onduleur monophasé**), ainsi est étudiée le circuit de puissance.

### IV.1. Composants de l'interrupteur de puissance

Le principe des convertisseurs statiques est basé sur la commutation de courant entre les mailles d'un circuit électrique de puissance. Ces commutations sont réalisées au moyen d'éléments semi-conducteur de puissance fonctionnant comme interrupteur soit à l'état passant (fermé), soit à l'état bloqué (ouvert). Le passage d'un état à l'autre, appelé commutation, s'effectue périodiquement.

Les éléments semi-conducteurs de l'électronique de puissance peuvent être classés selon leurs possibilités de commande. Les trois interrupteurs fondamentaux sont l'interrupteur unidirectionnel non commandé (diodes) ;

- L'interrupteur unidirectionnel commandé à la fermeture (thyristors) ;
- L'interrupteur unidirectionnel commandé à la fermeture et à l'ouverture (transistors bipolaires ...).

Les études publiées dans le domaine des convertisseurs de puissance, le transistor IGBT Est bien adapté pour les onduleurs à haute tension et Puissances fonctionnant avec une grande fréquence de commutation. C'est pourquoi, dans la suite de ce travail, nous considérerons que les interrupteurs de la partie puissance sont des transistors de type IGBT.

### IV.2. Réalisation de la carte de commande et la partie de puissance

#### IV.2.1. Carte de commande

Cette carte est composée par :

- Partie d'alimentation stabilisée ;
- Partie d'isolation et d'amplification des signaux.

#### IV.2.1.1. Alimentation stabilisée

Une alimentation stabilisée est un générateur dont un des gradateurs de sortie. La tension ou le courant. Peut être stabilisée à une ou à plusieurs valeurs fixes. Dans une alimentation régulée en tension. La tension de sortie  $V$  sortie est maintenue constante et indépendante dans les limites données de la tension d'entrée  $V$  entrée du courant de charge et de la température. Ainsi à partir d'une tension redressée filtrée variant autour d'une valeur moyenne. Un régulateur de tension doit fournir une tension continue constante avec une très faible ondulation résiduelle. Tout en fournissant un courant variable selon une certaine gamme le régulateur de tension permet donc :

- D'obtenir une tension de sortie continue constante pour une charge variable.
- De réduire le plus possible la tension d'ondulation résiduelle encore présente après le filtrage.
- D'éliminer les effets des variations de la tension d'entrée (tension du réseau d'alimentation [24]).

Le transformateur fournit une tension de 5v qui est redressée par le pont a diodes et filtré par le condensateur C1. Ensuite cette tension est régulée par un régulateur de tension intégré est un composant à semi-conducteur dont le rôle consiste à stabiliser une tension qui présente une ondulation et à rendre quasi continue sa valeur, ou on a utilisé UN régulateur de tension de sortie positive (7805) pour avoir +5v.

L'alimentation de la carte de commande sera ainsi prise sur la sortie +5 V.

Des condensateurs de filtrage seront ajoutés en entrée et en sortie de régulateur pour éliminer les bruits et les parasites.

Nous avons représenté le schéma de l'alimentation stabilisée en réel et dans le PROTEUS sur les Figures ci- dessous :



Figure 32 : Schéma réel de l'alimentation stabilisée

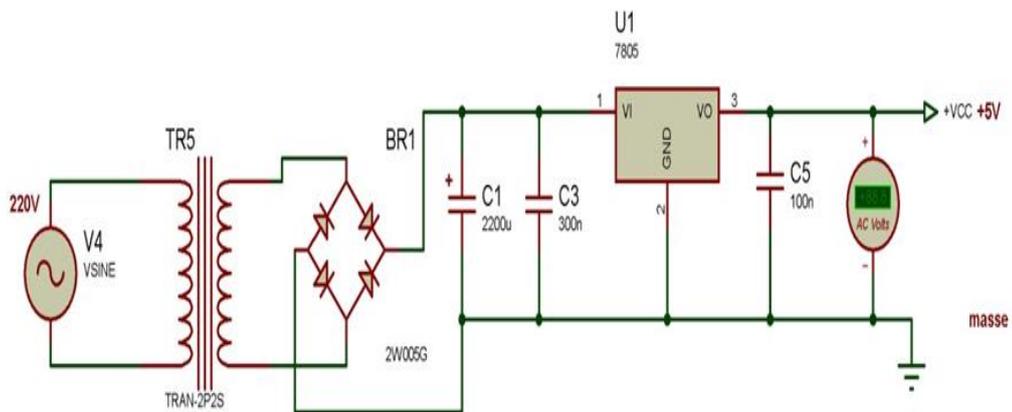
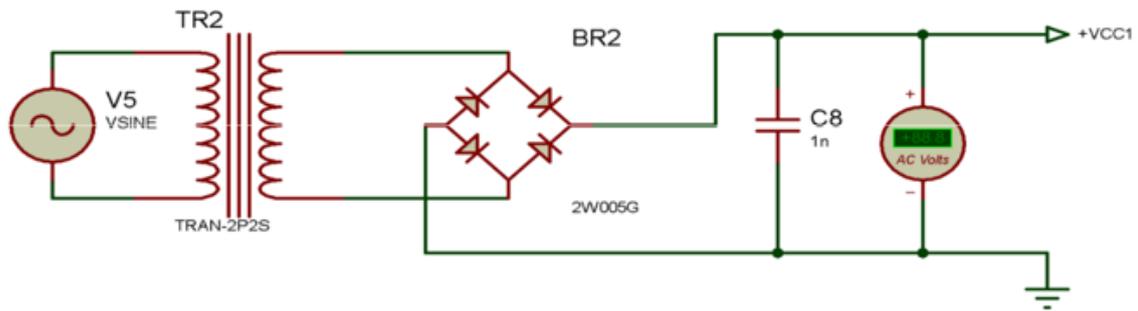


Figure 33 : Schéma de l'alimentation proposée sur PROTEUS de5v

Et en plus une alimentation de 12V qui est présentée dans la **figure34**, pour alimenter le driver.



**Figure 34 : Schéma de l'alimentation stabilisée sur PROTEUS de 12v**

Pour saturer les transistors utilisés IGBT (IRGPC40F), nous avons besoin d'une tension à 5V et pour assurer la saturation V<sub>dd</sub> de driver, nous avons utilisé 12V pour le NE 555, 74LS04 inverseur, optocoupleur A3121, driver IR2112.

Pour définir ce processus on a besoin :

- Un transformateur ;
- Un pont de diode ;
- Un étage de filtrage ;
- Un régulateur intégré.

#### IV.2.1.1.1.Transformateur

Dans le but d'avoir une alimentation continue (+12V), nous avons opté pour des transformateurs qui possède une bobine au primaire et deux identiques de 220V/2\*18V efficaces aux secondaires (un point milieu).

Le transformateur utilisé est de type 220V/2×18V 600mA avec une puissance de 10.8VA et une fréquence de 50-60Hz.

#### IV.2.1.1.2.Redresseur (Pont de diode)

Le redressement à double alternance est obtenu à partir de la tension alternative 12V aux bornes du secondaire des transformateurs, une tension unidirectionnelle. Pour faire ceci, on a choisi un pont redresseur de moyenne puissance.

#### IV.2.1.1.3.Filtrage (les condensateurs)

Le but du filtrage est de donner une tension sensiblement continue, le redressement étudié précédemment nous a permis de convertir une tension alternative sinusoïdale en une tension redressée (à base de caractéristique de charge et décharge de condensateur). Lorsque

la capacité du condensateur est grande plus la réserve du courant ne sera importante, ça permet de mieux supporter les brusques demandes de courant provenant du circuit utilisateur. Il faudra choisir un condensateur pouvant supporter la tension maximale du système.

#### IV.2.1.1.4. Régulation

La stabilisation des tensions positive est réalisée par les régulateurs de tension 7805 et 7812 ce qui est un circuit intégré à 3 pattes.

Le régulateur utilisé est de type LM7815, qui donne toujours 12V à la sortie.

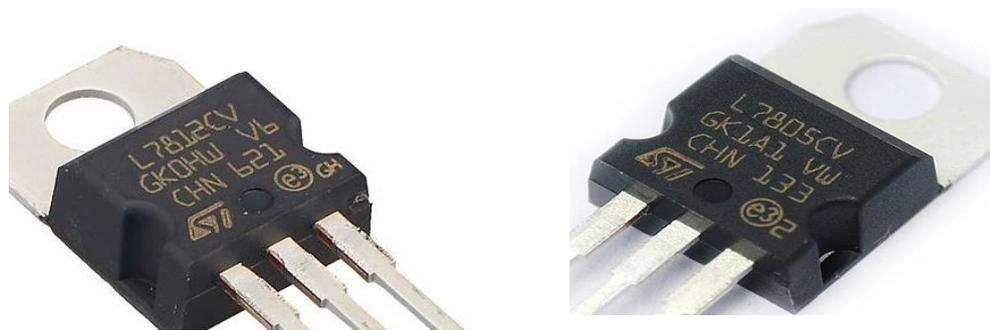


Figure 35 : Régulateurs de tension 12V et 5V

#### IV.2.1.1.5. Protection après régulation

Le condensateur céramique non polarisé est usuellement utilisé pour la protection en courant contre les courts-circuits, donc une bonne régulation permet d'éliminer toute variation éventuelle de la tension pour aboutir à 12 V.

#### IV.2.1.2. Partie d'isolation et d'amplification des signaux

##### IV.2.1.2.1. Oscillateur de fréquence (Circuit intégré NE55)

###### A. Présentation

Le NE555 (plus couramment nommé 555) est un circuit intégré utilisé pour la temporisation ou en mode multivibrateur. Le NE555 a été créé en 1970 par Hans R. Camenzind et commercialisé en 1971 par Signetics. Ce composant est toujours utilisé de nos jours en raison de sa facilité d'utilisation, son faible coût et sa stabilité [21]. Un milliard d'unités sont fabriquées par an.

Le NE555 peut fonctionner selon trois modes : monostable, astable ou bistable.



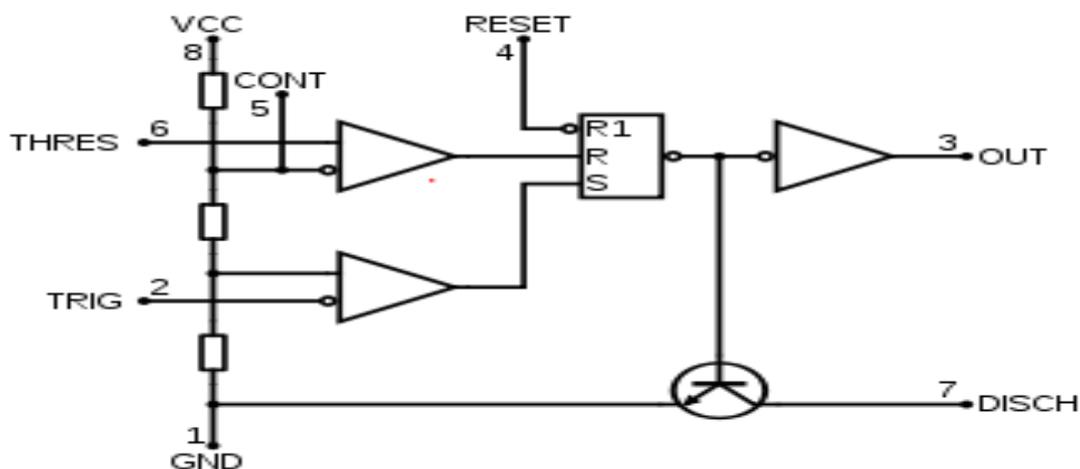
### Remarque

« NE555 » est le nom originel du composant proposé par Signetics. De nombreux fabricants ont proposé ce composant avec une compatibilité du brochage, et un préfixe différent. Aujourd'hui les versions CMOS de ce composant (tel que le MC1455 de Motorola) sont le plus souvent utilisées.

### C. Principe de fonctionnement

On peut voir à partir du schéma bloc les différents composants du NE555, soit :

- 2 comparateurs.
- 3 résistances configurées en diviseur de tension. Les deux tensions respectivement de  $1/3$  et  $2/3$  de  $V_{cc}$  servent de références aux comparateurs.
- 1 bascule SET-RESET contrôlée par les comparateurs.
- 1 inverseur.
- 1 transistor pour décharger le condensateur de temporisation.



**Figure 37 : Schéma bloc simplifié du NE555**

L'opération du 555 suit la logique de fonctionnement du schéma bloc présenté et peut prendre 4 états différents.

- Le signal RESET est à un niveau bas : La bascule est remise à zéro et le transistor de décharge s'active la sortie reste impérativement à un niveau bas. Aucune autre opération n'est possible.
- Le signal TRIG est inférieur à  $1/3$  de VCC : la bascule est activée (SET) et la sortie est à un niveau haut, le transistor de décharge est désactivé.
- Le signal THRES est supérieur à  $2/3$  de VCC : la bascule est remise à zéro (RESET) et la sortie est à un niveau bas, le transistor de décharge s'active.
- Les signaux THRES et TRIG sont respectivement inférieurs à  $2/3$  de VCC et supérieurs à  $1/3$  de VCC : la bascule conserve son état précédent de même que pour la sortie et le transistor de décharge.

Ces états sont résumés dans le tableau suivant :

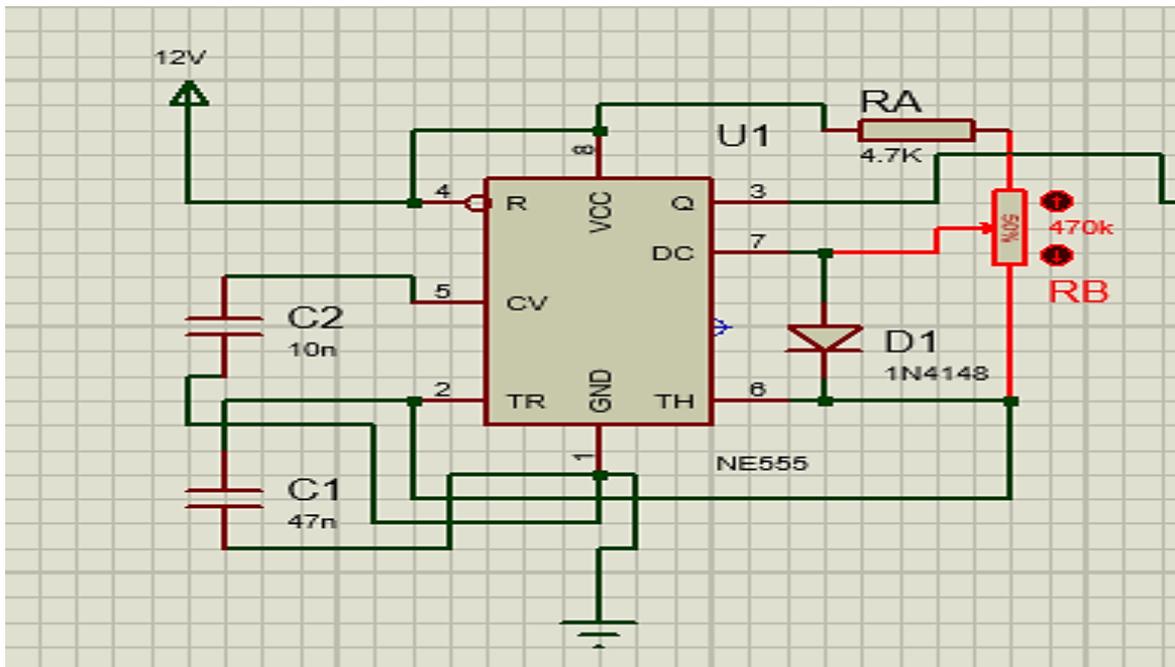
RESET	TRIG	THRES	OUT	DISCH
0	X	X	0	Actif
1	$<1/3 V_{cc}$	X	1	Inactif
1	$>1/3 V_{cc}$	$>2/3 V_{cc}$	0	Actif
1	$>1/3 V_{cc}$	$<2/3 V_{cc}$	Valeur précédente	

**Tableau 3: Les états logiques de fonctionnement de NE 555**

**D. Modes de fonctionnement**

- **Fonctionnement en mode astable**

La configuration astable permet d'utiliser le NE555 comme oscillateur. Deux résistances et un condensateur permettent de modifier la fréquence d'oscillations ainsi que le rapport cyclique. L'arrangement des composants est tel que présenté par le schéma ci-contre. Dans cette configuration, la bascule est réinitialisée automatiquement à chaque cycle générant un train d'impulsion perpétuelle comme ci-dessous.



**Figure 38 : Le branchement du NE555 en astable**

Une oscillation complète est effectuée lorsque le condensateur se charge jusqu'à 2/3 de Vcc et se décharge à 1/3 de Vcc. Lors de la charge, les résistances Ra et Rb sont en série avec le condensateur, mais la décharge s'effectue à travers de Rb seulement.

