

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

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE

N° : 06



DOMAINE : ST

FILIERE : GENIE ELECTRIQUE

OPTION : ELECTROMECHANIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de Master Académique

Par : OKBA Salah et BEDDIAR Walid

Etude et réalisation d'un onduleur de tension triphasé à MLI

Intitulé

Soutenu devant le jury composé de :

OUAGUENI Fayssal

Université de M'sila

Président

BOUZIDI Riad

Université de M'sila

Rapporteur

BOUDJELLAL Bilal

Université de M'sila

Examineur

Année universitaire : 2018 /2019

REMERCIEMENTS

Nos remerciements vont tout premièrement, à Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage pour réaliser ce travail.

On tient à remercier :

*Notre encadreur **Mr : Bouzidi Riad** pour son suivi continu ainsi que sa bonne orientation du travail.*

Nos remerciements vont également à nos professeurs pour leurs conseils précieux.

On remercie également les membres de jury :

D'avoir acceptés d'honorer par leur présence la soutenance de notre mémoire de fin d'étude.

Enfin on remercie tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin afin d'achever ce travail en particulier mes collègues.

.

Dédicace

Je dédie ce travail à mes très chers parents pour leurs soutiens inconditionnels.

Puisse Dieu, vous procurez santé, bonheur et prospérité.

A mes sœurs et à mon frère Mahdi qui ont su m'encourager tout au long de ma vie.

A tous les membres de la famille ainsi que nos amis.

BEDDIAR WALID

Dédicace

Je tiens à dédier ce modeste travail avant tout

A la mémoire de mon père,

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

A tous les membres de la famille ainsi que nos amis.

OKBA SALAH

Résumé

L'importance et La présence des onduleurs de tension triphasée dans le secteur industriel par leurs diverses applications tel que l'association aux machines électriques, qui permet de réaliser des entraînements électriques à vitesse variable, ainsi que l'alimentation sans interruption et secours des équipements électriques, était l'objectif de plusieurs études des leurs différentes techniques de commande des onduleurs.

Grâce à l'évolution technologique de l'électronique de puissance, en paramétrant les instants de commutation des transistors, l'onduleur crée n'importe quelles tensions alternatives d'amplitude et de fréquence réglable à partir d'une source de tension continue.

Ce présent projet est relatif à l'étude et à la réalisation d'un onduleur de tension triphasé. Le premier chapitre est consacré à la modélisation mathématique de cet onduleur triphasé. Dans le second chapitre nous avons présenté les différentes techniques de commande de l'onduleur avec leurs simulations avec logiciel PSIM, dans le but d'avoir la meilleure technique de commande. Et nous avons validé pratiquement notre technique de commande choisie dans le troisième chapitre sur un onduleur triphasé que nous avons réalisé au niveau du laboratoire de génie électrique. Les résultats expérimentaux et de la simulation sont identiques, ce qui montre notre réussite pour la réalisation de l'onduleur et pour l'implantation de la technique MLI.

Mots clé : Onduleur triphasé, MLI, convertisseur statique, validation expérimentale, carte STM32F407.

Abstract

The importance and the presence of three-phase voltage inverters in the industrial sector by their various applications such as the association with asynchronous machines, which allows for variable speed electric drives, as well as uninterrupted power supply and backup of electrical equipment, was the objective of several studies of the different inverter control techniques.

Thanks to the technological evolution of the power electronics, by setting the switching times of the transistors, the inverter creates any alternating voltages of amplitude and adjustable frequency from a DC voltage source.

This project is related to the study and realization of a three-phase voltage inverter. The first chapter is dedicated to the mathematical modeling of this three-phase inverter. In the second chapter we presented the different control techniques of this inverter with their simulations in the environment of PSIM software, in order to have the best control technique. And we practically validated our chosen control technique in the third chapter on a three-phase inverter that we realized at the level of the electrical engineering laboratory. The experimental results and the simulation are identical, which shows our success for the realization of the inverter and for the implementation of the PWM technique.

Key words: three-phase inverter, PWM, static converter, STM32F407 card, experimental validation.

ملخص

إنَّ أهمّية مَمّوجات التوتّر ثلاثية الطور في القطاع الصناعي من خلال تطبيقاتها المختلفة مثل الارتباط بالآلات الكهربائية، والتي تسمح بتغيير سرعة المحركات الكهربائية، بالإضافة إلى توفير الطاقة دون انقطاع ودعم المعدات الكهربائية، جعلها هدفا للعديد من الدراسات المختلفة لتقنيات التحكم فيها.

وبفضل النهضة التكنولوجية في مجال الإلكتروني، المموجات تستطيع تحويل التيار المستمر الى أي تيار متناوب ذو تواتر متحكّم فيه.

يرتبط هذا المشروع بدراسة وانجاز مَمّوج توتر كهربائي ثلاثي الطور، حيث يخصص الفصل الأول فيه للنمذجة الرياضية لهذا المَمّوج، في الفصل الثاني، قدّمنا بعض تقنيات التحكم في المَمّوج مع محاكاتها في برنامج PSIM، وذلك من أجل الحصول على أفضل تقنية تحكم، ثم قمنا بالتحقق من صحة تقنية التحكم المختارة لدينا في الفصل الثالث على المَمّوج ثلاثي الطور الذي أنجزناه على مستوى مختبر الهندسة الكهربائية.

النتائج التجريبية ونتائج المحاكاة كانت متطابقة، ممّا يدل على نجاحنا في تحقيق إنجاز المَمّوج وتنفيذ تقنية التحكم بتضمين عرض النبضة.

الكلمات المفتاحية: مَمّوج ثلاثي الطور، تقنية تضمين عرض النبضة، محول سكوني، تحقق تجريبي، البطاقة STM32F407.

Table des matières

<i>Introduction générale</i>	1
CHAPITRE I : Modélisation de l'onduleur triphasé	
I. 1. Introduction :	3
I. 2. Définition :	3
I.3 Classification des onduleurs :	4
I.3.1 Onduleurs non autonomes :	4
I.3.2 Onduleurs autonomes :	4
I.3.2.1 Onduleurs (autonomes) de tension :	4
I.3.2.2 Onduleurs (autonomes) du courant	5
1.3.3 Onduleurs à résonance :	5
I.4 Types d'onduleurs autonomes de tension	5
I.4.1 Les onduleurs monophasés	5
I.4.2. Les onduleurs triphasés :	6
I.5. Principe de fonctionnement de l'onduleur triphasé	7
I.6. Modèle mathématique de l'onduleur de tension triphasé :	7
I.7. Domaines d'application :	9
I.8. Conclusion :	10
CHAPITRE II : Techniques de commande de l'onduleur de tension triphasé	
II.1. Introduction :	12
II.2. Commande 180°:	12
II.2.1 Principe de fonctionnement :	13
II.2.2 Schéma de bloc :	13
II.2.3 Résultats de simulation :	14
II.2.4 Interprétation :	16
II.3 Commande 150° :	16
II.3.1 Principe de la commande :	16
II.3.2 Schéma de bloc :	17
II.3.3 Résultats de simulation :	17
II.3.4 Interprétation :	18

