

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane Mira

Faculté de la Technologie



Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : automatique

Spécialité : automatique et système et Informatique industrielle

Thème

Etude et réalisation d'un onduleur monophasé pur sinus

Préparé par :

TAMADARTAZA Cylia

AZIROU Naim

Dirigé par :

AISSOU Said

Examiné par :

L. TIGHZERT

M. HANFOUG

Année universitaire : 2021/2022

Introduction Général

Introduction Générale

Ces dernière années, le secteur de l'électronique de puissance s'est considérablement développé, en offrant un fort potentiel de conversion d'énergie électrique. La recherche dans ce domaine a pris en compte plusieurs aspects, en particulier la topologie, la structure et les performances du convertisseur interrupteur d'alimentation et la technologie de contrôle.

Par l'électronique de puissance ou l'électronique de la commutation on entend le traitement et le contrôle du transfert d'énergie électrique entre une source et un récepteur, en réalité, elle peut être définie par l'électronique spécialisée dans le changement de forme de tension et de courant électrique associés à l'aspect énergétique des circuits électriques on l'appelle aussi «conversion statique de l'énergie électrique» elle permet de convertir une énergie disponible sous une forme donnée (continue, alternative, basse ou haute tension etc..) en une autre. [1] [2]

Les convertisseurs statiques peuvent être classés selon leurs mode de commutation ou mode de conversion. Sachant que « l'électronique de puissance » s'intéresse au fait de relier une source d'énergie à un récepteur donné, il devient possible de classer les structures de conversion d'énergie électrique en quatre catégories.[3]

1. Convertisseur **alternatif-continu** : **REDRESSEURS** ;

utilisation: alimentation des moteurs à courant continu, charge des batteries ;

2. Convertisseur **alternatif-alternatif** : **GRADATEURS**;

utilisation: production des vitesses variables en alternatif (levage, machine-outil).

3. Convertisseur **continu-continu** : **HACHEURS** ;

utilisation: commande des moteurs à courant continu (vitesse variable), alimentation à découpage.

4. Convertisseur **continu-alternatif** : **ONDULEURS** ;

De nos jours, les énergies renouvelables occupent une place beaucoup plus grande. Une forme d'énergie qui est de plus en plus utilisée et pour cause, cette source d'énergie est disponible presque partout. L'énergie produite sous forme continue, doit être ondulée pour pouvoir alimenter des charges alternatives ou l'injecter au réseau de distribution alternatif.

Les onduleurs sont constitués de composants actifs et passifs sophistiqués et performants qui admettent cependant un certain nombre de limitations qui ne sont pas sans conséquence sur la synthèse des boucles de commande.

Dans les onduleurs, l'utilisation de Mosfet's de puissance est nécessaire afin de permettre une fréquence de commutation plus grande. Par contre, un compromis devra être fait puisque'une fréquence de commutation plus grande implique de plus grandes pertes par commutation et

l'échauffement des divers composants constituant cet onduleur et ainsi une diminution du rendement.

L'implantation des algorithmes de commandes est faite sur une carte ARDUINO de type MEGA 2560, celle-ci est utilisée pour générer les signaux de commande des interrupteurs Mosfet's de l'onduleur.

L'objectif principal du mémoire est l'étude et la réalisation d'un onduleur monophasé à sinus pur. Afin d'atteindre cet objectif, nous avons scindé notre travail en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présenterons les types d'onduleurs ainsi que leurs domaines d'application et les diverses stratégies de commande :[4] [8][9]

- La commande symétrique .
- Commande décalée .
- La Modulation de largeur d'impulsion MLI.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons la description et les dimensionnements des trois circuits fondamentaux qui forment ainsi notre onduleur réalisé qui se compose de :

- Circuit de puissance .
- Circuit de commande.
- Circuit d'alimentation .

Dans le troisième chapitre, nous allons introduire les résultats des études et stratégies que nous avons décrit dans les deux premiers chapitres. Les résultats obtenus dans le présent chapitre confirment la fiabilité de notre inverseur que nous avons commandé avec deux types de stratégies.

- La commande symétrique .
- La commande SPWM.

Une conclusion générale et des perspectives de ce travail seront présentées à la fin du mémoire.

CHAPITRE I: Généralités sur les onduleurs

Introduction

Les convertisseurs statiques sont des circuits électriques utilisant des semi-conducteurs de puissance en régime de découpage pour traiter l'énergie électrique à haut rendement et assurer d'autres fonctionnalités. La quasi-totalité des instruments qu'on utilise fonctionnent sur alimentation alternative fournie par le secteur public, or actuellement d'autres sources d'énergie délivrent des tensions continues, inadaptées pour les instruments et outils électriques qu'on exploite, en particulier avec l'émergence des nouvelles sources telles que les énergies renouvelables. De ce fait une conversion de l'énergie s'impose, on distingue plusieurs types de convertisseurs statiques, la figure I.1 résume les plus utilisés. Cependant, pour passer du régime continu au régime alternatif (DC/AC), on exige des critères de qualité et de performance pour répondre aux caractéristiques des différents appareils, cette conversion est assurée par les onduleurs.[1-5]

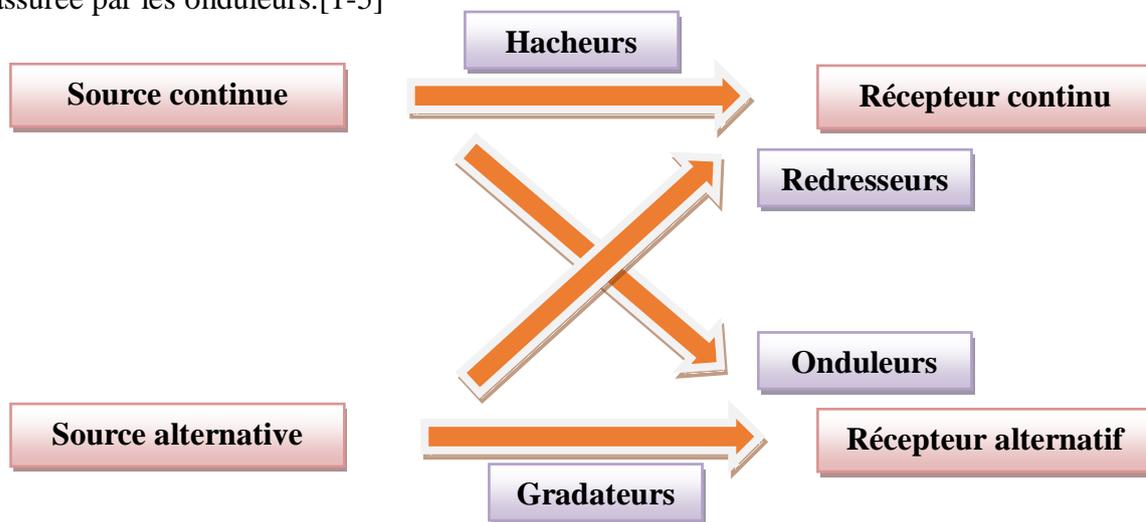


Figure (I.1) : Classification des convertisseurs statiques.

I. Définition de l'onduleur

La conversion continue-alternative (DC/AC) consiste à générer une ou plusieurs tension(s) alternative(s), Le plus souvent sinusoïdale(s), à partir d'une tension continue. Ceci permet principalement d'alimenter des appareils adaptés aux tensions du réseau à partir de batteries ou de tensions redressées, ou encore de piloter, par la variation de la fréquence, un moteur à courant alternatif (AC) à vitesse variable. Les circuits qui réalisent ces opérations sont appelés « **onduleurs** ». L'onduleur est essentiellement utilisé pour fournir une tension

ou/et un courant alternatif afin d'assurer l'alimentation en énergie des charges critiques (micro-ordinateur, station de télécommunication) pendant les coupures du réseau électrique ou une alimentation permanente pour les systèmes autonomes (centrales photovoltaïques, engins aérospatiaux). [1-3]

La représentation symbolique d'un onduleur est donnée par la figure (I.2).

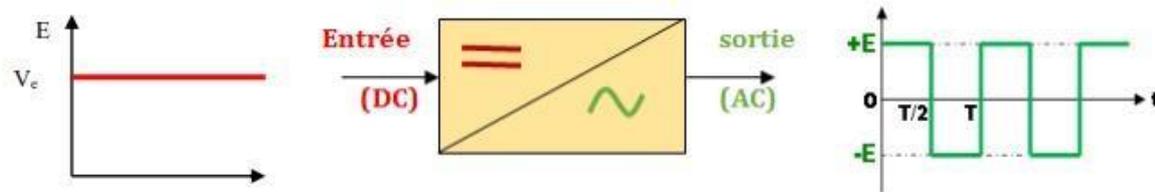


Figure (I.2) : Schéma de principe de l'onduleur.

I.1. Types d'onduleurs

Les onduleurs sont classés selon le type d'application et les performances désirées. [1-2]

I.1.1. Onduleur autonome

Un onduleur autonome est un convertisseur de commutation à transistors ou à thyristors, dont les instants de commutation sont imposés par des circuits externes. La fréquence et la forme d'onde de la tension de sortie sont imposées à la charge, c'est-à-dire elles sont propres à l'onduleur. L'onduleur autonome peut être;

➤ A fréquence fixe

Utilisé comme source de secours ou alimentation sans coupure, Il est alimenté le plus souvent à partir d'une batterie d'accumulateurs (salles d'informatique), Il est utilisé aussi pour l'alimentation des charges inductives (fours à induction, ...).

➤ A fréquence variable

Dans ce cas il est utilisé pour la variation de vitesse des moteurs asynchrones triphasés 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 les moteurs à courant alternatif.

I.1.2. Onduleur non autonome (ou assisté)

Un onduleur non autonome ou assisté est un convertisseur de commutation à interrupteurs, dont les instants de commutation sont imposés par la charge. Dans ce cas, la fréquence et la forme d'onde de la tension de sortie sont imposées par le réseau alternatif sur lequel débite l'onduleur.

➤ **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 autonome. On distingue deux modèles à résonance.

➤ **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.

➤ **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. Selon la source d'alimentation de l'onduleur il existe deux types :

I.1.3. L'onduleur de tension

C'est un onduleur qui est alimenté par une source de tension continue, d'impédance interne négligeable. Sa tension n'est pas affectée par la variation du courant qui le traverse, la source continue impose la tension à l'entrée de l'onduleur et donc à sa sortie. L'onduleur de tension est autonome si la fréquence de la tension de sortie est indépendante du réseau alternatif, il est non autonome (assisté) si la fréquence est imposée par le réseau alternatif. Selon le choix des interrupteurs commandés, les onduleurs présentent des avantages les uns par rapport aux autres. C'est pourquoi un onduleur de tension à transistors présente des avantages par rapport à celui à thyristors comme

- ✓ Facilité de commande (le transistor est commandé à l'ouverture et à la fermeture),

- ✓ Élimination du circuit de commutation forcée,
- ✓ Faibles pertes de commutation,
- ✓ Possibilité de fonctionnement à des fréquences plus élevées.

I.1.4. Onduleurs de courant

Un onduleur de courant (souvent appelé commutateur de courant) est alimenté par une source de courant, c'est-à-dire par une source d'inductance interne si grande que le courant « i » qui la traverse ne peut être affecté par les variations de la tension « u » à ses bornes.

Un onduleur peut être réalisé avec des composants semi-conducteurs. Ce dernier est un ensemble de trois pièces reliées à une source auxiliaire qui leur communique la séquence d'allumage et d'extinction.

I.2. Principe de fonctionnement d'un onduleur

I.2.1. Onduleur monophasé

Le principe de fonctionnement d'un onduleur monophasé autonome est très simple. Il suffit de disposer d'une source de tension continue (E) et quatre interrupteurs (Mofsets, Igbt,...), chaque deux interrupteurs sont branchés dans le même bras, comme le montre la figure (I.3).

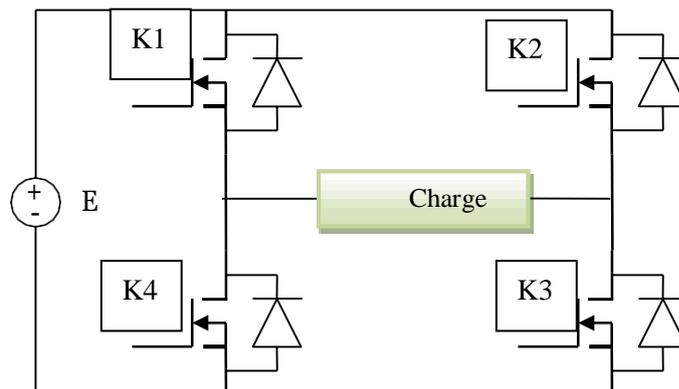


Figure (I.3) : Montage d'un onduleur monophasé en pont monophasé.

La tension de sortie ne peut prendre que deux valeurs :

Lorsque K1 K3 sont fermer $U = +E$.

Lorsque K2 K4 sont fermer $U = -E$.

I.2.2. Onduleur de tension triphasé

Pour obtenir un onduleur triphasé, il suffit de regrouper, en parallèle, trois bras et commander les interrupteurs de façon à avoir à la sortie trois phases décalées de 120° . En fait, ce regroupement donne un onduleur triphasé à six interrupteurs, deux pour chaque bras. Pour s'assurer que la source de tension U_d ne soit jamais court-circuitée et les circuits de courant I_a , I_b et I_c ne soient jamais ouverts, les interrupteurs présents dans le même bras ne doivent jamais commuter **simultanément**, ce qui leur impose des signaux de commande complémentaires. Ces interrupteurs doivent être bidirectionnels en courant, afin de pouvoir imposer les tensions de sorties quelque soit les courants de la charge. Ces interrupteurs sont formés d'une diode montée en antiparallèle à un semi-conducteur commandé à l'ouverture et à la fermeture. Selon la puissance existante .

La figure (I.4) montre le circuit de puissance d'un onduleur triphasé en pont

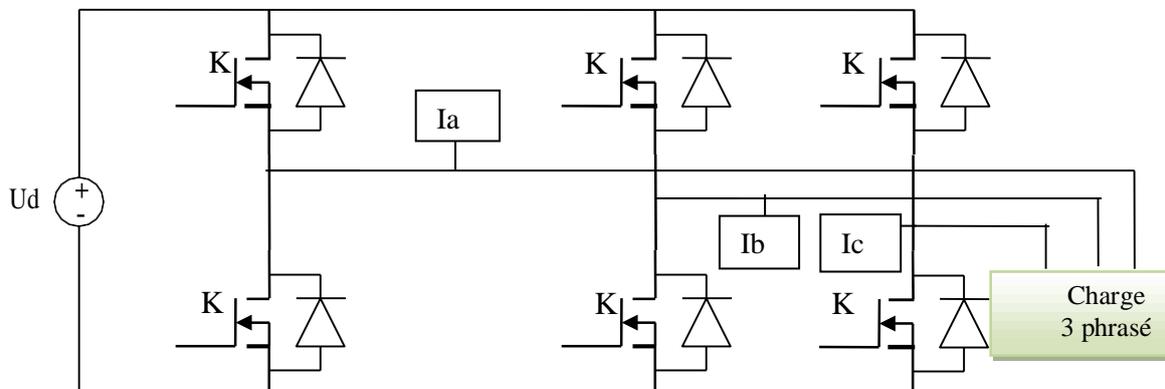


Figure (I.4): Montage d'un onduleur triphasé

I.3. Domaine d`application des onduleurs

Dans plusieurs domaines, particulièrement industriels, les onduleurs sont très utilisés parmi les applications les plus courantes on trouve; [2]

I.3.1. Réglage de la vitesse de rotation des moteurs

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

I.3.2. Alimentation de secours lors d'une coupure d'électricité

Les Onduleurs assurent la continuité de l'alimentation des machines à partir des batteries. En informatique professionnelle, un onduleur est indispensable pour éviter la perte d'informations dans les microprocesseurs.

I.3.3. 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 biais d'un onduleur.

I.4. Choix des interrupteurs

Pour qu'un onduleur fonctionne de manière efficace, on doit s'assurer de la circulation du courant aussi bien négatif que positif dans la source de courant à noter que le courant change de signe périodiquement suivant la fréquence (la valeur moyenne nulle). De ce fait l'interrupteur doit avoir deux conditions suivantes [3]:

- Unidirectionnel en tension.
- Bidirectionnel en courant.

La figure (I.5) montre un exemple de caractéristique courant tension d'un interrupteur semi-conducteur.

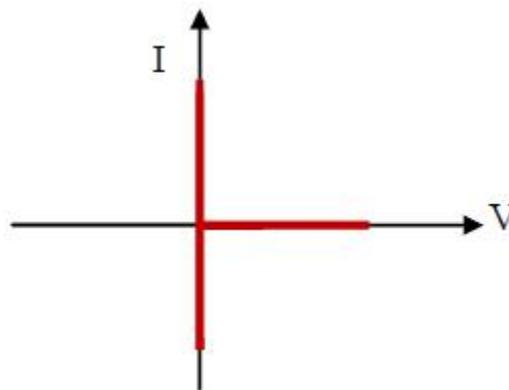


Figure (I.5) : Caractéristique courant-tension d'un interrupteur semi-conducteur.

I.4.1. Le transistor MOSFET

Le principe de fonctionnement d'un transistor MOSFET repose sur l'effet de champ, qui consiste à moduler de façon électrostatique une densité de charge mobile dans un semi-conducteur. La modulation est provoquée par un champ électrique perpendiculaire à la direction du mouvement de ces charges. La structure du MOSFET se décompose en trois parties principales, l'électrode de gâchette (G) qui commande l'intensité du champ électrique vertical et par conséquent la densité de charges mobiles, les électrodes de source (S) et de drain (D) séparées par un canal de conduction qui conduit le courant en fonction de son niveau de remplissage en charges mobiles. La figure suivante illustre l'effet du champ dans un transistor MOSFET. [4-7]

La figure (I.6) **montre** les caractéristiques électriques d'un semi-conducteur bidirectionnel.