C'est de cette façon que le rapport cyclique peut être modifié. La fréquence d'oscillations f ainsi que le rapport cyclique  $\alpha$  suivent les relations suivantes [20]

Alors on a :

$$f = \frac{1,44}{(Ra+2Rb)C} \quad (4.1)$$

$$\alpha = 1 - \frac{Rb}{(Ra+2Rb)} \quad (4.2)$$

Un temps de charge :  $t_1=0.693(Ra +Rb).C$  (4.3)

Un temps de décharge :  $t_2=0,693.Rb.C$  (4.4)

La période totale du cycle :  $T=t_1+t_2=0,693(Ra+2Rb).C$  (4.5)

La fréquence d'oscillation est l'inverse de la période :  $f=1/T = \frac{1,44}{(Ra+2Rb).C}$  (4.6)

Le rapport cyclique :  $\alpha = \frac{Ra+Rb}{Ra+2Rb}$  (4.7)

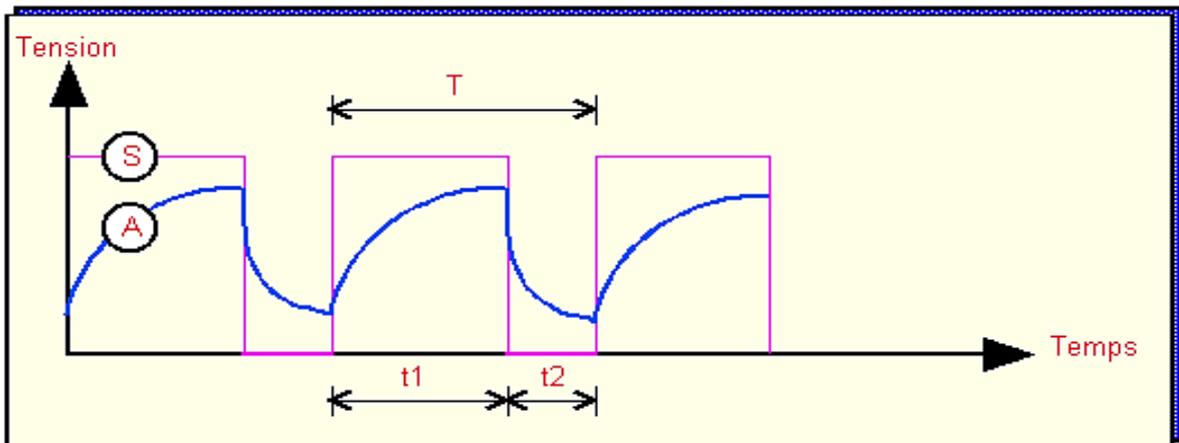
On en déduit que si  $Ra < Rb/2$  on a :  $\alpha = 0.5$  et  $f = \frac{1,44}{2RbC}$  (4.8)

On peut alors régler la fréquence en agissant sur  $Rb$  sans modifier le rapport cyclique.

Pour une fréquence de 85Hz on a :  $Ra=4.7k\Omega$ ,  $Rb=470k\Omega$  et  $C=0.01\mu F$

• **Chrono diagrammes**

Sur la sortie S (broche 3) et aux bornes du condensateur A (Broche 2) on trouve les signaux suivants



**Figure 39 : Chrono diagrammes de temporisateur NE 555**

Les temps se calculent à l'aide des formules :

$t_1=0,63(Ra +Rb) \times C$  .....(4.9)

$t_2 = 0.63 \times Rn \times C$ .....(4.10)

$T = t_1 + t_2$ ..... (4.11)

- **Fonctionnement en mode monostable**

L'utilisation du NE555 en configuration monostable permet de générer une impulsion d'une durée définie seulement à l'aide d'une résistance et d'un condensateur comme illustré dans le schéma ci-contre. Une impulsion est engendrée suite à l'application d'un front descendant à l'entrée du circuit, le graphique ci-dessous présente les formes d'ondes résultantes.

Immédiatement après l'application du front descendant la bascule interne est activée ainsi que la sortie. Du même coup, le transistor de décharge est désactivé permettant au condensateur C de se charger à travers la résistance R. La forme d'onde aux bornes du condensateur est celle d'un circuit de premier ordre RC face à un échelon de tension, c'est-à-dire une exponentielle croissante. Lorsque cette exponentielle atteint une valeur égale à deux tiers de la tension d'alimentation Vcc, la bascule interne est désactivée ramenant la sortie et le condensateur à zéro. La durée de l'impulsion  $t_w$  est donnée par la formule suivante:

$$t_w = 1.1 \times R \times C \dots\dots\dots(4.12)$$

On trouve également le schéma du 555 en monostable re déclenchable, qui est à l'identique excepté le pin 4 Restes reliés au érigé : à chaque impulsion d'entrée le time est réinitialisé même si l'impulsion précédente n'est pas terminée.

- **Montages de base**

Dans cette partie, on présentera dans un tableau de différents schémas de base utilisable NE 555

<p>NE555 en horloge (1)</p>	
<p>LED clignotante (2)</p>	
<p>Rythmeur de Jogging (3)</p>	

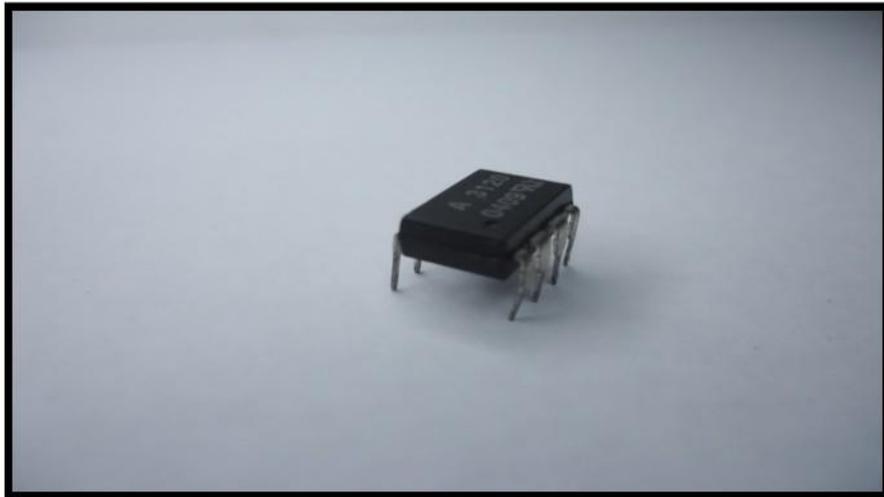
Tableau 4: Les différents schémas de base utilisable NE 555

#### IV.2.1.2.2.L'isolation galvanique

C'est l'interface électronique qui offre une protection du circuit de commande (composants à très basse tension) par rapport aux forts courants du circuit de puissance cette isolation peut être réalisée avec des transformateurs d'impulsion (isolation inductive) ou par des optocoupleurs (isolation optoélectrique). Notre choix s'est porté sur l'optocoupleur NPN qui offre une bonne isolation de 1000V.

##### A. L'optocoupleur (A3120)

Un optocoupleur est un composant ou un ensemble de composants qui permet le transfert d'informations entre deux parties électroniques isolées l'une de l'autre d'un point de vue électrique. La première partie est un émetteur, et la seconde partie est un récepteur. On peut l'assimiler à un composant qui a une entrée (émetteur) et une sortie (récepteur).



**Figure 40 : Image de l'optocoupleur HCPL-3120**

La **figure 40** indique le circuit intégré de l'optocoupleur

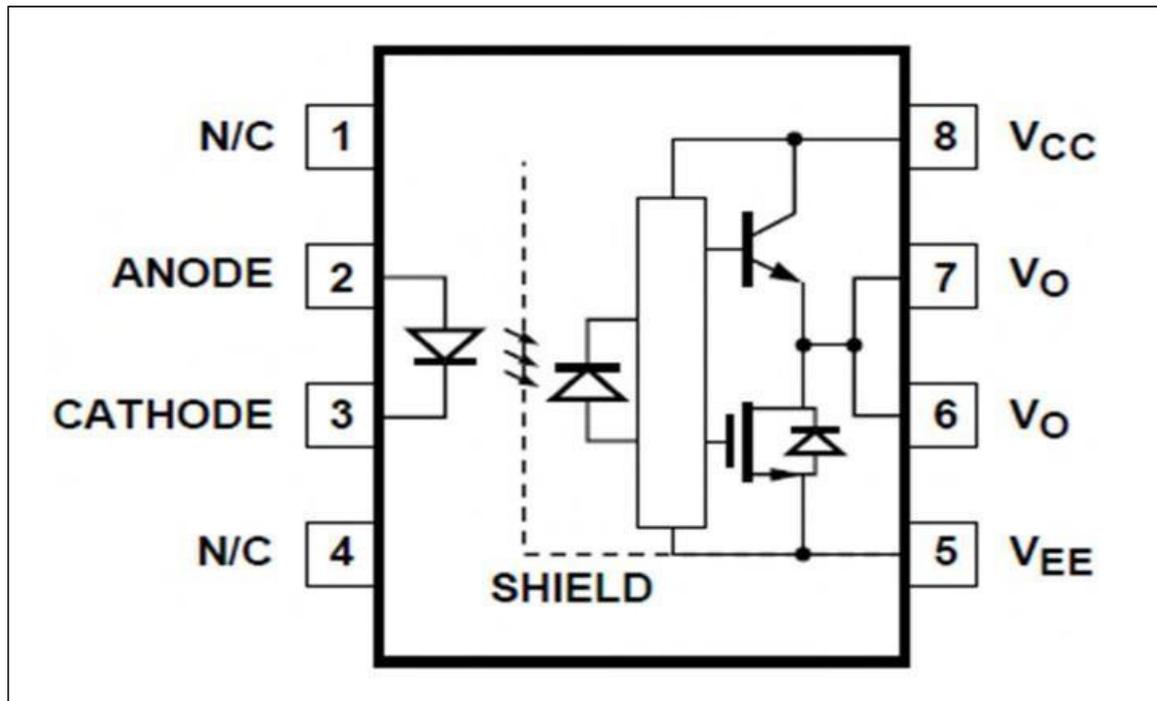


Figure 41 : Diagramme fonctionnel d'Optocoupleur

Paramètre	Symbole	Min	Max	Unité
Tension d'alimentation	(VCC- VEE)	15	30	Volts
Courant d'entrée (ON)	IF(ON)	7	16	mA
Tension d'entrée (OFF)	VF(OFF)	-3.0	0.8	V
Température d'exploitation	TA	-40	100	°C

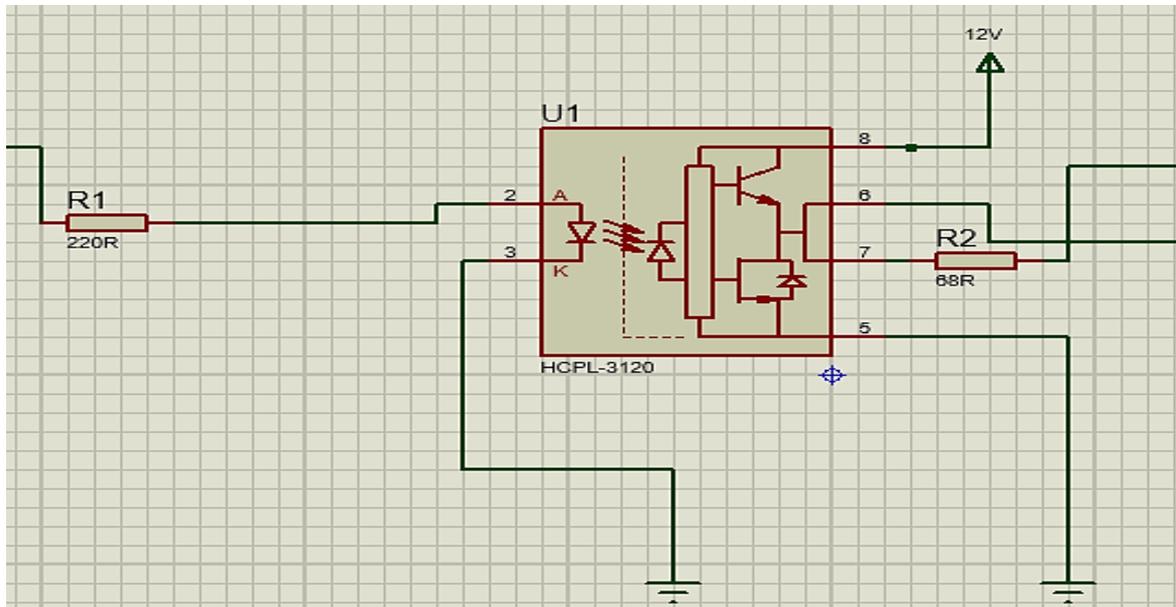
Tableau 5: Caractéristique d'optocoupleur

Un optocoupleur a deux fonctions :

La première est l'isolation galvanique. Le principe est de déconnecter une partie d'un montage d'une autre partie "sensible", les deux parties peuvent alors communiquer sans aucune liaison électrique, mais simplement à l'aide d'une liaison optique. De cette façon, aucun ne risque d'endommager la première partie ou la deuxième.

Cette liaison est réalisée avec l'aide d'une diode émettrice d'un côté et d'un photorécepteur de l'autre. Le tout est assemblé dans un petit boîtier hermétique à la lumière.

La deuxième fonction, c'est l'adaptation de tensions. En effet, comme la seule chose que fait l'optocoupleur c'est de transmettre une information tout ou rien ("1" ou "0") de façon lumineuse. Tu peux très bien le commander en 5V en entrée et avoir une sortie [25].



**Figure 42 : Le schéma de branchement d'un optocoupleur sur PROTEUS**

### B. Les caractéristiques d'un optocoupleur

Les caractéristiques spécifiques d'un optocoupleur sont principalement :

- La tension d'isolement entrée- sortie (Isolation Surge Voltage : Viso)
- Le courant d'entrée maximum (Forward Current :  $I_F$ )
- Le taux de transfert (Current Transfer Ratio : CTR)
- Le courant maximum en sortie (Collector Current :  $I_C$  (dans le cas d'un photo-Transistor))
- Le courant résiduel d'obscurité en fonctionnement (Collector – Base Dark Current : ICBO)
- La puissance maximum qui peut dissiper le boîtier (Total Device Power Dissipation : PD) [25].

### C. Circuit de générateur du temps mort (IR2112)

Les interrupteurs des circuits de puissance ne peuvent pas commuter d'une façon instantanée en passant d'un état de conduction à un état de blocage et vice versa, ils ont besoin d'une durée déterminée pour changer d'état, et comme les IGBTs de haut sont



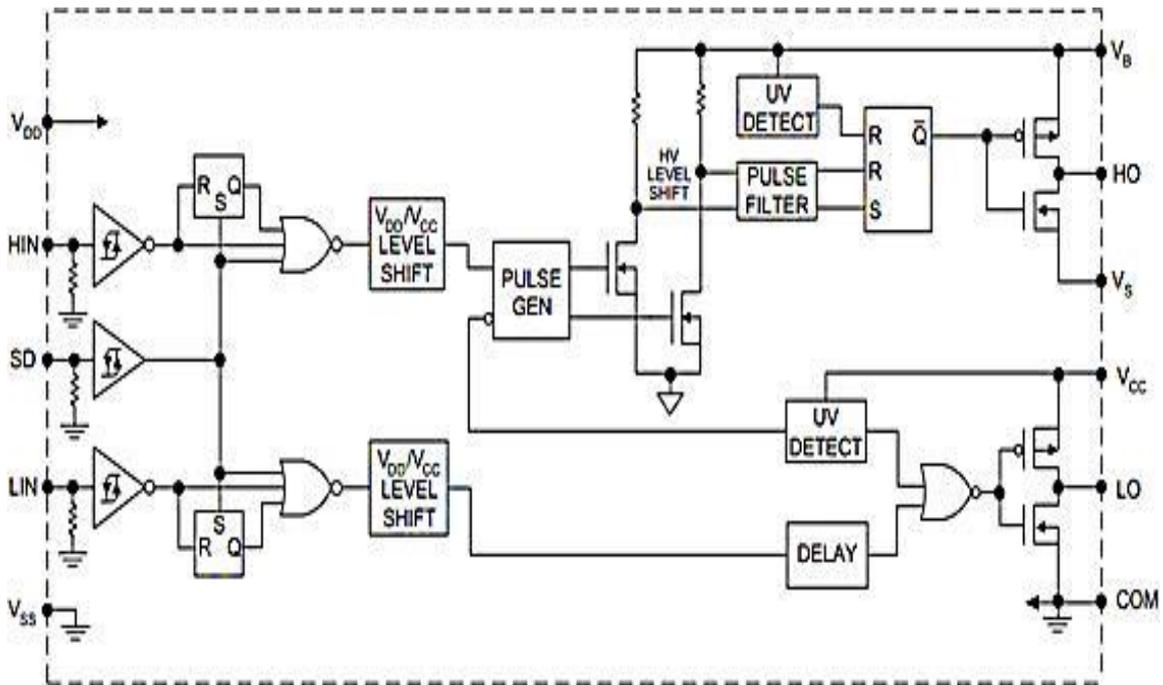


Figure 45 : Schéma interne du driver IR2112

Symbol	Description
<b>VDD</b>	Logic supply
<b>HIN</b>	Logic input for high side gate driver output (HO), in phase
<b>SD</b>	Logic input for shutdown
<b>LIN</b>	Logic input for low side gate driver output (LO), in phase
<b>VSS</b>	Logic ground
<b>VB</b>	High side floating supply
<b>HO</b>	High side gate drive output
<b>VS</b>	High side gate drive output
<b>VCC</b>	Low side supply
<b>LO</b>	Low side gate drive output
<b>COM</b>	Low side return

Tableau 6: Tableau significatif du driver

## D. Circuit de l'inverseur

- Inverseur 74HC04

Le M54/74HC04 est un inverseur CMOS HEX haute vitesse fabriqué en technologie C2MOS à grille de silicium. Il a les mêmes performances à haute vitesse de LSTTL combinées à une véritable faible consommation d'énergie CMOS. Le circuit interne est composé de 3 étages, dont une sortie tampon, ce qui permet une immunité au bruit élevée et une sortie stable. Toutes les entrées sont équipées de circuits contre les décharges statiques et les surtensions transitoires.

Le numéro IC 7404 est un inverseur hexadécimal. Ici, le terme hex fait référence aux six inverseurs inclus dans le circuit. La figure 46 montre les schémas de l'inverseur hexagonal 7404.

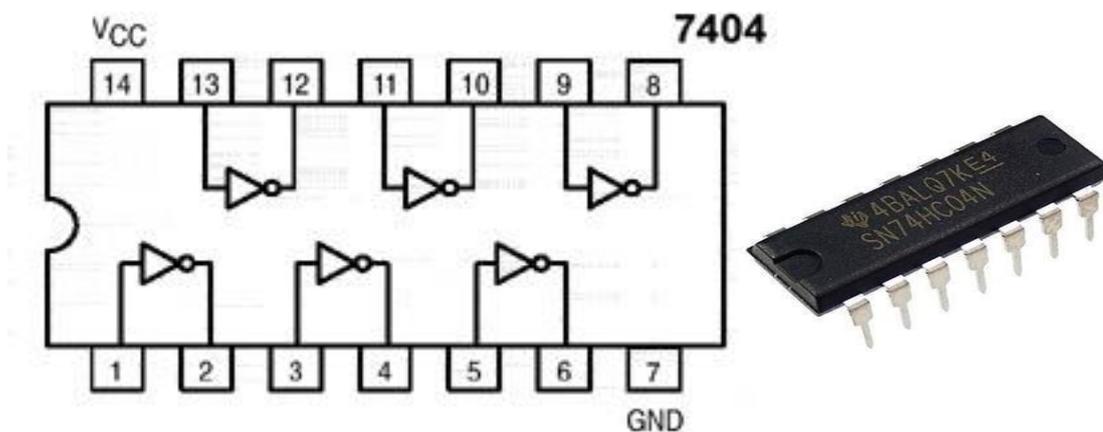


Figure 46 : Brochage de l'inverseur 74CH04

### IV.2.2. Réalisation de la carte de commande

Le but de cette carte est de contrôler l'onduleur monophasé à partir d'un signal de commande (l'ouvrir et la fermeture de quatre interrupteurs de l'onduleur).