II.4. La Commande MLI :	19
II.4.1 Différentes techniques de modulation de longueur d'impulsions (MLI) :	19
II.4.1.1 La modulation linéaire multiple (UPWM) :	19
II.4.1.2 La modulation sinusoïdale triangulaire unipolaire (SPWM) :	20
II.4.1.3 La modulation sinusoïdale partielle (ou modifiée) (MSPWM) :	20
II.4.1.4 L'injection d'un harmonique 3 dans la référence :	21
II.4.1.5 La modulation calculée :	22
II.4.1.6 La Modulation vectorielle :	22
II.4.1.7 Commande MLI triangle- sinusoïdales :	22
II.4.2 Caractéristiques de la modulation :	23
II.4.3 Principe de base :	23
II.4.5 Le schéma de bloc :	24
II.4.6 Résultats de simulation :	24
II.4.7 Interprétation :	26
II.5. Conclusion :	27
CHAPITRE III : validation expérimentale	
III.1 Introduction :	29
III.2 Présentation de la plateforme du banc d'essai :	29
III.3 Description de l'onduleur triphasé réalisé :	31
III.4 Alimentation 15 V DC :	31
III.5 Circuit de commande :	32
III.6 Circuit de Puissance :	33
III.7 Carte de développement des commandes STM32F407-Discovery	34
III.8 Résultat expérimentaux :	34
III.9 Interpretation	38
III.10 Conclusion :	39
Conclusion générale :	40
Bibliographie :	41
Annexe 01	43
Annexe 02	46

Liste des figures

CHAPITRE I : Modélisation de l'onduleur de tension triphasé

Figure I.1. Schéma de principe de l'onduleur	4
Figure I.2. Schéma de principe de l'onduleur monophasé	6
Figure I.3. Schéma d'onduleur de tension triphasé	6

CHAPITRE II : Techniques de commande de l'onduleur de tension triphasé

Figure II.1. Schéma fonctionnel de la commande pleine onde	13
Figure II.2. Impulsions de commande S1, S3, S5	14
Figure II.3. Tension simple v_a et tension composée v_{ab}	15
Figure II.4. Le spectre d'harmonique de la tension V_a	15
Figure II.5. Schéma fonctionnel de la commande 150°	17
Figure II.6. Impulsions de commande S1, S2, S3	17
Figure II.7. Allure des tensions V_a, V_{ab}	18
Figure II.8. Allure du spectre des harmoniques de la tension V_a	18
Figure II.9 La modulation de largeur d'impulsions multiples	19
Figure II.10 MLI sinusoïdal triangulaire unipolaire	20
Figure II.11 La modulation sinusoïdale modifiée	21
Figure II.12 MLI avec l'injection de l'harmonique 3	21
Figure II.13. Schéma de base MLI	22
Figure II.14. Schéma fonctionnel de la commande MLI	24
Figure II.15. Allure de tensions des signaux de commande	25
Figure II.16. Signaux de la commande MLI	25
Figure II.17. Allure des tensions V_a, V_{ab}	26
Figure II.18. Le spectre d'harmonique de la tension V_a	26

CHAPITRE III : validation expérimentale

Figure III.1 banc d'essai de l'onduleur monophasé	30
Figure III.2. Présentation de la plateforme du banc d'essai	30
Figure III.3. Onduleur de tension triphasé réalisé	31
Figure III.4. Schéma du circuit d'alimentation	32
Figure III.5. Schéma de principe du circuit de commande des MOSFETs.	32
Figure III.6. (a) TLP 250, (b) Configuration des pines de TLP 250	33

Figure III.7. (a) Schéma de principe du circuit de puissance d'un bras de l'onduleur,	33
Figure III.8. Carte de développement des commandes STM32F407	34
Figure III.9. Signaux de commande Sa, Sb et Sc.....	35
Figure III.10. Zoom d'un signal de commande Sb	36
Figure III.11. Tension simple Va.....	36
Figure III.12. Tensions simples Va, Vb, et tension composé Uab.....	37
Figure III.13. Zoom de tensions simples Va, Vb, et tension composé Vab.....	38
Figure III.14. Tensions simples Va, Vb et Vc	38

Liste des tableaux

Tableau III.1. Table de vérité de l'optocoupleur TLP 250.....	32
--	----

INTRODUCTION GENERALE

L'alimentation sans interruption des équipements électrique industriels, et l'entraînement électrique à vitesse variable des machines électriques, était l'objectif de plusieurs études dans ces dernières années grâce à l'évolution technologique des convertisseurs statique qui représente le cœur de tous systèmes électriques. L'association des convertisseurs statiques aux machines asynchrone permet de réaliser des entraînements électriques à vitesse variable tout en conservant les avantages bien connus de ce type de moteur, à savoir le faible coût, robustesse et entretien réduit. La fonction d'un onduleur est de convertir une tension continue d'entrée en une tension de sortie alternative symétrique d'amplitude et de fréquence désirée. Les onduleurs triphasés sont les plus utilisés dans les industries à cause de leurs faibles prix, très approuvés du côté de la réalisation et facile du côté de la commande électrique.

L'évolution de ces qualités est largement due à l'amélioration des performances des semi-conducteurs de puissance qui a été très importante ces dernières années. Cependant, même si les performances des semi-conducteurs en tension, courant et rapidité peuvent être encore améliorées, nous approchons aussi la limite du tolérable. En effet, si le rendement et la compacité demandent des composants extrêmement rapides, il n'en est pas de même vis à vis des critères de perturbation, et même dans une certaine mesure de la sûreté de fonctionnement. De toute évidence, le composant miracle qui commuterait des kilos volts et des kilos ampères en quelques nanosecondes ne passerait pas inaperçu, mais il serait sans doute à peu près inutilisable.

Pour cela notre travail consiste à réaliser un onduleur de tension triphasé piloté par la technique de modulation de largeur d'impulsion MLI à base des MOSFET.

Ce travail sera divisé en trois chapitres. Le premier chapitre consacrera à la modélisation d'un onduleur de tension triphasé, le deuxième discutera l'étude et la simulation des différentes techniques de commande de l'onduleur dans l'environnement du logiciel PSIM.

Et le dernier chapitre sera réservé à la réalisation de la carte de l'onduleur commandé par le microcontrôleur STM32F407 et à l'implantation de la technique de modulation de largeur d'impulsion MLI.

Chapitre 1

Modélisation de l'onduleur de tension triphasé

I. 1. Introduction :

Un convertisseur statique est un système permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donné en la convertissant. Les premiers convertisseurs de puissance électrique ont été réalisés avec des machines électriques couplées mécaniquement. Avec l'apparition des semi-conducteurs et de l'électronique de puissance, avec les diodes, les transistors, thyristors etc. Les systèmes de conversion deviennent de plus en plus élaborés et ne nécessitent plus de machines tournantes. C'est l'ère des convertisseurs statiques.

