

## IV.1 Introduction

L'essor de notre réalisation pratique est basé sur une connaissance théorique préalable qui permet de composer les différents circuits à partir d'une expérimentation de test. D'après les chapitres précédents on a pu avoir une idée sur le principe de fonctionnement de l'onduleur triphasé.

Dans ce dernier chapitre, on va effectuer multiples essais et les différentes étapes de réalisation des différentes parties de l'onduleur qui se composent de trois parties fondamentales.

- Génération des signaux (carte de commande).
- Partie commande et isolation rapproché.
- Partie Puissance.

## IV.2 Génération des signaux

La technique de modulation de largeur d'impulsion (Pulse Width Modulation PWM) consiste à générer un signal carré avec un rapport cyclique modulé en fonction d'un signal de commande. Le signal généré peut servir à commander un circuit de puissance à découpage (pont en H où demi pont), associé à un filtrage passe-bas, pour générer une onde sinusoïdale ou d'une autre forme. La technique est utilisée dans les onduleurs monophasés, diphasés ou triphasés [26].

Nous avons vu dans le chapitre 3 une description sur la carte ARDUINO MEGA et Comment l'utiliser pour générer un signal numérique, maintenant nous allons utiliser ce principe pour générer six signaux MLI (modulation de largeur d'impulsion) basant sur l'algorithme de l'implémentation du MLI vectorielle de telle sorte que chaque signal commande un interrupteur MOSFET. À l'aide des caractéristiques de la carte ARDUINO la fréquence des signaux est convenable.

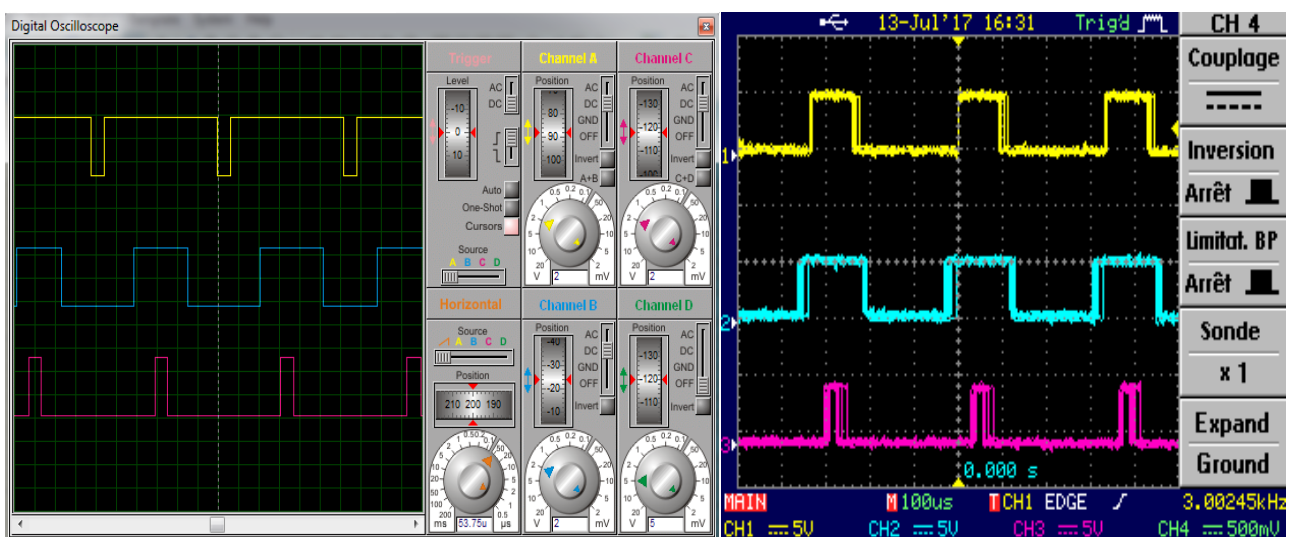


Figure IV.1 : les signaux générés par la carte ARDUINO.

### IV.3 Circuit de commande de l'onduleur triphasé

Afin de s'affranchir des contraintes de rapidité d'échantillonnage pour une MLI Vectorielle on va réaliser un montage qui va faire la conversion numérique analogique d'impulsion générée par la carte Arduino et assurer la tension suffisante pour attaquer la grille d'MOSFETs de notre carte.

#### IV.3.1 Système de génération des compléments et des temps morts

Ce module est décrit par la figure IV.2, l'entrée reçoit les trois impulsions de commande correspondant au pilotage des trois bras de l'onduleur de tension triphasé. Dans un souci de génération et d'homogénéisation des interfaces au niveau des onduleurs de tension des bancs tests du laboratoire, une adaptation en tension est mise en œuvre. Elle est constituée par des amplificateurs non inverseurs de la famille CMOS (4050) qui ont la particularité d'admettre des tensions sur les bornes d'entrées supérieures au niveau d'alimentation du circuit. Ainsi, les niveaux de tension pour le circuit générant les temps morts sont de 0V-5V. Les amplificateurs sont donc alimentés entre 0- 5V, par contre les seuils d'entrées peuvent être compris entre 3V et 15V pour le niveau haut ou logique «1» et «0» pour le niveau bas ou logique «0» [27].