Nous dessinons ce schéma avec logiciel PROTEUS en utilisant les bibliothèques des composants, ainsi nous pouvons tester le comportement du circuit de commande.

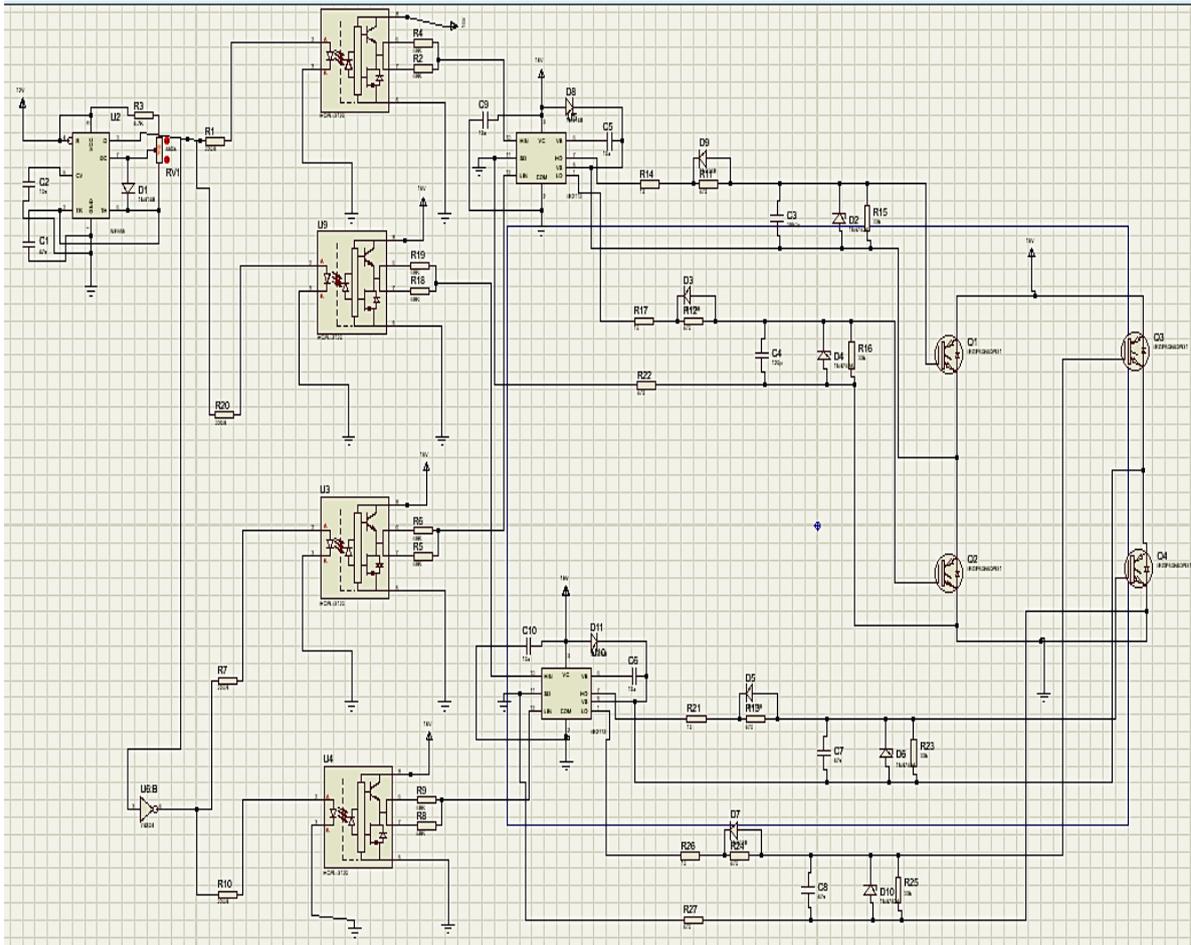


Figure 47 : Schéma complet de la carte de commande sur PROTEUS

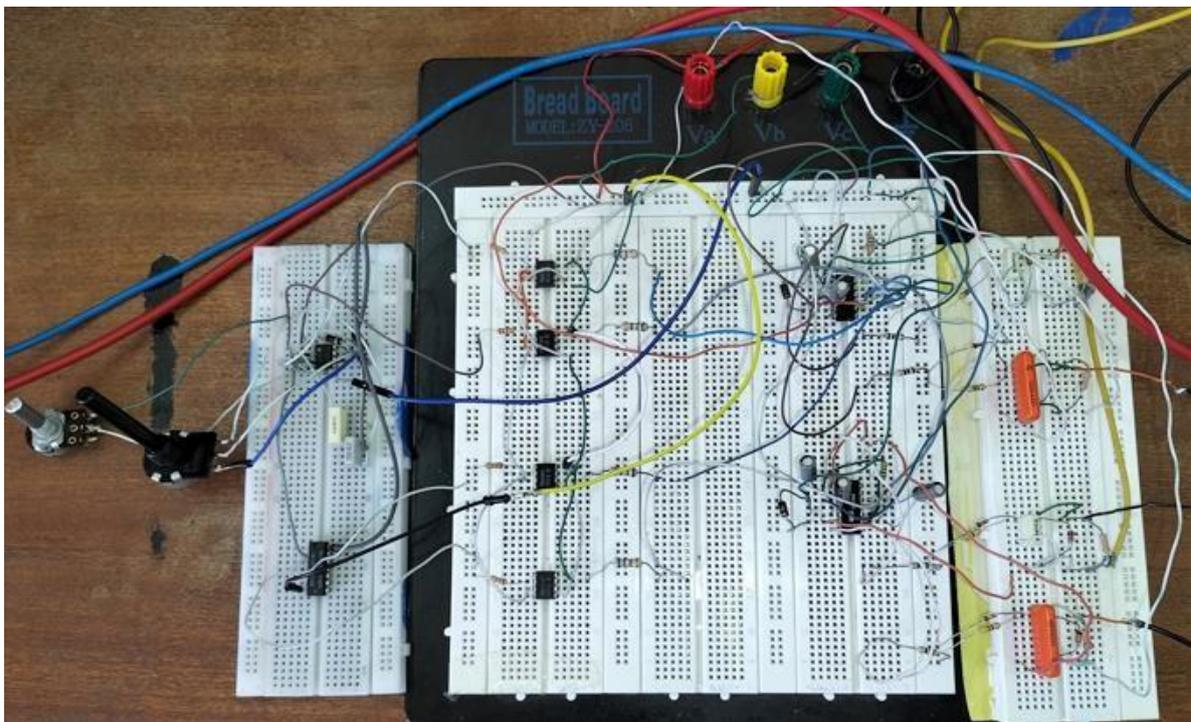


Figure 48 : Schéma de circuit réel de la carte de commande

### IV.2.3. Partie de puissance (onduleur monophasé)

Le circuit de puissance contient :

- Deux (2) bras, chaque bras est constitué de deux interrupteurs (IGBT)  $T_i$  et  $T_i'$  ( $i=1, 2$ ) commandés à l'ouverture et à la fermeture
- Quatre diodes
- Quatre radiateurs de refroidissement

#### IV.2.3.1. Transistor IGBT

Transistor IGBT c'est le mariage du bipolaire et du MOS alors :

Le transistor IGBT est un interrupteur électronique unidirectionnel ; il est surtout utilisé en électronique de puissance. Il est constitué d'un transistor bipolaire T2 et d'un Transistor à effet de champ (MOSFET) T1 [18].

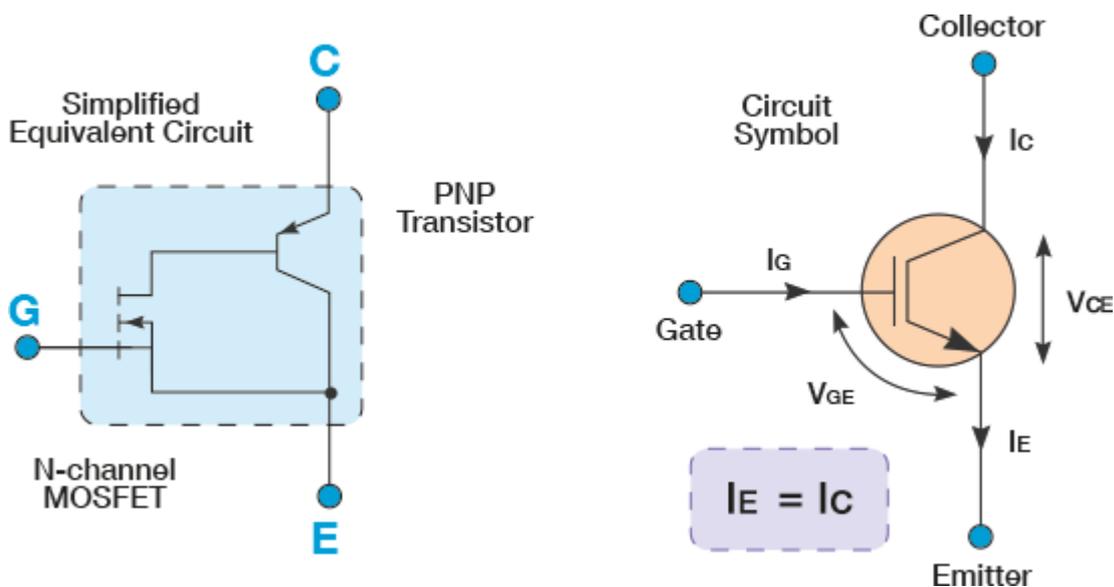


Figure 49 : Représentation symbolique d'un transistor IGBT

#### IV.2.3.1.1. Principe de fonctionnement

La mise en conduction du transistor T1 permet au courant de base de T2 de circuler ; le transistor T2 devient alors conducteur. Le blocage de T1 entraîne le blocage de T2,

Le courant  $I$  s'annule. L'ensemble se comporte comme un interrupteur électronique dont le courant de commande est nul.

Le transistor IGBT est surtout utilisé dans les cas de commandes à moyenne et forte puissance [18].

#### IV.2.3.1.2. Caractéristiques du transistor IGBT

Le transistor IGBT possède les caractéristiques principales suivantes :

Une tension de commande permettant la mise en conduction et le blocage du composant ;

##### À l'état passant :

- Une chute de tension composée d'une tension de seuil et d'une résistance interne,
- Un courant maximum permanent admissible.

##### À l'état bloqué :

- Une tension directe maximale admissible.

Les transistors IGBT utilisés en variation de vitesse peuvent fonctionner à des fréquences de quelques dizaines de kilohertz [19].

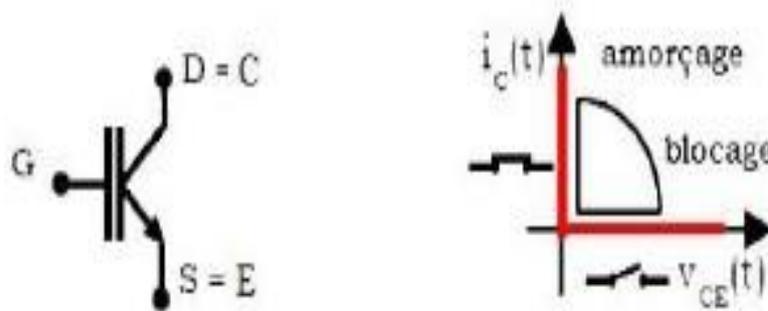


Figure 50 : Symbole et caractéristique d'un transistor IGBT.

#### IV.2.3.2. La diode

La diode est un élément redresseur non commandé qui comprend : deux couches de types opposés P et N constituant une jonction. Elle ne laisse passer le courant que dans un sens et uniquement si la tension qui lui est appliquée est positive [17].

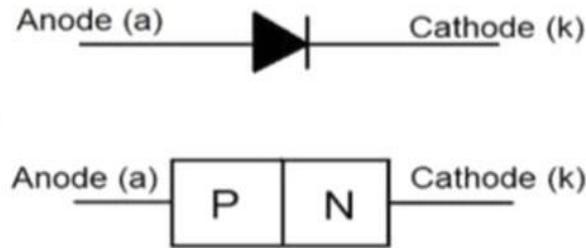


Figure 51 : Représentation symbolique d'une diode

#### IV.2.3.3. Principe de fonctionnement

Une diode conduit le courant dans le sens anode (A) - cathode (K)

- Sens direct : la diode est parfaitement conductrice, elle présente une faible chute de tension de 0.5 à 1.5v.
- Sens inverse : la diode est parfaitement bloquée, un très faible courant la traverse [17].

##### IV.2.3.3.1. Caractéristiques statiques d'une diode

La diode est un dipôle à semi-conducteur (jonction P-N), qui possède deux régimes de fonctionnement : bloqué et passant.

Ces régimes de fonctionnement ne sont pas contrôlables directement, mais dépendent de la tension  $V_{AK}$  aux bornes de la diode et de l'intensité du courant  $I_d$  la traversant [18].

<b>Diode bloquée</b>	État de la diode quand $V_{AK} < V_{seuil}$ , ce qui empêche le passage du courant dans la diode ; $I_D = 0$ .
<b>Diode passante</b>	État de la diode quand $V_{AK} \geq V_{seuil}$ , ce qui entraîne $I_D \neq 0$ .

Tableau 7: Représentation l'État bloquée et passante d'une diode

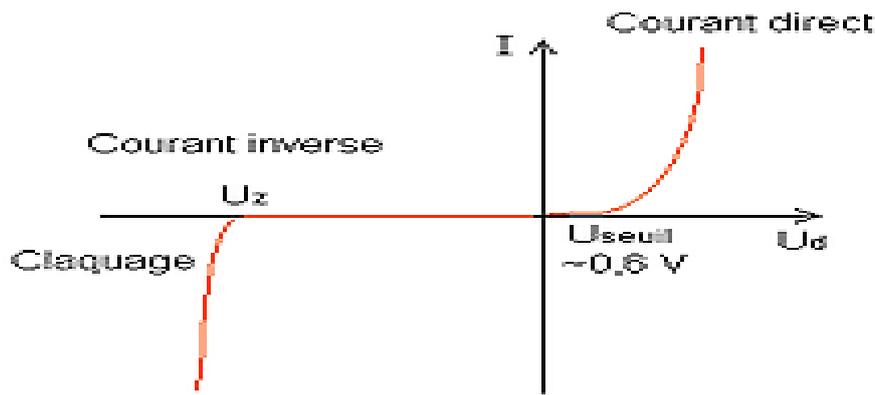


Figure 52 : Caractéristique réelle

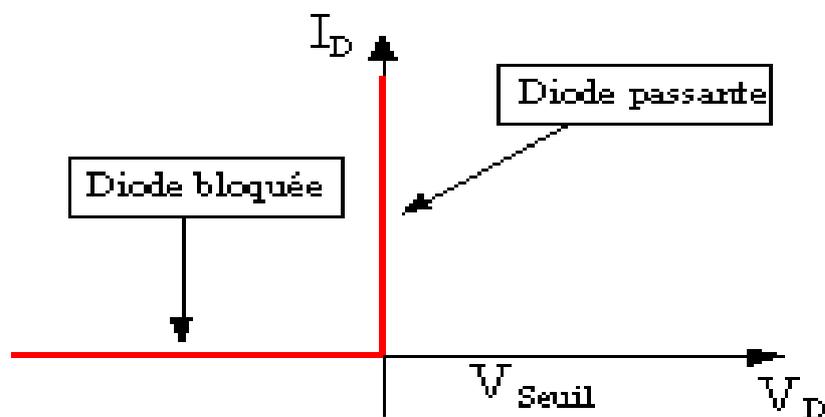


Figure 53 : Caractéristique idéale

#### IV.2.3.4. Dissipateur de chaleur

La cause principale de l'endommagement des composants dans la majorité des cas, c'est l'augmentation de température pour cela nous allons monter au dos de chaque transistor un radiateur dissipateur en aluminium que nous l'avons choisi de type métallique parce que l'aluminium est un bon conducteur de chaleur.

Il est choisi à base de  $T_A$  température ambiante ( $^{\circ}\text{C}$  ou  $\text{K}$ ),  $P$  la puissance thermique ( $\text{W}$ ); et  $R_{thjA}$  Résistance thermique ( $^{\circ}\text{C}/\text{W}$  ou  $^{\circ}\text{K}/\text{W}$ ). Qui est calculée sur la base de la résistance thermique;  $R_{thjB}$  la résistance thermique jonction-boîtier,  $R_{thBR}$  la résistance thermique boîtier- dissipateur,  $R_{thRA}$  la résistance thermique dissipatrice ambiante.

Sur l'onduleur, la résistance thermique totale peut être divisée en plusieurs parties, en fonction des surfaces de contact. En termes d'analyse thermique, il est possible de modéliser différentes connexions et températures comme un circuit électrique.