On distingue plusieurs familles de convertisseurs statiques :

Continu -----> Continu (Hacheur)

Continu -----> Alternatif (Onduleur)

Alternatif -----> Alternatif (Gradateur)

Alternatif -----> Continu (Redresseur)

La conversion continue –alternative est assurée par l'onduleur qui permet d'obtenir une tension alternative à partir d'une source de tension continue. Pour cela, ce premier chapitre présente la modélisation mathématique de l'onduleur triphasé de tension.

I. 2. Définition :

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continue – alternative, alimenté en continu, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir l'alternatif à la sortie. L'onduleur est essentiellement utilisé pour fournir une tension ou un courant alternatif afin d'assurer l'alimentation en énergie des charges critiques (micro-ordinateur, station de télécommunication.) pendant la coupure du réseau électrique ou une alimentation permanente pour les systèmes autonomes (centrales photovoltaïques, engins aérospatiaux,). La représentation symbolique d'un onduleur est donnée par la figure I.1. :

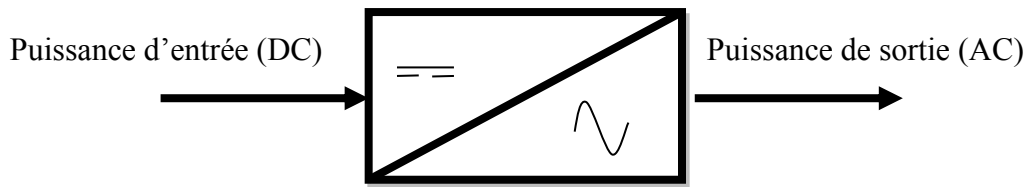


Figure I.1. Schéma de principe de l'onduleur

I.3 Classification des onduleurs :

Une première classification peut être faite en distinguant : onduleurs non autonome et onduleur autonome.

Entre ces deux types d'onduleurs, il existe un type intermédiaire d'onduleur appelé onduleur à commutation par la charge « ou encore onduleur à résonance »

I.3.1 Onduleurs non autonomes :

Un onduleur est dit non autonome si l'énergie nécessaire pour la commutation des thyristors est fournie par le réseau alternatif qui est donc un réseau actif. C'est le cas du fonctionnement en onduleur des redresseurs. La fréquence et la forme d'onde de la tension sont imposées par le réseau alternatif

I.3.2 Onduleurs autonomes :

Un onduleur autonome est un convertisseur statique assurant la conversion continu- alternatif. Alimenté en continu, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir de l'alternatif à la sortie.

Un onduleur autonome dépend essentiellement de la nature du générateur et du récepteur entre lesquels il est monté cela conduit à distinguer :

I.3.2.1 Onduleurs (autonomes) de tension :

Un onduleur de tension est un onduleur qui est alimenté par une source de tension continue (source d'impédance interne négligeable), la tension « u » n'est pas affecté par les variations du courant « i » qui la traverse, la source continue impose la tension à l'entrée de l'onduleur et donc à sa sortie.

Le courant à la sortie « i' » et donc le courant à l'entrée « i » dépendent de la charge placée du côté alternatif. Cette charge peut être quelconque à la seule condition qu'il

ne s'agisse pas d'une autre source de tension (capacité ou f.e.m alternative) directement branchée entre les bornes de sortie.

I.3.2 Onduleurs (autonomes) du courant

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

1.3.3 Onduleurs à résonance :

Les onduleurs à résonance sont des onduleurs de tension ou de courant à un créneau par alternance fonctionnant dans des conditions particulières. La charge doit être un circuit oscillant peu amorti. On commande les interrupteurs par une fréquence voisine de la fréquence de résonance de la charge. Si celle- ci varie, il faut faire varier la fréquence de commande. L'onduleur doit donc être piloté par la charge, il n'est plus autonome [1].

I.4 Types d'onduleurs autonomes de tension

I.4.1 Les onduleurs monophasés

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

- L'onduleur monophasé avec transformateur de sortie à point milieu appelé onduleur push- pull.
- L'onduleur monophasé avec diviseur capacitif à l'entrée appelé onduleur en demi pont.

Si on veut varier la largeur relative des créneaux formant les alternances de la tension de sortie, il faut quatre interrupteurs c'est : l'onduleur monophasé en pont figure (I.2).

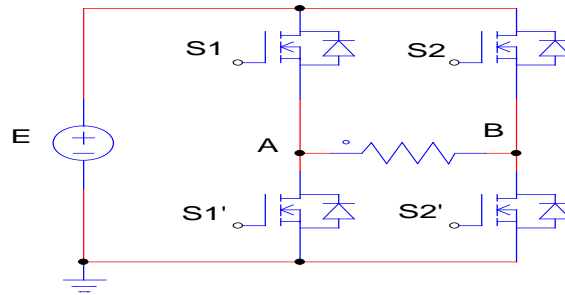


Figure I.2. Schéma de principe de l'onduleur monophasé

I.4.2. Les onduleurs triphasés :

L'onduleur de tension triphasé découle immédiatement de trois demi pont monophasé, on obtient l'onduleur triphasé à six interrupteurs.

Chaque demi pont comprend un thyristor (ou un transistor) et une diode.

La source de tension continue est obtenue à partir d'un pont redresseur.

Pour assurer la continuité des courants de sortie alternatif I_a , I_b , I_c , les interrupteurs S_1 , S_1' et S_2 , S_2' , S_3 et S_3' doivent être complémentaires deux à deux.

On définit $S_i = (T_i, D_i)$ [4].

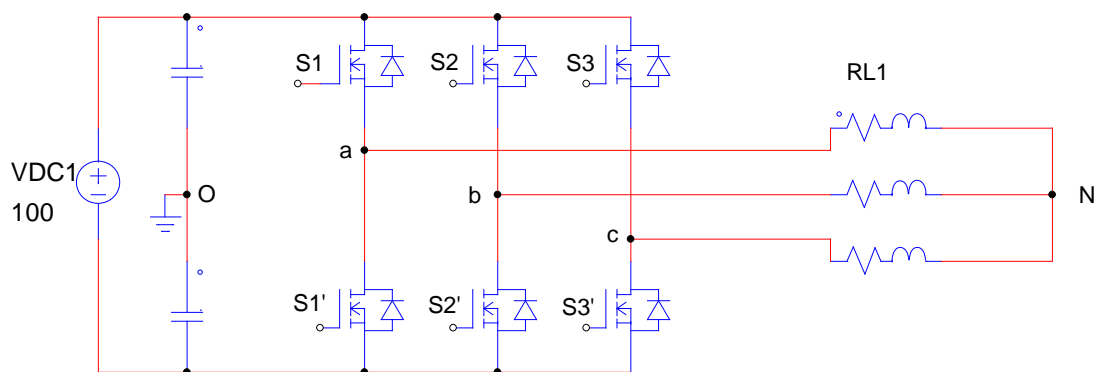


Figure I.3. Schéma d'onduleur de tension triphasé

I.5. Principe de fonctionnement de l'onduleur triphasé

La représentation schématique de l'onduleur est fournie par la (figure I.3) Pour assurer la continuité des courants de sortie alternatif I_a , I_b et I_c , les interrupteur S_1 et S_1' , S_2 et S_2' , S_3 et S_3' doivent être complémentaire deux à deux, et pour que les tensions de sortie V_a , V_b et V_c soient identiques à un tiers de la période T de leur fondamental prés, il faut commander chaque demi pont avec un retard de $T/3$ sur le

précédent. En commande pleine onde on ferme donc :

- S_1 pour $wt=0$ et $S_{1'}$ pour $wt = \pi$.
- S_2 pour $wt=2\pi/3$ et $S_{2'}$ pour $wt = \pi+2\pi/3$
- S_3 pour $wt=4\pi/3$ et $S_{3'}$ pour $wt= \pi+4\pi/3$

La présence du neutre relié à la source est indispensable si le récepteur est déséquilibré et tout particulièrement s'il comporte des charges monophasées montées entre phase et neutre. Si le récepteur triphasé est équilibré (moteur triphasé par exemple) on peut supprimer la liaison entre le point neutre « N » et le point milieu « 0 » du la source, Donc supprimer celui- ci, on obtient alors l'onduleur triphasé proprement dit [5].