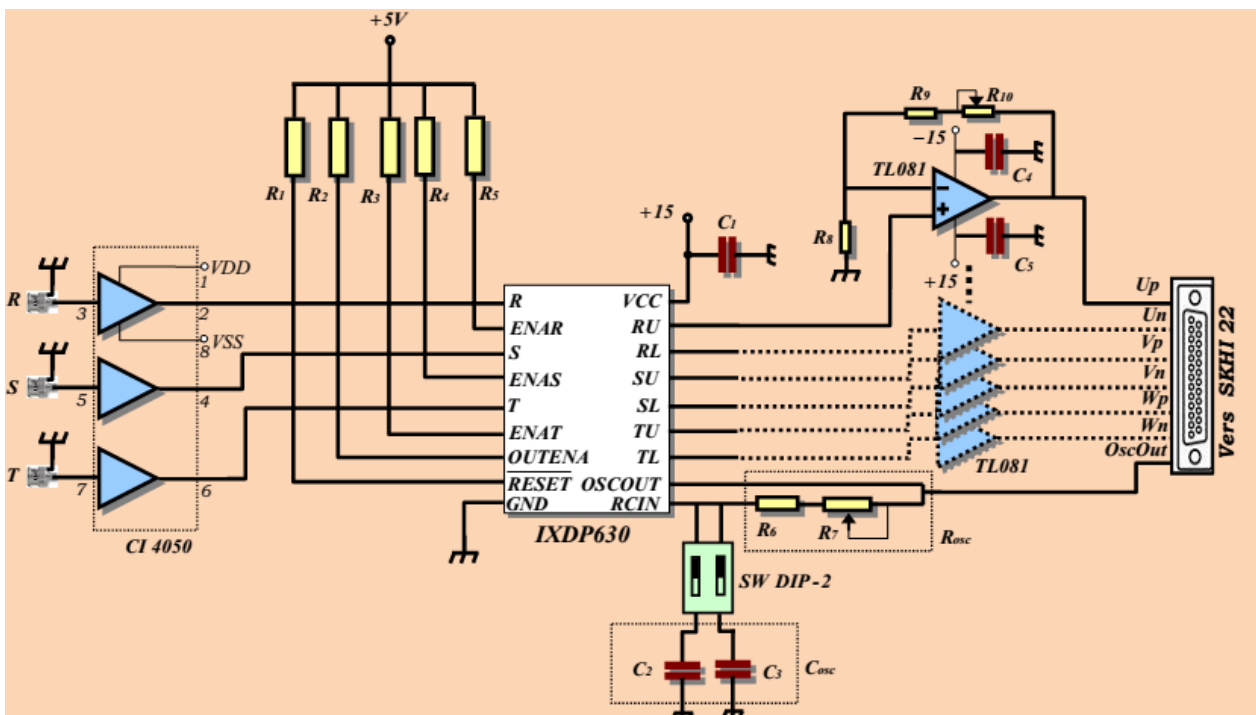


Figure IV.2 : Schéma de génération des compléments et des temps morts de la commande

Cette solution a l'avantage d'accepter une très large gamme de niveaux pour les outils temps réels de la commande. En effet, il est ainsi possible d'utiliser aussi bien des sorties numériques (ou logique) en 0-5V que des d'interface pour le contrôle d'onduleurs triphasés l'IXDP630 de la société

IXYS semi-conducteurs GmbH est exploité. Celui-ci réalise la complémentarité des commandes pour chaque bras de l'onduleur avec une génération de temps morts ( $t_{mort}$ ) numériques strictement identiques sur les trois bras selon l'équation suivante :

$$t_{mort} = \frac{8}{f_{osc}} \quad (IV.1)$$

Où " $f_{osc}$ " représente la fréquence d'oscillation de l'horloge du circuit. Cette solution garantit des temps morts rigoureuses identiques et évite des disparités sur les trois phases contrairement aux solutions analogiques qui créent ces temps morts de façon indépendantes sur les trois bras. L'oscillateur est composé d'un réseau RC (ou un quartz pour le circuit IXDP630) qui permet la programmation de la valeur des temps morts. Elle est fixée par la circuiterie interne à exactement huit périodes d'horloge, ainsi, le réglage de la valeur du temps mort s'effectue par l'ajustement des valeurs de  $R_{osc}$  et de  $C_{osc}$  qui se traduit par une modification de la fréquence de cet oscillateur donnée par [28] :

$$f_{osc} = \frac{0.95}{R_{osc} * C_{osc}} \quad (IV.2)$$

### IV.3.1.1 Driver IXDP630 (Inverter Interface and Digital Dead time Generator)

Le composant principal utilisé dans la carte est l'IXDP630. Il est destiné principalement à l'application en triphasé, en assurant le temps nécessaire (temps mort) pour séparer les deux signaux logiques requis pour les deux IGBT de même bras, le IXDP630 a été spécialement conçu pour piloter directement un optocoupleur à grande vitesse comme le Hewlett Packard HCPL2211 famille ou le 740L60XX Instrument général OPTOLOGIC famille.

#### IV.3.1.1.1 Caractéristiques de l'IXDP630

- Alimenté en 5V, technologies logique mise en œuvre HCMOS et permet le maintien de faible puissance à grande vitesse.
- Les entrées passent à travers des triggers de schmitt, ce qui permet d'améliorer l'immunité au bruit.
- Permet d'obtenir simultanément des temps morts égaux pour les trois phases de sortie.
- Remplace 10-12 standard SSI/MSI dispositif logiques.
- Permet l'utilisation d'un large éventail de stratégies de modulation PWM.
- Peut être connecté directement à des optocoupleur de grandes vitesses.

### IV.3.1.1.2 Application

- Commande mono ou triphasé des machines électriques.
- Les systèmes USP mono ou triphasé.
- Circuit général de conversion de puissance.
- La répartition des impulsions et génération du retard des signaux.
- Usage général et filtres.

L'IXDP630 utilise un oscillateur à base d'un trigger de schmitt, par l'association de deux composants externes,  $R_{osc}$  et  $C_{osc}$ . On peut déterminer la fréquence d'horloge à partir duquel on calcule le temps mort. Cette conception permet une réduction significative des couts sur un oscillateur à quartz standard, mais présente un compromis dans la précision de fréquence. La précision initiale et la dérivée sont une fonction de la composant externe et les coefficients de température, approvisionnement tension, et par IXDP630. A des fréquences de moins de 1MHZ

La figure IV.7 présente les chronogrammes du fonctionnement normal de l'IXDP630. On remarque qu'une fois le RESET est libéré, un temps morts de 8 périodes d'horloge est réalisé entre XU et XL (avec X: R, S ou T et U: UP, LOW).

Lorsque XU et XL sont à "0", la longueur de temps morts est fixée à 8 fois la période de l'horloge.