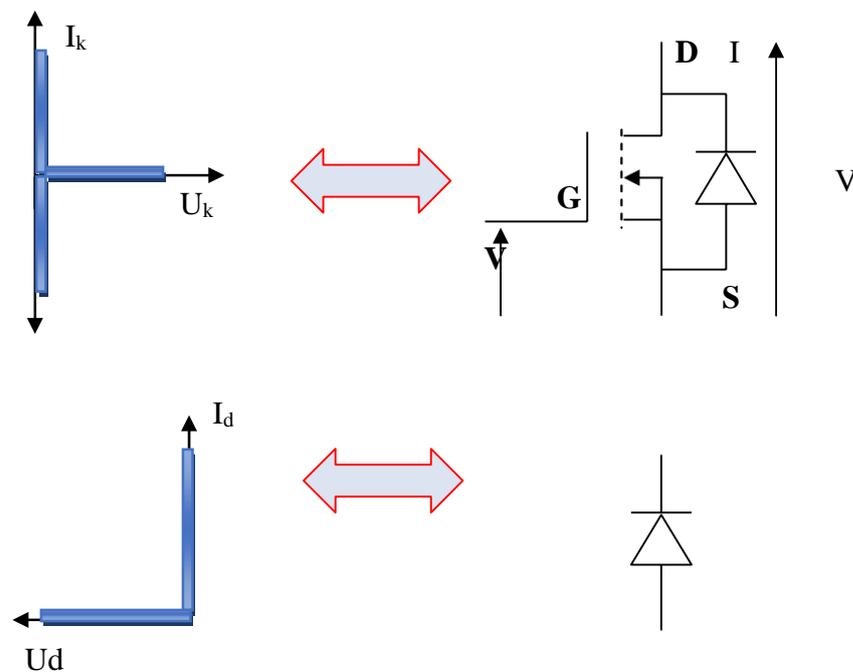


Figure (I.6) : Interrupteur bidirectionnel en courant .

La grille est polarisée par la tension grille-source V_G . Les charges sont mises en mouvement par l'intermédiaire d'un champ électrique longitudinal lié à l'application d'une tension entre le drain et la source. La source sert de référence de potentiel. Les tensions V_G et V_D permettant de contrôler le courant qui passe dans le canal. Selon les deux types du substrat P

ou N, on peut concevoir deux types transistors MOSFET les N-MOSFET et P-MOSFET respectivement :

➤ MOSFET à canal N

Dans les N-MOSFET, le substrat est de type P. dans ce cas la grille est polarisée positivement par une tension V_G suffisante, qui va peupler l'interface SC- oxyde, d'électron permettant l'apparition de deux zones peuplées d'électrons, la source et le drain reliés par un canal rempli d'électrons et la tension V_D doit être positive afin de drainer ces électrons, le courant circule du drain vers la source.

La figure (I.7) montre l'interrupteur de puissance MOSFET de type N.

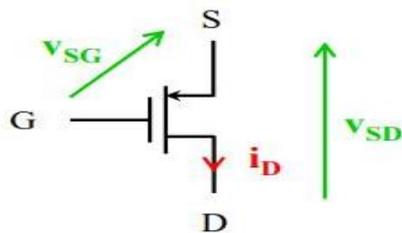


Figure (I.7) : MOSFET en canal N

➤ MOSFET à canal P

Dans les transistors P-MOSFET, le substrat est de type N le P-MOSFET, dont la gâchette est polarisée négativement par une tension suffisante, qui va peupler de trous les interfaces SC-Oxyde, et qui donne deux zones peuplées de trous : la source et le drain reliés par un canal rempli de trous et la tension V_{ds} doit être négative afin de drainer ces trous, le courant circule donc de la source vers le drain.

La figure (I.8) montre l'interrupteur de puissance MOSFET de type p.

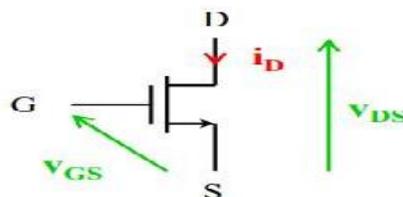


Figure (I.8) : MOSFET en canal P

De type P ou N, le MOSFET possède naturellement une diode en antiparallèle assurant la bidirectionnalité en courant et fonctionne dans des temps de recouvrement qui pénalise les pertes de commutations .

I.5. Stratégies de commande des onduleurs

Un onduleur peut être commandé de plusieurs façons, tout dépend du domaine d'application. Le résultat final sera toujours le même qui n'est rien d'autre que la conversion d'une tension continue à l'alternative. Un signal alternatif est tout signal auquel sa valeur moyenne est nulle et son facteur de forme tend vers l'infini.

I.5.1. Commande à onde carrée (Commande plein onde)

Le principe de cette commande consiste en la conduction de chaque interrupteur pendant toute la demi-période de la tension de sortie. Elle est connue aussi par le nom « commande type 180° ». La fermeture d'un interrupteur coïncide avec l'ouverture de l'autre interrupteur placé sur le même bras, ce qui donne des signaux de commande complémentaires.

On l'appelle aussi la commande symétrique, elle consiste à commander les interrupteurs K1 et K3 en même temps dans une demi période, ensuite, on commande les interrupteurs K2 et K4 sur une autre demi période. Les signaux de commande obtenus avec simulation sous le logiciel PSIM sont représentés sur la figure (I.9). [5]

La fréquence a été fixée à 50 Hz.

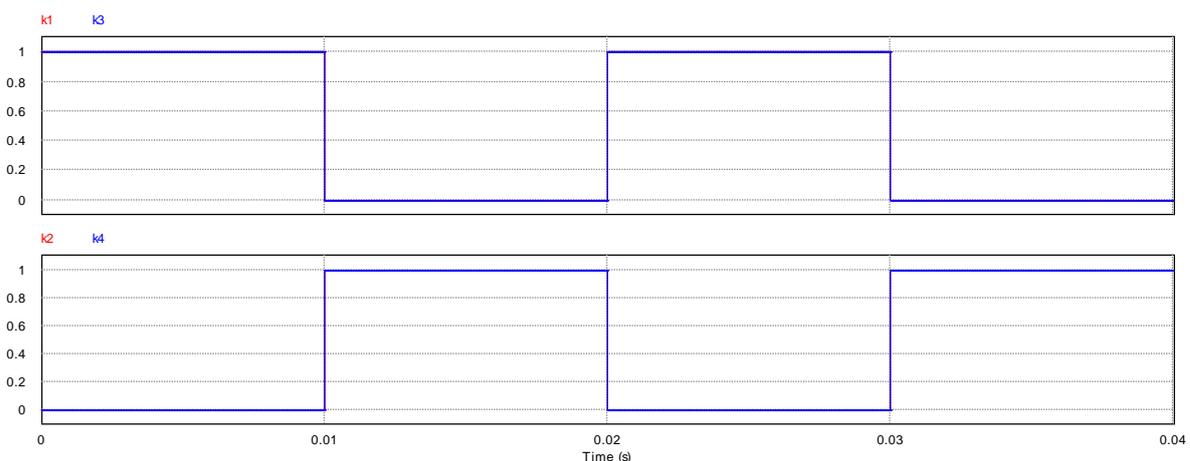


Figure (I.9) : signaux de commande complémentaires des interrupteurs K1 K3 et K2 K4.

K1	K2	K1	K2
K3	K4	K3	K4

Après simulation sur le logiciel PSIM, nous avons obtenu les résultats de simulation Figure (1.10).

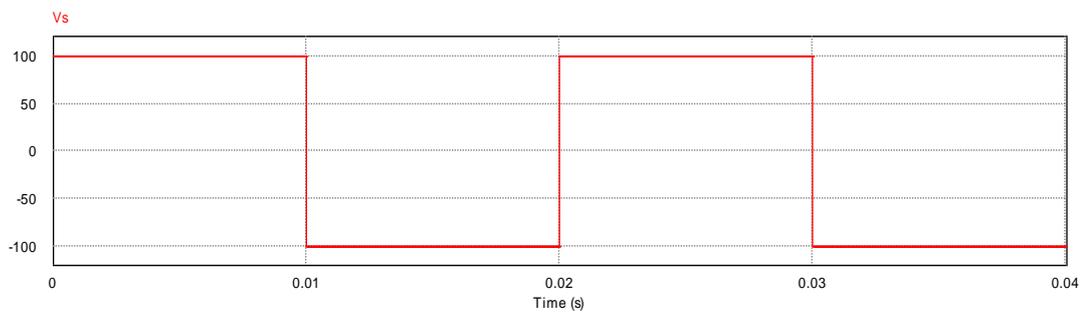


Figure (1.10) Tension de sortie d'un onduleur monophasé à commande symétrique.

La tension de charge est alternative sous forme carrée, la valeur moyenne du signal est nulle.

- ✓ Durant la période [0, 10 ms], K1 et K3 sont commandés cela implique la fermeture de K1 et K3, tandis que K2 et K4 sont ouverts. La charge est donc soumise à une différence de potentiel E .
- ✓ Durant la période [10 ms, 20 ms], K2 et K4 sont commandés cela implique la fermeture de K2 et K4, tandis que K1 et K3 sont ouverts. La charge est donc soumise à une différence de potentiel $-E$. [5]

La commande est périodique on retrouve donc le même résultat pour chaque période.

I.5.2. Commande décalée (120)

La commande décalée ressemble à la commande symétrique sauf que la commande des interrupteurs K3 et K4 est décalée par rapport à celle de K1 et K2 avec un retard de $\alpha = 30$ et la fermeture d'un interrupteur ne coïncide plus avec l'ouverture de l'autre interrupteur placé sur le même bras.

Les signaux de commande obtenus avec simulation sous le logiciel PSIM sont représentés sur la figure (I.11).

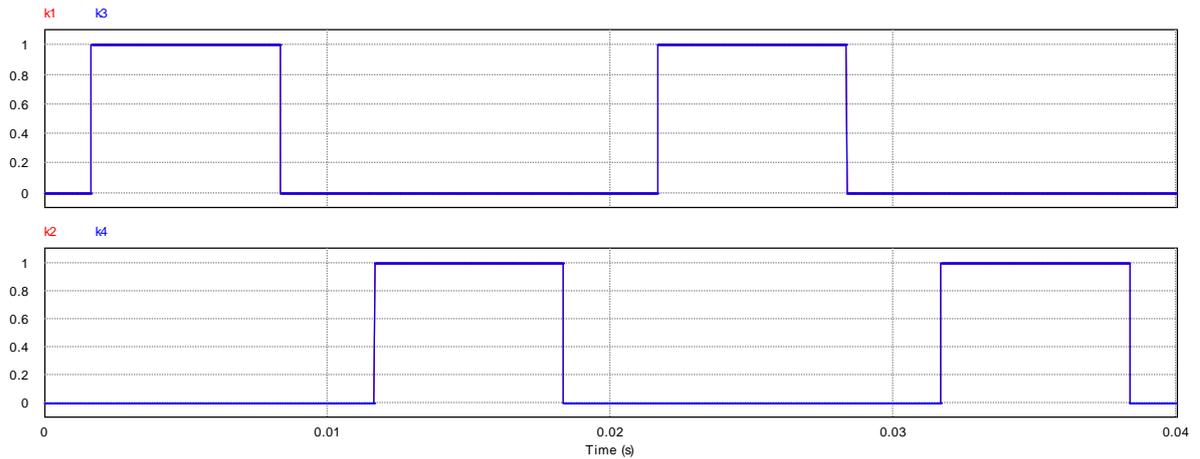


Figure (I.11) : signaux de commande décaler.

K1	K2	K1	K2
K4	K3	K4	K3

Après simulation sur le logiciel PSIM, nous avons obtenu les résultats de simulation Figure (1.12).

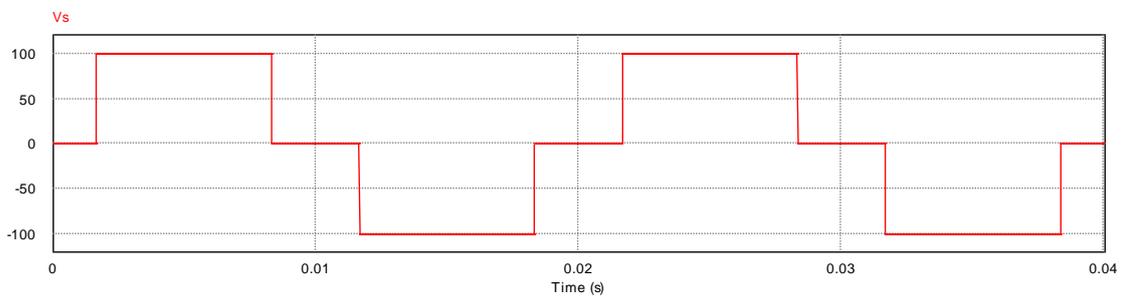


Figure (1.12) Tension de sortie d'un onduleur monophasé commande décalée.

La tension de charge Figure (1.12) est alternative sous forme proche à un sinus (sinus modifié), la valeur moyenne du signal est nulle.

- ✓ $[0\ 30^\circ]$ k1 et k4 fermés, k2 k3 ouverts la charge n'est pas soumise à une différence de potentiel donc la tension à ces bornes est nulle.
- ✓ $[30^\circ\ 180^\circ]$ k1 k3 fermés , k2 k4 ouverts , la charge est soumise à une différence de potentiel E.
- ✓ $[180^\circ\ 210^\circ]$ k2 k3 fermés , k1 k4 ouverts , la charge est soumise à une différence de potentiel a ces bornes nulle .

[210° 360°] k_2 k_4 fermés , k_1 k_3 ouverts , la charge est soumise à une différence de potentiel à ces bornes $-E$.

I.5.3. Commande MLI (Modulation de largeur d'impulsion)

Afin d'améliorer la répartition des harmoniques on a recours à la commande MLI. Les tensions obtenues aux bornes du récepteur (la charge) pour les onduleurs monophasés 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) pour améliorer la forme d'onde du courant ou de la tension de sortie, et par conséquent, la minimisation des harmoniques provoquant l'échauffement de la charge et la détérioration de ses performances. En fait l'onduleur de tension à MLI est toujours choisie pour avoir une réponse rapide et des performances élevées. Elle consiste à adopter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie, on génère une série d'impulsions à un intervalle régulier qu'on appelle la période de découpage, au lieu de générer des impulsions de même largeur comme la sortie d'un hacheur en machine à courant continu on fait varier les largeurs d'impulsion de manière cyclique on obtient alors un signal de la forme suivante. [2]

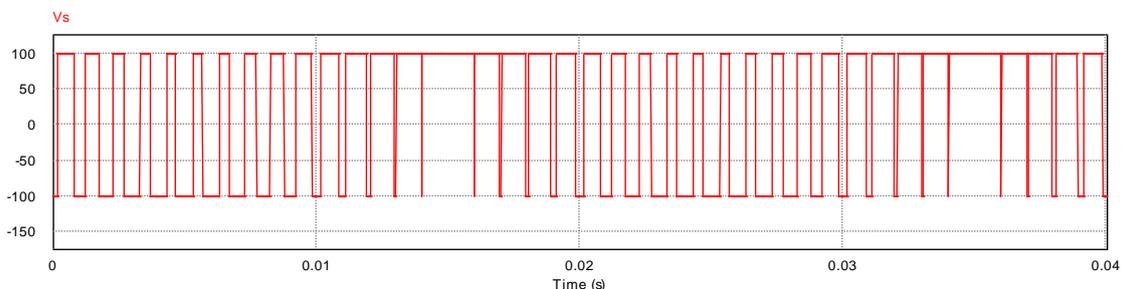


Figure (I.13) : Tension de sortie de la MLI.

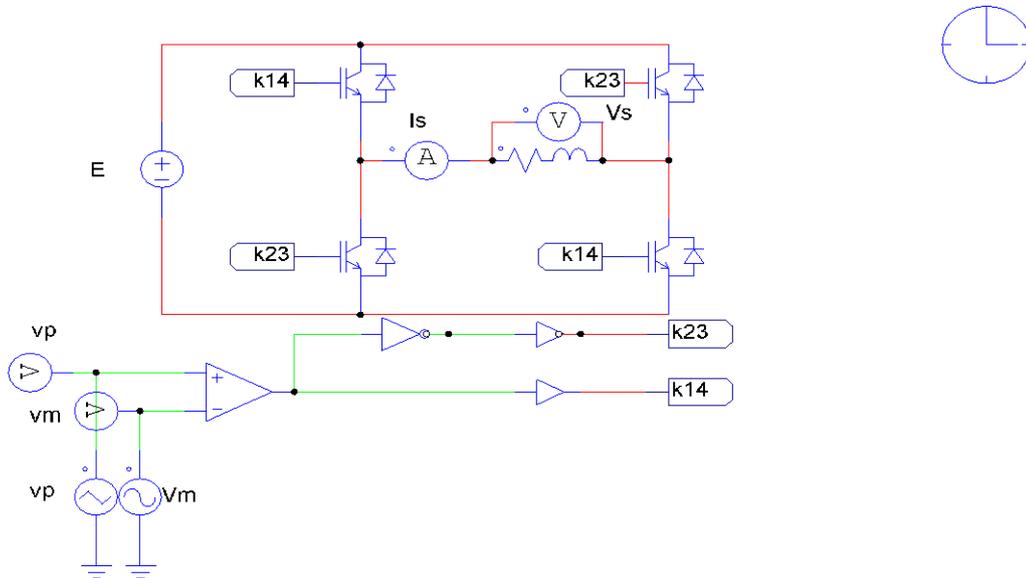
La manipulation du nombre d'impulsions forment chacune une des alternances d'une tension de sortie d'un onduleur à MLI . elle présente deux avantages importants à s'avoir;

- ✓ Repousser vers des fréquences élevées les harmoniques d'ordres inférieurs de la tension de sortie, ce que facilite le filtrage au niveau de la charge [2].
- ✓ Elle permet de faire varier la valeur fondamentale de la tension désirée.