I.6. Modèle mathématique de l'onduleur de tension triphasé :

Les interrupteurs S_1 et $S_{1'}$, S_2 et $S_{2'}$, S_3 et $S_{3'}$ doivent être complémentaires deux à deux, quel que soit la loi de commande à adopter, il est possible d'établir des relations générales que nous utiliserons pour la commande MLI ; quels que soient les courants, les interrupteurs imposent les tensions entre les bornes de sortie A , B , C et le point milieu (fictif) 'O' de la source de tension.

$$\begin{cases} V_a - V_O = \frac{V_{dc}}{2} ; S_1 \text{ fermé} & \text{Et} & V_a - V_O = -\frac{V_{dc}}{2} ; S_1 \text{ ouvert} \\ V_b - V_O = \frac{V_{dc}}{2} ; S_2 \text{ fermé} & \text{Et} & V_b - V_O = -\frac{V_{dc}}{2} ; S_2 \text{ ouvert} \\ V_c - V_O = \frac{V_{dc}}{2} ; S_3 \text{ fermé} & \text{Et} & V_c - V_O = -\frac{V_{dc}}{2} ; S_3 \text{ ouvert} \end{cases} \quad (\text{I.1})$$

Les interrupteurs imposent donc les tensions composées à la sortie de l'onduleur ainsi pour la première de ces tensions.

$$\begin{cases} V_a - V_b = (V_a - V_O) - (V_b - V_O) = V_{dc} & \text{Si } S_1 \text{ est fermé et } S_2 \text{ est ouvert} \\ V_a - V_b = (V_a - V_O) - (V_b - V_O) = 0 & \text{Si } S_1 \text{ et } S_2 \text{ sont fermés} \\ V_a - V_b = (V_a - V_O) - (V_b - V_O) = 0 & \text{Si } S_1 \text{ et } S_2 \text{ sont ouverts} \\ V_a - V_b = (V_a - V_O) - (V_b - V_O) = -V_{dc} & \text{Si } S_1 \text{ est ouvert et } S_2 \text{ est fermé} \end{cases} \quad (\text{I.2})$$

Son point neutre étant isolé, si le récepteur est équilibré on peut passer des tensions composées aux tensions simples V_a, V_b, V_c à la sortie de l'onduleur.

Pour que, quelle que soit leurs formes d'ondes, les trois courants I_a, I_b, I_c aient une somme nulle, il faut que leurs trois fondamentaux aient une somme nulle et qu'il en soit de même pour les divers harmoniques.

Si le récepteur est équilibré, ces trois phases présentent la même impédance pour le fondamental ainsi que pour les divers harmoniques, les produits impédances 'Z'-courants, c'est à- dire les tensions ont une somme nulle pour les fondamentaux ainsi que les systèmes harmoniques successifs, en ajoutant toutes ces sommes on obtient la somme nulle des trois tensions [4].

A cause de l'équilibre on a :

$$\begin{cases} I_A + I_B + I_C = 0 \\ V_a + V_b + V_c = 0 \end{cases} \quad (\text{I.3})$$

Donc :

$$\begin{cases} U_{ab} - U_{ca} = (V_a - V_b) - (V_c - V_a) = 2V_a - V_b - V_c \\ U_{bc} - U_{ab} = (V_b - V_c) - (V_a - V_b) = -V_a + 2V_b - V_c \\ U_{ca} - U_{bc} = (V_c - V_a) - (V_b - V_c) = 2V_c - V_b - V_a \end{cases} \quad (\text{I.4})$$

Et on a :

$$\begin{cases} V_a = -V_b - V_c \\ V_b = -V_a - V_c \\ V_c = -V_a - V_b \end{cases} \quad (\text{I.5})$$

Donc :

$$\begin{cases} V_a = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) = \frac{1}{3}[(V_a - V_b) - (V_c - V_a)] \\ V_b = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) = \frac{1}{3}[(V_b - V_c) - (V_a - V_b)] \\ V_c = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) = \frac{1}{3}[(V_c - V_a) - (V_b - V_c)] \end{cases} \quad (\text{I.6})$$

On obtient finalement :

$$\begin{cases} V_a = \frac{1}{3}[2(V_a - V_o) - (V_b - V_o) - (V_c - V_o)] \\ V_b = \frac{1}{3}[-(V_a - V_o) + 2(V_b - V_o) - (V_c - V_o)] \\ V_c = \frac{1}{3}[-(V_a - V_o) - (V_b - V_o) + 2(V_c - V_o)] \end{cases} \quad (\text{I.7})$$

Si V_{AO} , V_{BO} et V_{CO} sont les tensions d'entrée de l'onduleur (valeur continues), alors V_A , V_B et V_C sont les tensions de sorties de cet onduleur (valeurs alternatives), par conséquent, L'onduleur de tension peut être modélisé par une matrice [T] assurant le passage continu -alternatif (DC-AC).

$$[T] = \frac{1}{3} \cdot \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \quad (\text{I.8})$$

On aura alors :

$$[V_{AC}] = [T] \cdot [V_{DC}] \quad (\text{I.9})$$

Avec : $[V_{AC}] = [V_A \ V_B \ V_C]^T$: Tension alternative équilibrée.

Et $[V_{DC}] = [V_{AO} \ V_{BO} \ V_{CO}]^T$: Tension continue.

I.7.Dommaines d'application :

Les onduleurs ont été conçus essentiellement pour fonctionner dans les domaines d'applications suivants:

a. Les alimentations sans interruption (ASI) : Certaines applications sensibles (secteur pétrolier, hôpitaux, serveurs informatiques...) ne peuvent supporter la moindre panne d'alimentation.

Pour réaliser une alimentation sécurisée, on a la même structure que précédemment avec des batteries sur le bus continu, ce qui permet de continuer à fournir de l'énergie et donc une tension sinusoïdale le temps qu'un groupe électrogène prenne le relais. (Rq : onduleurs plus souvent en monophasé) .