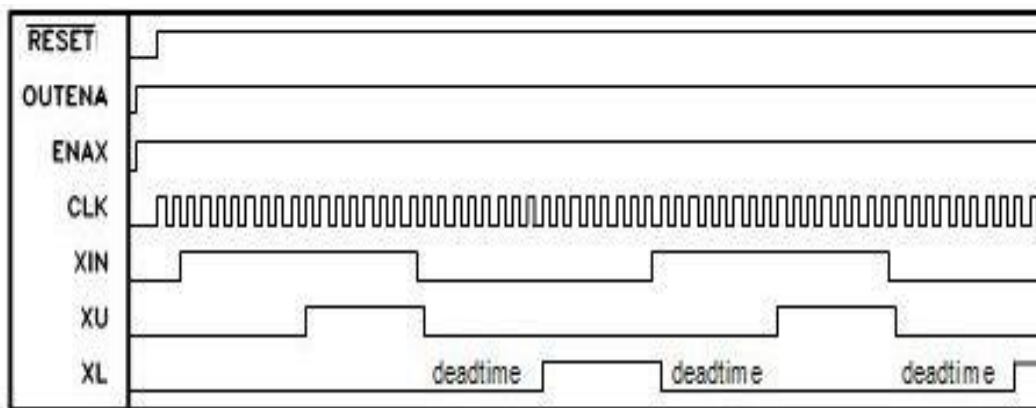


Figure. IV.3: Chronogramme de fonctionnement de l'IXDP630.

### IV.3.2 La partie Commande rapprochée

Le signal généré par la carte ARDUINO est de type 5V logique donc il faut faire l'isolation entre la carte de commande et le reste de circuit (drivers et la partie puissance) pour cela on utilise des optocoupleur où opto-isolateur [29].

### IV.3.2.1 Isolation

On parle d'isolation galvanique entre deux circuits électriques ou électroniques, lorsqu'il n'y a aucune liaison conductrice (fil électrique, châssis métallique,, etc.) entre ces deux circuits. Il s'agit de la tension de mode commun entre l'entrée et la sortie de l'optocoupleur. Le constructeur spécifie en général une tension maximale continue et/ou alternative pour laquelle aucun claquage ne se produit. Cette tension doit pour le test être appliquée durant un temps minimum (1 seconde ou 1 minute). Pour obtenir une bonne isolation, les composants optiques sont séparés par un écran transparent.

### IV.3.2.2 Optocoupleur HCPL2211

Un optocoupleur ou photo coupleur, est un dispositif optoélectronique qui transmet des informations logiques ou analogiques sous forme de signal électrique, via une voie optique qui isole électriquement l'entrée de la sortie. Ainsi, le coupleur optique HCPL 2211 est une porte logique optiquement couplé. Il contient une LED Ga ASP. Les détecteurs ont des étages de sortie de pôles totémiques et des étages d'entrée du récepteur optique avec haut-Schmitt pour fournir des formes d'onde logiques compatibles, illuminant la nécessité de wave shaping supplémentaire. Les signaux de commande ne font intervenir que très peu d'énergie : ils envoient un ordre d'ouverture ou de fermeture ; pour notre application il est nous avons choisis l'optocoupleur HCPL2211 parce qu'il supporte un  $dv/dt$  de  $5000V/\mu s$  ce qui le met à l'abri des perturbations parasites pouvant créer des commutations aléatoires ; et que sa tension d'isolement est de 2500V [28].

### IV.3.2.3 Applications

- Isolation des systèmes logiques hauts débit,
- Interfaces informatiques-périphériques,
- Interfaces système microprocesseur,
- Récepteur de ligne à grande vitesse,
- Power Control Systems.

## IV.4 La simulation virtuelle de la carte commande «PORTEUS»

Avant de passer à la réalisation pratique, nous avons utilisé un CAO: il s'agit de ISIS - PORTEUS, c'est un CAO électronique perfectionné conçu par Labcenter Electroniques qui permet de dessiner des schémas électroniques, de les simuler et de réaliser le circuit imprimé correspondant.

Le CAO électronique «PROTEUS» disponible et téléchargeable sur ce lien [21], se compose de nombreux outils regroupés en modules au sein d'une interface unique. Ce dernier nous permet de schématiser notre carte électrique et la simuler virtuellement comme le montre la figure suivante:

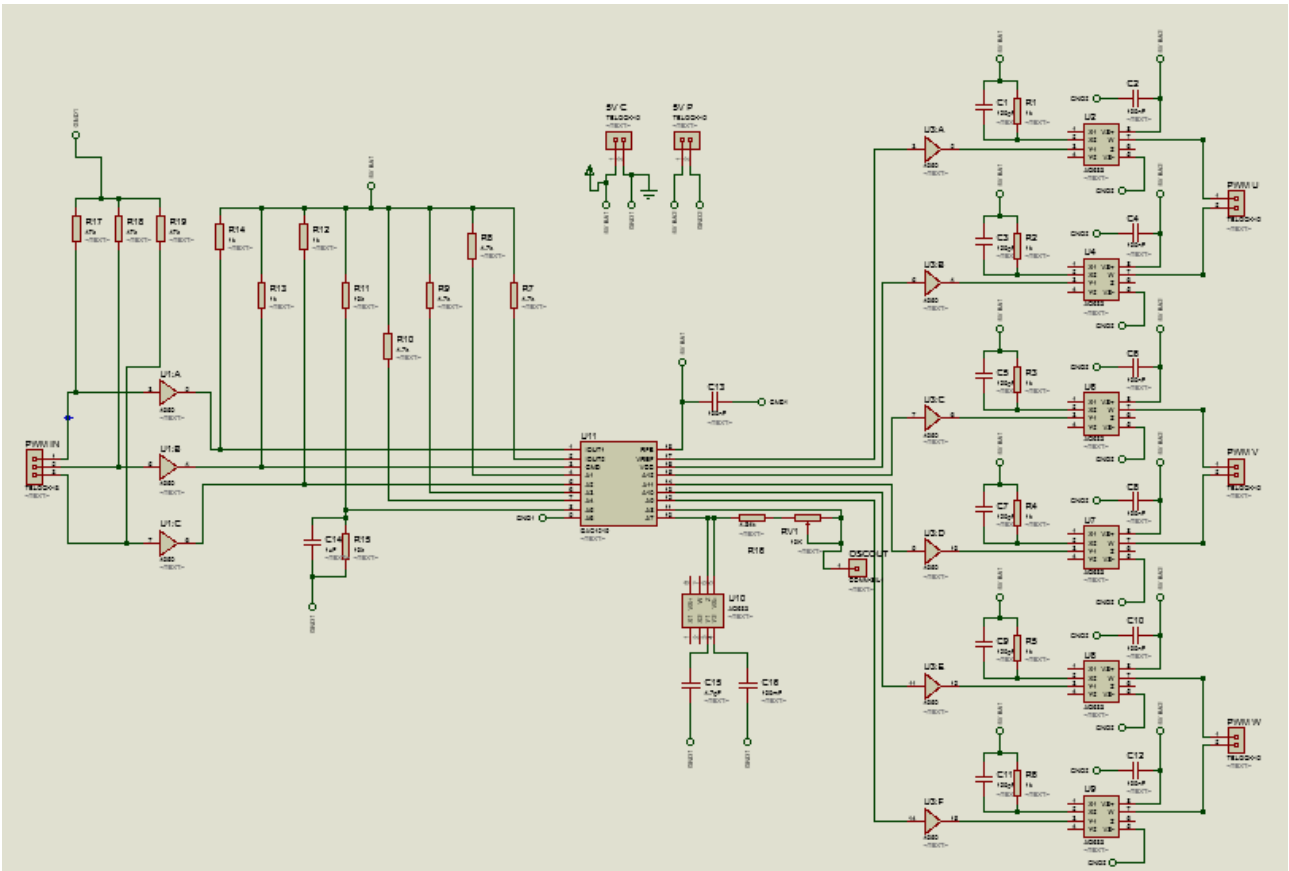


Figure IV.4: Schéma de circuit imprimé de la partie commande avec ISIS.

Afin d'alimenter les composants avec (5V et 15V), il faut réaliser une carte pour assurer l'alimentation car les composants demandent une alimentation pour le schéma de circuit imprimé suivant est réalisé avec le logiciel «ARES » PCB:

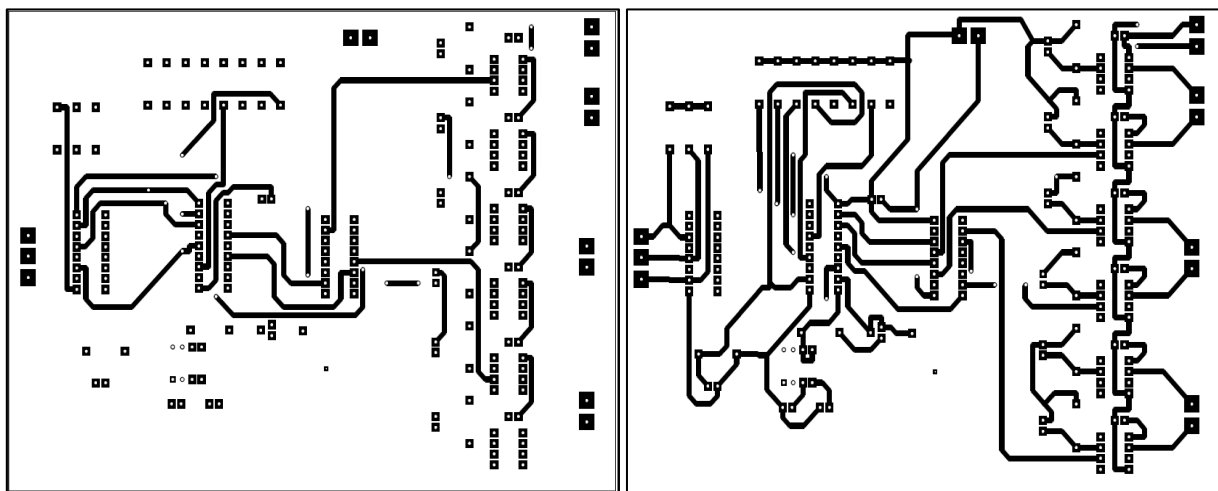


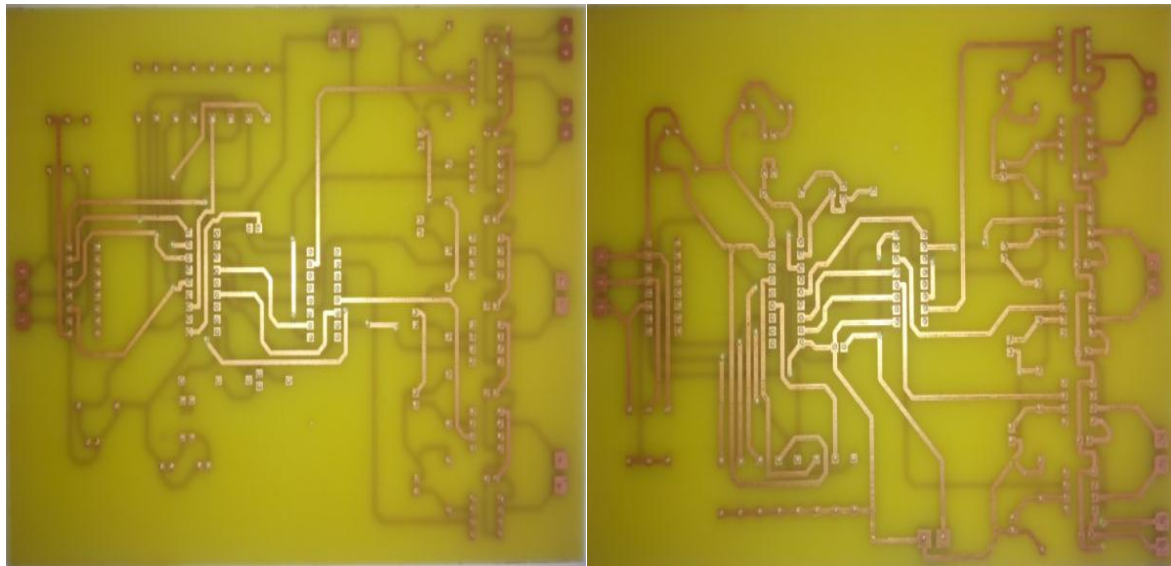
Figure IV.5: Schéma de circuit imprimé de la carte commande avec ARES (Top et Bottom)