Pour générer la commande MLI nous faisons recours a deux technologies différentes :

➤ MLI triangulo- sinusöidale [1][2][3]

La modulation de largeur d'impulsions consiste à superposer une tension sinusöidale à basse fréquence F_m et à amplitude V_m appelée modulante générée par un auxiliaire à une tension triangulaire à haute fréquence F_p et d'amplitude V_p appelée porteuse, nous l'avons simulé sur le logiciel PSIM comme le montre la figure (I.14).



La figure (1.14) : représente la MLI triangulo-sinusöidale sur PSIM.

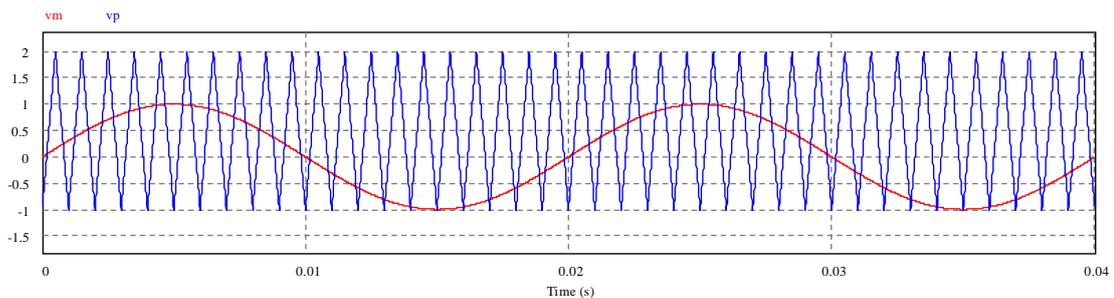


Figure (I.15) : Commande MLI triangulo-sinusöidale.

Afin de déterminer les instants de commutation. Cette stratégie de commande est caractérisée par :

1. L'indice de modulation m (rapport de fréquences) : $m = \frac{F_p}{F_m}$

2. Le coefficient de réglage en tension r (rapport d'amplitudes) : $r = \frac{V_m}{V_p}$

➤ **MLI calculé (PWM Sinusoïdal) [2]**

Dans le cas de la commande SPWM, les interrupteurs sont commandés à partir d'un microprocesseur qui génère alors une séquence de commande qui permettra d'obtenir le signal MLI, le principe est le même que pour une commande symétrique et décalée. A cause des commutations des transistors on peut alors obtenir un signal unipolaire qu'on ne peut avoir avec le signal analogique à cause de l'écran.

Le signal MLI est caractérisé entre autre par le nombre de signaux de commutation, chaque changement du signal est issu de la commande des transistors. La figure ci-dessous est une simulation d'un onduleur monophasé en pont par la commande SPWM.

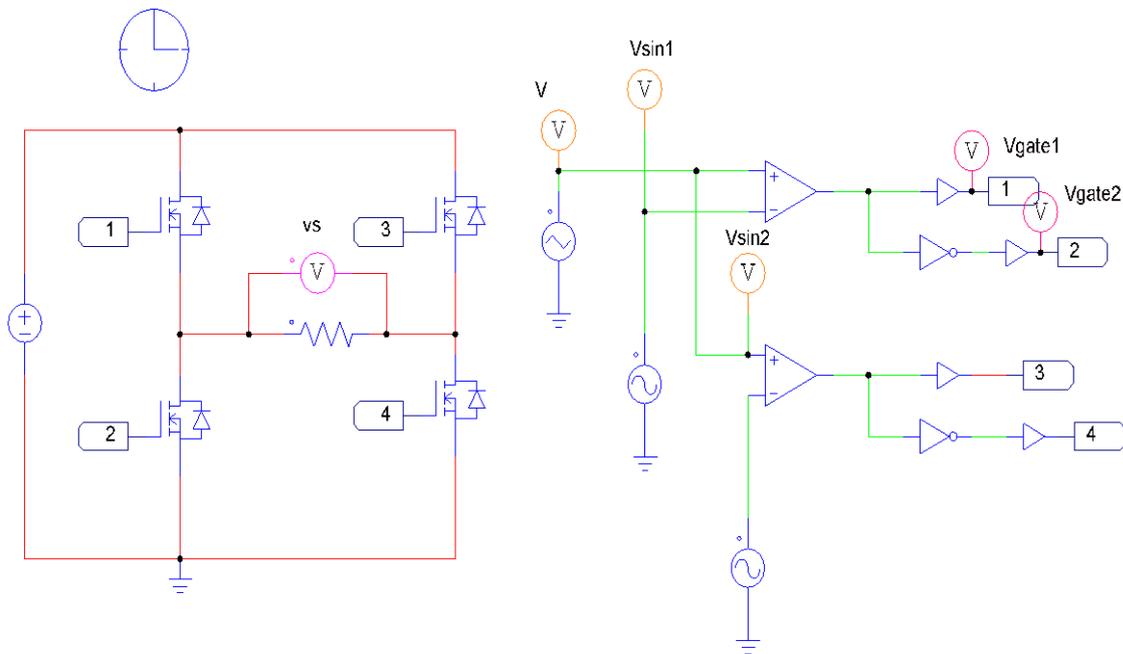


Figure (I.16) : Onduleur monophasé sur PSIM avec la commande SPWM.

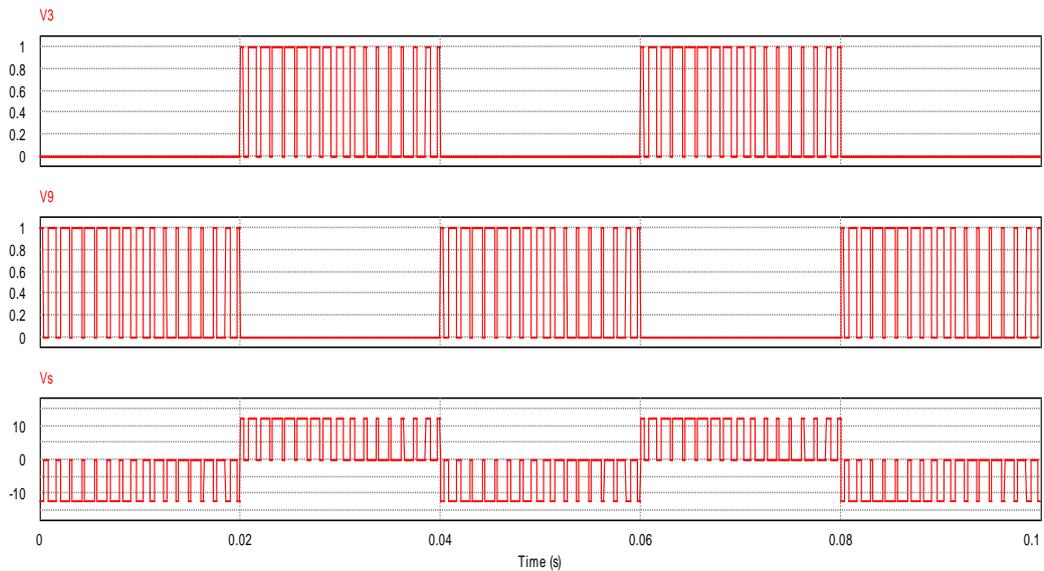


Figure (I.17) : Signaux de sortie avec la SPWM.

I.6. Les harmoniques

Les harmoniques sont des tensions ou des courants sinusoïdaux dont la fréquence est un multiple entier (h) de la fréquence du réseau, appelée fréquence fondamentale (50 Hz).

Lorsqu'elles sont combinées à la tension ou au courant fondamental sinusoïdal, les harmoniques provoquent la distorsion de la forme d'onde de la tension ou du courant. Comme conséquences de cette distorsion, il y a : les surcharges (du conducteur du neutre, des sources...), les déclenchements intempestifs, le vieillissement accéléré et la dégradation du rendement. Les harmoniques sont généralement nommées H_k , où k est le rang de l'harmonique. [6-11]

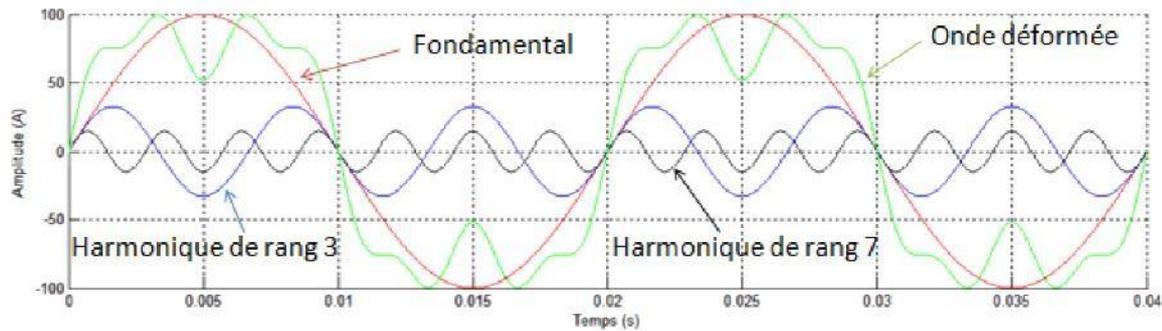


Figure (I.18) : Déformation de la fondamentale par des harmoniques de rang 3 et de rang 7.

La caractérisation des harmoniques peut être définie à l'aide du taux de distorsion harmonique THD. Ce dernier, donnant une mesure de l'influence thermique de l'ensemble des harmoniques, qui veut dire la quantification de pertes de valeur efficace dus aux harmoniques et défini comme étant le rapport de la valeur efficace des harmoniques à la valeur efficace du fondamental.

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{V_{eff} \text{ toutes harmoniques}}}{\sqrt{V_{eff} \text{ du fondamental}}} \quad (\text{I.1})$$

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{V_{eff}^2 + V_{1\text{eff}}^2}}{\sqrt{V_{1\text{eff}}^2}} \quad (\text{I.2})$$

Pour éliminer les harmoniques on a recours à la technique de filtrage ,dont on distingue deux types . Filtre actif et filtre passif .

I.7. Les filtres

Le filtre est un dispositif électronique qui laisse passer et amplifie un signal en fonction de sa fréquence au même temps supprime les fréquences indésirables. il est constitué de plusieurs caractéristiques, son importance se résume dans la possibilité de tenir a la linéarité et l'invariance et des conditions (causalité et stabilité) et on peut les répartir en plusieurs types. [7].

On dit un filtre actif quand les composants actifs (circuit intégré ou transistor) jouent un rôle dans la constitution du filtre et autorisent l'amplification

Par contre un filtre passif se caractérise par l'usage exclusif de composants passifs (résistances, condensateurs, bobines). Par conséquent, leur gain (rapport de puissance entre la sortie et l'entrée) ne peut excéder. Autrement dit, ils ne peuvent qu'atténuer en partie des signaux, mais pas les amplifier.

I.7.1. Types de filtres

Les types de filtres les plus utilisés sont :

➤ **Filtre passe-haut**

Il ne laisse passer que les fréquences au-dessus d'une fréquence déterminée, appelée "fréquence de coupure". Il atténue les autres (les basses fréquences). Autrement dit, il «laisse passer ce qui est haut». C'est un atténuateur de graves pour un signal audio. On pourrait aussi l'appeler coupe-bas.

➤ **Filtre passe-bas**

Il ne laisse passer que les fréquences au-dessous de sa fréquence de coupure. C'est un atténuateur d'aiguës pour un signal audio. On pourrait l'appeler coupe-haut.

➤ **Filtre passe-bande**

Il ne laisse passer qu'une certaine bande de fréquences (et atténue tout ce qui est au-dessus ou en-dessous). Il est très utilisé dans les récepteurs radio, tv... pour isoler le signal que l'on désire capter.

➤ **Filtre réjécteur de bande**

aussi appelé filtre trappe, cloche ou coupe-bande, est le complémentaire du passe-bande. Il atténue une plage de fréquences. Cela peut être utile pour diminuer certains parasites

I.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une définition générale sur les onduleurs monophasés, sa constitution physique élémentaire, son fonctionnement et son application. Nous avons également présenté quelques techniques de commande. Le fonctionnement de ces onduleurs peuvent être sujet à des problèmes soit au niveau de la structure (les semi-conducteurs) soit au niveau de la commande (les signaux de commutation), la sûreté de fonctionnement est une nécessité importante pour les applications exigeantes.

Dans le prochain chapitre, nous allons nous intéresser au dimensionnement et à la conception de l'onduleur en pont monophasé.

Chapitre II: Dimensionnement de l'onduleur monophasé

Introduction

Après avoir présenté la définition d'un onduleur ses caractéristiques et ses domaines d'application en passant par la sensibilité par rapport aux harmoniques. Dans ce chapitre nous allons présenter les perspectives que nous avons suivi pour la conception de l'onduleur en arrivant jusqu'à sa réalisation, le dimensionnement des composants de chacun des circuits, finalement on a traité théoriquement les signaux délivrés par la carte ARDUINO.

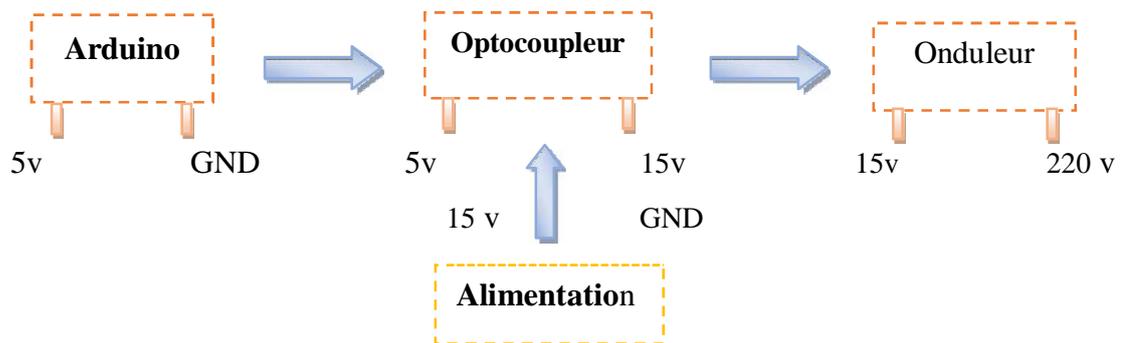


Figure (II.1): Schéma fonctionnel d'onduleur monophasé

II Choix du montage de l'onduleur

II.1 Montage en pont

Dans ce type d'onduleur, quatre interrupteurs sont utilisés. Les impulsions de gâchette pour les mosfets K1 et K2 sont identiques ainsi pour K3 et K4. Les deux commutateurs fonctionnent en même temps. De même, les mosfets K3 et K4 ont les mêmes impulsions de gâchette et fonctionnent en même temps. Mais les mosfets K1 et K4 (bras verticaux) ne fonctionnent jamais en même temps. Si cela se produit, la source de tension CC sera court-circuitée. On résume:

- La tension de l'entrée V est une tension continue.
- Les commutateurs K1 et K2 sont considérés comme idéaux et travaillent en commutation de façon périodique avec une fréquence de 50 Hz.

Chapitre II: Dimensionnement de l'onduleur monophasé

- K1 et K2 se ferment et s'ouvrent d'une manière simultanée et de façon absolument complémentaires avec K3 et K4.
- La fermeture du couple K1 K2 impose en sortie une tension $+E$.
- La fermeture du couple K4 K3 impose en sortie une tension $-E$.

Le tableau des données (II. 3) décrit les états bloqués et/ou passés des interrupteurs pour un bras de commutation.

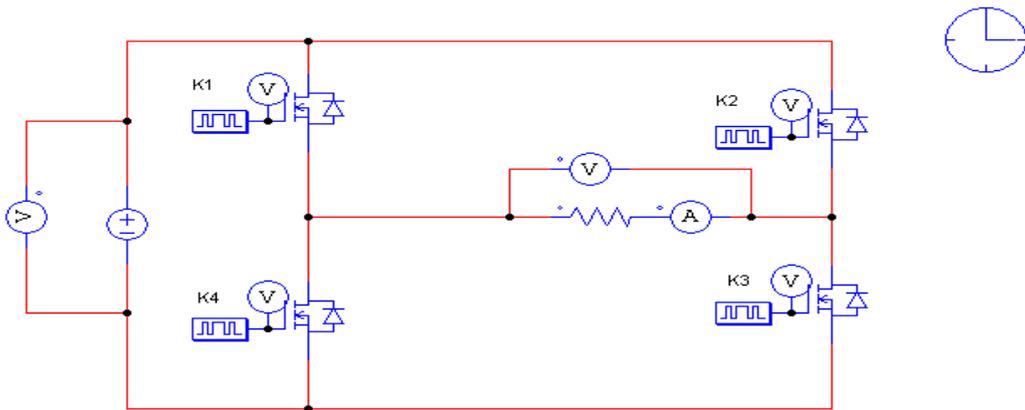


Figure (II.2) : Onduleur monophasé en pont complet.