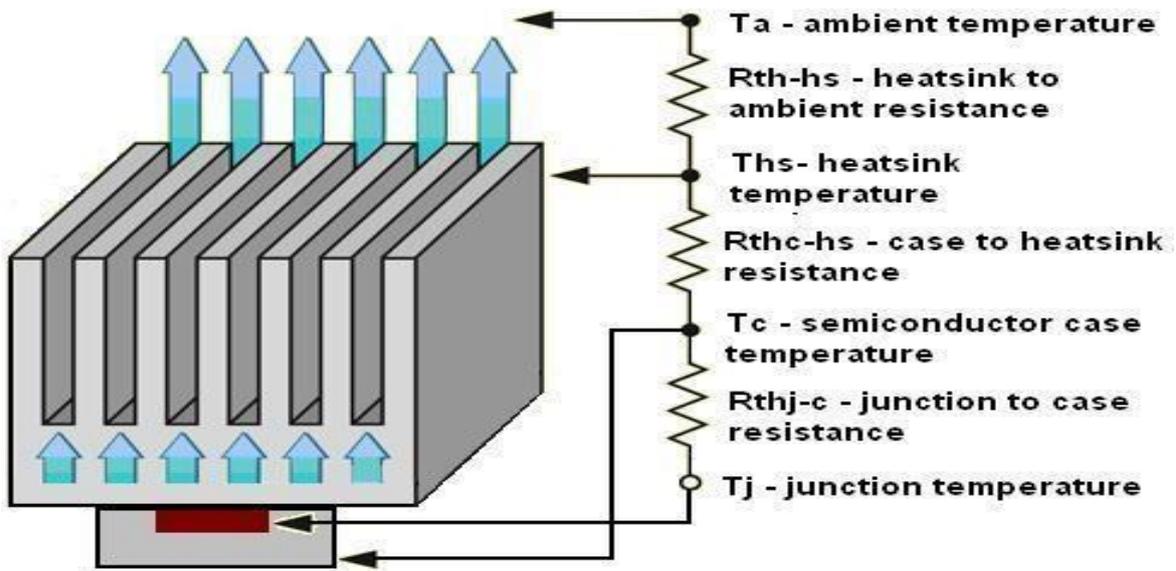


Figure 54 : Schéma et circuit électrique entre jonction silicium et ambiant

$$T_j = T_A + R_{th} R_{AP} I_{ost} \tag{4.13}$$

$$R_{thjA} = R_{thjB} + R_{thRA} + R_{thBR} \tag{4.14}$$

À partir des données (Datasheet) du IRGPC40F fournies en annexe, il est possible de déterminer la température maximale de la jonction, qui serait de 175°C. De plus, la température ambiante maximale sera fixée à 40°C.

	Paramètres	Type.	Max.	Unités
$R_{\theta J C}$	Junction-to-case	—	0.50	°C/W
$R_{\theta C S}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.24	—	
$R_{\theta J A}$	Junction-to-Ambient	—	40	

Tableau 8: Résistance thermique de IRGPC40F



Figure 55 : Dissipateur de chaleur

### IV.3. Réalisation de l'onduleur (circuit de puissance)

Nous avons utilisé aussi le même simulateur PROTEUS pour schématiser le circuit de puissance :

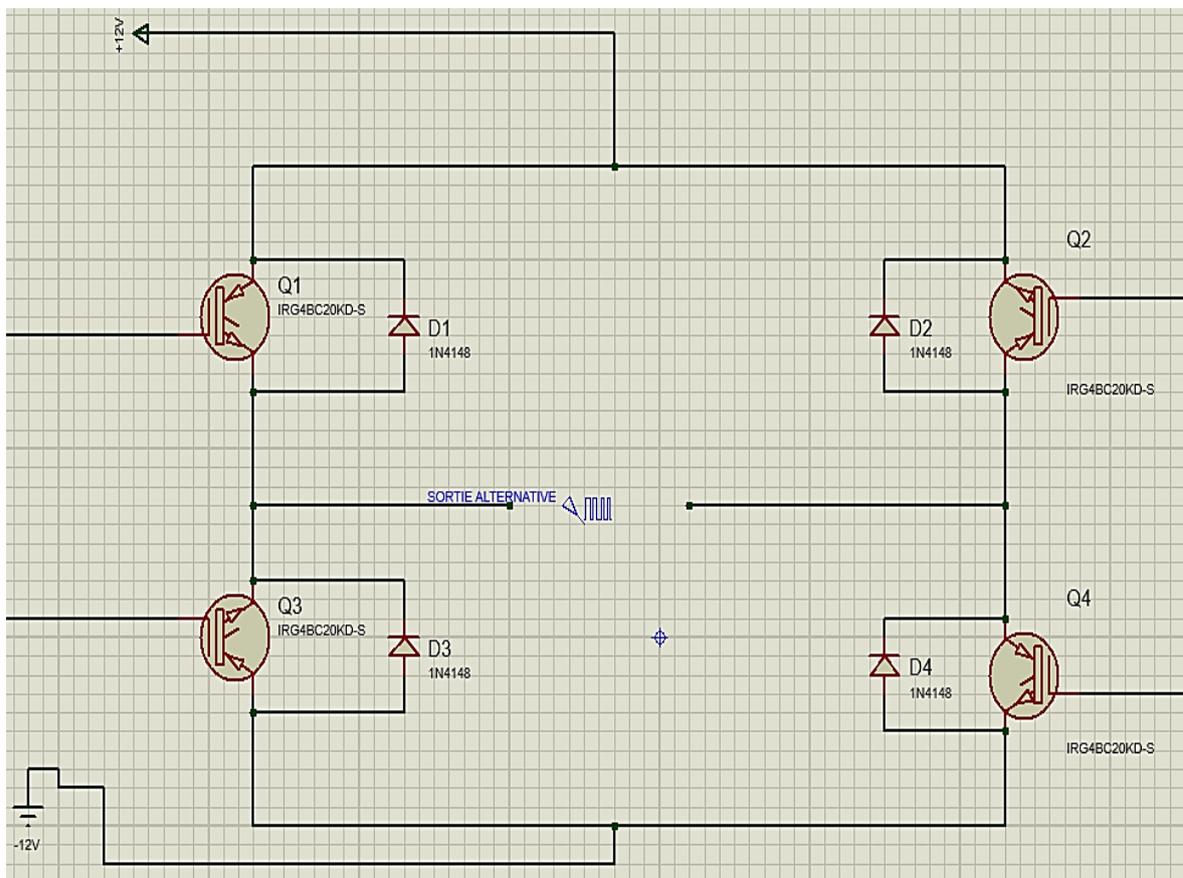
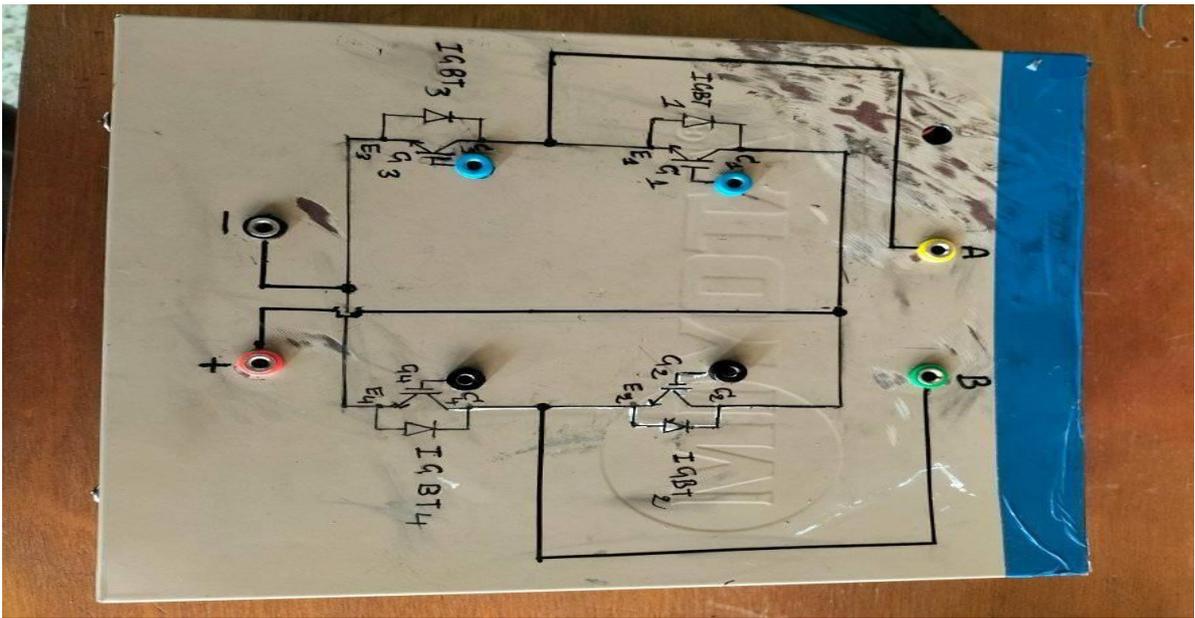


Figure 56 : Schéma électrique de l'onduleur sur PROTEUS

Voici ci-dessous l'image en réelle de notre carte de puissance :

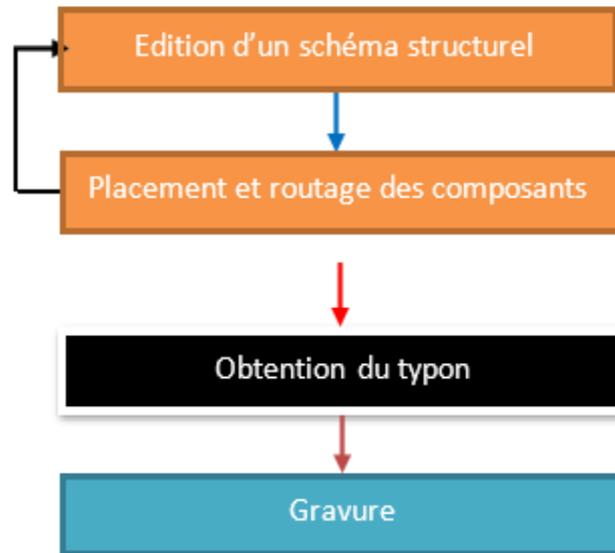


**Figure 57 : Images réelles de la carte de puissance**

- 1) Support de dissipateur.    2) Transistor (IGBT).
- 3) L'entrée de la commande.    4) les diodes
- 4) Source de tension continue.    5) La sortie alternative de l'onduleur monophasé.

#### IV.4. Les étapes de conception d'une carte électronique

Ces étapes nous pouvons les résumer sur l'organigramme suivant :



**Figure 58 : Les étapes de conception d'une carte électronique**

Ce schéma résume l'ensemble des étapes de conception d'une carte électronique :

- Élaboration du schématique ;
- Élaboration du typon avec chevelu pour une cohérence totale entre schéma et typon ;
- Routage automatique possible.

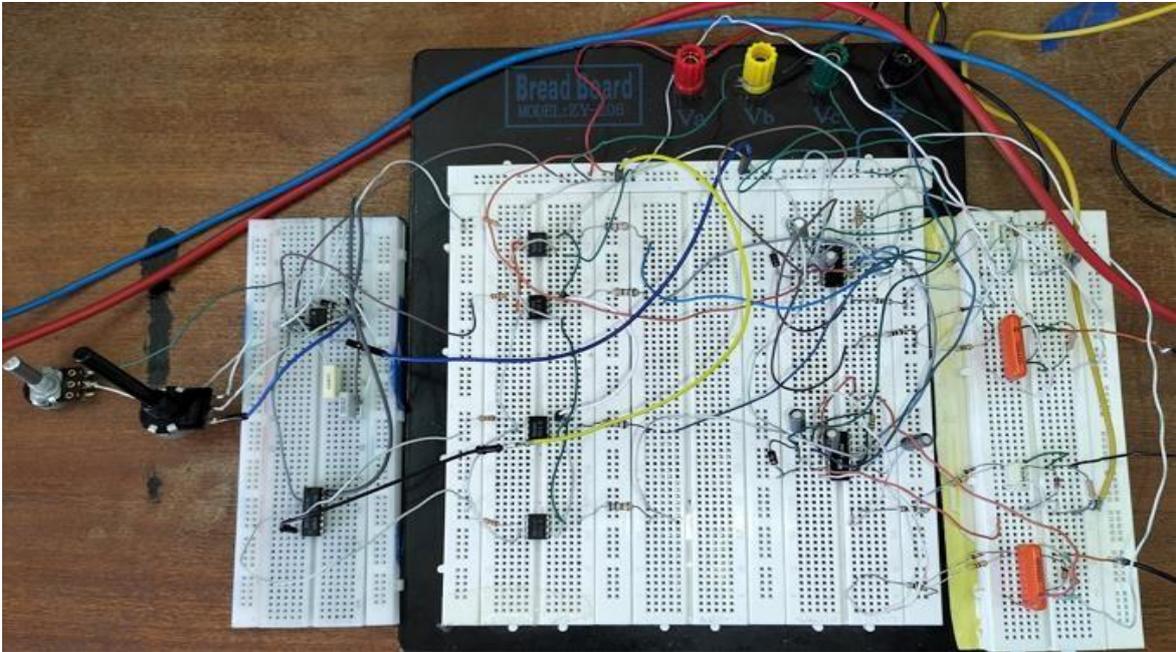
Avant de créer le typon pour le circuit, il faut bien maintenir le schéma structurel de l'onduleur monophasé.

Transfert du circuit sur la plaque du cuivre : Cela passe par deux parties :

- Mode opératoire (Coupe, Préparation, Insolation, Révélation, Rinçage, Gravure et Nettoyage)
- Implantation des composants et soudure (Perçage, Soudure).

### IV.5. Résultats des circuits commande dans plaque essais

Dans cette partie, nous présentons le circuit de partie commande et celui de la Commande de l'onduleur monophasé.

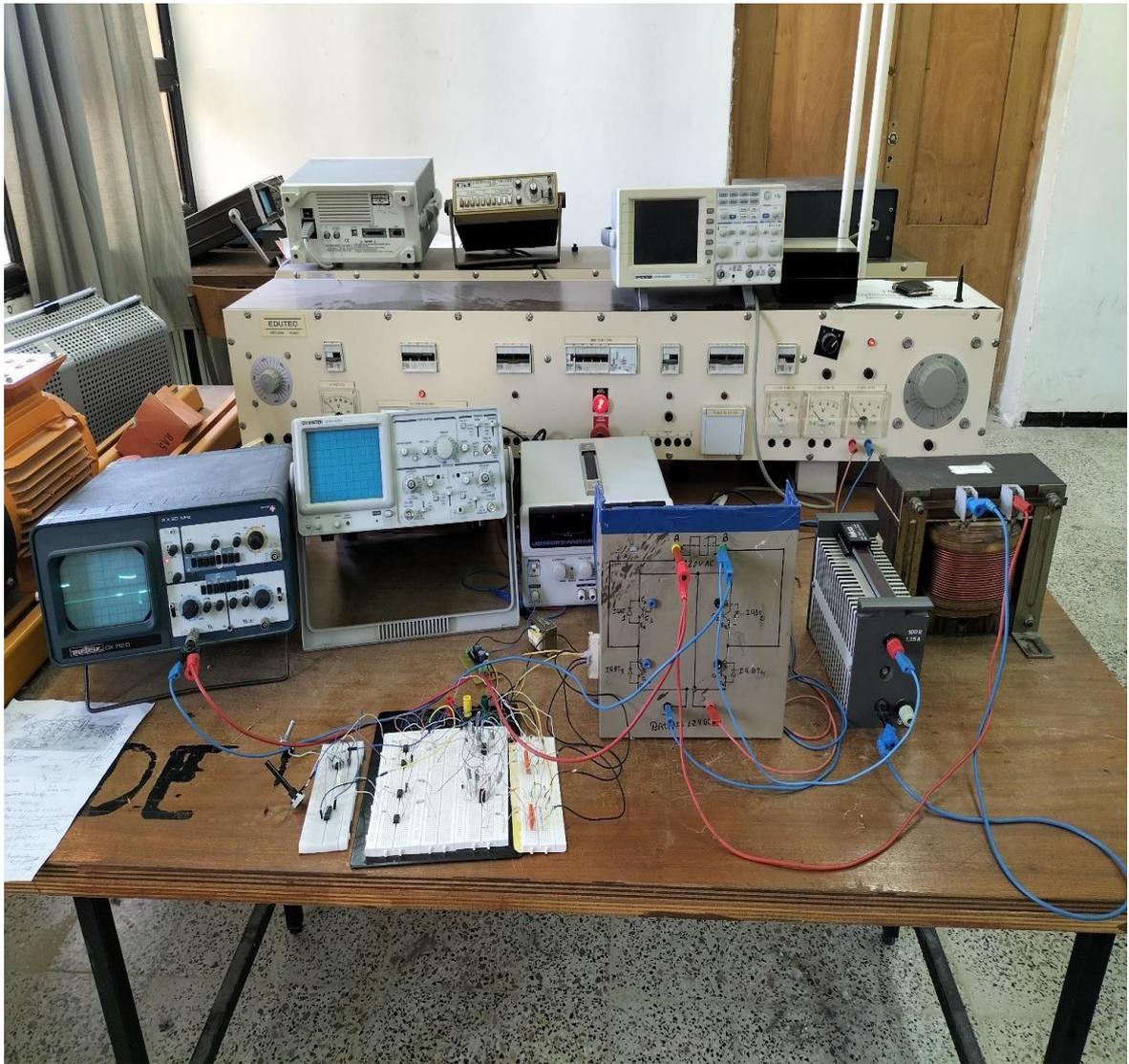


**Figure 59 : Image réelle de la carte de commande**

- 1) L'entrée de réseau 12 V et 5V continue.
- 2) Temporisateur NE555.
- 3) L'inverseur 74ch04.
- 4) quatre optocoupleurs A3121
- 5) deux drivers IR2112.
- 6) dites résistances de protection de circuit.
- 7) dits condensateurs
- 8) deux diodes simples.

### IV.6. Description du banc d'essai

La **figure 60** du banc d'essais expérimentaux présentée ci-dessous. Nous avons implémenté la technique de commande pour commander l'onduleur monophasé, la commande symétrique.



**Figure 60 : Banc d'essai expérimental**

Ce banc d'essais est constitué par : 1) Oscilloscope. 2) Carte de commande réalisée. 3) L'onduleur réalisé. 4) La source de tension continue variable. 5). Alimentation stabilisé 6) La charge (R). 7). Charge (L).

### IV.7. Résultats des essais expérimentaux au laboratoire

Essais N°1 : On a effectué des tests pour visualiser les signaux générés par la carte de commande.