Pour réaliser une telle carte on va passer par plusieurs étapes :

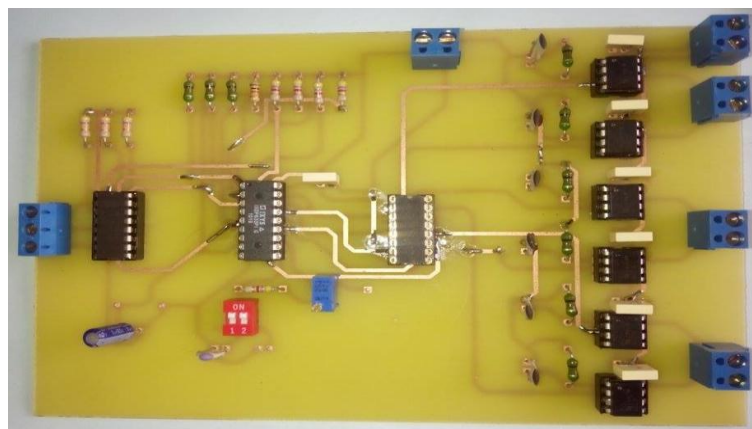
- Découper la plaque Epoxy/cuivre aux dimensions du futur circuit imprimé ;
- Mettre le typon dans l'insoleuse en vérifiant bien ses faces ;
- Pour que l'insolation puisse s'effectuer, il faut retirer l'adhésif opaque qui protège la couche photosensible des rayons ultra-violets de la lumière ambiante ;
- Placer la plaque pré sensibilisée dans l'insoleuse, avec le typon coté cuivre une fois l'adhésif retiré ;
- L'étape qui suit présente « une gravure chimique » dans laquelle est utilisé le produit attaquant le cuivre « le perchlorure du fer » ;

Cette figure regroupe ces étapes :



**Figure IV.6:** Animation de la carte de commande en 3D.

Après la réalisation du circuit imprimé et le soudage des composants dans la carte, maintenant on utilise les impulsions produites par le circuit de commande pour attaquer les MOSFETs de circuit de puissance.



**Figure IV.7:** Photo réelle de la carte électronique de commande.

### IV.4.1 Gestion du temps mort

Le temps mort est introduit entre le blocage d'un transistor et la mise en conduction de l'autre. Pour assurer la génération d'un retard entre les signaux de commande des deux MOSFETs. Pour éviter la conduction simultanée des deux transistors d'un même bras de pont, le montage permet de réaliser cette fonction. Cette solution est retenue car elle permet une meilleure flexibilité en terme de réglage des temps morts voir la Figure III.25. L'inconvénient vient du fait que le réglage du temps mort est délicat car il faut jouer sur plusieurs paramètres en même temps [24].

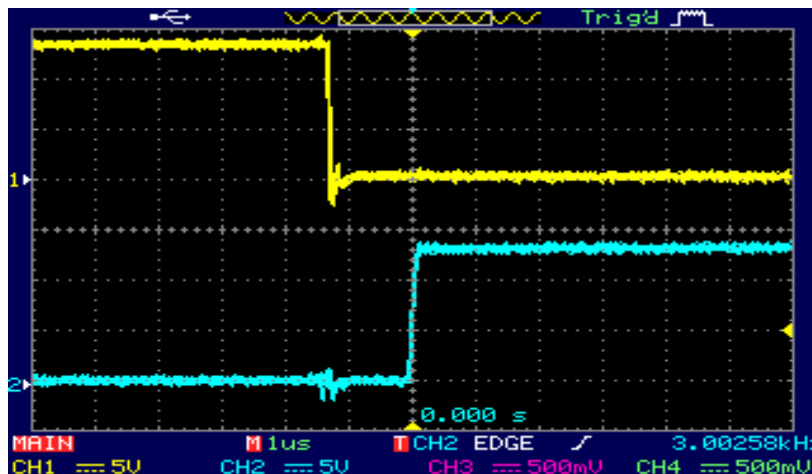


Figure IV.8: Le temps morts entre deux MOSFETs d'un même bras.

## IV.5 Partie puissance

### IV.5.1 Caractéristique statique et interrupteur

Le raisonnement qui permet de déterminer les caractéristiques statiques des interrupteurs nécessaires pour un onduleur de tension. Le convertisseur DC/AC réversible en courant, il s'agit de pouvoir assurer la circulation d'un courant aussi bien négatif que positif dans la source. On note que le courant change de signe périodiquement suivant la fréquence (la valeur moyenne nulle), les deux contraintes imposent l'interrupteur choisi (Figure III.9) unidirectionnel en tension, bidirectionnel en courant [30].



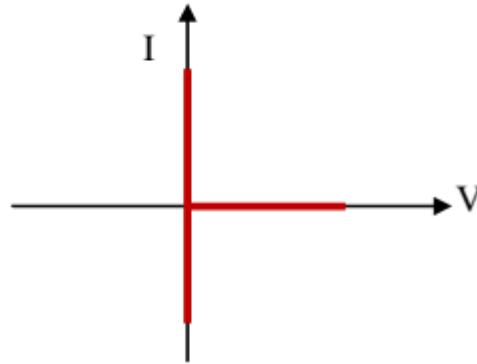


Figure IV.9: Caractéristique statique de l'interrupteur.