En pratique, les onduleurs actuels (pour ASI ou variateurs) sont pilotés par des algorithmes très compliqués (contrôle vectoriel de flux) et surtout comporte des fonctionnalités annexes, support de plusieurs protocoles de communication, pilotage par PC déporté, paramétrage différent suivant la charge ...

Rq : l'onduleur seul peut fonctionner dans les quatre quadrants (à condition de mettre en anti parallèle des diodes sur les transistors), mais souvent le bus continu est alimenté par un pont redresseur triphasé à diode qui lui n'est pas réversible en courant [2].

b. La variation de la vitesse : Comme nous l'avons vu sur les cours sur les MAS et machines synchrones, la façon la plus efficace de régler la vitesse de ces machines et d'agir sur la fréquence de leur tension d'alimentation. Pour répondre à ce besoin, on conçoit donc un redresseur triphasé qui fournit une tension continue et on place un onduleur à la suite qui crée le réseau de tension triphasé sinusoïdal à une l'amplitude et à la fréquence permettant le fonctionnement désiré.

- c. Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes
- d. Alimentation de sûreté : pour contrarier les microcoupures ou les tensions parasites dans le système informatique.

I.8. Conclusion :

L'objectif de ce premier chapitre est la modélisation mathématique de l'onduleur de tension triphasé, où nous avons le commencer par des généralités sur les onduleurs (définition, leurs classifications, et leur domaines d'application. Puis nous avons donné le principe de fonctionnement de l'onduleur avec son schéma de puissance. Et finalement, nous avons obtenu le modèle mathématique de l'onduleur qu'est, tout simplement, une matrice carrée. Après cette modélisation, nous étudierons les différentes techniques de commande dans le prochain chapitre.

Chapitre 2

**Techniques de commande de l'onduleur de
tension triphasé**

II.1. Introduction :

Les onduleurs de tension peuvent être pilotés suivant plusieurs stratégies. A faibles fréquences, ils sont pilotés à pleine onde, le signal de commande sera à la fréquence de la tension désirée à la sortie, et la source continue doit être réglable (à l'aide d'un redresseur à thyristor ou d'un hacheur).

A fréquence élevée, ils sont pilotés en modulation de largeur d'impulsion. Cette dernière stratégie permet de régler à la fois l'amplitude et la fréquence en gardant la source continue constante (pont à diode).

Afin de produire une tension de sortie proche de la sinusoïde, différentes stratégies de commande seront présentés :

- 1- Commande pleine onde ou 180° .
- 2- Commande 150° .
- 3- Commande MLI.

Et nous les simulerons dans l'environnement PSIM pour voir leurs différences.

II.2. Commande 180° :

Dans les variateurs de vitesse, l'onduleur de tension fonctionne presque toujours en MLI dans toute la plage des vitesses. L'onduleur fait varier non seulement la fréquence des tensions de sortie mais aussi leur valeur. Toutefois, il faut d'abord examiner le cas où l'onduleur est commandé en pleine onde, car ce fonctionnement sert de point de départ et de base de comparaison pour l'étude de fonctionnement en MLI.

Nous concéderons une charge triphasée équilibrée, et pour simplifier l'étude nous supposons que le couplage en étoile (bien que le branchement d'une charge triangle soit envisageable).

Pour cette structure, plusieurs types de commande sont possible, on a fait les études pour la commande 180° , c'est la commande la plus utilisée.

Les interrupteurs sont commandés pendant une durée correspondant à une demi période, mais avec des séquences décalées de 120° d'un bras par rapport aux autres
D'où :

- A tout instant deux interrupteurs sont en état de conduire et les quatre autres sont bloqués
- Deux interrupteurs d'un même bras doivent être commandé de façon complémentaires afin de ne pas court-circuiter la source de tension. On obtient donc six séquences de conduction par période.

II.2.1 Principe de fonctionnement :

Dans ce type de commande, la génération des signaux de commande de l'onduleur est effectuée en transformant un signal sinusoïdal en un signal carré pour chaque phase selon l'algorithme suivant :

$$\text{Si } \sin(\omega.t) > 0 \rightarrow S(t)=1$$

$$\text{Si } \sin(\omega.t) < 0 \rightarrow S(t)=0$$

Où :

$\sin(\omega.t)$: est le signal sinusoïdal ; $S(t)$: est le signal carré résultant de la commande.

II.2.2 Schéma de bloc :

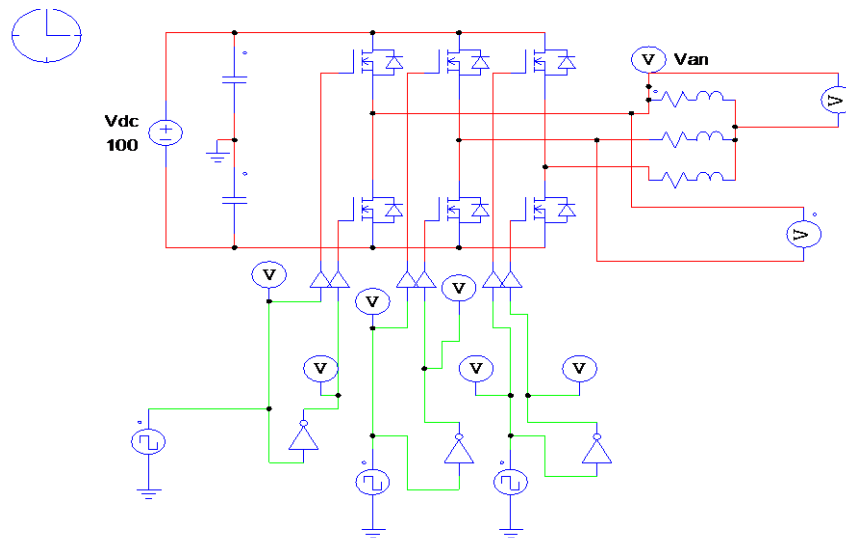


Figure II.1. Schéma fonctionnel de la commande pleine onde

II.2.3 Résultats de simulation :

Nous avons fait la simulation de la commande en plein onde ou la commande 180° sur notre onduleur dans l'environnement PSIM, et dont sa charge est inductive RL couplé en étoile et permettant de mesurer la tension simple, avec une fréquence imposée de 50Hz, et un bus dc de 100V. Les résultats de simulation sont donnés par les figures (II.2, II.3, II.4).