	Bras 1		Bras 2		Tension U_c
	K1	K4	K3	K2	
Cas 1	Passent	Bloqué	Passent	Bloqué	$U = 0$
Cas 2	Passent	Bloqué	Bloqué	Passent	$U_c = E$
Cas 3	Bloqué	passent	Passent	Bloqué	$U_c = -E$
Cas 4	Bloqué	passent	Bloqué	Passent	$U_c = 0$

c

Figure (II.3) : tableau explique le fonctionnement de l'onduleur a deux bras.

Pour un demi-cycle inférieur ($\frac{T}{2} < t < T$), Dans ce type d'onduleurs, quatre interrupteurs sont utilisés. Les impulsions de gâchette pour les mosfets K1 et K2 sont identiques ainsi pour K3 et K4. Les deux commutateurs fonctionnent en même temps. De même, les mosfets K3 et K4 ont les mêmes impulsions de gâchette et fonctionnent en même temps. Mais les mosfets K1 et K4 (bras verticaux) ne fonctionnent jamais en même temps. Si cela se produit, la source de tension CC sera court-circuitée [3] [4]. On résume:

K 3 et K4 se déclenchent et le courant circule. Pendant cette période, le courant circule de la droite vers la gauche. La tension de charge de pointe est la même que la tension d'alimentation dans les deux cas correspond à la moitié de la tension d'alimentation en continu. Dans un onduleur complet, la tension de crête est la même que la tension d'alimentation en régime continu

II.2 Dimensionnement du circuit

Le circuit simplifié de l'onduleur figure (II.5) est composé de deux circuits fondamentaux, le circuit de commande qui sera alimenté sous une tension de 15 volts en plaçant une alimentation indépendante de celle du circuit de puissance qui à son tour va être alimentée par une source de tension de 220V. [11] [14] [15]

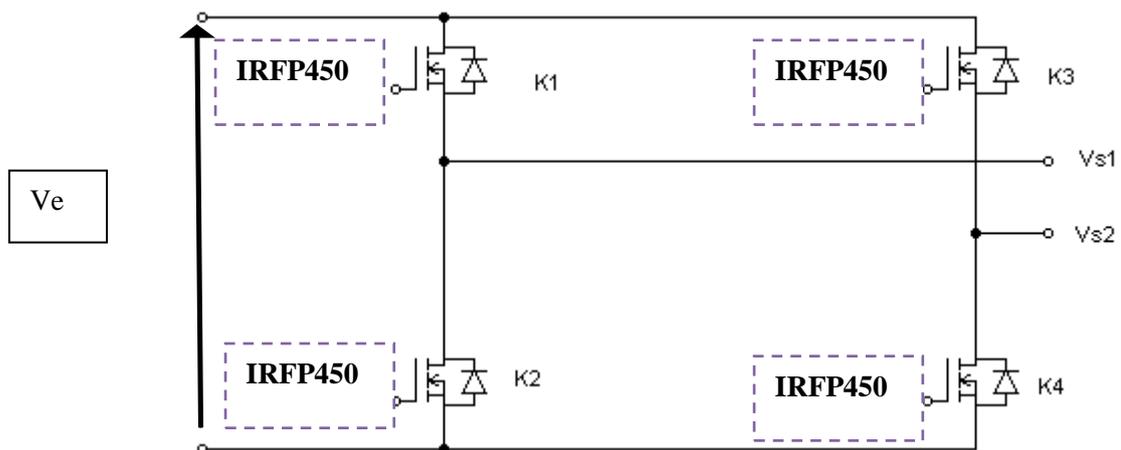


Figure (II.5) : Onduleur en pont complet .

II.3 Circuit de puissance

La partie puissance, comporte quatre mosfets, la raison de notre choix des interrupteurs et le fait qu'il possède naturellement une diode en antiparallèle assurant la bidirectionnalité en courant monté au dos de chaque MOSFET une résistance qui les protège pour chaque surplus d'intensité. Plus sa valeur est grande plus l'intensité du courant est faible.

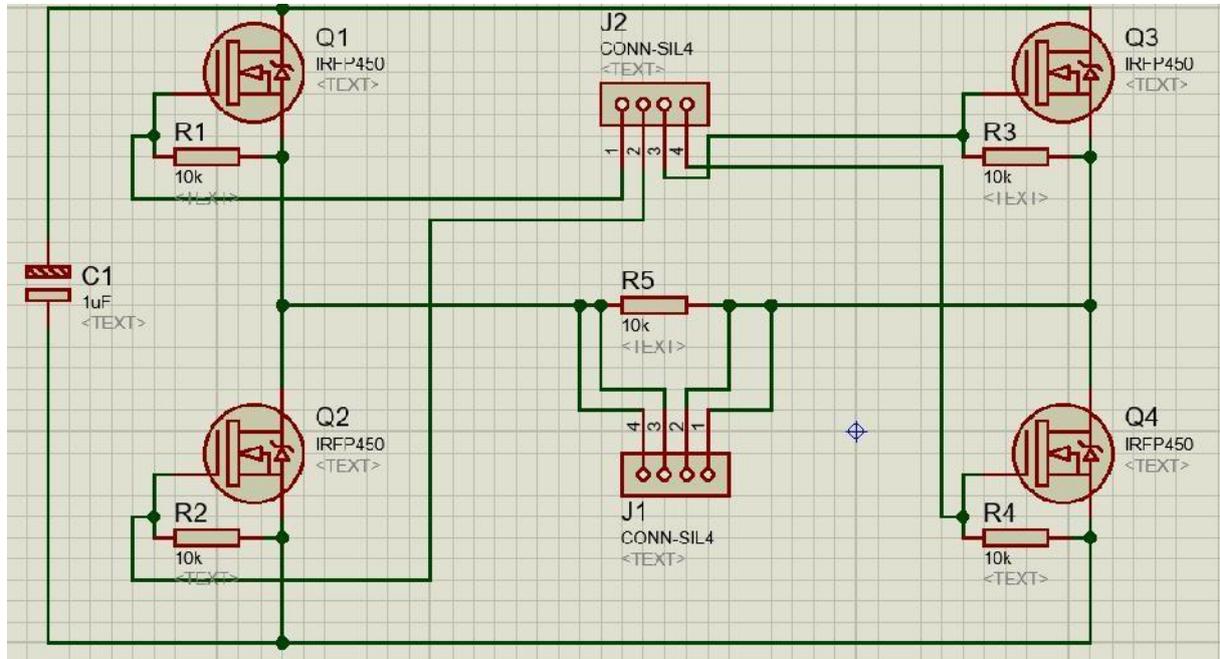


Figure (II.6) : Simulation du circuit de puissance sur ISIS du Proteus.

II.3.1 Description du circuit de puissance

II.3.1.1 Les Mosfets

Quelque soit la stratégie de commande de cet onduleur il faut prendre conscience que c'est la partie de commande qui impose l'amorçage et le blocage des commutateurs K1 à K2.

Notre choix est porté sur MOSFET IRFP450 Figure (II.7). La tension de commande du mosfet doit être absolument référencée à la tension de l'émetteur. Pour les interrupteurs K2 et K4, une alimentation commune peut être utilisée car ils ont la même référence.

Par contre, les interrupteurs K1 et K3 doivent avoir chacun leur alimentation car leur référence saute entre V_{s1} et V_{s2} en fonction des commutations et n'est pas la même pour les deux. En réalité chaque transistor est bien commandé à partir d'un signal logique mais dans notre cas c'est l'optocoupleur qui se charge de la mise en forme et l'amplification du courant transitoire de gâchette. IRFP450 qui est constitué principalement d'une gâchette, d'une

source et d'un drain. Une diode inverse relie la gâchette à la source afin de renverser le courant en cas de court-circuit.

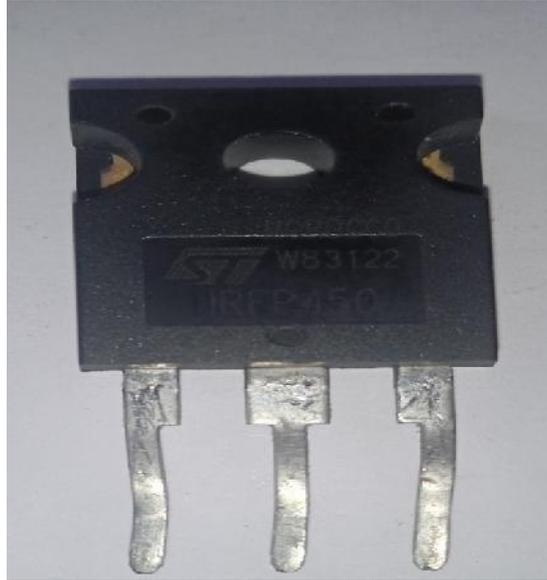


Figure (II.7) : Photo du mosfet utilisé IRFP450.

II.3.1.2 La résistance

Nous avons placé pour chaque MOSFET une résistance de 10 kilos Ohm entre la gâchette et la source pour empêcher l'amorçage accidentel du Mosfet.

II.3.1.3 Fonctionnement du circuit de puissance

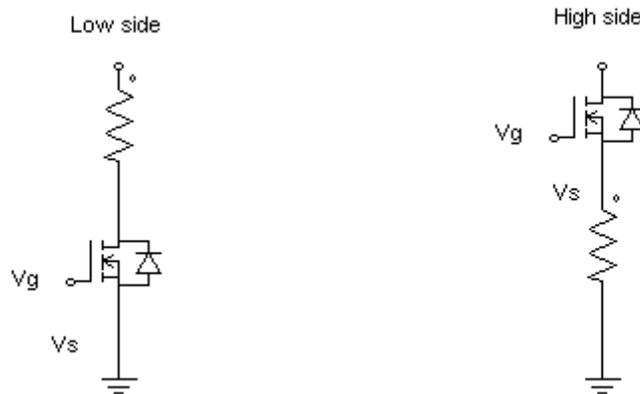
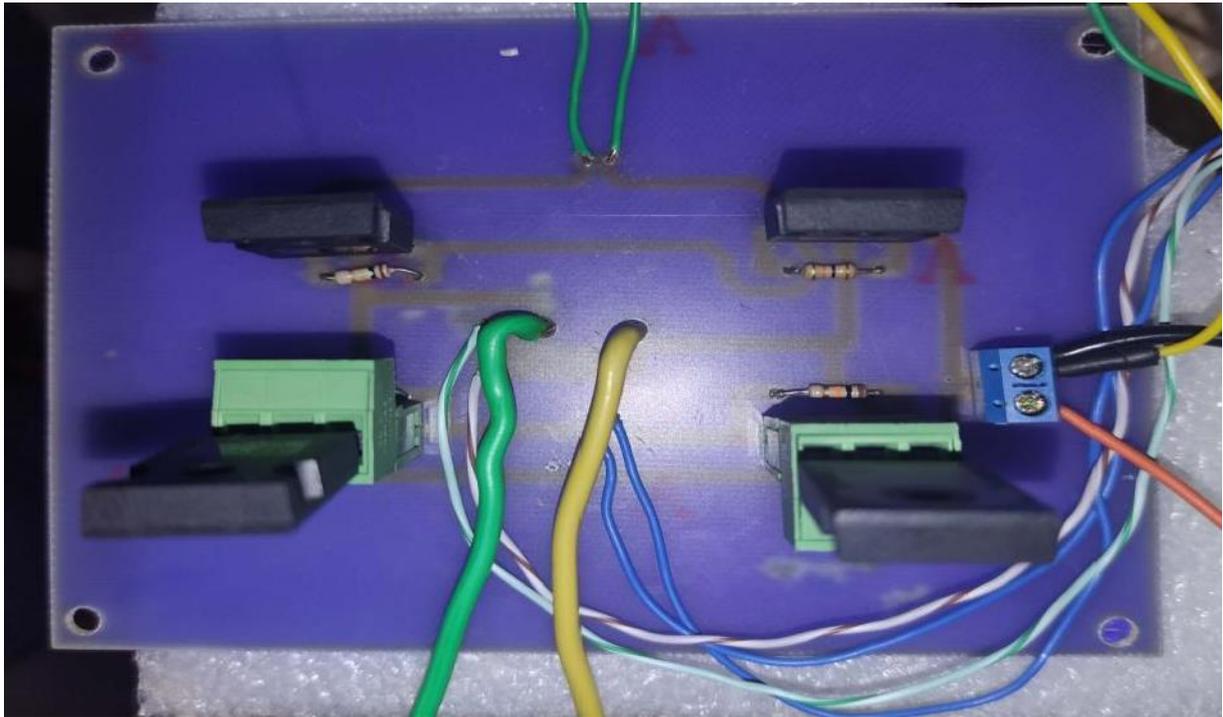


Figure (II.9) : branchement du côté bas et côté haut.

Pour que le mosfet conduise, la tension de gâchette V_g doit être strictement supérieure à la tension de la source V_s de 8 à 15 volts. Dans le cas du côté bas (Low Side), Figure (II.9), la source est directement connectée à la masse (GND) donc quelque soit la tension qu'on applique à la charge, elle sera toujours supérieure à V_s . [10][14]

Par contre pour ce qui concerne le côté haut (High Side) qui est plus complexe la tension de source V_s est branchée directement à la tension de charge dont on ne connaît pas la valeur de la tension de la source V_s , C'est pour cela les constructeurs ont élaboré une technique appelée la technique d'alimentation du bootstrap .

La figure suivante représente le circuit de puissance de l'onduleur monophasé réalisé.

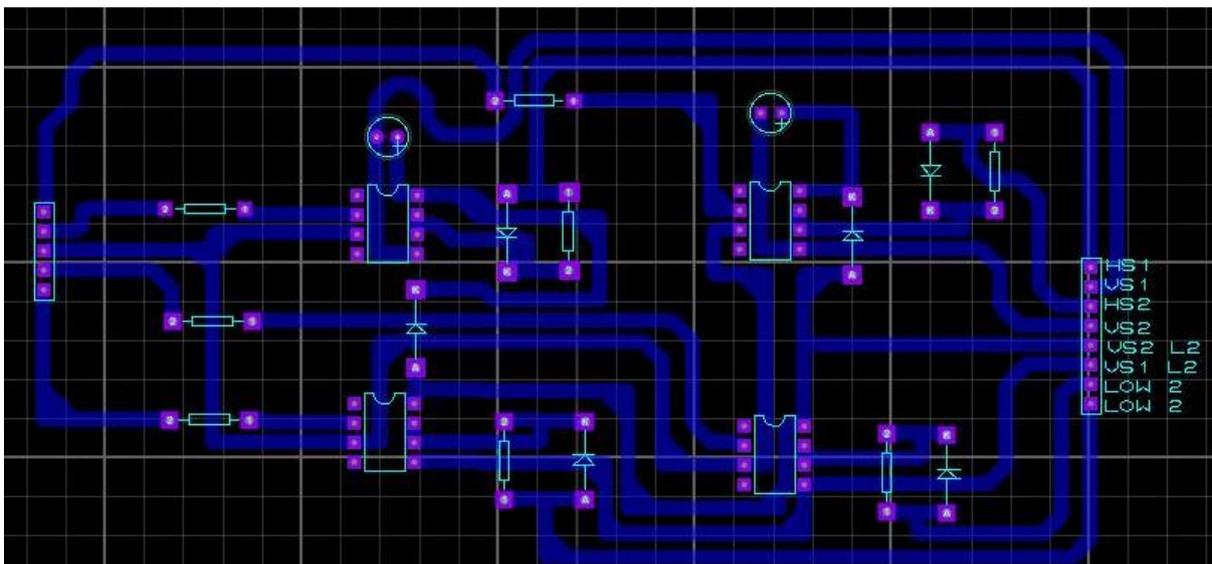


Figure(II.10) : circuit de puissance de l'onduleur monophasé.

II.4 Circuit de commande de l'onduleur monophasé

Dans cette partie, nous allons réaliser un montage qui va faire la conversion numérique et analogique d'impulsion générée par la carte ARDUINO qu'on appelle les signaux de commande pour assurer une tension suffisante en vue d'attaquer les gâchettes des Mosfets du circuit.

Le figure (II.11) représente le circuit de commande de l'onduleur monophasé réalisé sous ISIS et ARES dans proteus.



Figure(II.11) : circuit de commande sur la partie ARES du Proteus.

II.4.1 Les composants du circuit de commande

II.4.1.1 Isolation (Opto-coupleur HCPL A3120)

Un coupleur optique est un composant électronique de commande qui permet de réaliser un isolement vis-à-vis de la charge (circuits de la puissance) ou d'une ligne de transmission de données. Il s'appelle un coupleur optique ou photo coupleur (optocoupleur ou opto-isolation) et constitué d'un émetteur (DEL: diode électroluminescente), d'un récepteur (photodiode, phototransistor, photothyristor, phototriac), dans ce travail on utilise le type **Hcpl A3120** pour assurer l'isolation optique entre le circuit de commande et celui de puissance pour la protection de l'ensemble du circuit précédent. [14][11][13]

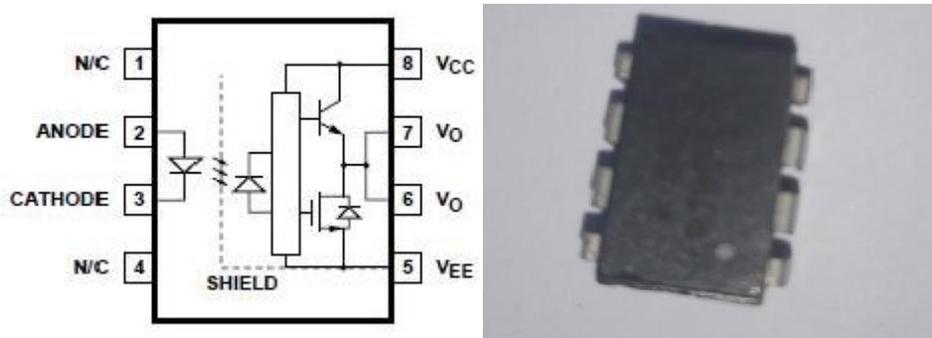


Figure (II.12): Schéma et photo réels de l'optocoupleur utilisé HCPLA3120.