La solution technologique qui permet de directement ce type de caractéristiques statiques représentées sur Figure IV.10:

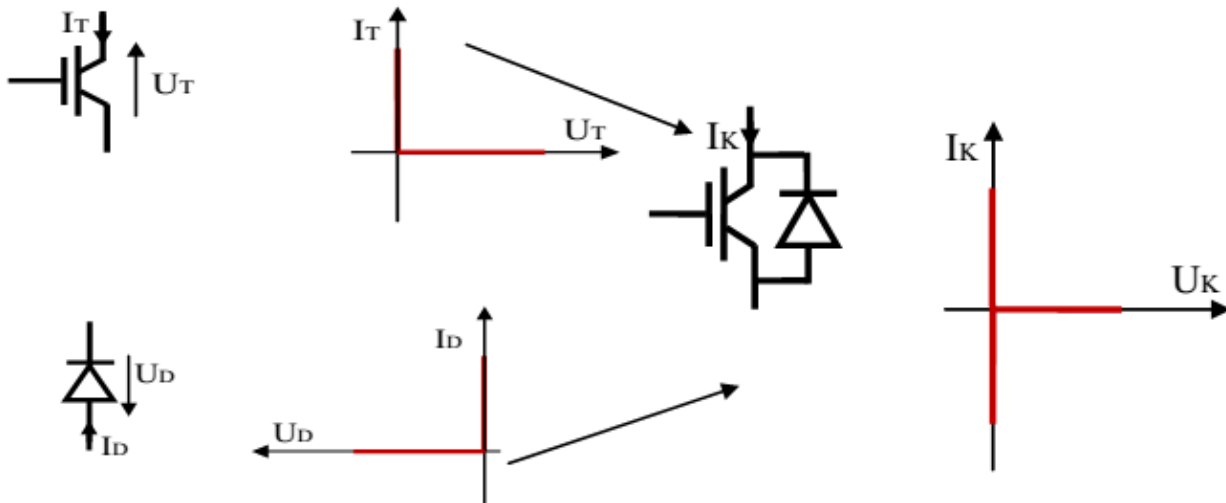


Figure IV.10: L'interrupteur bidirectionnel en courant.

### IV.5.2 Choix d'interrupteur

Les composants de l'électronique de puissances (interrupteurs) sont déterminés par les niveaux de la puissance et la fréquence de commutation. En règle générale, plus les composants sont rapides, plus la puissance commutée est faible et inversement. A titre indicatif, les transistors MOSFET, sont considérés comme des composants très rapides mais de puissance relativement faible.[31]. Mis à part le MOSFET qui possède naturellement une diode en antiparallèle assurant la bidirectionnalité en courant. L'utilisation de MOSFET est limitée pour des applications moyennes et forte puissance, à diode interne fonctionne dans des temps de recouvrement important qui pénalisant les pertes par commutation [30]. Un autre avantage dans l'utilisation des MOSFETS concerne la simplicité du circuit d'amorçage de gâchette

comparativement à celui des transistors bipolaires ou des thyristors. En effet, le MOSFET ne nécessite pas de protection contre les  $di/dt$  et les  $dv/dt$  [31].

## IV.6 Réalisation de l'onduleur triphasé avec bras redondant

L'onduleur réalisé contenir tous les parties qu'on mentionner précédemment C.-à-d. des circuits comportent la carte ARDUINO, partie de commande rapproché et la partie de puissance comme montre la Figure suivante :

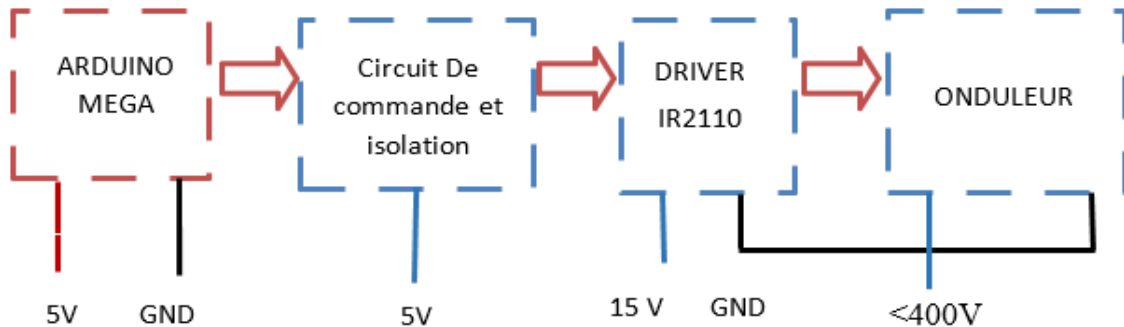


Figure IV.11 : schéma fonctionnel d'un onduleur.

### IV.6.1 DRIVER

Dans de nombreuses situations, nous devons utiliser les MOSFET configurés comme des commutateurs à haut niveau. Beaucoup de fois, nous devons utiliser les MOSFET configurés comme des commutateurs de haut et de bas-côté. Comme dans les circuits en pont. Dans les circuits à demi-pont, nous avons 1 MOSFET haut-côté et 1 MOSFET côté bas. Dans les circuits à pont intégral, nous avons 2 MOSFET haut-côté et 2 MOSFET côté bas. Dans de telles situations, il est nécessaire d'utiliser des circuits de commande côté haut aux côtés des circuits de commande côté bas. La manière la plus courante de conduire les MOSFET dans de tels cas est d'utiliser des conducteurs MOSFET à haut-bas. Sans aucun doute, la puce de pilote la plus populaire est l'IR2110.

Notre réalisation ce passe par plusieurs étapes :

- Simulation de circuit sous l'environnement ISIS.
- Création de circuit imprimé sous l'environnement ARES.
- Impression de la carte et emplacement des composants.

### IV.7 Simulation de la carte puissance

Ce travail utilise des outils de simulation fonctionnelle et électronique comme peut le voir sur le Figure IV.11 on dessine cette schéma avec logiciel PORTEUSE la partie ISIS en utilisant les bibliothèques des composantes, ainsi nous pouvons tester le comportement du circuit.