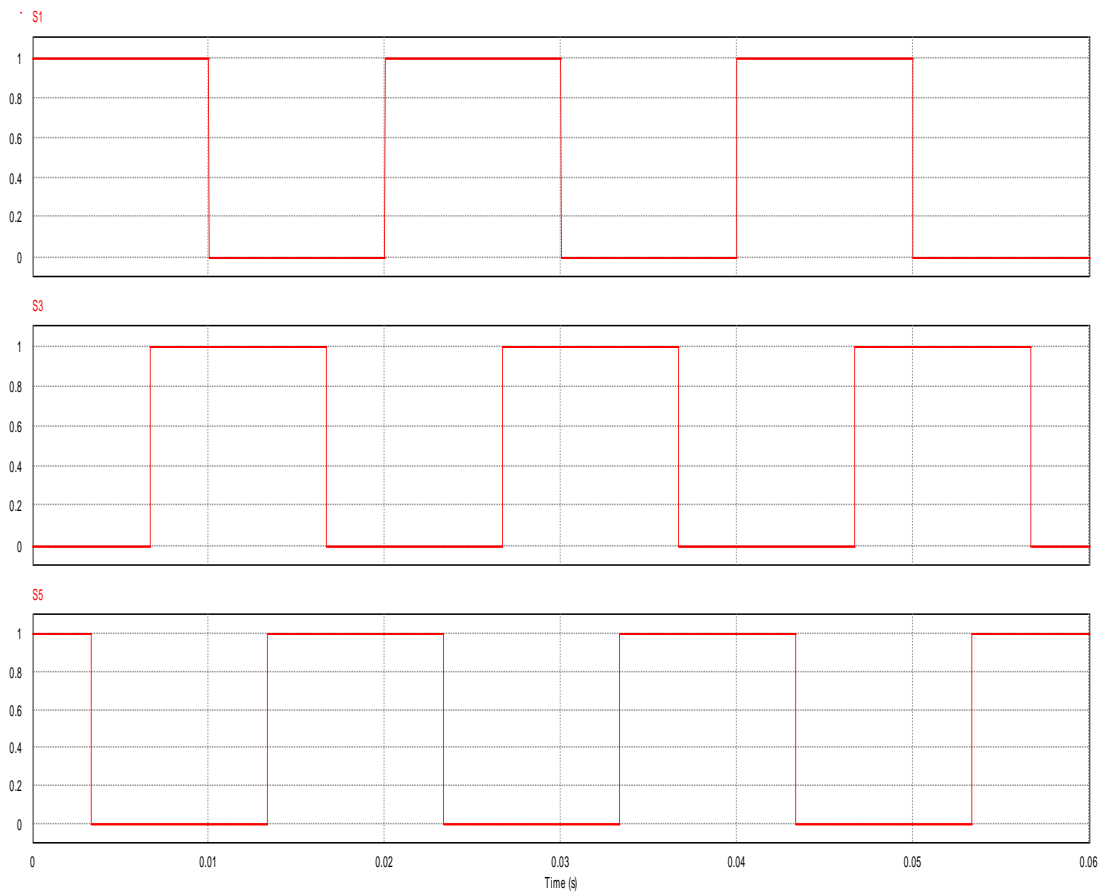


Figure II.2. Impulsions de commande S1, S3, S5

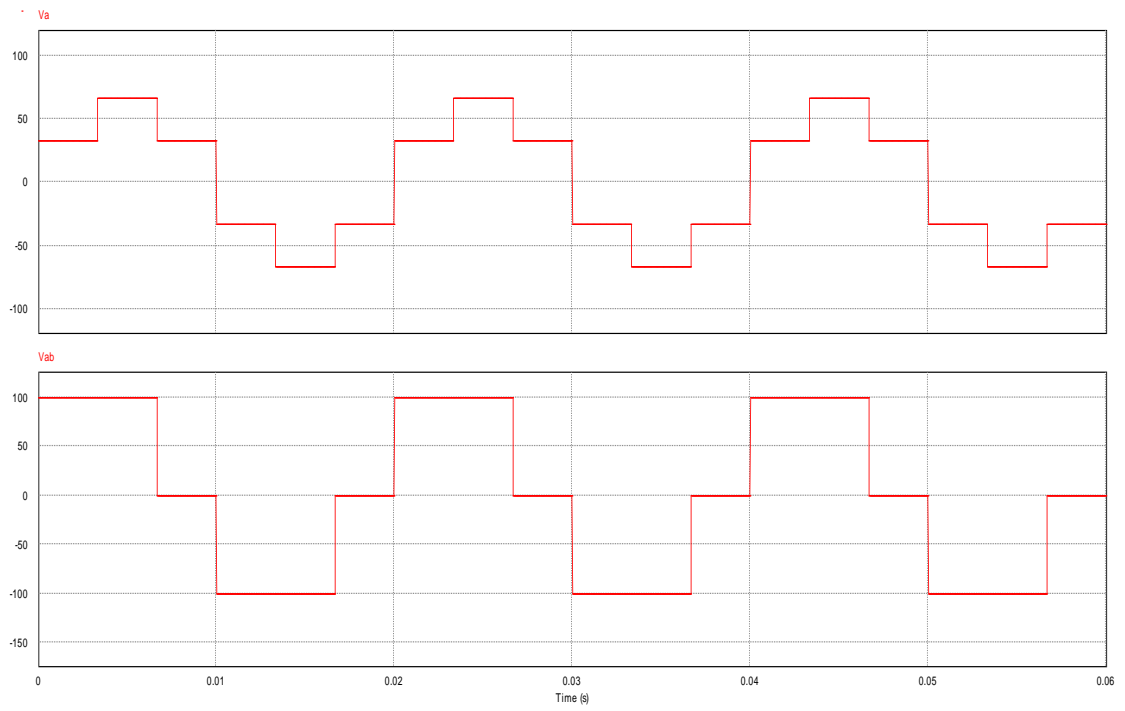


Figure II.3. Tension simple v_a et tension composée v_{ab}

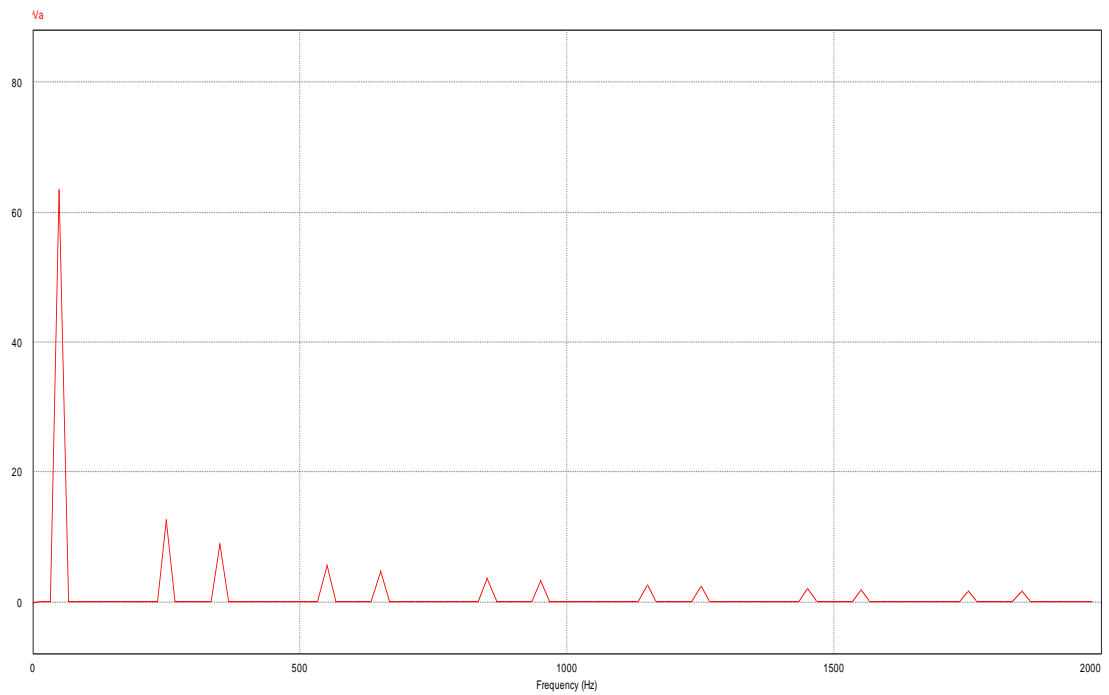


Figure II.4. Le spectre d'harmonique de la tension V_a

II.2.4 Interprétation :

La figure (II.2) montre que les impulsions de commande ont été égales à 1 pendant une demi-période de 0.01s et ont été décalées avec 120° .