#### IV.7.1. Gâchette 01 voir la figure ci-dessus

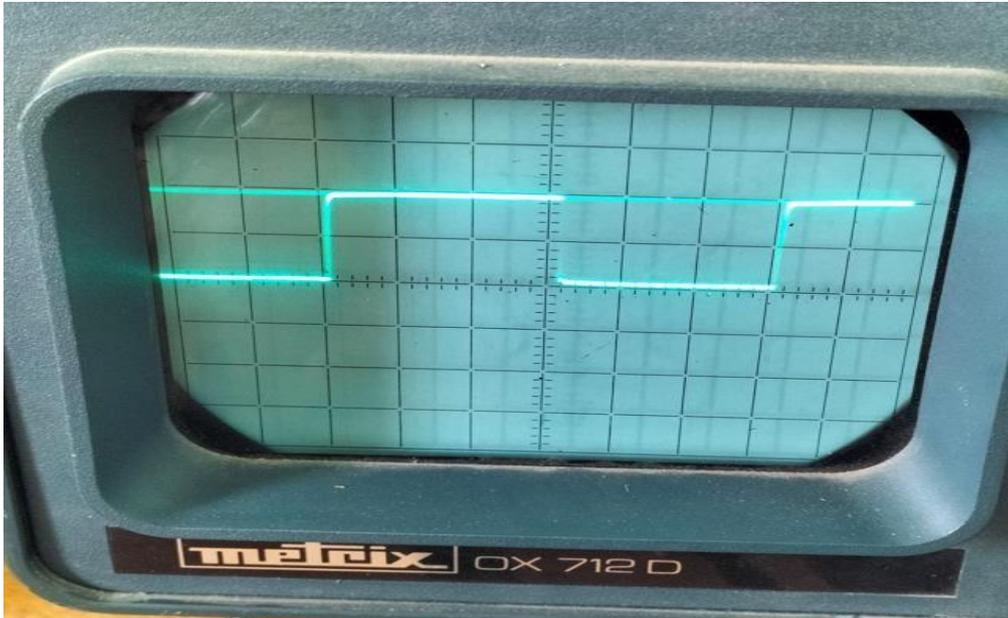


Figure 61 : L'allure de gâchette 01 (5v/div ,2ms/div)

#### IV.7.2. Gchatte02 voir la figure ci ci-dessus

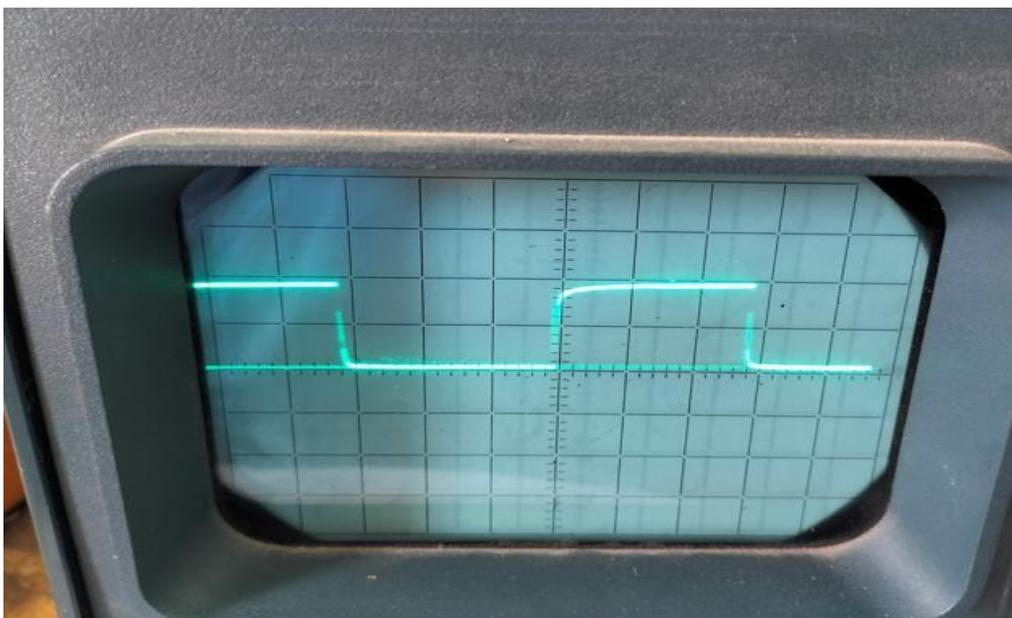


Figure 62 : L'allure de gâchette 02 (5v/div ,2ms/div)

## IV.7.3. Gâchette 03 voir la figure ci ci-dessus

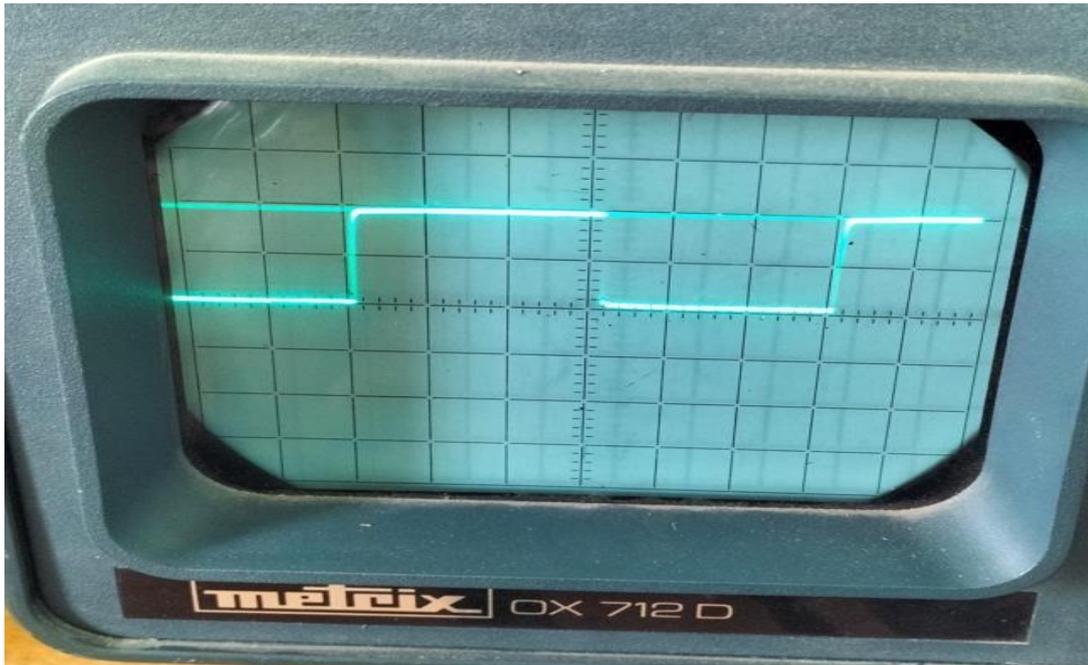


Figure 63 : L'allure de gâchette 03 (5v/div ,2ms/div)

## IV.7.4. Gâchette 04 voir la figure ci ci-dessus

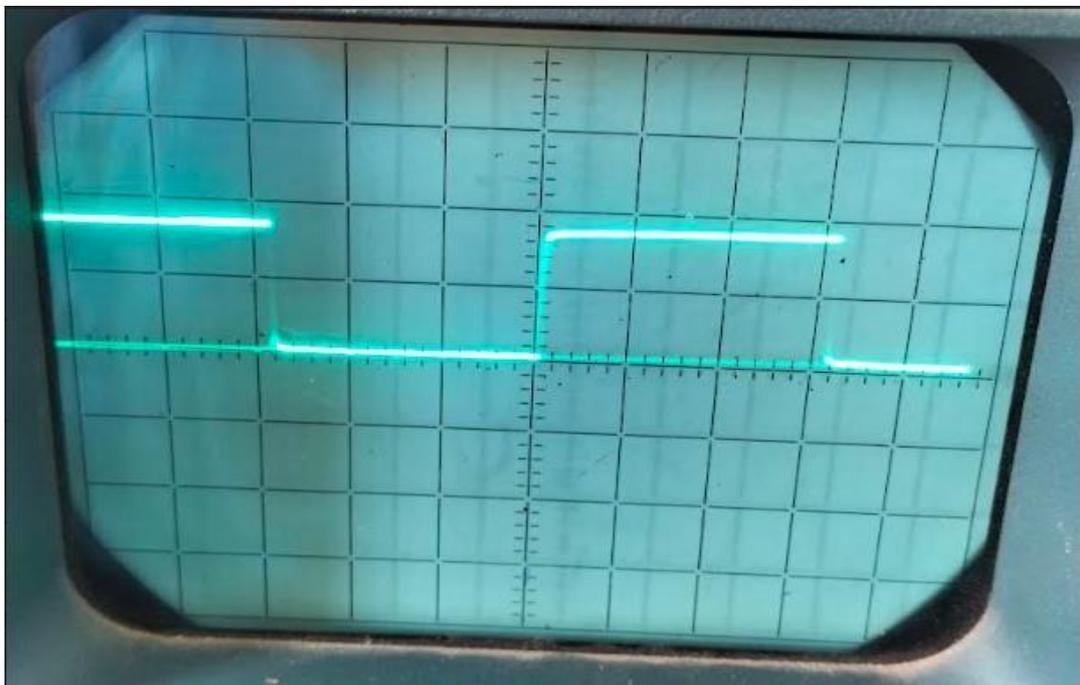


Figure 64 : L'allure de gâchette 04 (5v/div ,2ms/div)

Essais N°2 : Observation des grandeurs électriques pour l'onduleur monophasé en pont.

#### IV.7.5. L'onduleur à vide

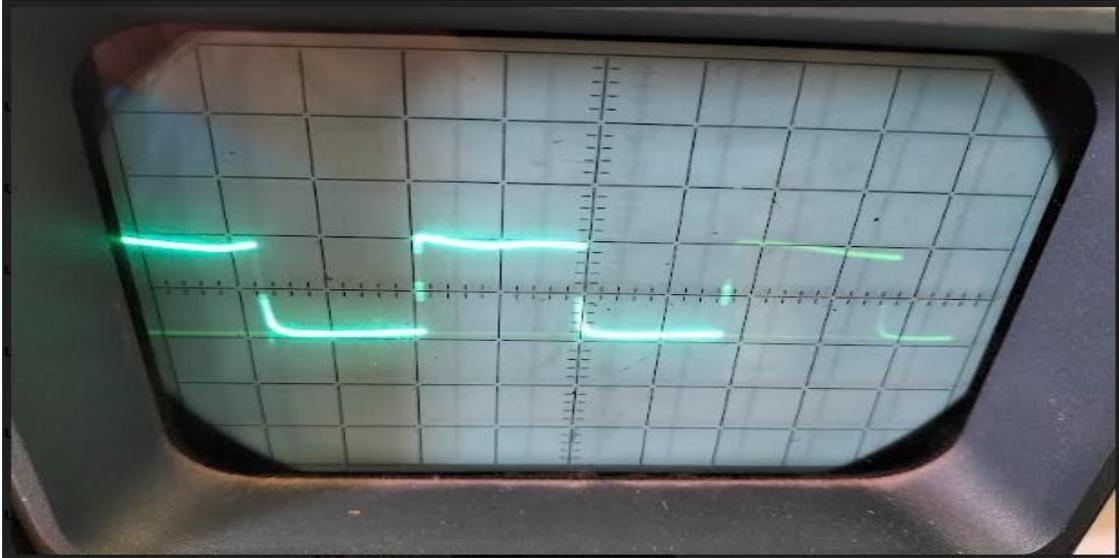


Figure 65 : L'allure de tension à vide (5v/div ,2ms/div)

**Interprétation :** La Figure 65 représente la tension alternative aux bornes de la charge sous la forme créneau.

#### IV.7.6. Débit sur une charge résistive R

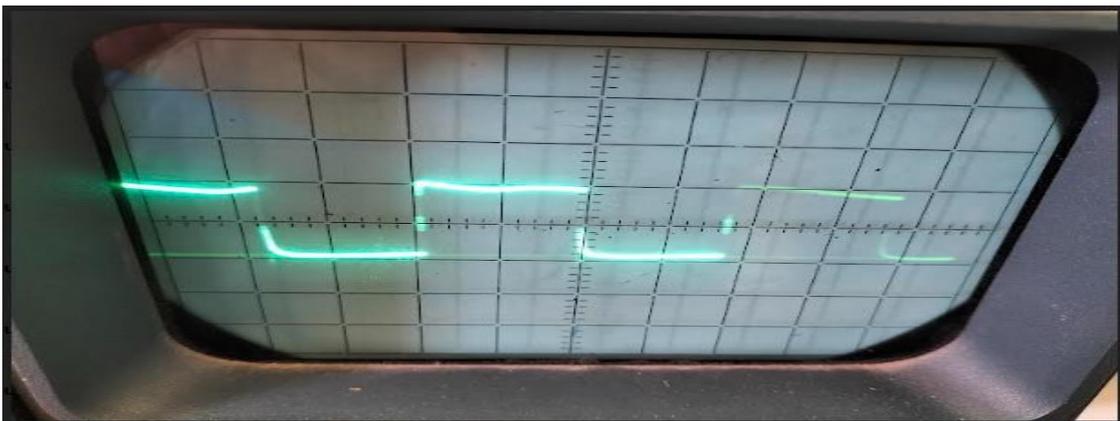


Figure 66 : L'allure de tension en charge R (5v/div ,2ms/div)

❖ **Interprétation :** La Figure 66 représente la tension alternative aux bornes de la charge sous la forme créneau

### IV.7.7. Débit sur une Charge RL

#### IV.7.7.1. La courbe de tension

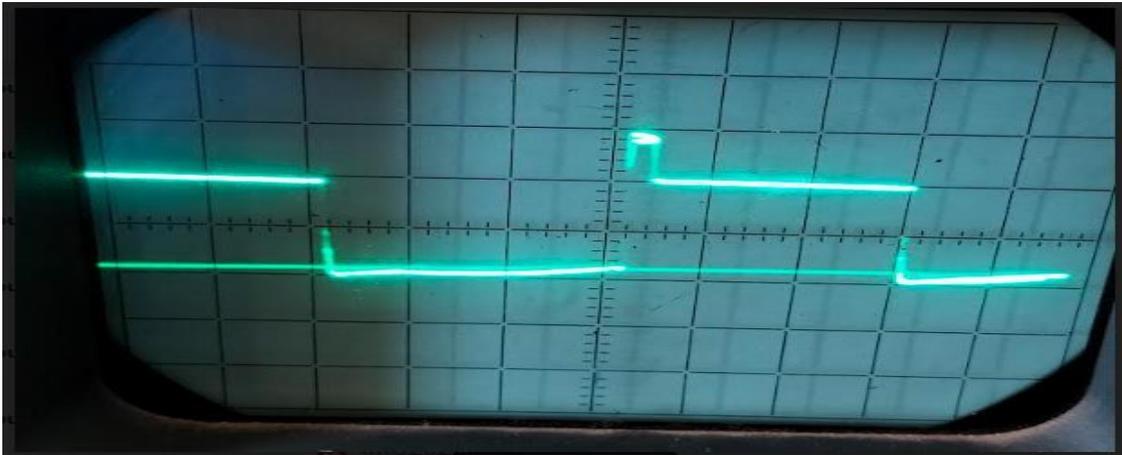


Figure 67 : L'allure de tension en charge RL (5v/div ,2ms/div)

- ❖ **Interprétation :** La Figure 67 représente la tension alternative aux bornes de la charge sous la forme créneau.

#### IV.7.7.2. La courbe de courant

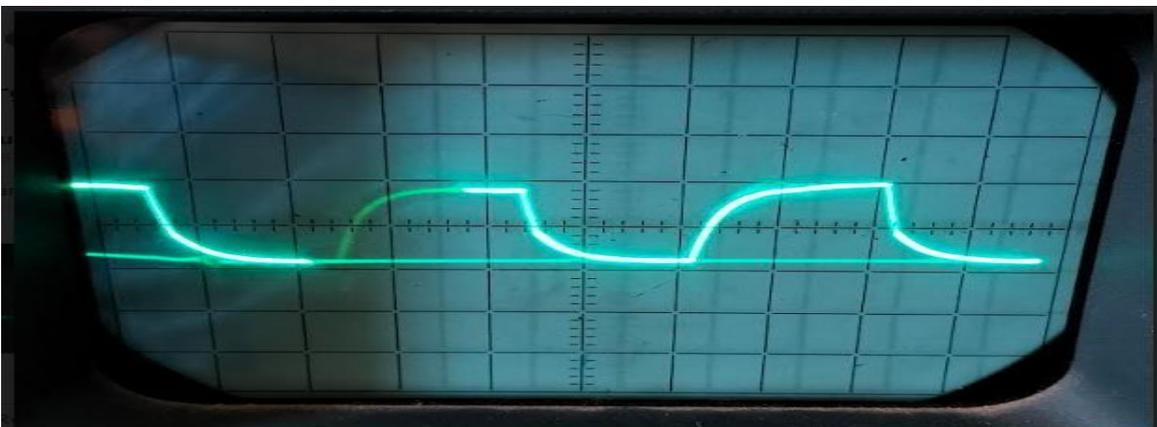


Figure 68 : L'allure de courant en charge RL (5v/div ,2ms/div)

- ❖ **Interprétation :** La Figure 68 représente la courant alternative qui travers la charge sous la forme exponentielle avec retard par rapport à la courbe de tension.

#### IV.7.8. Le Débit après transformateur (9v/220v,600mA)



**Figure 69 : L'allure de tension après transformateur (20v/div ,2ms/div)**

- ❖ **Interprétation :** La **Figure 69** représente la tension alternative aux bornes de la charge après le transformateur sous la forme sinusoïdale.

#### **Remarque :**

La tension de sortie est d'obtenir 150v, pas, car notre objectif était d'avoir à la sortie la tension de 220v à cause des composants électroniques pas fiables.

#### **Conclusion**

À travers ce chapitre, nous avons présenté les différents résultats obtenus de toute réalisation. L'allure de la tension obtenue à la sortie de l'onduleur permet de valider le bon fonctionnement de carte commande qui réalise.

## *Conclusion générale*

## *Conclusion Générale*

---

Dans le cadre de la préparation du diplôme de master en électromécanique, ce travail vise à présenter une étude théorique, simulation et réalisation pratique de l'onduleur monophasé (mise en place d'un banc d'essai expérimental) au niveau du laboratoire de mesure du département d'électrotechnique à l'université de Bejaia.