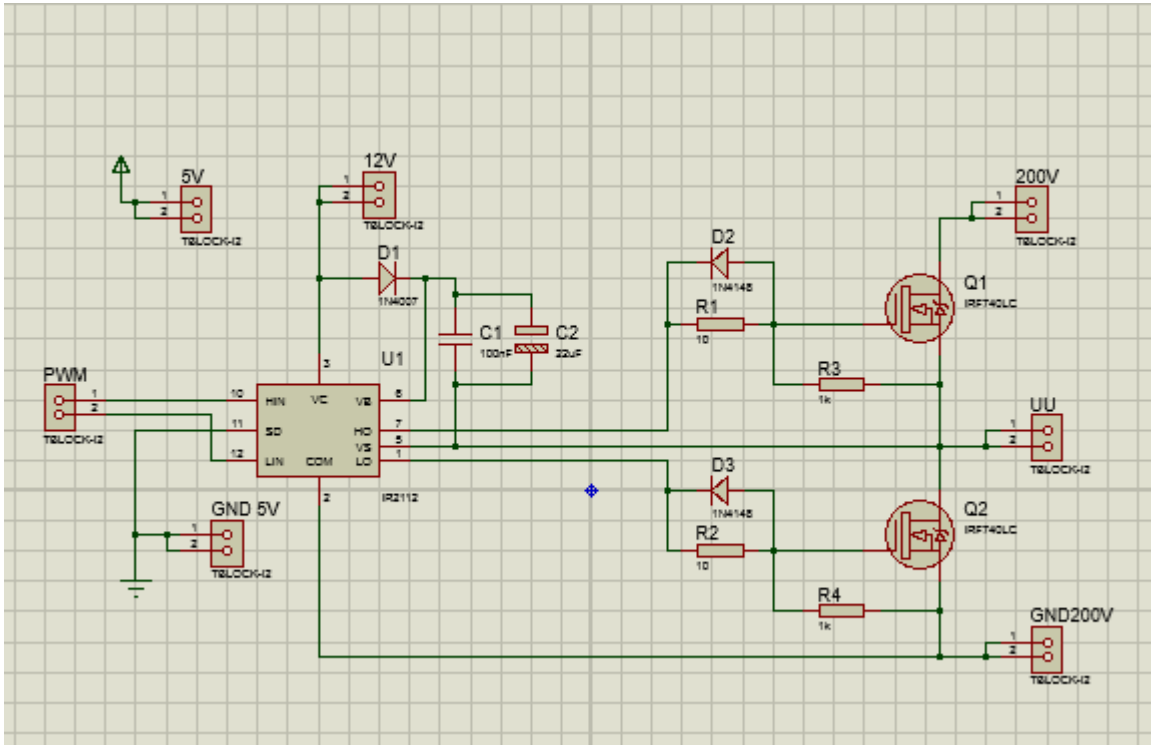


Figure IV.12: Schéma électrique de la partie puissance avec ISIS.

D1, C1 et C2 avec l'IR2110 forment les circuits de démarrage. Lorsque LIN = 1 et Q2 sont activés, C1 et C2 sont chargés sur le niveau sur VB, ce qui représente une diode au-dessous de + VCC. Lorsque LIN = 0 et HIN = 1, cette charge sur C1 et C2 permet d'ajouter la tension supplémentaire - VB dans ce cas - au-dessus du niveau source de Q1 pour conduire le Q1 en configuration haut-côté. Une capacité suffisamment grande doit être choisie pour C1 afin qu'elle puisse fournir la charge requise pour garder Q1 activé pour tout le temps. C1 ne doit pas non plus être trop large pour que la charge soit trop lente et que le niveau de tension ne monte pas suffisamment pour maintenir le MOSFET. Plus l'heure est élevée, plus la capacité requise est élevée. Ainsi, plus la fréquence est faible, plus la capacité requise est élevée pour C1. Plus le cycle de service est élevé, plus la capacité requise est élevée pour C1. Oui, il existe des formules disponibles pour calculer la capacité. Cependant, il existe de nombreux paramètres impliqués, dont nous ne connaissons peut-être pas, par exemple, le courant de fuite du condensateur. Donc, j'estime juste la capacité requise. Pour les basses fréquences telles que 50 Hz, j'utilise entre une capacité de 47 $\mu$ F et 68 $\mu$ F. Pour les hautes fréquences comme 30kHz à 50kHz, j'utilise entre 4.7 $\mu$ F et 22 $\mu$ F. Comme nous utilisons un

condensateur électrolytique, un condensateur céramique doit être utilisé en parallèle avec ce condensateur. Le condensateur céramique n'est pas nécessaire si le condensateur bootstrap est du tantale [32].

Nous constatons que plus le courant parcourant les pistes est élevé plus les pistes doivent être larges. Un autre paramètre à prendre en compte lors du choix de la largeur d'une piste la résistance électrique.



Figure IV.13 : carte d'un bras d'onduleur réalisé.

## IV.8 les résultats expérimentaux

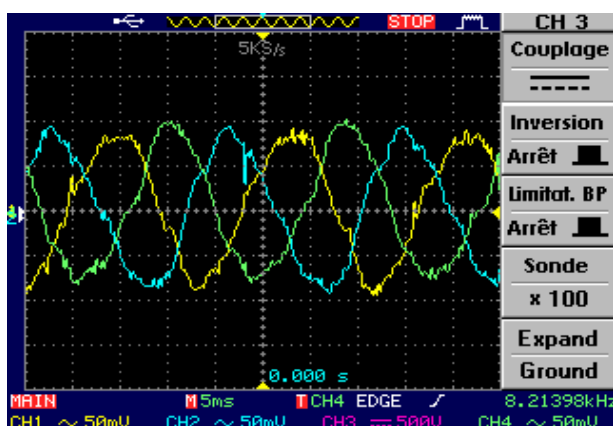


Figure IV.14 : courants triphasé pour charge RL.