Les figures (II.12) représentent le circuit HCPL A3120.

II.4.1.2 Condensateurs

les condensateurs électrochimiques sont repartis en plusieurs types dont le rôle est majoritairement d'assurer un filtrage d'une tension continue, mais "hachée", pour notre cas nous avons utilisé deux condensateurs, le premier qui fait partie du bootstrap relie et V_C V_E de l'optocoupleur qui portent la valeur de $10\mu\text{F}/63\text{V}$ et $10\mu\text{F}/50\text{V}$.

II.4.1.3 Resistances

Comme nous l'avons déjà expliqué précédemment nous avons utilisé deux résistances dans ce circuit, la première résistance qui est branchée à l'entrée de l'optocoupleur relié à l'Arduino par l'anode, avec une valeur $220\ \Omega$, l'autre résistance branchée en

parallèle avec la diode en reliant l'optocoupleur au circuit de puissance avec une valeur 4,5 Ohm.

II.4.1.4 Les diodes

Nous avons utilisé deux types dont la diode de lumière en parallèles avec la résistance reliant les pates du Vo de l'optocoupleur avec le connecteur, l'autre type de diode et celle du bootstrap .

II.4.1.5 Le BOOTSTRAP

Dans cette partie se résume la problématique des commutations périodiques en général, mais particulièrement l'application de tension de gâchette qui permet d'imposer l'amorçage et le blocage des MOSFETs. La tension de commande du bras provient dans notre cas a partir de L'ARDUINO est traitée par le circuit de commande pour en arriver aux deux signaux complémentaires pour les appliquer sur les gâchettes , en revanche il fournit une tension qui permet de charger et de décharger des capacités de filtrage. Pour éviter et éliminer les difficultés de commande mises en évidence aux questions précédentes, il est pratiquement obligé de s'orienter vers plusieurs solutions technologiques. Parmi celles-ci, la solution dite « bootstrap » qui permet de régler le problème de la commande du transistor du High Side par l'utilisation d'un condensateur et d'une diode judicieusement disposés. [14][11][3][18]

En réalité, le bootstrap consiste à créer une alimentation flottante pour le circuit de commande du MOSFET du haut à partir de l'alimentation du bas. Donc ce type de commande est dédié à la commande des bras de l'onduleur en pont.

II.4.2 Fonctionnement du circuit de commande

Une résistance de gâchette de $4,7\Omega$ est recommandée par l'optocoupleur pour diminuer les pertes de commutations. Cette résistance règle en fait la pente de la montée et la descente de tension lors des commutations.

L'optocoupleur choisi, peut fournir minimum 2A. Afin d'avoir un peu plus de liberté dans l'optimisation de ces pentes, le schéma électrique comporte une diode suivie d'une résistance en parallèle à la résistance de gâchette pour régler indépendamment les pentes montantes et les pentes descendantes de tension collectrice et émettrice afin de diminuer les pertes de commutations. Une résistance de 10kilos Ohm est ajoutée entre la gâchette et la

source pour fixer la tension en cas de problème. la résistance sert à limiter le courant en passant a travers la diode de l'optocoupleur.

Le principe consiste a profiter de la conduction de la MOSFET du bas T1` pour charger le condensateur C boots jusqu'a +15 V (la tension d'alimentation des optocoupleurs) a travers la diode D boots ce qui fait que le collecteur T1` est a zéro .Quand le transistor du bas T'1 se bloque, le transistor du haut T1 s'amorce et il devient conducteur, la charge portée par la capacité C_B va servir à alimenter la commande de l'interrupteur du haut T1, donc le potentiel du point commun (collecteur du T'1 - émetteur de T1) passe de zéro à la valeur +HT et fait passer avec lui le pôle négatif du condensateur C_B au même potentiel, donc son pôle positif sera à une valeur supérieure de 15V de là, la diode D_B est polarisée en inverse ce qui implique le blocage de cette dernière. Donc la charge de C_B va assurer :

L'alimentation du circuit de commande de l'interrupteur du hautT1.

La charge de la capacité d'entrée (grille) du transistor T1.

- Le maintien de cette charge pendant toute la durée de conduction du transistor T1.

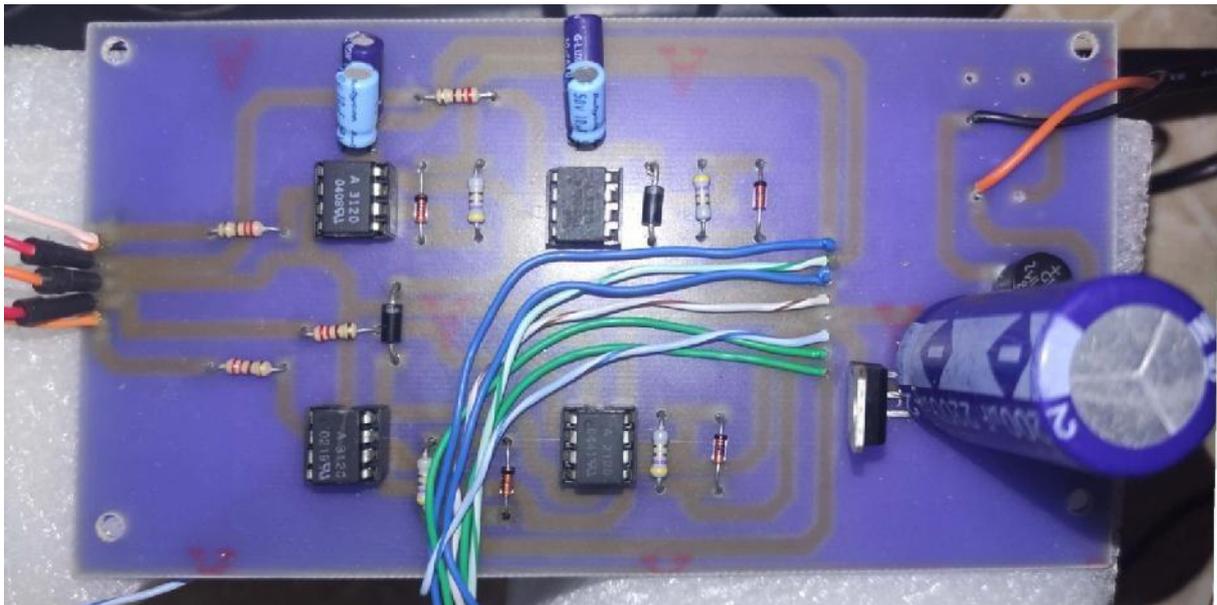


Figure (II.13): photo réelle de la partie commande du circuit imprimé.

II.5 Circuit D'alimentation

Cette partie du circuit qui a beaucoup d'importance dans le déroulement nécessaire de notre travail est dédiée essentiellement pour alimenter la partie commande avec 15 volts en continu à partir de 220 V en alternatif. Pour cela nous avons besoin de quelques composants électroniques pour la réaliser.

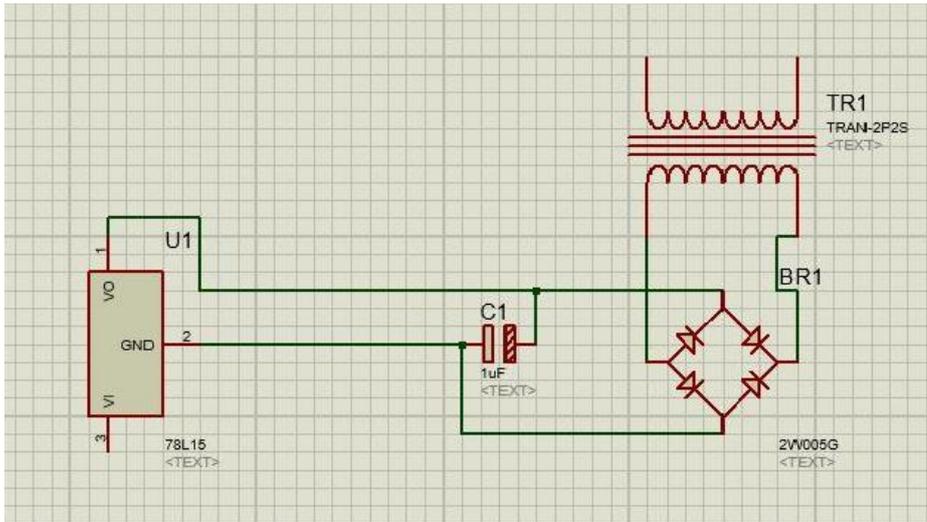


Figure (II.14): Schéma de circuit d'alimentation simulé sur ISIS proteus.

II.5.1 Les composants du circuit d'alimentation

II.5.1.1 Transformateur

Un transformateur est une machine électrique qui permet de modifier les valeurs de tension et d'intensité du courant délivrés par une source d'énergie électrique alternative, en un système de tension et de courant de valeurs différentes, mais de même fréquence et de même forme. Il effectue cette transformation avec un excellent rendement. Pour notre circuit on a placé un transformateur de 12V/600 mili Ampère.



Figure (II.15) : photo du transformateur utilisé 12V/600mA.

II.5.1.2 Pont de diode

Un pont de diode ou redresseur plein onde est un ensemble de ponts de 4 diodes utilisées pour redresser le courant alternatif en courant continu.

II.5.1.3 Condensateur

Nous avons choisi un condensateur de filtrage de 2200uF / 63V.

II.5.1.4 Le régulateur

Un régulateur de tension est un composant qui stabilise une tension a une valeur fixe (doit fournir une tension constante pour tout courant de sortie ou toute charge) est essentiel pour les composants électroniques qui nécessitent peu de fluctuation de tension. nous avons mit un régulateur **7815** vu que l'opto-coupleur **A3120** s'alimente avec 15V



Figure (II.16): photo réelle de partie commande du circuit imprimé.

II.5.2 Fonctionnement du circuit d'alimentation

On branche le circuit d'alimentation avec une tension locale de valeur 220 V alternative à l'entrée du transformateur pour avoir une tension réduite en sortie qui sera à l'entrée du pont de diodes qui va redresser cette tension en tension continue, ensuite le condensateur se charge de

filtrer la tension continue avant son arrivée aux bornes du régulateur de tension qui va la stabiliser à 15 Volt

II.6 Les signaux délivrés par l'ARDUINO

Afin d'avoir des signaux aux bornes de sortie de l'onduleur il faudrait d'abord injecter un signal aux bornes de ses entrées, et pour cela nous avons ajouté une carte ARDUINO pour fournir les signaux qu'on souhaite étudier. [12]

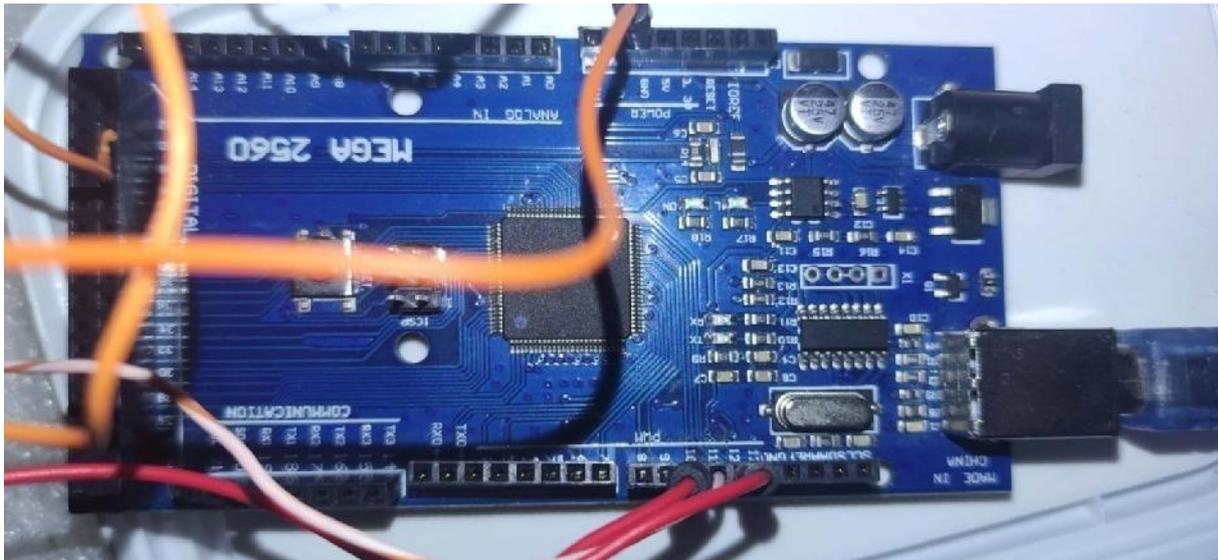


Figure (II.17): photo de la carte ARDUINO utilisée.

II.6.1 La commande plein onde

Ce type de commande est le modèle le plus classique, il consiste à commander les deux interrupteurs qui commutent de façon complémentaires pendant chaque période T . Elle consiste à fermer chaque interrupteur pour 180 degrés l'équivalent de $T/2$ cette méthode la plus utilisée vue sa simplicité et quelques avantages au niveau du spectre harmonique. [1-3]

II.6.2 La commande SPWM

La commande SPWM (Modulation de largeur d'impulsions d'onde sinusoïdale) consiste à comparer un signal sinusoïdal dit (consigne) à un signal triangulaire dit (porteuse) de fréquence supérieure permettant de fixer par la même fréquence de commutation et ainsi la bande de fréquences occupée par le contenu harmonique. et pour mettre en œuvre un SPWM, les impulsions sont modulées avec les largeurs initiales plus étroites qui s'élargissent progressivement au centre du cycle, et finissent finalement par être plus étroites à la fin pour terminer le cycle. Pour être précis, les impulsions commencent avec les largeurs les plus

étroites qui s'élargissent progressivement avec chaque impulsion suivante, après cela la séquence continue mais avec une modulation opposée, c'est-à-dire que les impulsions commencent maintenant à se rétrécir progressivement. Jusqu'à la fin du cycle. Cela constitue un cycle SPWM et cela se répète tout au long à une fréquence particulière déterminée par la fréquence d'application 50Hz. En règle générale, le SPWM est utilisé pour piloter des dispositifs tels que les mosfets qu'on a utilisé dans l'onduleur. Ce modèle de modulation spécial garanti que les cycles de fréquences sont exécutés avec une valeur de tension moyenne qui change progressivement (également appelée valeur RMS), au lieu de lancer des pointes de tensions élevées ou basses soudaines comme cela est normalement observé dans les cycles d'ondes carrées plates. [14] [11][17]

II.6.3 Temps mort

Revenant aux problématiques qu'on avait déjà expliqué dues à la commutation, et le risque de court-circuit du montage d'onduleur pendant les commutations des transistors et pour ne pas tomber dans ce genre de dégâts on s'oriente vers la création de ce qu'on appelle le temps mort qui est le retard entre le blocage des MOSFETS du bras gauche de l'onduleur et l'amorçage de l'autre bras, le temps dont nous avons besoin est créé au niveau de la carte ARDUINO. [16]

II.7 Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à la réalisation de l'onduleur monophasé en pont, nous avons présenté la méthode de réalisation de l'onduleur et les différents composants qu'on peut utiliser dans les circuits. Après cela, nous avons assemblé les différentes parties du système (carte de commande, carte de puissance et d'alimentation). Nous avons ainsi constaté comment extraire les signaux de commande à partir de la carte ARDUINO.

Dans le chapitre suivant, nous allons procéder à une validation expérimentale, les tests des circuits et la présentation des résultats pratiques.

Chapitre III: Tests pratiques et validation des résultats

Introduction

Ce chapitre est consacré à la validation expérimentale des études et de simulation présentées aux premiers et deuxième chapitres, il s'agit de la validation d'onduleur réalisé et utilisé avec les différents types de commande. En effet , le but de cette réalisation consiste à la conversion d'une tension continue a une tension alternative purement sinusoïdale que nous allons extraire par la commande SPWM. Pour mieux comprendre le pourquoi du sinus nous allons comparer les résultats de deux commandes différentes , la SPWM et la commande symétrique puis a l'aide de l'analyse fréquentielle en séries de Fourier nous comparerons les résultats obtenus.

III commande de l'onduleur

III.1 Commande symétrique

La commande de l'onduleur a été faite a partir de la carte ARDUINO pour l'implémentation numérique des différents algorithmes de commande .