Le mémoire est organisé en quatre chapitres, en plus d'une introduction. Dans le premier chapitre, nous avons présenté des notions générales sur les onduleurs leurs stratégies de commande et les applications courantes.

Le deuxième chapitre a été consacré à l'explication du fonctionnement de l'onduleur et représenter la modélisation

Le troisième chapitre nous avons étude simulation de l'onduleur sur SIMULINK/MATLAB, et discuter les résultats que nous les avons acquises. Ensuite, nous passons au chapitre quatrième qui est de la réalisation d'onduleur monophasé.

Le quatrième chapitre est l'objet de cette étude traite la méthode de réalisation d'un onduleur qui vise à faire obtenir un courant alternatif à partir d'une tension continue

Ce travail a mis en évidence l'importance de la réalisation pratique, il est vrai Quelques systèmes de simulation nous ont aidés pour savoir ou en va dans l'expérience, mais la réalisation nous a appris beaucoup de choses et de techniques qu'on n'aurait jamais eues avec la simulation.

## *Liste bibliographie*

## *Liste bibliographie*

---

- [1] OKBA Salah et BEDDIAR Walid. « Étude et réalisation d'un onduleur de tension triphasé à MLI », mémoire de Master, UNIVERSITÉ MOHAMED BOUDIAF - M'Sila 2019.
- [2] BERREZZEK Farid « Étude des Différentes Techniques de Commande des Onduleurs à MLI associés à une Machine asynchrone » mémoire de magister, Université Badji Mokhtar. Annaba 2006.
- [3] HAMEURLAINE Sid-Ali et ZELILEF Hamza « Commande d'un Onduleur triphasé par les Techniques de Modulation de Largeurs d'Impulsions à Élimination sélective d'Harmoniques », mémoire de Master, Université Mohammed Seddik Ben Yahia – Jijel 2018.
- [4] S. Guy, B. Robert, Labrique Francis, les convertisseurs de l'électronique de puissance laconversion alternative (volume 4). Édition tec&doc, 1995.
- [5] Onduleur de tension : mise en œuvre et Structures-principes-applications. Techniques d'ingénieur, traité de génie électrique D.3176-3177.
- [6] Onduleurs et harmoniques, Cahiers techniques Merlin Gerin N°159.
- [7] T. Wildi : Électrotechnique, 3e édition, éditions de Boeck université (1999). .
- [8] Commande numérique, régimes intermédiaires et transitoires, Techniques d'ingénieur, traité de génie électrique D.3643-3.
- [9] C. Canudas de Wit, Modélisation, Contrôle vectoriel et DTC. Commande des moteurs asynchrones 1 Éditions Hermès.
- [10] S. MECHERI, << Réalisation d'un onduleur de tension monophasée centrale par carte ARDUINE >>, Université de Constantine I, 2013/2014.
- [11] Midi solaire soit 14h en France métropolitaine l'été.
- [12] G. Séguier and F. Labrique, « Les Convertisseurs de l'Électronique de Puissance », Tome 4 : La Conversion continue alternative', Édition Lavoisier, Technologie et Documentation, 1989.
- [13] Benadel HANI Choudira MESSAOUD, « Technique de commande d'un onduleur

## *Liste bibliographie*

---

triphase », projet de fin d'études licence génie électrique.

[14] Shahram KARIMI « Continuité de service des convertisseurs triphasés de puissance etprototypage "FPGA in the loop": application au filtre actif parallèle »

[15] : M. Zhifeng DOU « Sûreté de fonctionnement des convertisseurs nouvelles structures deredondances pour onduleurs sécurisés à tolérance de pannes ».

[16] Ken Shirriff “ Secrets of Arduino P.W.M.”

[17] Guy S2GUIER. Les convertisseurs de l'électronique de puissance, Tec & Doc, 1993.

[18] pierre. Agathis. Électricité, électronique de commande de puissance, électrotechnique, Dunod, paris, 1997

[19] Clenet. Démarreurs et variateurs cahier technique Schneider électrique n°208, édition novembre 2003

[20] A. BENMOUFOK, F. BEDREDINE Étude et réalisation d'un pont mixte asymétrique pour la commande d'un moteur à courant continu. Projet de fin d'études (D.E.U.A), Université de Bejaia, 2002.

[21] [Dicodunet.com/définitions/sciences/ne555.htm](http://dicodunet.com/définitions/sciences/ne555.htm)

[22] <http://for-ge.blogspot.com/2015/07/ne555.html>

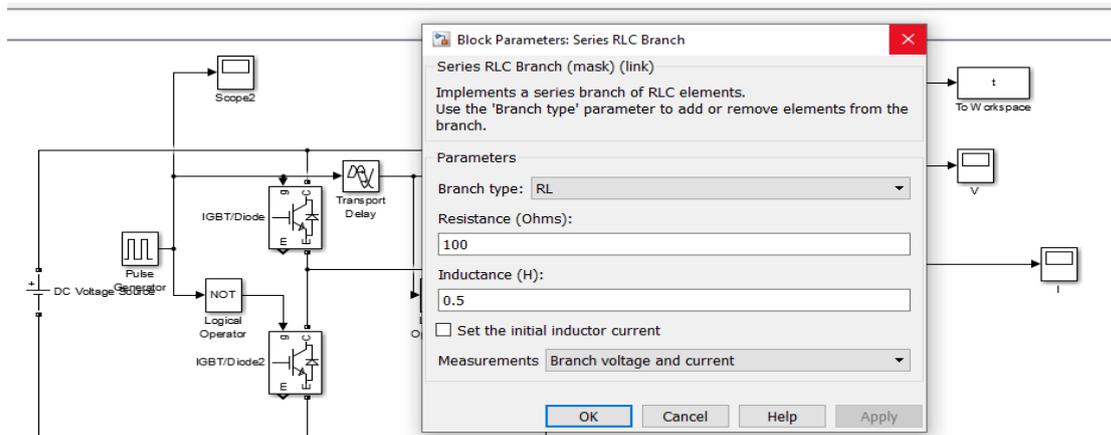
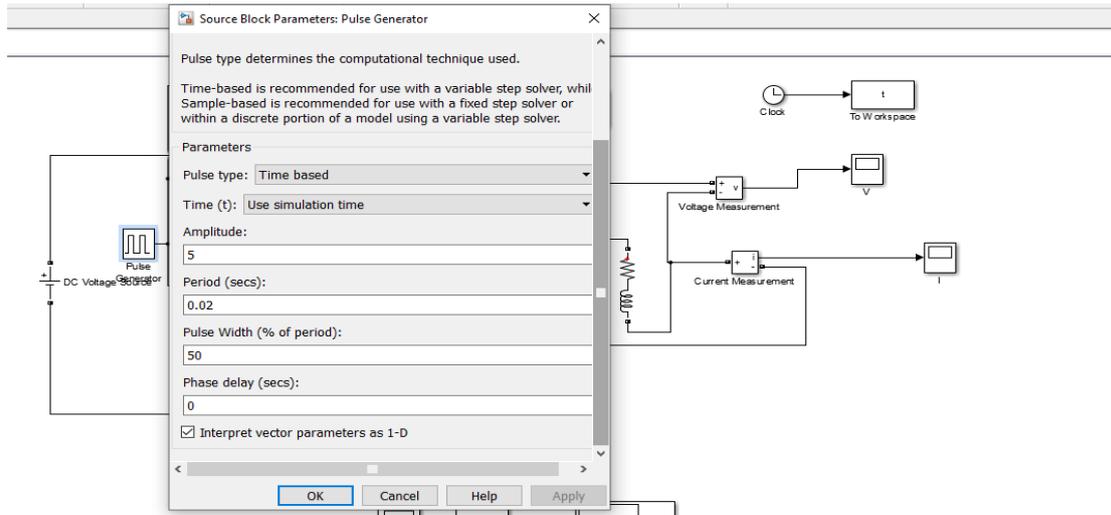
[23] Debbou Mustapha, Ouatmani Riad. Étude et réalisation d'un onduleur de tension triphasé, université Abderrahmane mira bejaia,2008.

[24] CASSAGNE Antoine, COCAUD Jérémy. Conception d'un hacheur Buck 200W 24V-12V, Polytech'Tours, du 12 octobre 2011 au 24 février 2012.

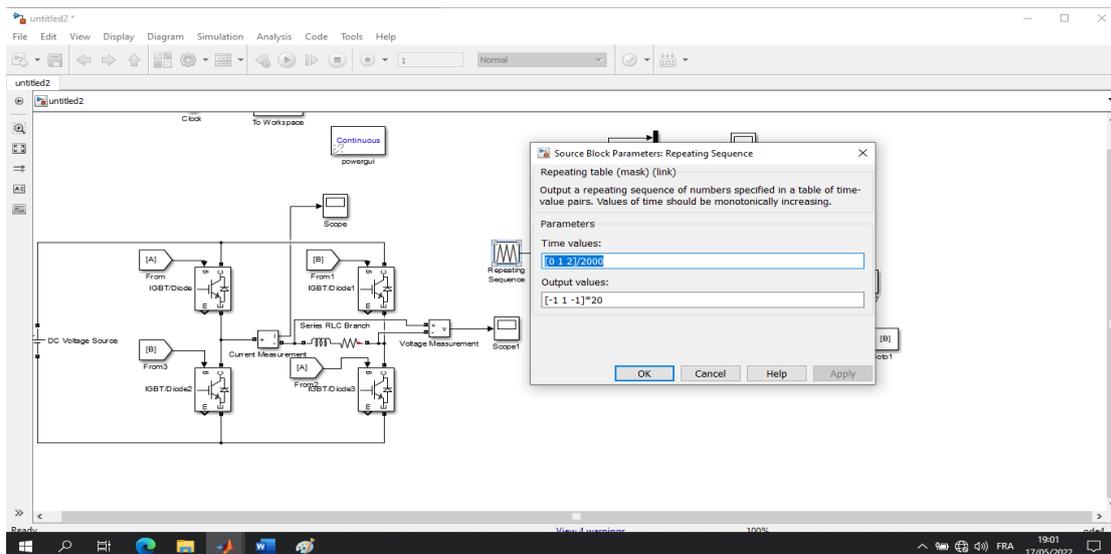
[25] <https://www.electromecanique.net/2018/10/photocoupleur-lfonctionnement.html>.

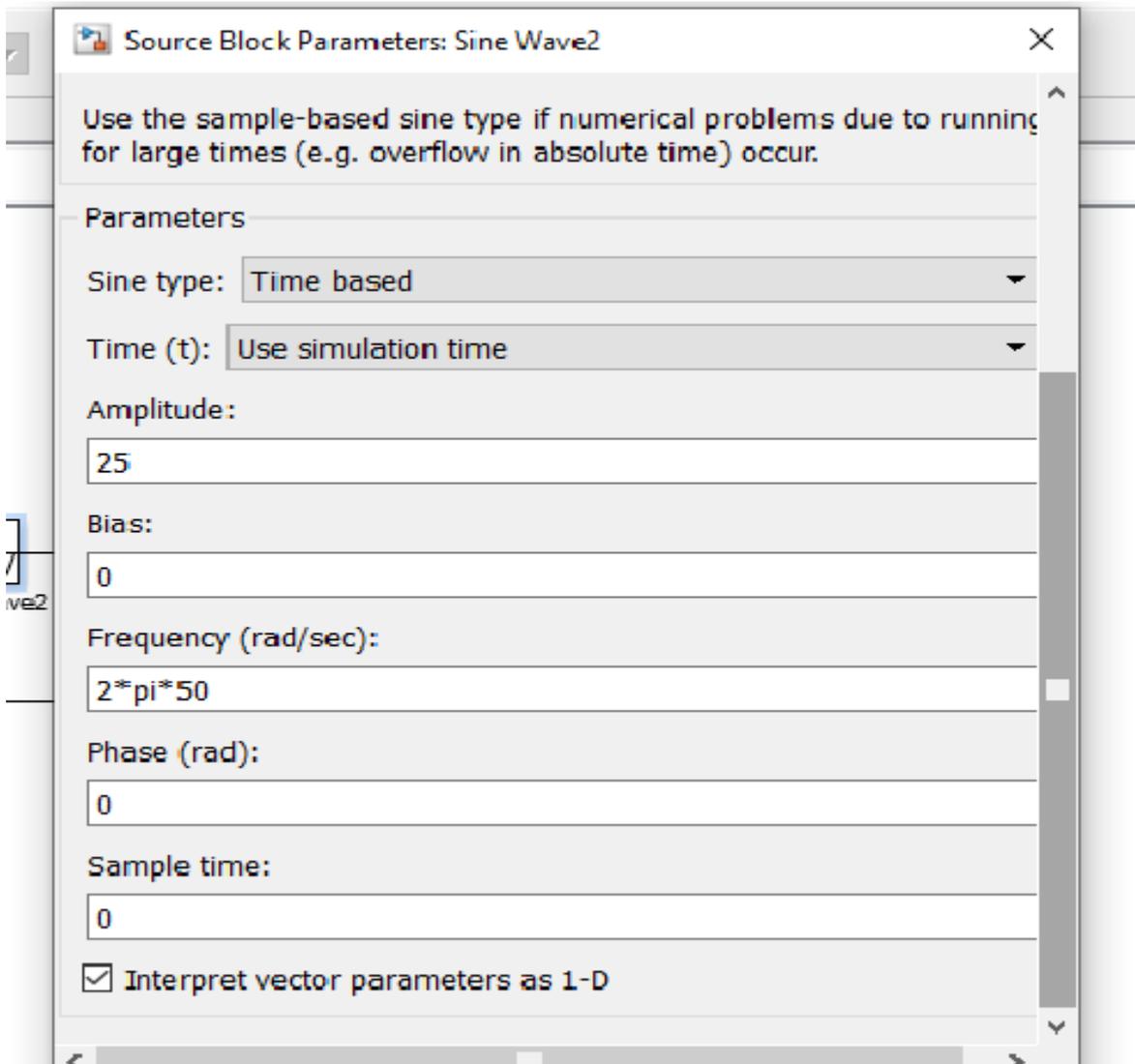
# *Annexes*

## 1.COMMANDE 120



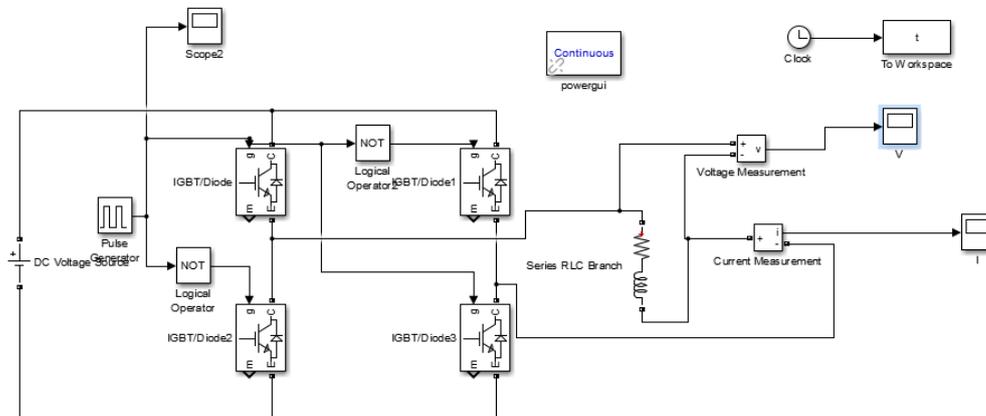
## 2.COMMANDE MLI



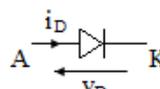
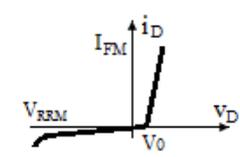
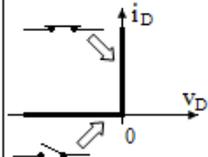
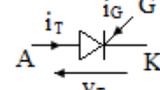
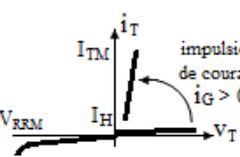
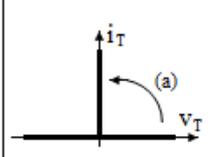
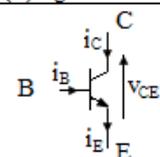
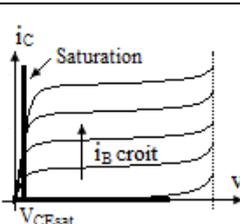
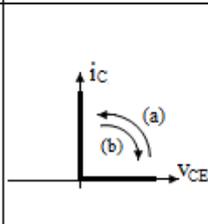
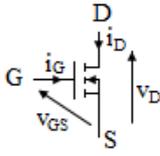
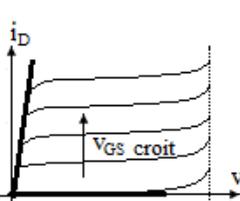
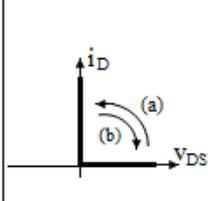
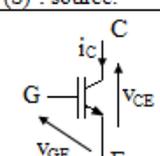
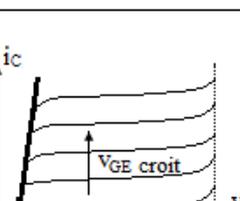
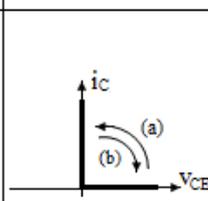
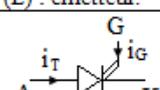
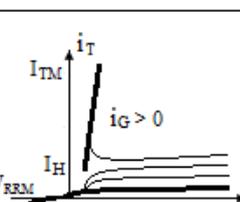
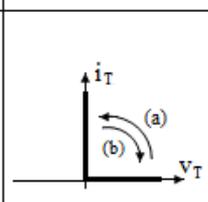