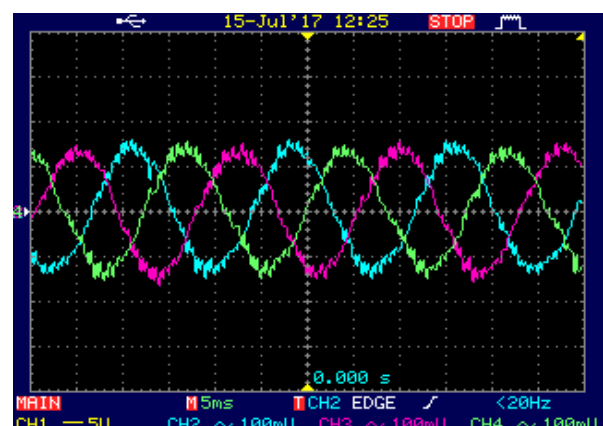


Figure IV.15 : courants triphasé pour charge moteur asynchrone.

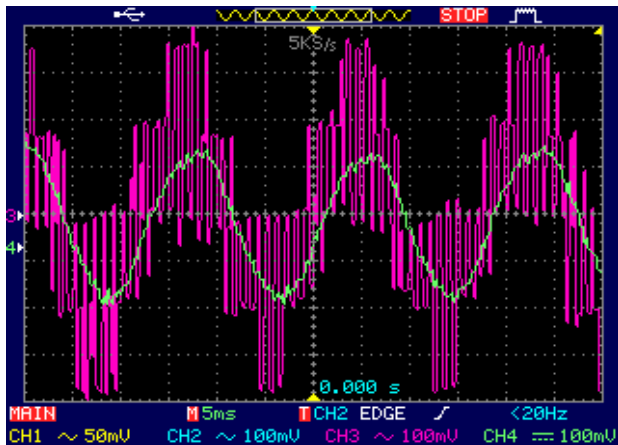


Figure IV.16 : Tension simple et courant à fréquence 50HZ.

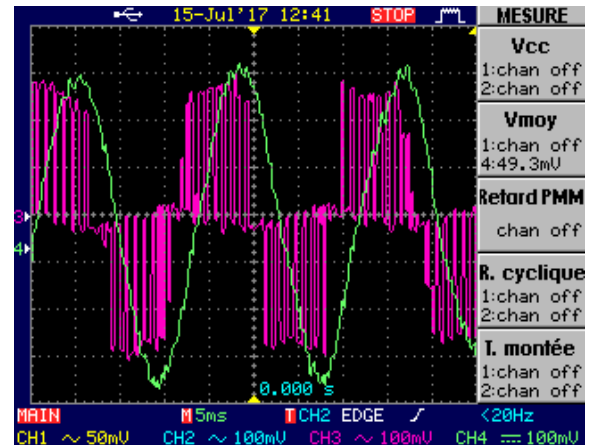


Figure IV.17 : Tension composée et courant à fréquence 50HZ.

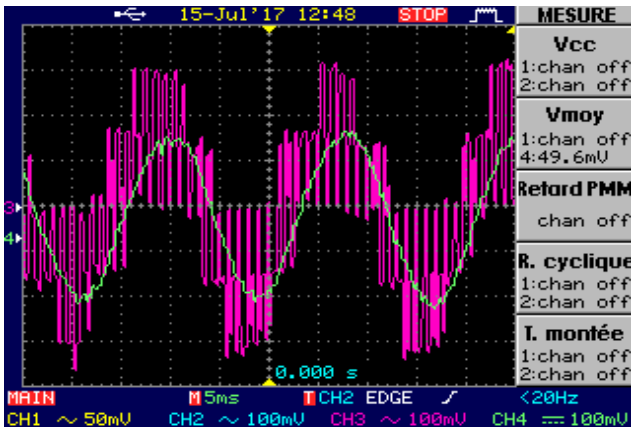


Figure IV.18 : Essai à tension simple constante maximale.

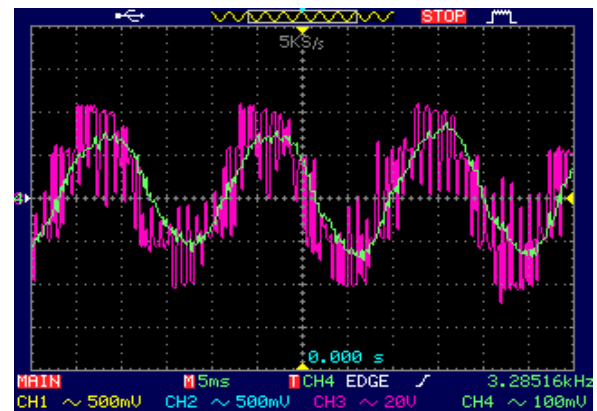


Figure IV.19 : Essai à tension avec rapport cyclique de 50%.

### IV.9 Interprétation des résultats

Les résultats obtenus sont très proche aux résultats de simulation, puis que la représentation l'intensité du courant  $i_c(t)$  dans la charge peut être positive alors que la tension est positive et négative lorsque la tension est négative. Les mêmes résultats que nous avons acquis dans l'étude de la simulation. La figure IV.15 sont représenter la forme d'onde du courant  $i_c(t)$  à la sortie d'onduleur avec la charge machine asynchrone à cage, on obtient un signal d'une forme plus proche d'une forme sinusoïdale (presque sinusoïdale) d'une fréquence de 50 Hz.

- 1)- Le déplacement du vecteur de référence entre les secteurs (de 1 à 6) pendent chaque période.
- 2)- Les rapports cycliques des trois interrupteurs supérieurs sont décalés entre eux de un tiers de période.

- 3)- Les trois formes des courants de phases sont déphasées par  $120^\circ$  degré.
- 4)- La MLI vectorielle permet d'améliorer la forme de la tension  $V_a$  et d'augmenter la valeur de son amplitude fondamentale, donc elle offre des performances comparables à celles des autres techniques à MLI.
- 5)- Réduction du déchet de tension.

## **IV.9 Conclusion**

Ce chapitre a été dédié à la présentation des résultats de validation expérimentale de l'onduleur et la carte réalisés, nous ont permis de confirmer, la fiabilité de notre réalisation à travers des tests avec les charges ( RL et Moteur asynchrone), L'association de ces onduleurs avec les signaux de commande introduits par la carte de commande (Arduino +la carte de commande rapprochée), a permis la simplification de la mise en œuvre de l'algorithme de la commande vectorielle qui été adapté et appliqué aux différents types charges.