III.1.1 Signal de commande

La figure ci-dessous représente les signaux de commande sortie d'ARDUINO visualiser sur oscilloscope

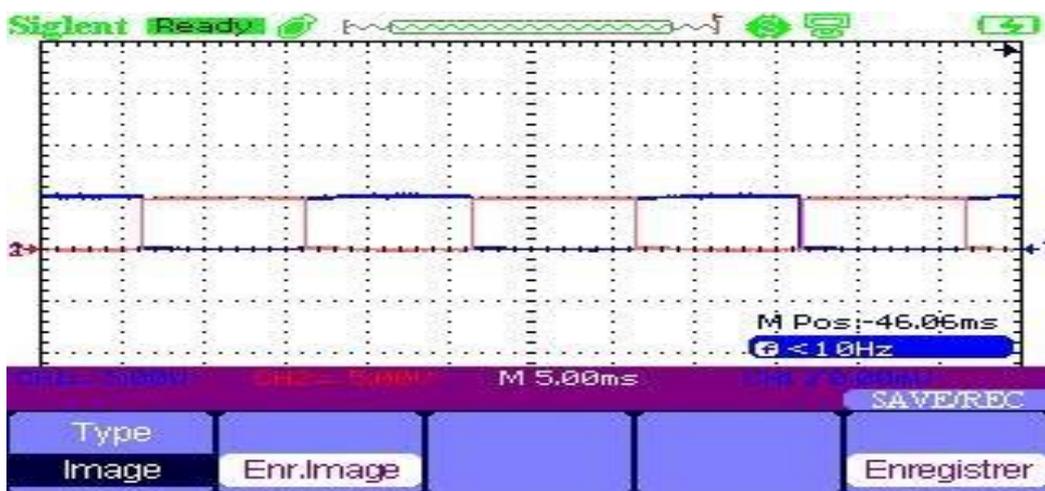


Figure (III.1) : Signaux de commande d'un bras d'onduleur sans isolation.

Comme on peut le voir , il s`agit de deux signaux de commande complémentaires dont l`ouverture du premier transistors du premier signal (bleu) est la fermeture du second (rouge) et ils sont d`une amplitude 5v avant l`isolation .Et avant chaque commutation il y`a un temps mort .

III.1.2 Temps mort

Pour éviter le risque du court-circuit de la source et les augmentations de courant , nous allons créer suffisamment du temps mort pour protéger notre circuit. Le temps mort est le délai entre le blocage et l`actionnement de transistors avec un autre du même bras. En effet, le délai d`attente dont nous avons besoin est crée au niveau de la carte de commande (ARDUINO), afin d`éviter que les deux transistors d`un même bras du pont soient passants en même temps, le montage permet d`effectuer cette fonction cette solution a été choisie car elle permet une grande flexibilité. Le temps mort crée par la carte de commande entre deux signaux est suffisant pour commander les MOSFETs de notre onduleur qui es à (75us).

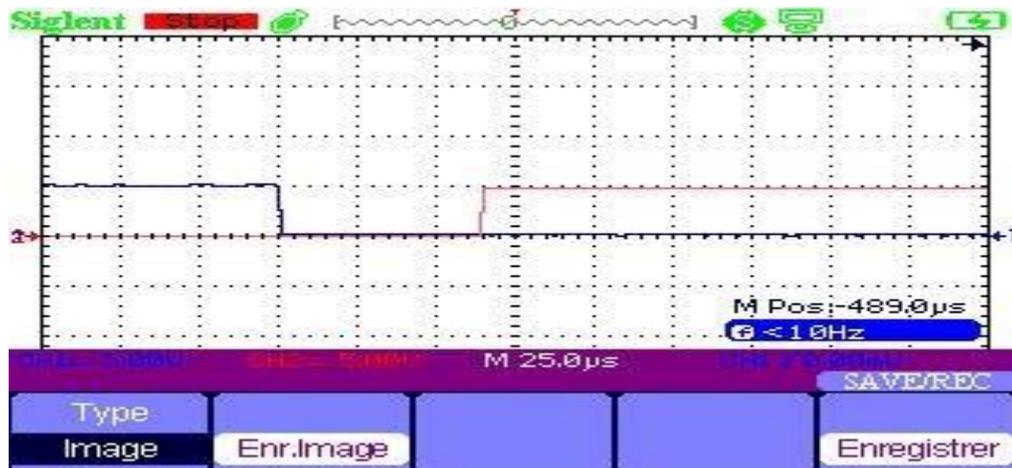


Figure (III.2) : Temps mort visualiser depuis l`oscilloscope.

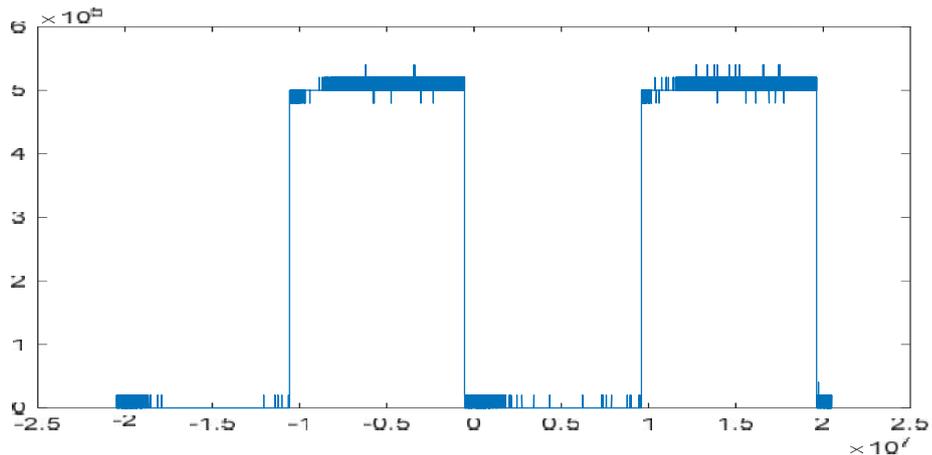


Figure (III.3) :Le temps mort de l'ARDUINO `CSV` converti dans MATLAB. Comme on peut le remarquer dans les deux figures ci dessus , il y`as un certain décalage temporelle entre les commutations.

III.1.3 Amplification des signaux de commandes

Les photographies ci-dessous résument l'opération d'amplification et d'isolation optoélectronique des signaux de commandes.

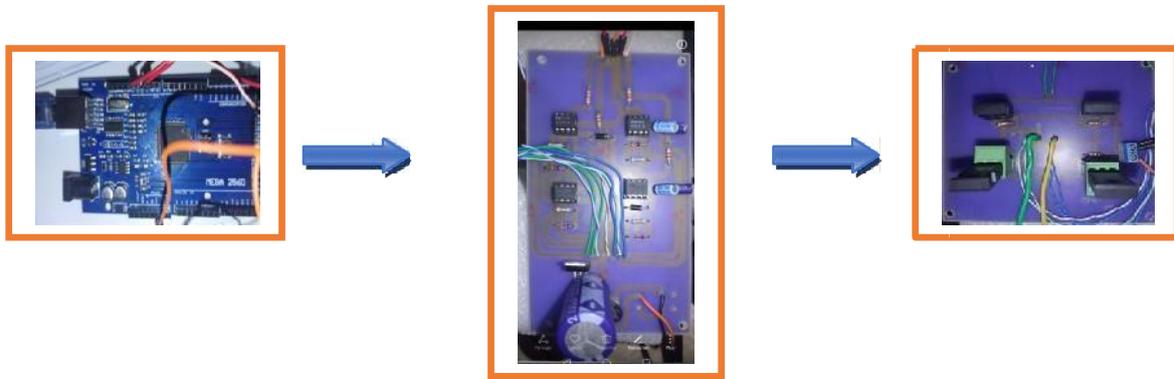


Figure (III.4) : photographies récapitulatives de l'amplification des signaux .

On associe la carte ARDUINO avec notre carte de commande, on obtient les mêmes signaux que les précédant seulement ils seront amplifiés et isolés. L'isolation effectuée est très importante, car elle protège notre carte de commande de tout risque qu'il peut y avoir . Les résultats seront affichés sur les figures (III.5) (III.6).

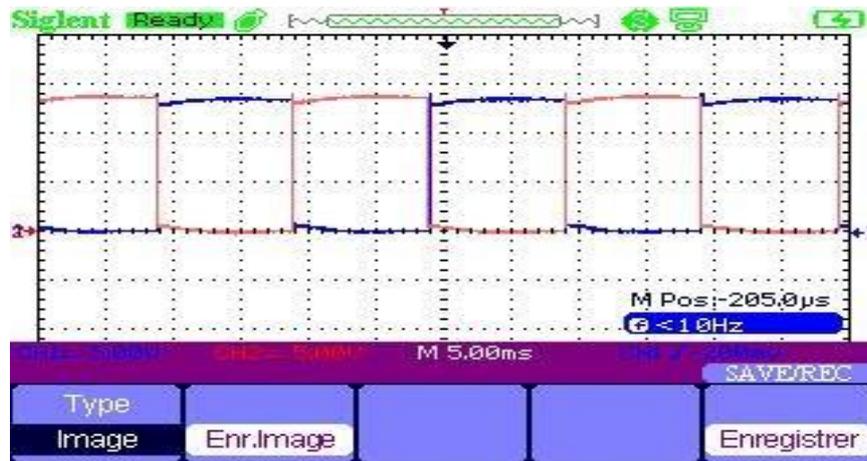


Figure (III.5) : Signaux de commande d'un bras d'onduleur amplifier et isoler.

Dans ces figures, on constate l'amplification remarquable des signaux de commande a la sortie des opto-coupleurs et cela pour saturer les MOSFET et avoir des commutations parfaites ou presque .

III.1.4 Résultats de la tension de sortie

L'allure de la tension de sortie V_s est ainsi conforme au chronogramme représenté dans la figure (III.6) .La tension aux bornes de la charge témoigne de l'efficacité de l'onduleur réalisé qui sera représenté dans les figures suivantes :

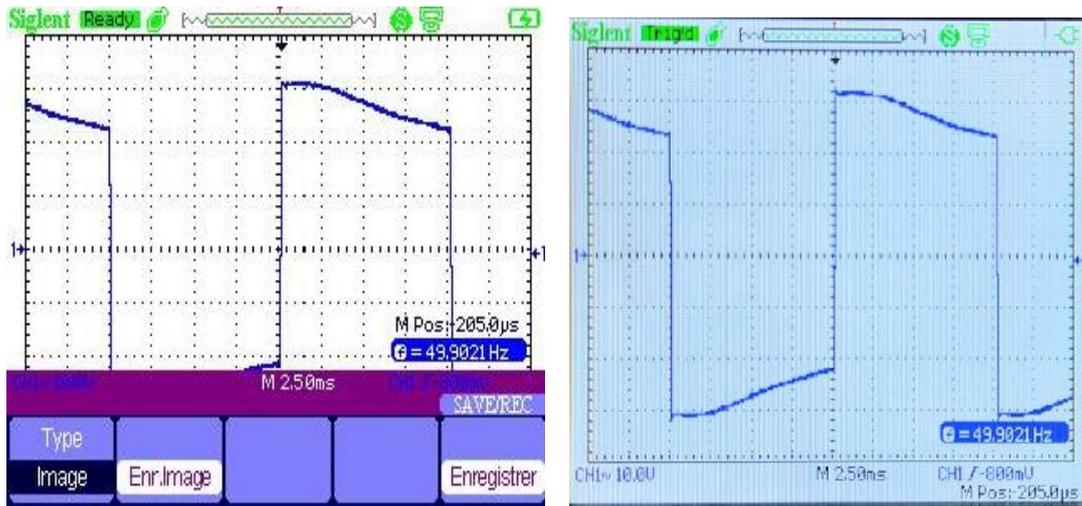


Figure (III.6) : Signal de tension au bornes de la charge.

On constate que la tension obtenue est effectivement alternative avec une période de 20 ms et une fréquence de 50Hz et d'amplitude de 30v .

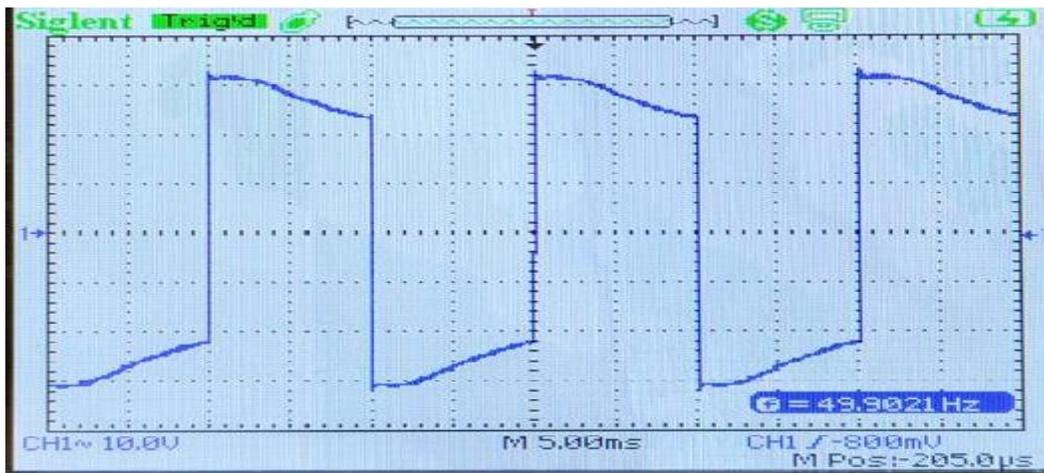


Figure (III.7) : Signal de tension visualisé depuis l'oscilloscope

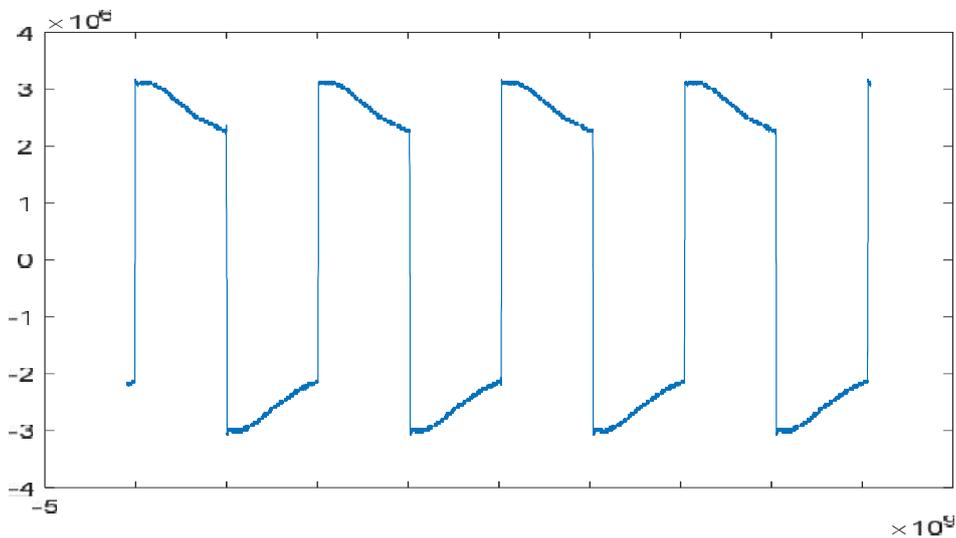


Figure (III.8) : Signal de tension `CSV` converti sur MATLAB.

- Valeur moyenne d'un signal alternatif carré :

$$V_{moy}(t) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (III.1)$$

$$V_{moy}(t) = \frac{1}{0.02} \int_0^{0.02} V_{max} dt + \int_0^{0.02} -V_{min} dt \quad (III.2)$$

$$V_{moy}(t) = \frac{1}{0.02} \int_0^{0.02} 30 dt + \int_0^{0.02} -30 dt \quad (III.3)$$

$$V_{moy}(t) = \frac{1}{0.02} (30 \int_0^{0.02} dt - 30 \int_0^{0.02} dt) \quad (III.4)$$

$$V_{moy}(t) = 0 \quad (III.5)$$

la valeur moyenne $V_m(t) = 0$, donc ce signal est effectivement alternatif et la tension est stable elle contient qu'une seule valeur. En revanche, on est loin du signal sinusoïdal c'est pour cela qu'on a ajouté des éléments de filtrage des Harmoniques.

III.1.5 Analyse fréquentielle

Cette partie consiste à étudier les variations du rapport des amplitudes du signal de sortie et du signal d'entrée par rapport à la fréquence F. nous allons utiliser la série de Fourier afin de tracer le spectre d'amplitude qui est la somme des signaux alternatifs à fréquences différentes qu'on appelle Les Harmoniques.

Remarque : chaque signal périodique possède sa propre expression en série de Fourier et son propre spectre d'amplitude.

Les résultats de calcul sont dans l'équation (III.6)

$$x(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \underbrace{\frac{1}{k} \frac{4E}{\pi}}_{\text{Amplitude}} \underbrace{\sin(k\omega t)}_{\text{Ondulation}} \quad \text{avec } k = \text{impair} \quad \text{(III.6)}$$

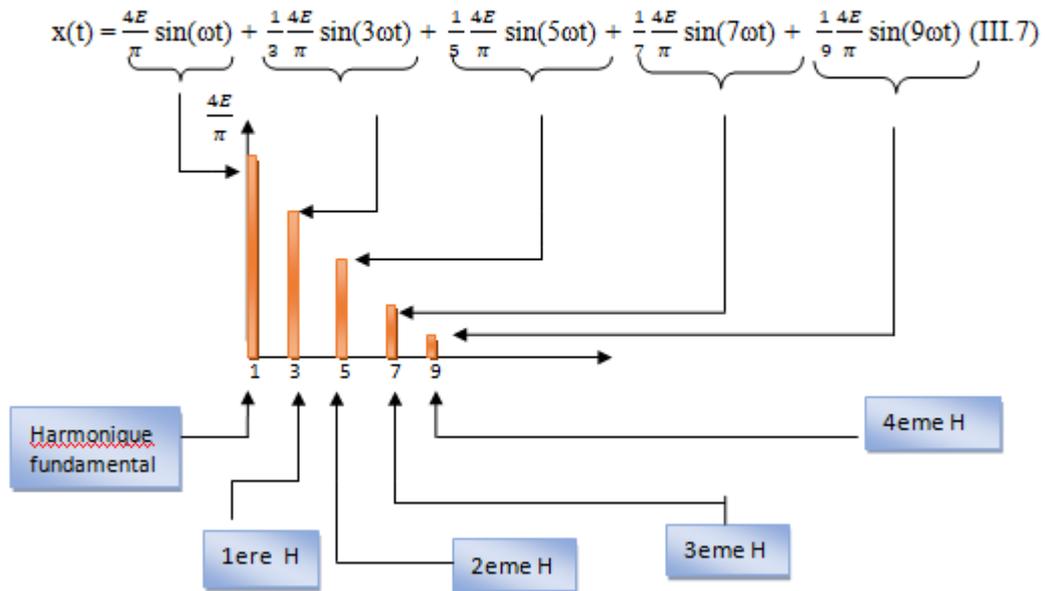


Figure (III.10) : spectre d'amplitude d'un signal carré .