### 3.COMMANDE 180

1



Semi-conducteurs de l'électronique de puissance

Composant de l'électronique de puissance	Symbole	Fonctionnement en commutation	Caractéristique statique réelle	Caractéristique statique idéale
<b>Diode</b>	 <p>(A) : anode (K) : cathode</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Se ferme pour :</b> <math>v_D &gt; V_0 &gt; 0</math> (<math>V_0</math> : tension de seuil)</li> <li>• <b>S'ouvre dès que :</b> <math>i_D</math> s'annule</li> </ul>		
<b>Thyristor</b>	 <p>(A) : anode (K) : cathode (G) : gâchette</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Amorçage:</b> Lorsque <math>v_T &gt; 0</math>, il se ferme si on envoie une impulsion de courant <math>i_G</math> dans la gâchette.</li> <li>• <b>Blocage :</b> il s'ouvre dès que <math>i_T</math> s'annule.</li> </ul>		
<b>Transistor bipolaire</b> <b>BJT</b> (Bipolar Junction Transistor)	 <p>(C) : collecteur. (B) : base. (E) : émetteur.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Etat passant :</b> Il se ferme lorsque le courant de base <math>i_B</math> est suffisamment fort. <math>i_B &gt; I_{Bsat}</math></li> <li>• <b>Etat bloqué :</b> Il se bloque lorsque le courant de base <math>i_B</math> est nul.</li> </ul>		
<b>Transistor à effet de champ</b> <b>MOSFET</b> (Métal Oxyde Semi-conducteur)	 <p>(D) : drain. (G) : grille. (S) : source.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Etat passant :</b> Il se ferme pour <math>V_{GS} &gt; V_{GS(s)} &gt; 0</math> (<math>V_{GS(s)}</math> : tension de seuil)</li> <li>• <b>Etat bloqué :</b> Il se bloque lorsque <math>v_{GS}</math> est nulle.</li> </ul>		
<b>Transistor bipolaire à grille isolé</b> <b>IGBT</b> (Insolated Gate bipolar Transistor)	 <p>(C) : collecteur. (G) : grille. (E) : émetteur.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Etat passant :</b> Il se ferme lorsque <math>V_{GE} &gt; V_{GE(s)} &gt; 0</math> (<math>V_{GE(s)}</math> : tension de seuil)</li> <li>• <b>Etat bloqué :</b> Il se bloque lorsque <math>v_{GE}</math> est nulle.</li> </ul>		
<b>Thyristor commandé à l'ouverture</b> <b>GTO thyristor</b> (Gate Turn Off thyristor)	 <p>(A) : anode (K) : cathode (G) : gâchette (Gate)</p>	<p>Le GTO est un thyristor dont la gâchette permet de commander l'amorçage et le blocage. (ouverture et fermeture commandées)</p>		

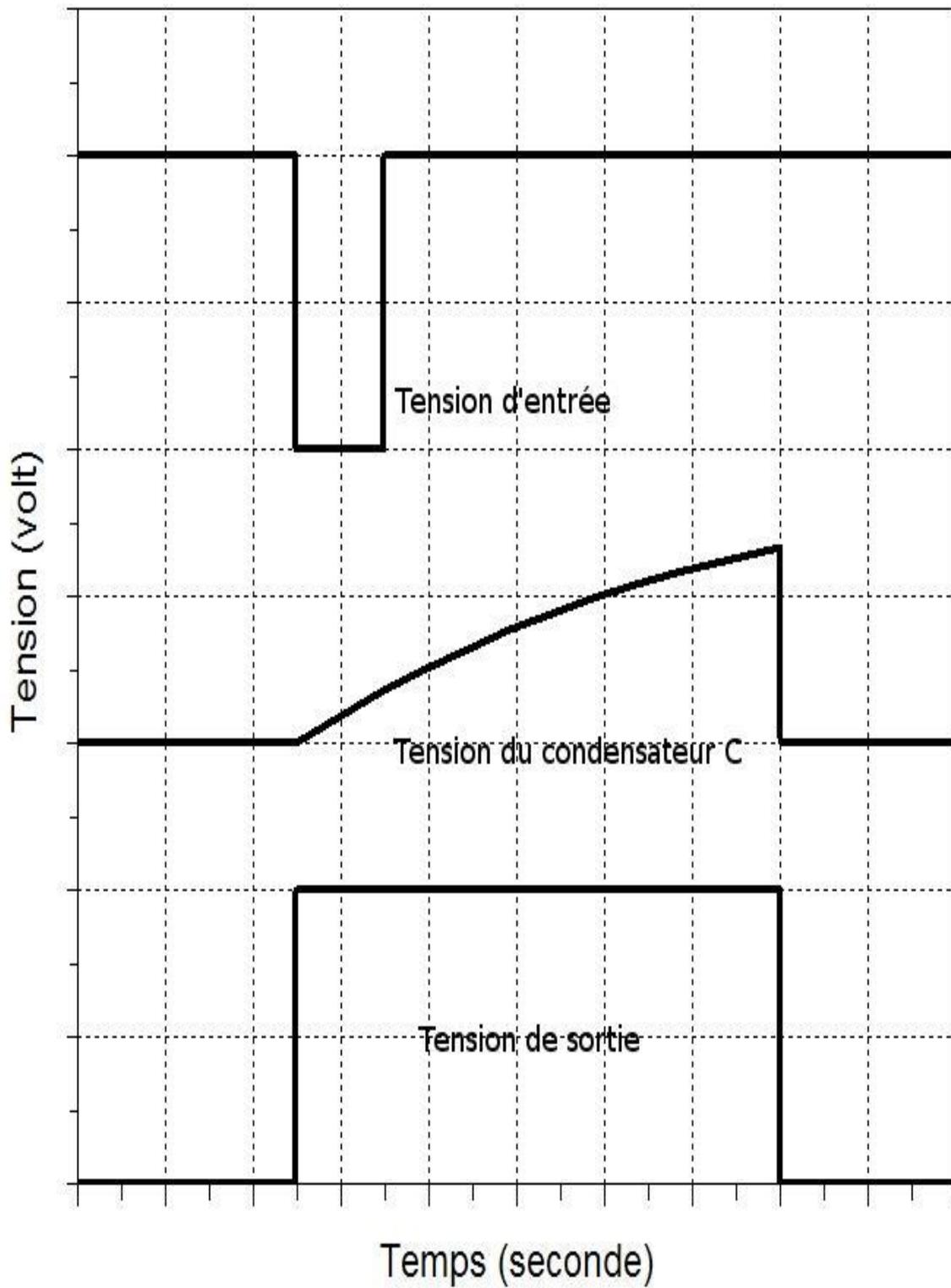


Figure Forme d'onde du NE555 en configuration monostable.