La tension composée V_{ab} a alterné entre $+V_{dc}$ et $-V_{dc}$, tandis que la tension simple a alterné entre $2V_{dc}/3$, $V_{dc}/3$ d'une part, et $-V_{dc}/3$, $-2V_{dc}/3$ d'autre part, comme déjà on a vu au premier chapitre.

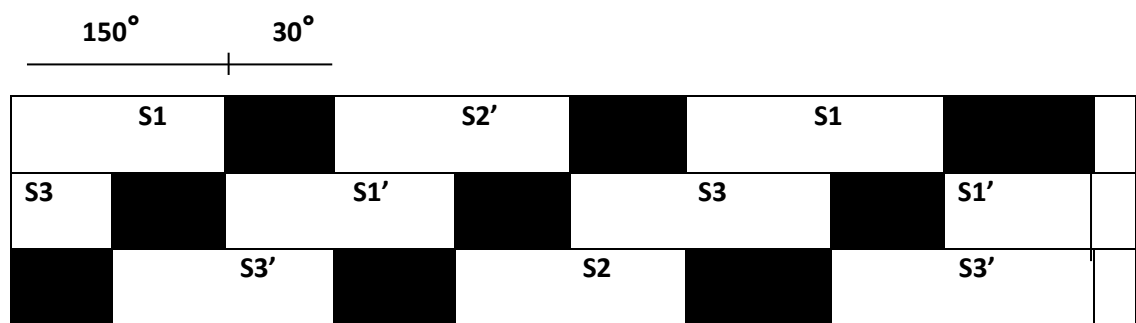
Le spectre d'harmonique de la tension de sortie est très riche en harmoniques de rang faible, donc le filtrage est difficile, ce qui montre que sa forme est très éloignée à la forme sinusoïdale et ce qui limite son utilisation dans l'industrie. C'est la stratégie de commande la plus simple et qui ne permet pas de varier sa valeur efficace.

II.3 Commande 150° :

II.3.1 Principe de la commande :

Chaque interrupteur est commandé pendant 120° ou 150° . Il y a un « trou » de 60° (ou 30°) entre les commandes de deux interrupteurs d'une même branche, (commande disjointe).

Les commandes des interrupteurs d'une branche sont décalées de 120° par rapport aux interrupteurs d'une branche voisine.



II.3.2 Schéma de bloc :

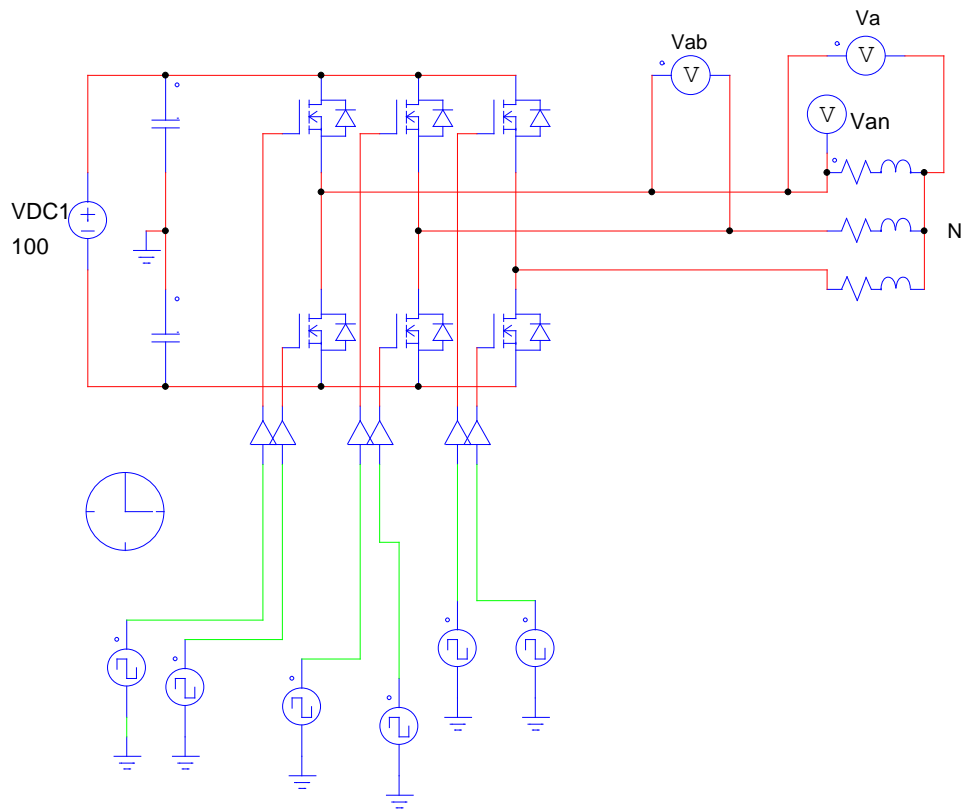


Figure II.5. Schéma fonctionnel de la commande 150°

II.3.3 Résultats de simulation :