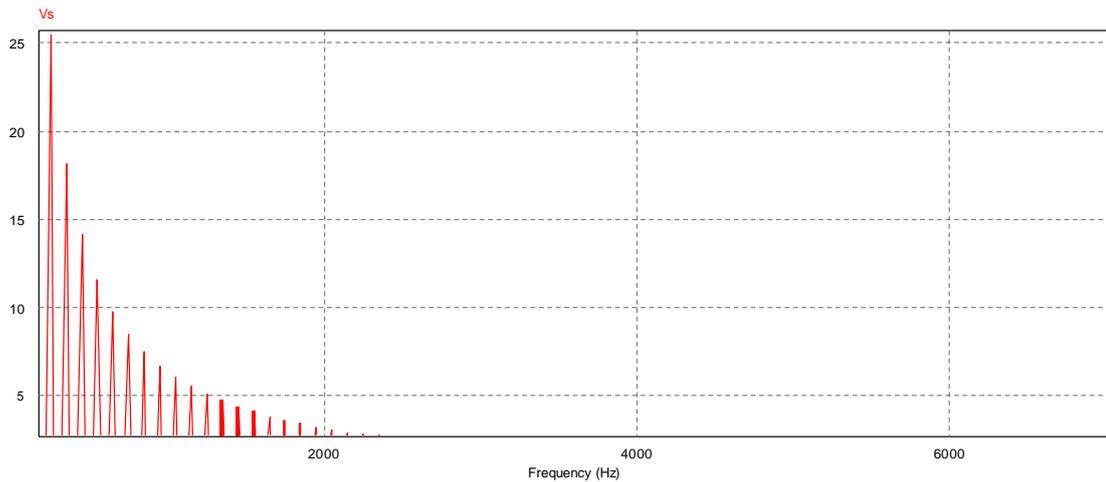


Figure (III.11) : Spectre d'amplitude Réalisé sur PSIM .

La figure (III.11) représente le spectre d'amplitude d'un signal de tension carrée .
Après les calculs en décomposition de la série de Fourier résulte le résultat suivant

$$x(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{(2k+1)} \frac{4E}{\pi} \sin((2k+1)\omega t) \quad \text{(III.8)}$$

On remarque qu'on trouve dans cette écriture, que des harmoniques impaires de rang $(2k+1)$ et des amplitudes inversement proportionnelles à ces rangs . La fréquence fondamentale a été choisie à 50 Hz.

III.2 La commande SPWM

Dans le domaine des Onduleurs il est préférable d'utiliser des stratégies de commande plus évoluées permettant de repousser plus efficacement les harmoniques causées par le découpage . C'est l'objectif principal de la commande SPWM qu'on va voir dans la partie qui suit .

III.2.1 Signal de commande

La technique qui consiste à généré des signaux de commande appelée PWM ou Modulation de Largeur d'impulsion) consiste juste en la comparaison, au sens électronique du terme, d'un signal sinusoïdal dit« de consigne »avec une« porteuse » triangulaire de fréquence supérieure permettant de fixer par là même la fréquence des commutations . le signal de commande est représenté dans la figure qui suit

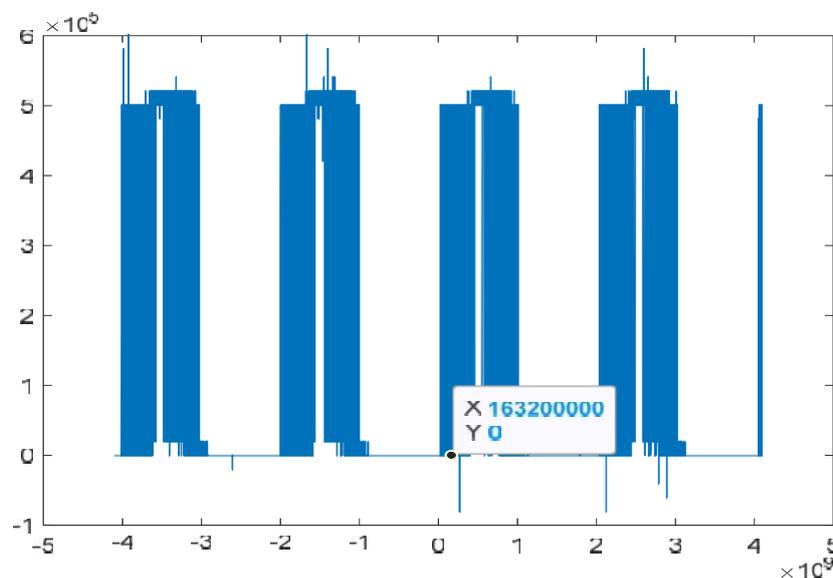


Figure (III.12) : Signal de commande `CSV` de la commande SPWM.

La figure (III.12) représente le signal de commande de la SPWM qui est hachée . il est issue par les commutations des MOSFETs , car pour chaque interrupteur complémentaire celui qu'on considère comme low side reste fermer tandis que l'autre interrupteur commute rapidement avec des périodes très courtes ce qui explique le résultat ci dessous .

III.2.2 Signal de tension

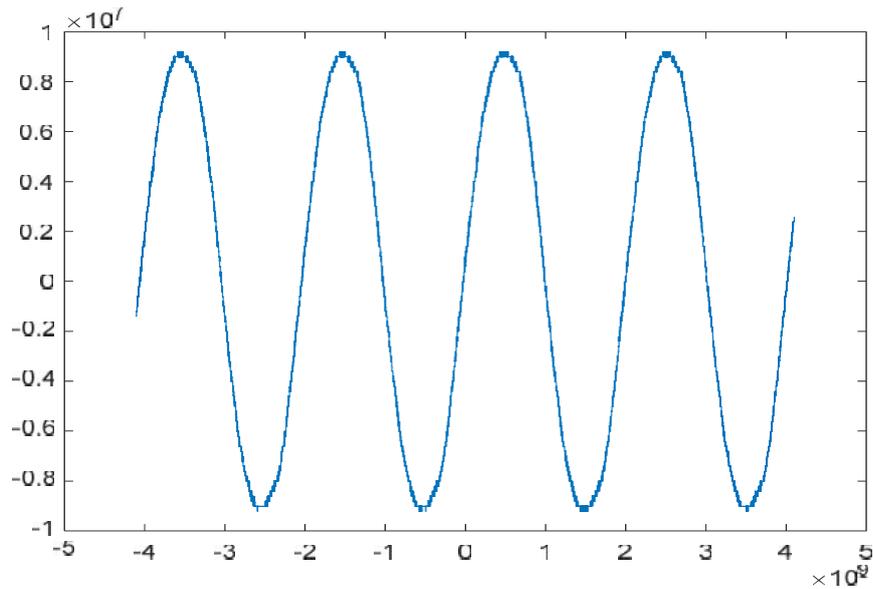


Figure (III.13) : Tension de sortie CSV convertie dans MATLAB.

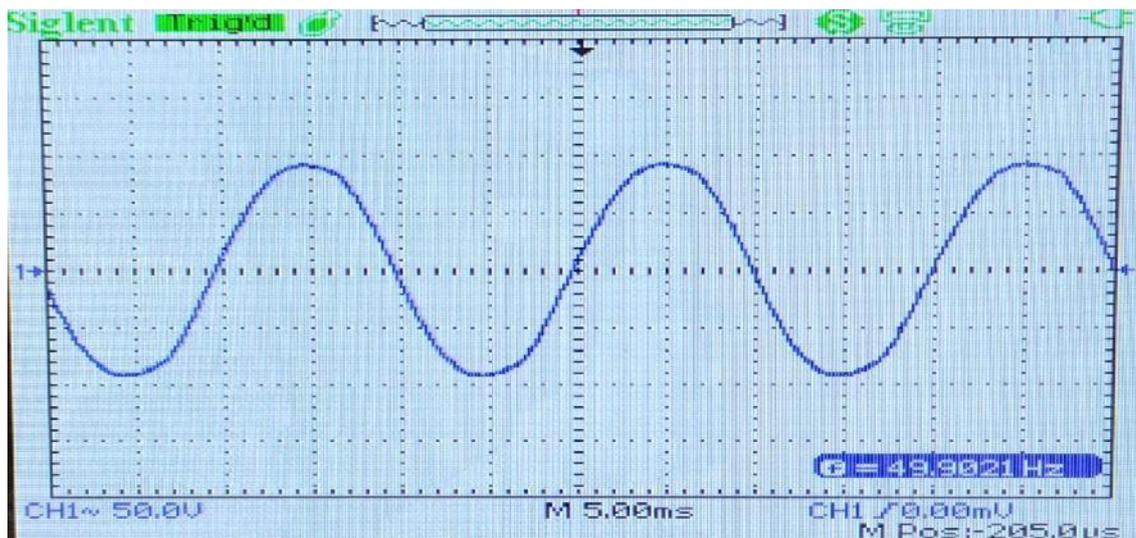


Figure (III.14) : Tension de sortie capturée par l'oscilloscope.

Les figures (III.13) et (III.14) représentent la tension de sortie sinusoïdale avec une amplitude de 15v , une fréquence de 50 Hz et une période de 20 ms .

Valeurs moyenne : on a

$$T = 20 \text{ ms} \quad \omega = \text{Pulsation}$$

$$x(t) = \frac{1}{T} \int_0^T v_m s_i(t) dt \quad (\text{III.9})$$

$$v_m(t) = \frac{1}{0,0} \left(\int_0^{0,0} 15 s_i(t) dt - \int_0^{0,0} 15 s_i(t) dt \right) \quad (\text{III.10})$$

$$v_m(t) = \frac{1}{0,0} (15[-\cos(\omega t)] - 15[-\cos(\omega t)]) \quad (\text{III.11})$$

$$v_m = 0$$

Ce qui signifie qu'effectivement nous avons obtenu un signal alternatif dont sa valeur moyenne est a :

$$v_m = 0$$

III.2.3 Analyse fréquentielle de la SPWM

On utilisant la série de Fourier , en trace le spectre d'amplitude .

$$x(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \frac{4E}{\pi} \sin(\omega t + \varphi) \quad (\text{III.12})$$

$$\text{avec } \varphi = \frac{\pi}{2} \text{ et } \omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (\text{III.13})$$

$$V_m = V_e \sqrt{2} \quad (\text{III.14})$$

$$x(t) = V_m \sin(\omega t + \varphi) = V_e \sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi) \quad (\text{III.15})$$

$$\text{où : } x(t) = V_m \sin(2\pi f_c t + \varphi) = V_e \sqrt{2} \sin(2\pi f_c t + \varphi) \quad (\text{III.16})$$

$$V_e = 312\text{v}$$

Donc $x(t) = 1$ qui es l'harmonique fondamentale . Les résultats obtenus sont représentés dans la figure suivante .

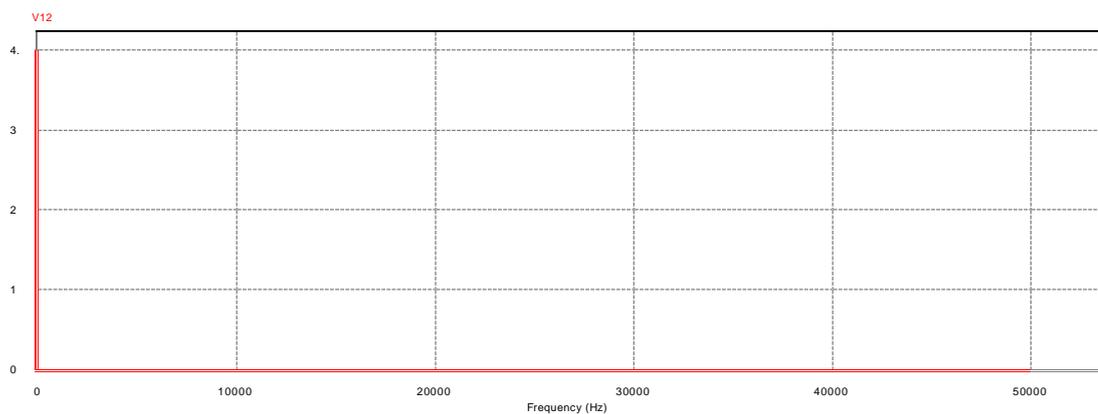


Figure (III.15) : Spectre d'amplitude d'un signal SPWM.

La figure (III.15) représente la FFT d'un signal sinusoïdal .Comme on peut le remarquer, il existe aucune harmonique pour un signal sinusoïdal , par conséquent aucune perte réactive .

voilà donc la raison pour la quelle nous avons choisi la commande de Modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale .

Conclusion

Ce chapitre est dédié aux résultats de vérification expérimentale de l'onduleur réalisé , confirmant la fiabilité par des tests. La combinaison des circuits avec la carte ARDUINO, simplifie la mise en œuvre de l'algorithme de contrôle (symétrique , SPWM).

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude et la réalisation d'un onduleur monophasé à **sinus** pur, les onduleurs sont amenés à connaître des développements importants liés essentiellement à une volonté de plus en plus affichée de diversification des moyens de production de l'énergie particulièrement dans le domaine du solaire photovoltaïque. Nous avons mis en évidence l'importance d'un signal sinus dans les alimentations électriques face aux autres signaux alternatifs qui contiendraient des harmoniques.

Ainsi, après un bref rappel sur les onduleurs et sur les commandes de ces derniers, nous nous sommes intéressé au dimensionnement et à la conception des parties le constituant, nous avons commencé par la partie commande puis la partie puissance.

La partie commande à pour objectif d'amplifier et d'isoler le signal de commande délivré par l'arduino , le circuit de puissance contient les commutateurs commandés par la commande rapprochée .

Pendant toute la période de réalisation, nous étions contraints de dimensionner et tester très soigneusement chaque composant utilisé et chaque circuit imprimé réalisé, afin de garantir le bon fonctionnement de l'ensemble après assemblage.

En conclusion , nous avons Présenté une étude théorique, simulation et réalisation pratique de l'onduleur monophasé à sinus pur , le signal sinusoïdal a été obtenu grâce à la commande SPWM et aux techniques de filtrage .

Ce travail a mis en évidence l'importance de la réalisation pratique, il est vrai que les systèmes de simulation nous aident, mais la théorie ne remplace pas l'expérience, effectivement la connaissance vient de l'expérience.

Sommaire

Chapitre I : Généralités sur les onduleurs

Introduction général.....	1
Introduction.....	3
I. Définition de l'onduleur.....	4
I.1. Types d'onduleurs.....	5
I.1.1. Onduleur autonome.....	5
➤ A fréquence fixe.....	5
➤ A fréquence variable.....	5
I.1.2. Onduleur non autonome (ou assisté).....	5
➤ Onduleur à résonance.....	5
➤ Onduleur à résonance série.....	5
➤ Onduleur à résonance parallèle.....	6
I.1.3. L'onduleur de tension.....	6
I.1.4. Onduleurs de courant.....	6
I.2. Principe de fonctionnement d'un onduleur.....	6
I.2.1. Onduleur monophasé.....	7
I.2.2. Onduleur de tension triphasé.....	7
I.3. Domaine d'application des l'onduleurs.....	8
I.3.1. Réglage de la vitesse de rotation des moteurs.....	8
I.3.2. Alimentation de secours lors d'une coupure d'électricité.....	8
I.3.3. Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes.....	8
I.4. Choix des interrupteurs.....	8
I.4.1. Le transistor MOSFET.....	9
➤ MOSFET a canal N.....	10
➤ MOSFET a canal P.....	11
I.5. Stratégies de commande des onduleurs.....	11
I.5.1. Commande à onde carré (Commande plein onde).....	11
I.5.2. Commande décalée (120).....	13
I.5.3. Commande MLI (Modulation de largeur d'impulsion).....	15
➤ MLI triangulo- sinusoïdale	16
➤ MLI calculer (PWM Sinusoïdale)	17
I.6. Les harmoniques.....	18
I.7. Les filtres.....	19
I.7.1. Types de filtre.....	20
➤ Filtre passe-haut.....	20
➤ Filtre passe-bas.....	20
➤ Filtre passe-bande.....	20
➤ Filtre réjécteur de bande.....	20
I.8. Conclusion.....	20

Chapitre II : Dimensionnement de l'onduleur monophasé.

Introduction.....	21
II Choix du montage de l'onduleur.....	21
II.1 Montage en pont.....	21
II.2 Dimensionnement du circuit.....	21
II.3 Circuit de puissance.....	23
II.3.1 Dimensionnement du circuit.....	24
II.4 Circuit de commande de l'onduleur monophasée.....	27
II.4.1 Les composants du circuit de commande.....	28

II.4.2	Fonctionnement du circuit de commande.....	29
II.5	Circuit D'alimentation.....	30
II.5.1	Les composants du circuit d'alimentation.....	31
II.5.2	Fonctionnement du circuit d'alimentation.....	32
II.6	Les signaux délivrée par l'ARDUINO.....	33
II.6.1	La commande plein onde.....	33
II.6.2	La commande SPWM.....	33
II.6.3	Création du temps mort.....	34
II.7	Conclusion.....	34

Chapitre III : Tests pratiques et validation des résultats.