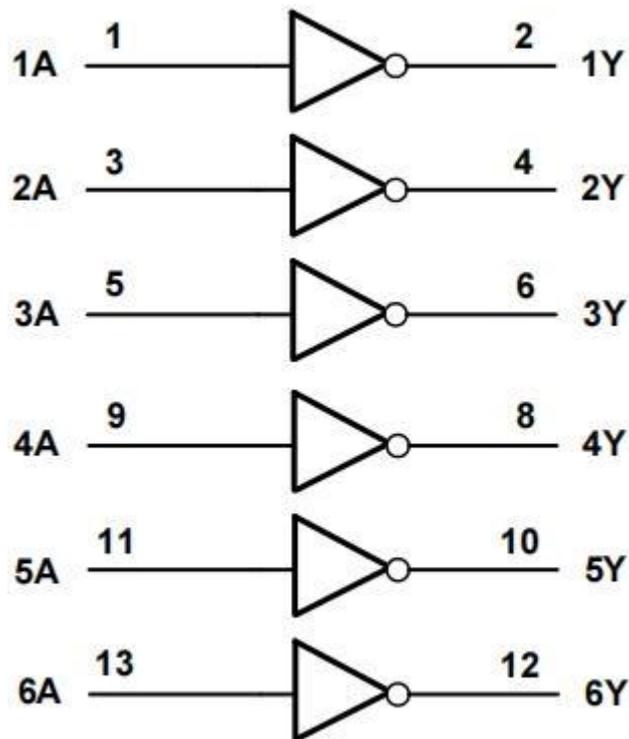


Figure Logic Diagram 74HC04

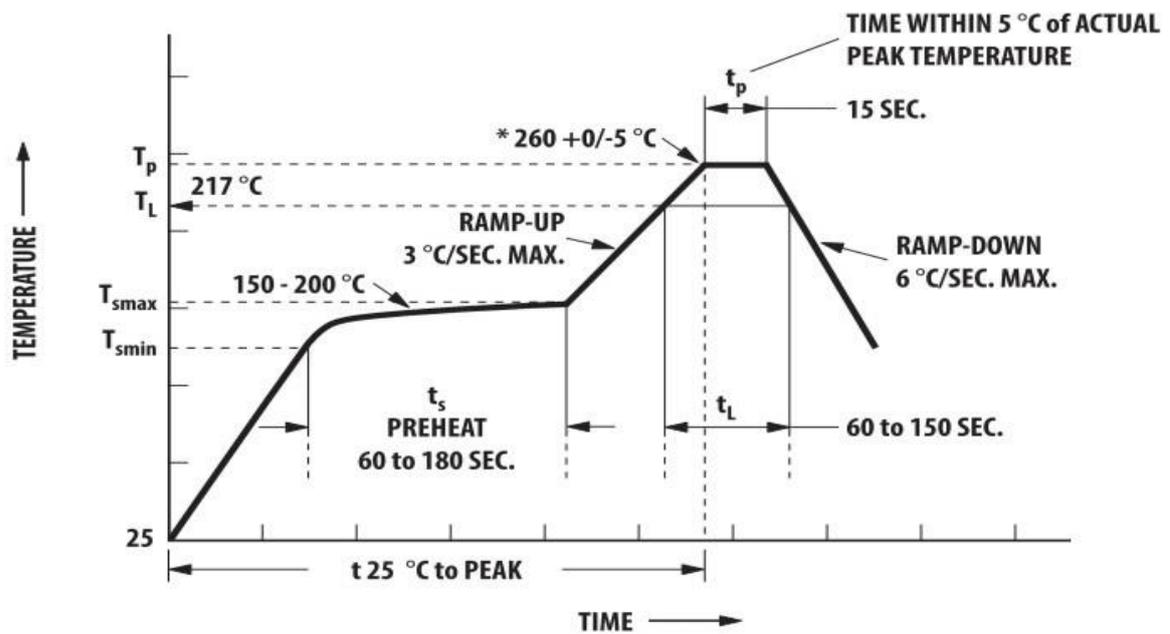


Figure Solder reflow Temperature profile

### Recommended Pb-Free IR Profile

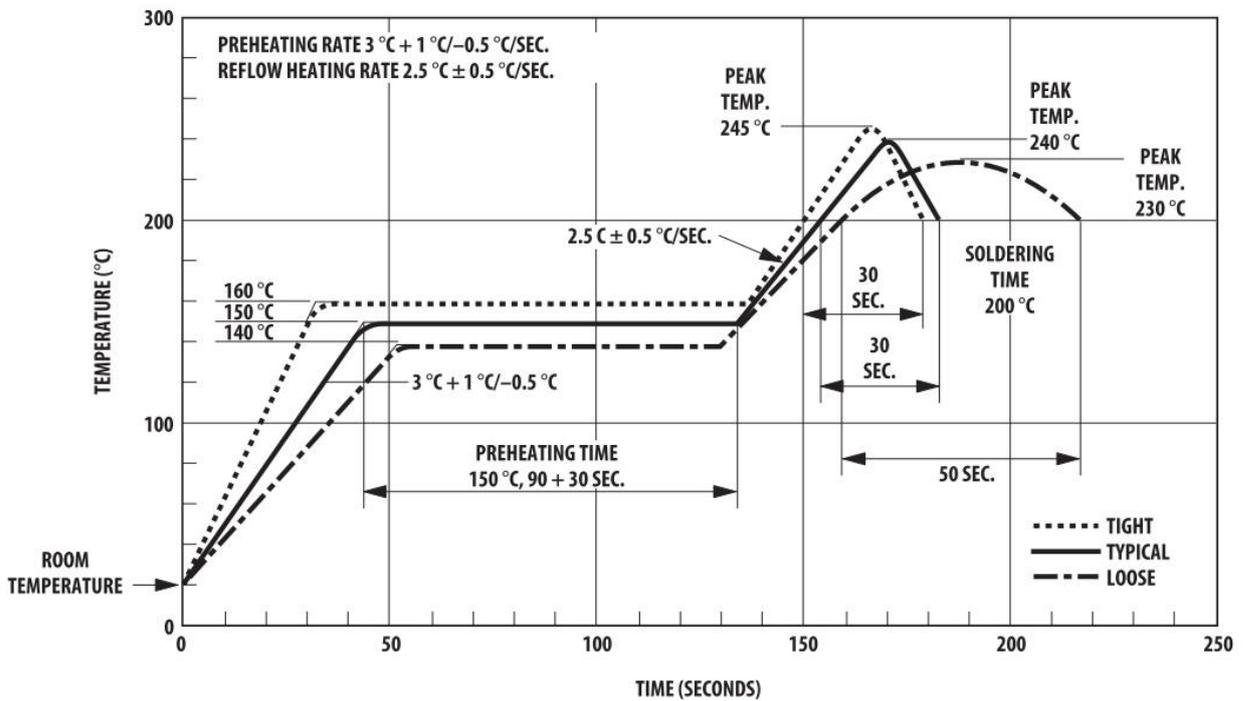


Figure Recommended pb-Free IR Profile



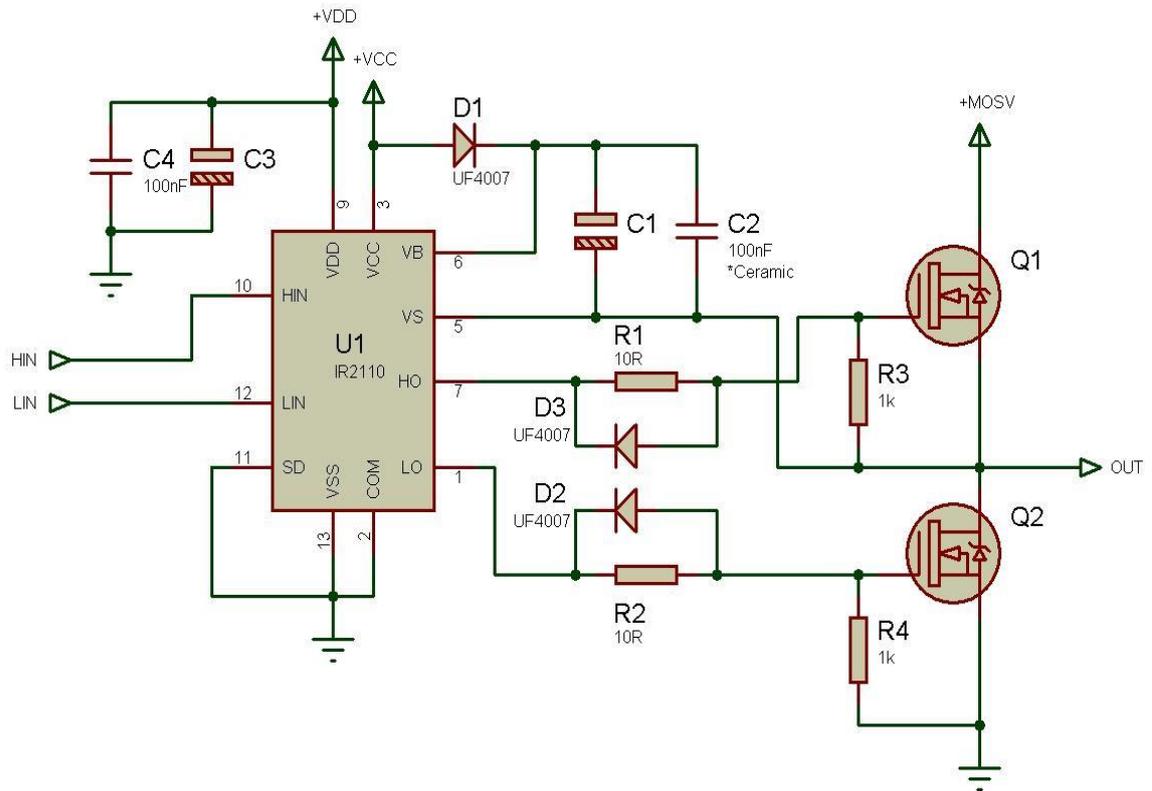


Figure – Basic IR2110 circuit for driving half-bridge

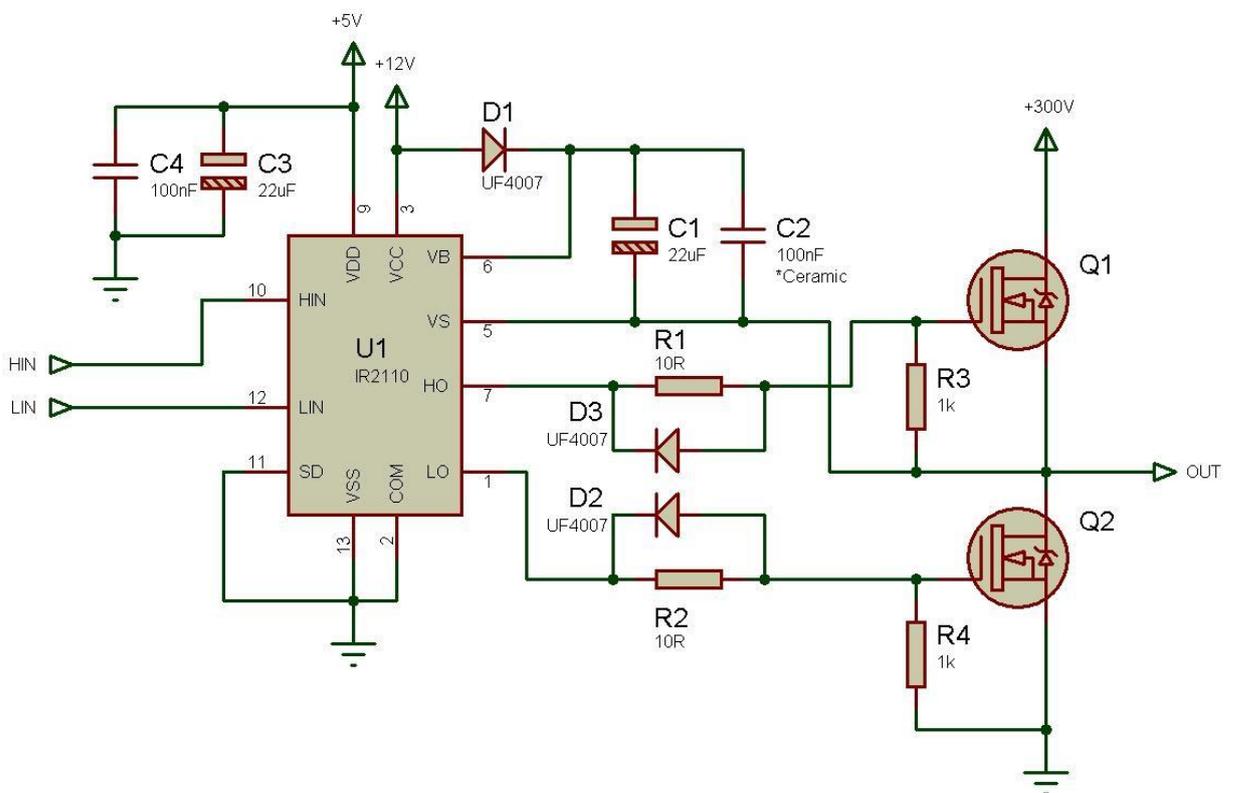
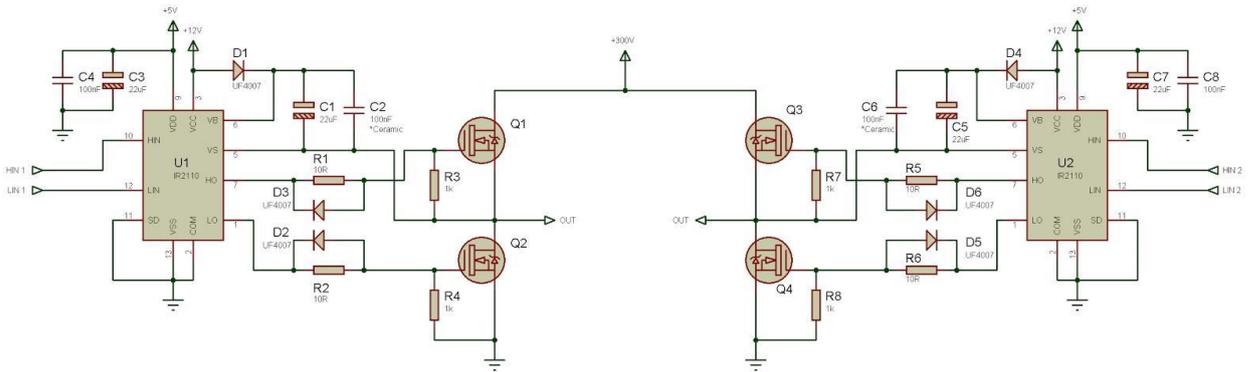
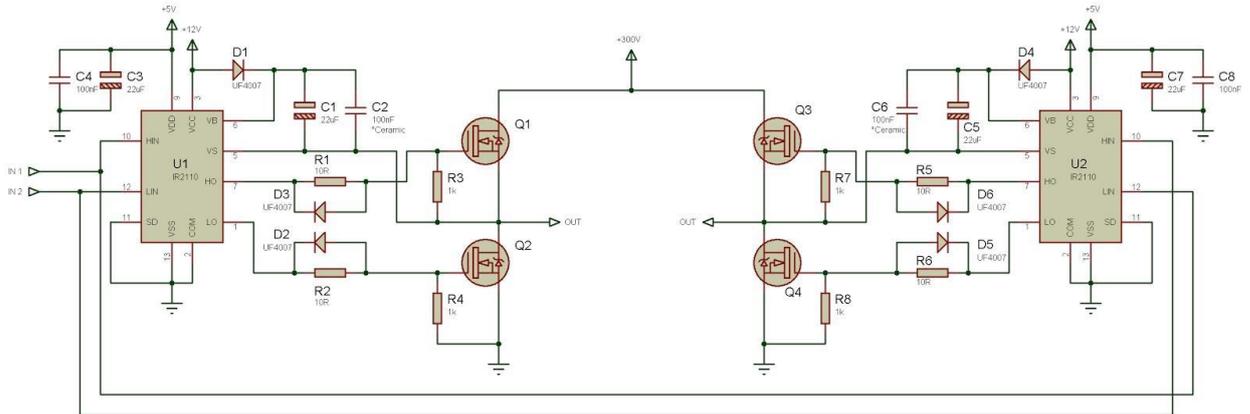


Figure – IR2110 circuit for high-voltage half-bridge drive



**Figure – IR2110 circuit for high-voltage full-bridge drive with independent switch control**



**Figure – IR2110 circuit for high-voltage full-bridge drive with tied switch control – control with 2 input signals**

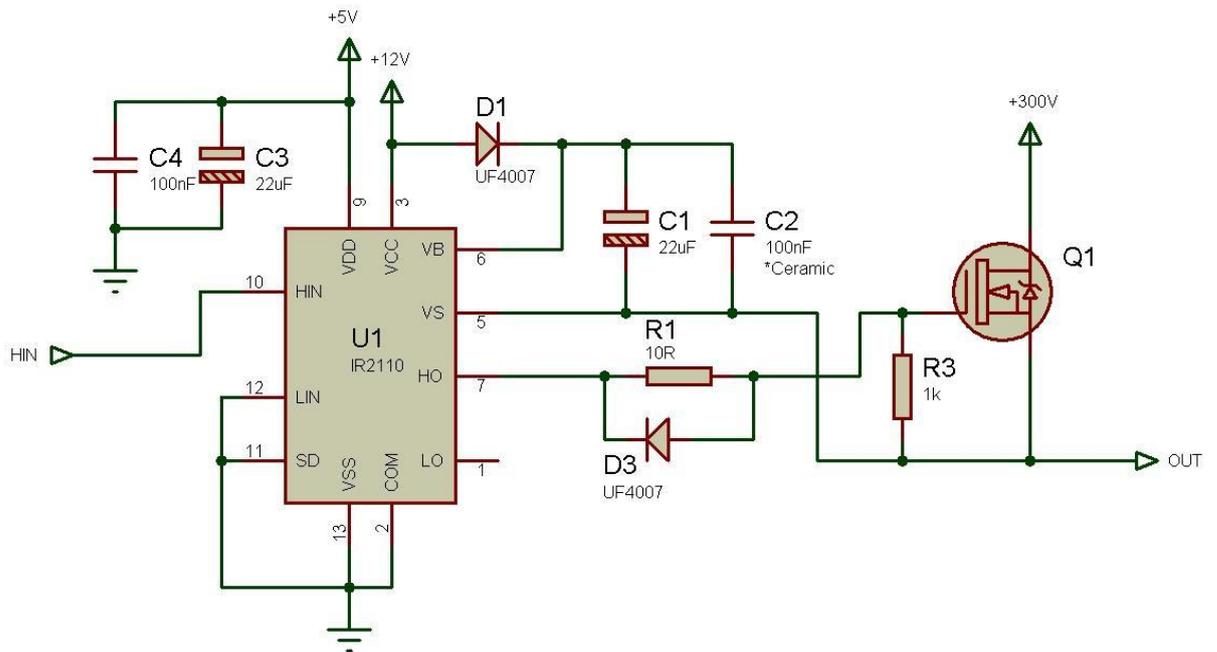


Figure – Using the IR2110 as a single high- voltage high-side driver

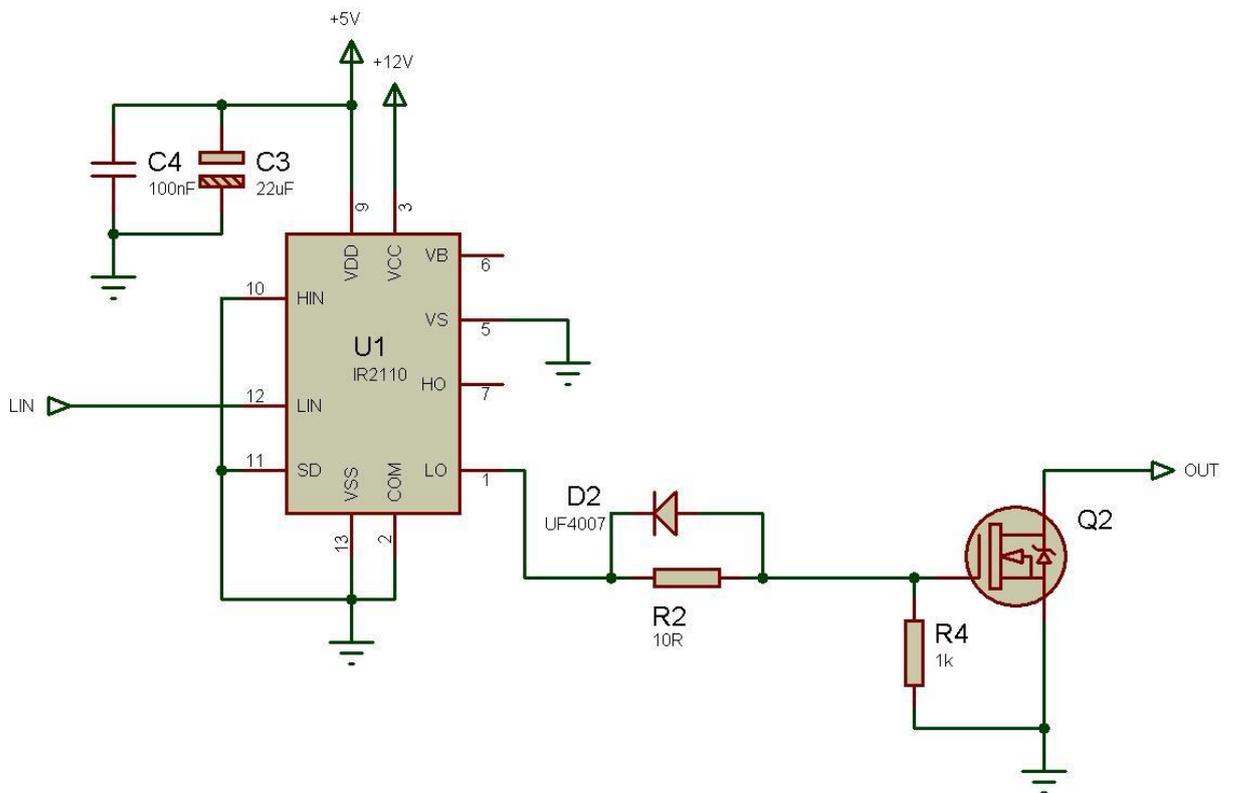


Figure – Using the IR2110 as a single low-side driver



# *Tables des matières*

**Remerciements**

**Dédicace**

**Sommaire**

**Liste d'abréviation**

**Liste des tableaux**

**Liste des figures**

Introduction générale..... 1

**Chapitre I**

**Généralité sur les onduleurs et leurs Commandes**

Introduction..... 4

I.1.Définition de l'onduleur..... 4

I.2.Types d'onduleurs.....4

I.2.1.Onduleur autonome.....4

I.2.2.Onduleur non autonome..... 5

I.3.Principe général de fonctionnement..... 5

I.4.Applications des onduleurs..... 6

I.4.1.Applications..... 6

I.4.1.1.Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone..... 6

I.4.1.2.Alimentation de secours..... 7

I.4.1.3.Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes..... 7

I.4.1.4.Applications relatives aux transports..... 8

I.4.1.4.1.Transports ferroviaires..... 8

I.4.1.4.2.Transports aériens..... 8

I.4.1.4.3.Transports maritimes..... 8

I.5.Onduleur de tension..... 8

I.6.Onduleur de courant..... 10

I.7.Onduleur à résonance..... 11

I.7.1.Onduleur à résonance parallèle..... 11

I.7.2.Onduleur à résonance série..... 11

I.8.Onduleur de tension triphasé..... 12

## *Table des matières*

---

I.9.Stratégies de commande.....	12
I.9.1.Commande 180°.....	12
I.9.2.Commande 120°.....	13
I.9.3.Commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI).....	13
I.9.3.1.Modulation sinusoïdale (MLIS).....	14
I.9.3.2.Modulation vectorielle (SVM).....	15
I.10.Paramètre de performance de l'onduleur.....	15
I.10.1.Le taux de distorsion.....	15
I.10.2.Le facteur de la nième harmonique HF <sub>n</sub> .....	15
Conclusion.....	16

## **Chapitre II**

### **Modalisation de l'onduleur monophasé et leurs commandes**

Introduction.....	18
II.1.Définition de l'onduleur monophasé.....	18
II.2.Principe de fonctionnement d'un onduleur.....	19
II.2.1.Onduleurs hybride ou intelligent.....	19
II.2.2.Principe de fonctionnement d'un onduleur monophasé.....	20
II.3.Commande de l'onduleur monophasée.....	24
II.3.1.Commande à rapport cyclique fixe.....	25
II.3.2. Commande à rapport cyclique variable.....	26
Conclusion.....	28

## **Chapitre III**

### **Simulation des techniques de Commande des onduleurs monophasés**

Introduction.....	30
III.1.Commande 180° d'un onduleur monophasé.....	30
III.2.Commande 120° d'un onduleur monophasé.....	32
III.3.Commande à Modulation de largeur d'impulsion (MLI).....	34
Conclusion.....	36

## **Chapitre IV**

### **Réalisation et expérimentation de prototype d'onduleur monophasé**

Introduction.....	38
IV.1.Composants de l'interrupteur de puissance.....	38
IV.2.Réalisation de la carte de commande et la partie de puissance.....	38
IV.2.1.Carte de commande.....	38
IV.2.1.1.Alimentation stabilisée.....	39
IV.2.1.1.1.Transformateur.....	41
IV.2.1.1.2.Redresseur (Pont de diode).....	41
IV.2.1.1.3.Filtrage (les condensateurs).....	41
IV.2.1.1.4.Régulation.....	42
IV.2.1.1.5.Protection après régulation.....	42
IV.2.1.2.Partie d'isolation et d'amplification des signaux.....	42
IV.2.1.2.1.Oscillateur de fréquence (Circuit intégré NE55).....	42
IV.2.1.2.2.L'isolation galvanique.....	50
IV.2.2.Réalisation de la carte de commande.....	55
IV.2.3.Partie de puissance (onduleur monophasé).....	57
IV.2.3.1.Transistor IGBT.....	57
IV.2.3.1.1.Principe de fonctionnement.....	57
IV.2.3.1.2.Caractéristiques du transistor IGBT.....	58
IV.2.3.2.La diode.....	58
IV.2.3.3.Principe de fonctionnement.....	59
IV.2.3.3.1.Caractéristiques statiques d'une diode.....	59
IV.2.3.4.Dissipateur de chaleur.....	60
IV.3.Réalisation de l'onduleur (circuit de puissance).....	62
IV.4.Les étapes de conception d'une carte électronique.....	64
IV.5.Résultats des circuits commande dans plaque essais.....	65
IV.6.Description du banc d'essai.....	65
IV.7.Résultats des essais expérimentaux au laboratoire.....	67
IV.7.1.Gâchette 01 voir la figure ci dosseau.....	67
IV.7.2.Gchatte02 voir la figure ci dosseau.....	67
IV.7.3.Gâchette 03 voir la figure ci dosseau.....	68
IV.7.4.Gâchette 04 voir la figure ci dosseau.....	68

## *Table des matières*

---

IV.7.5.L'onduleur à vide.....	69
IV.7.6.Débit sur une charge résistive R.....	69
IV.7.7.Débit sur une Charge RL.....	70
IV.7.7.1.La courbe de tension.....	70
IV.7.7.2. La courbe de courant.....	70
IV.7.8.Le Débit après transformateur (9v/220v,600mA).....	71
Conclusion.....	71
Conclusion générale.....	73
Liste bibliographie	
Annexes	

# Étude et réalisation d'un onduleur monophasé.

## Résumé

Dans les domaines industriels, tels que la commande des systèmes des énergies renouvelables (éolien, photovoltaïque ...) où ils dépendent fortement des machines alternatives, nous avons besoin d'un onduleur électrique pour convertir la tension continue (énergies stockées des batteries) en alternative pour la connecter au réseau électrique.

Dans ce travail, nous étudions théoriquement quelques méthodes de commande de l'onduleur sous MATLAB/SIMULINK (commande 180 et Commande MLI...), et nous avons mené une démarche appliquée en réalisant et expérimentant un schéma réel utilisant un oscillateur Ne555, des optocoupleurs pour l'isolation et des drivers IR2112 pour piloter les interrupteurs de l'onduleur.

**Mots clés :** Ne555, ir2112, a3120, onduleur, transformateur, rapport cyclique, gâchette, signal commande, commande 180, Commande MLI.

## Abstract

In industrial fields, such as the control of renewable energy systems (wind, photovoltaic, etc.) where they are highly dependent on alternative machines, we need an electrical inverter to convert direct voltage (stored energy from batteries) into alternative to connect it to the power grid.

In this work, we theoretically study some inverter control methods under MATLAB/SIMULINK (180 control and MLI control, etc.), and we have carried out an applied approach by realizing and experimenting with a real diagram using a Ne555 oscillator, optocouplers for insulation and IR2112 drivers to drive the inverter switches.

**Keywords:** Ne555, ir2112, a3120, inverter, transformer, duty cycle, trigger, command signal, command 180, PWM command.

## ملخص

في المجالات الصناعية، مثل التحكم في أنظمة الطاقة المتجددة (الرياح، الكهروضوئية، وما إلى ذلك) حيث تعتمد بشكل كبير على الآلات المتناوبة، نحتاج إلى عاكس كهربائي لتحويل الجهد المباشر (الطاقة المخزنة من البطاريات) إلى بديل لتوصيله بشبكة الطاقة.

في هذا العمل، ندرس نظرياً بعض طرق التحكم في العاكس تحت 180 MATLAB / SIMULINK تحكم والتحكم MLI، إلخ، وقمنا بتنفيذ نهج تطبيقي من خلال تحقيق وتجريب مخطط حقيقي باستخدام مذبذب Ne555، optocouplers للعزل وبرامج تشغيل IR2112 لقيادة مفاتيح العاكس.

**الكلمات المفتاحية:** Ne555، ir2112، a3120، العاكس، المحول، دورة العمل، الزناد، إشارة الأمر، الأمر 180، أمر PWM.