Introduction		
III.	Commande de l'onduleur.....	35
III.1	Commande symétrique.....	35
III.1.1	Signal de commande.....	35
III.1.2	Temps mort	35
III.1.3	Amplification des signaux de commandes.....	36
III.1.4	Résultat tensions de sortie.....	37
III.1.5	Analyse fréquentielle.....	40
III.2	La commande SPWM.....	42
III.2.1	Signal de commande.....	42
III.2.2	Signal de tension.....	43
III.2.3	Analyse fréquentielle de la SPWM.....	44
Conclusion		45

RESUME

Ces dernières années, les domaines de l'électronique de puissance se sont développés considérablement et, offrent 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. Les convertisseurs statiques monophasés à structure tension sont des éléments essentiels de nombreux systèmes d'électronique de puissance tels que les variateurs de vitesse, les alimentations sans interruption et les filtres actifs. La sécurité de ces systèmes, leur fiabilité, leurs performances, la qualité de l'énergie et la continuité de service constituent aujourd'hui des préoccupations majeures dans le domaine de l'énergie. Les défaillances d'un convertisseur statique, qu'elles proviennent des drivers de sa commande rapprochée, d'un des composants de puissance commandables, conduisent à la perte totale ou partielle du contrôle des courants de phase. Notre Etude consiste à appliquer la théorie dans la pratique pour qui va aboutir la construction d'un onduleur monophasé à sinus pur.

ABSTRACT

In recent years, the fields of power electronics have developed considerably and, offer enormous potential for the conversion of electrical energy. Research in this field considers several aspects, including the topologies of converters, structures and performance of power switches and control techniques. Single-phase static converters with a voltage structure are essential components of many power electronics systems such as speed drives, uninterruptible power supplies and active filters. The safety of these systems, their reliability, their performance, the quality of the energy and the continuity of service are today major concerns in the field of energy. The failures of a static converter, whether from the drivers of its close control, from one of the controllable power components, lead to the total or partial loss of phase current control. Our Study consists in applying the theory in practice for which will lead to the construction of a single phase inverter with pure sine.

Remarque : chaque signal périodique possède sa propre expression en série de Fourier et son propre spectre d'amplitude. Les résultats de calculs sont dans l'équation (III.6).

$$x(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \underbrace{\frac{1}{k}}_{\text{Amplitude}} \underbrace{\frac{4E}{\pi}}_{\text{Ondulation}} \sin(k\omega t) \quad \text{avec } k = \text{impair} \quad \text{(III.6)}$$

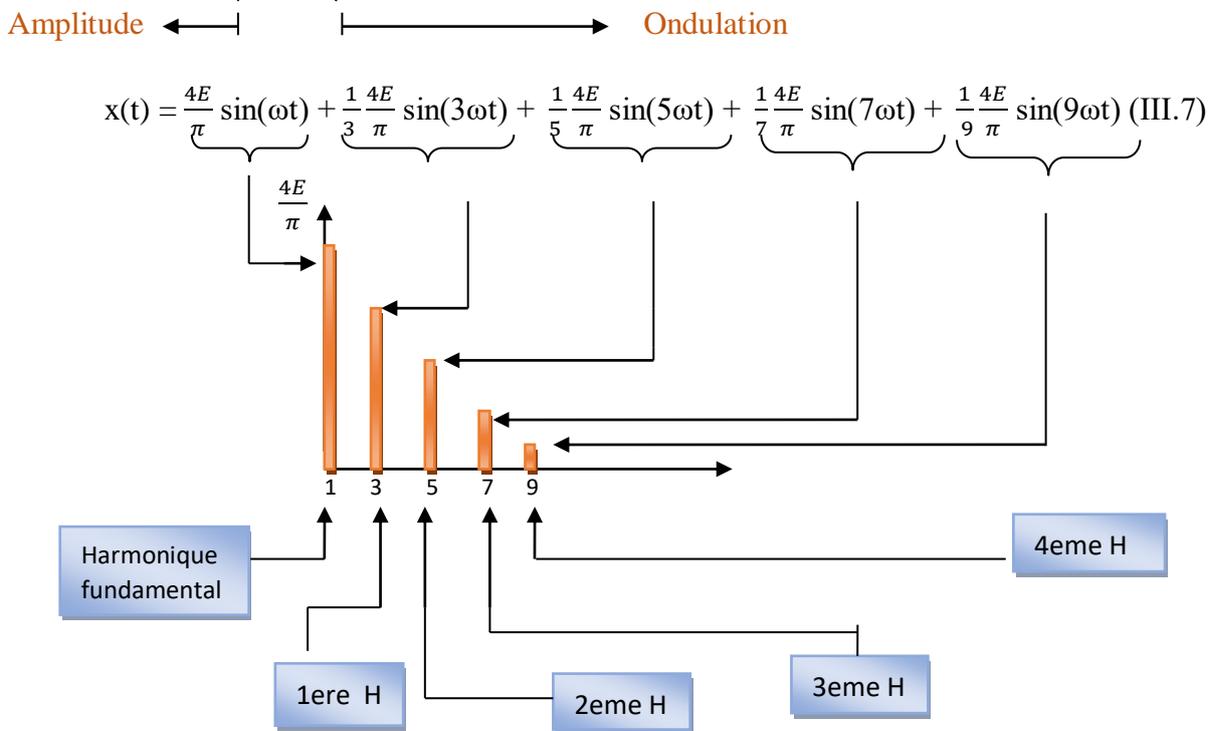


Figure (III.10) : spectre d'amplitude d'un signal carré .

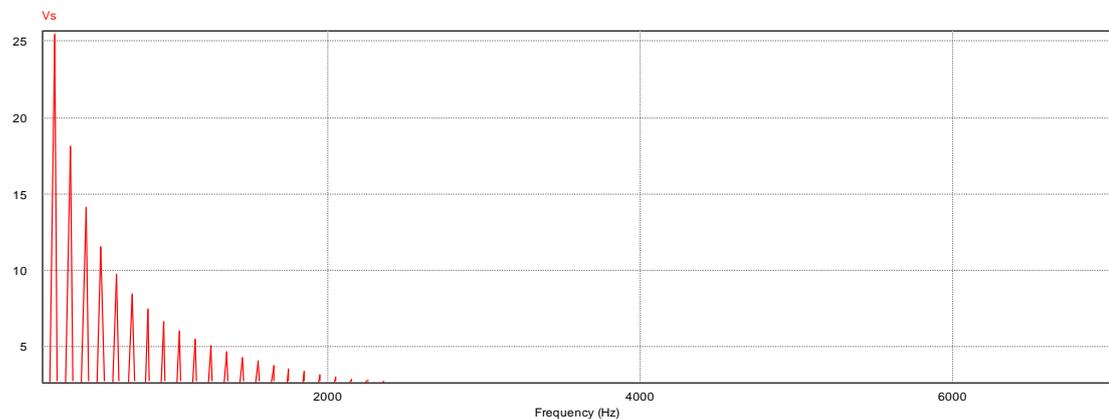


Figure (III.11) : Spectre d'amplitude Réaliser sur PSIM .

La figure (III.11) représente le spectre d'amplitude d'un signal de tension carré . Après les calculs en décomposition de la série de Fourier on ressort le résultat suivant

$$x(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{(2k+1)} \frac{4E}{\pi} \sin((2k+1)\omega t) \quad \text{(III.8)}$$

a. Pont de diode

Un pont de diode ou redresseur plein onde est ensemble de pont de 4 diodes utilisées pour redresser le courant alternatif en courant continu.

b. Condensateur

Nous avons choisi un condensateur de filtrage de 2200uF / 63V.

c. Le régulateur

Un régulateur de tension est un composant qui stabilise une tension a une valeur fixe (doit fournir une tension constante pour tout courant de sortie ou toute charge) et est essentiel pour les composants électronique qui nécessitent peu de fluctuation de tension. nous avons met un régulateur **7815** vu que l'optocoupleur **A3120** s'alimente avec 15V

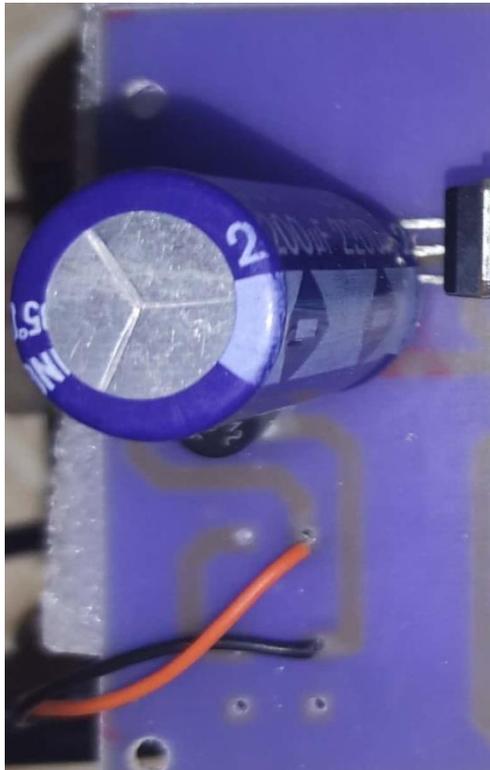


Figure (II.16): photo réelle de partie alimentation du circuit imprimé.

II.1.1.2 Le fonctionnement du circuit d'alimentation

On branche le circuit d'alimentation avec une tension locale de valeur 220 V alternatif à l'entrée du transformateur pour avoir une tension réduite en sortie qui sera à l'entrée du pont de diodes qui va redresser cette tension vers le continu, ensuite le condensateur se charge de

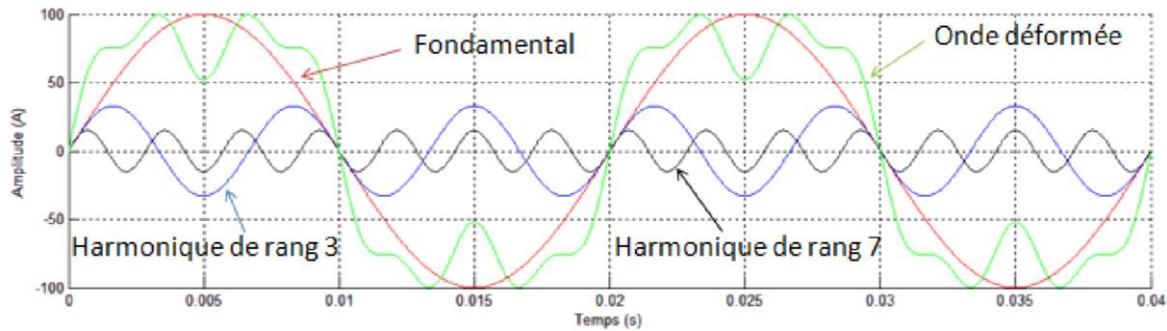


Figure (I.18) : Déformation de la fondamentale par des harmoniques de rang 3 et de rang 7.

La caractérisation des harmoniques peut être définie à l'aide du taux de distorsion harmonique THD. Ce dernier, donnant une mesure de l'influence thermique de l'ensemble des harmoniques, qui veut dire la quantification de pertes de valeur efficace dus aux harmoniques et défini comme étant le rapport de la valeur efficace des harmoniques à la valeur efficace du fondamental

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{V_{eff}^2 \text{ toutes harmoniques}}}{\sqrt{V_{eff}^2 \text{ du fondamental}}} \quad (\text{I.2})$$

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{V_{eff}^2 + V_{1eff}^2}}{\sqrt{V_{1eff}^2}} \quad (\text{I.3})$$

Pour éliminer les harmoniques on a recours à la technique de filtrage, dont on distingue deux types. Filtre actifs et filtres passifs.

Les filtres

Le filtre est un dispositif électronique qui laisse passer et amplifier un signal en fonction de sa fréquence au même temps supprime les fréquences indésirables. Il est constitué de plusieurs caractéristiques, son importance se résume dans la possibilité de tenir à la linéarité et l'invariance et des conditions (causalité et stabilité) et on peut les répartir en plusieurs types. [7]

On dit un filtre actif quand les composants actifs (circuit intégré ou transistor) jouent un rôle dans la constitution du filtre et autorisent l'amplification.

Liste des abréviations

DC : courant / tension continu

AC : courant / tension alternatif

RLC : Circuit composé de résistance, inductance et un condensateur.

Mosfet : (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) => transistor à effet de champ

IGBT :(Insulated Gate Bipolar Transisto) => transistor bipolaire à grille isolée

N-Mosfet : Mosfet à canal N

P-Mosfet : Mosfet à canal P

PSIM : logiciel (Unbeatbale power electronic software).

Proteus : logiciel (PCB design and circuit similator software)

MATLAB : logiciel de langage de script émulé par un environnement du développement

MLI : Modulation de largeur d'impulsion

SPWM : Modulation de largeur d'impulsion d'onde sinusoïdale

THD : le taux de distorsion harmonique

K1, k2, k3, k4 : interrupteurs 1, 2, 3, et 4 des Mosfets 1, 2, 3 et 4

GND : la mise à terre $V = 0$

Bootstrap : composé de deux mots (boots : chaussure, trap : piège)

Optocoupleur HCPL : composant électronique composé de : (opto : lumière, coupleur : isolation)

Bibliographie

- [1] G. Séguier, R. Bausière, F. Labrique Livre « Les convertisseurs de l'électronique de puissance a conversion alternative », Volume 4, Edition tec&doc, 1995.
- [2] W. Theodore , S.Gilbert « Electrotechnique », 3ème édition de Boeck université, Article de revue 1999.
- [3] Mecheri Sallah-Ediine , «Réalisation d'un onduleur monophasé contrôler par une carte ARDUINO » Mémoire de fin d'étude Master , Université Constantine, 2014.
- [4] Merad Faiza «Conception et simulation des caractéristiques électriques d'un transistor MOSFET nanométrique a conduction latéral» Université Aboubeker Belkaid 2014 .
- [5] G.seguier « Electronique de puissance »,livre ,7ème .Edition 1999.
- [6] N. Gheorghe « Perturbations dans les réseaux électriques », Article de Revue Polyewpert Technique N°53 2008.
- [7] L.Jean Louis, « Fonction des champs Harmoniques »,Article de revue Cellules rythmiques et développement organique , 2004.
- [8] P.Nicolas, «électronique de puissance pour l'industrie» , les convertisseurs de puissance et leurs commande»,livre, 2006.
- [9] B. philipe «Electronique de puissance Méthodologie et convertisseurs élémentaires »livre, PPUR precceur polythechniques ,2006.
- [10] Luc Lasne , «électronique de puissance », Université de bordeaux , 2ème Edition, 2015.
- [11] Didaoui Mokrane , Elik Ferhate «Réalisation d'un onduleur triphasé a base de transistor IGBT», Mémoire de fin d'étude en Master ,université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou,2009.
- [12] Christophe Carron , «Onduleur 1kw pour roue a eau a vitesse variable »,thèse Doctorat Ecole Valisanne Hochschule Wallis ,2006.
- [13] A. Nedjma , «conception d'une commande MIPPT optimale a base d'intelligence artificielle d'un système photovoltaïque »,thèse Doctorat , Université Bourgogne Franche-Comté ,2020 .
- [14] Ouhidi , Tarik, «Conception et simulation d'une source d'alimentation constitue d'un preregulateur monophasé de puissance 1 kw»,thèse de doctorat ,Ecole de technologies supérieurs , 2002.

- [15] M. Adouane , M, haddadi , «Etude et conception d`un onduleur monophasé autonome gérer par un microcontrôleur PIC 16F876A»,Article de revue , Journal of renewable energie , 2009.
- [16] P. Barrade, '*Electronique de Puissance: Méthodologie et Convertisseurs Elémentaires*',
Lausanne Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Première édition 2006.
- [17] C. Buttay, '*Contribution à la Conception par la Simulation en Electronique de Puissance,Application à l'Onduleur Basse Tension*', Institut National des Sciences Appliquées, Lyon,Novembre 2004.
- [18] S. Gusia, '*Modélisation des Systèmes Electroniques de Puissance à Commande MLI*',
Université Catholique de Louvain, Bruxelles, Belgique, Septembre 2005.

Liste des symboles

V_G = la tension de gâchette de MOSFET

V_S = la tension de source de MOSFET

V_{DS} = la tension entre le drain et la source de MOSFET

V_{GS} = la tension entre La gâchette et la source de MOSFET

F_m = basses fréquences du signal

F_p = haute fréquence du signal

V_m = Amplitude modulante du signal

V_p = Amplitude porteuse du signal

V_{1max} = La valeur maximale du fondamentale de la tension de phase à la sortie de l'onduleur vaut exactement

U_{DC} = la tension de bus continu

U_{Hk} = Harmonique de tension

I_{HK} = Harmonique de courant

V_{S1} = tension de sortie du l'optocoupleur qui alimente le bras 1 du l'onduleur

V_{S2} = tension de sortie du l'optocoupleur qui alimente le bras 2 du l'onduleur

V_{EE} = la pate 5 de l'optocoupleur

V_{CC} = la pate 8 de l'optocoupleur

V_{eff} = valeur efficace

r = Le coefficient de réglage en tension

m = L'indice de modulation m

ω : pulsation

φ : Déphasage

T : période

I_a = courant passant par le bras '1' du l'onduleur

I_b = courant passant par le bras '2' du l'onduleur

I_c = courant passant par le bras '3' du l'onduleur