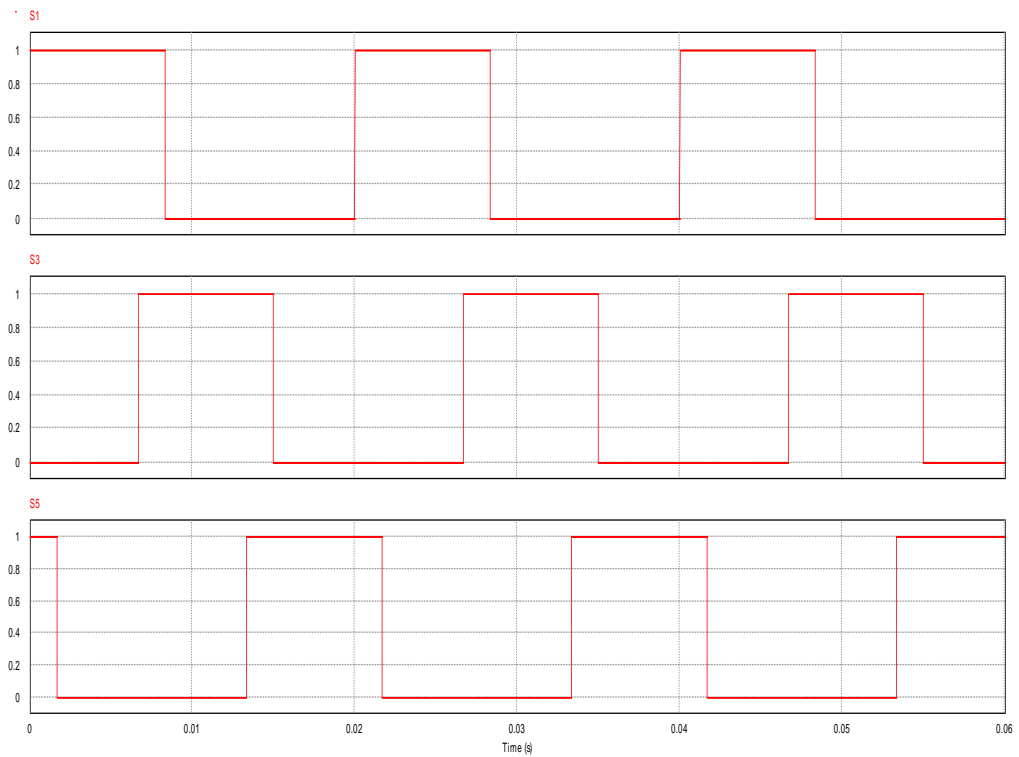


Figure II.6. Impulsions de commande S1, S2, S3

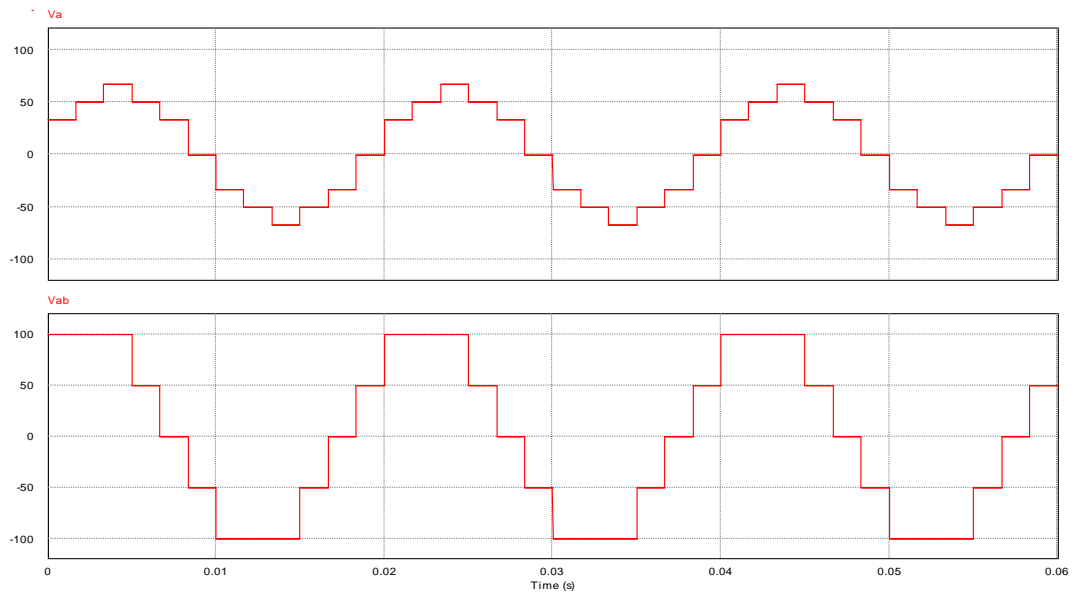


Figure II.7. Allure des tensions V_a, V_{ab}

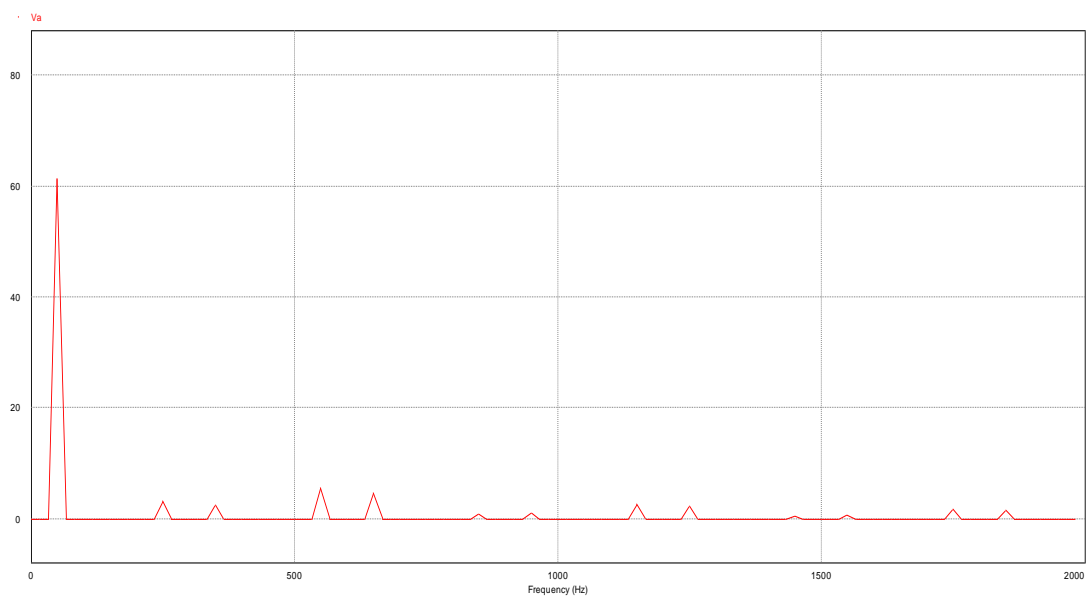


Figure II.8. Allure du spectre des harmoniques de la tension V_a

II.3.4 Interprétation :

La commande des interrupteurs est décalée : pendant un instant la charge est court-circuitée sur elle-même.

Ce décalage permet de faire varier la valeur efficace de la tension d'alimentation.

Suivant la valeur de ce décalage un harmonique gênant sera éliminé (en général l'harmonique de rang 3).

La forme de la tension de sortie dépend de la nature de la charge.

La commande disjointe permet d'avoir des courbes plus voisines de la sinusoïde. Le taux de composantes harmoniques de rang faible est minimal pour 150° . Ce choix simplifie le problème de filtrage mais complique la commande (enclenchement et déclenchement d'interrupteurs tous les 30°).

II.4. La Commande MLI :

II.4.1 Différentes techniques de modulation de largeur d'impulsions (MLI) :

Plusieurs techniques de modulations ont été adoptées afin d'améliorer la qualité de la tension à la sortie de l'onduleur, parmi lesquelles on peut citer :

II.4.1.1 La modulation linéaire multiple (UPWM) :

Dans cette technique on compare une porteuse triangulaire avec un signal de référence linéaire.

L'onde de sortie est sous la forme d'un train d'impulsion en créneaux de largeurs égales (Figure II.9). Si l'indice de modulation est égal à un, on obtient la modulation singulière, dans laquelle le signal de sortie est formé d'une seule impulsion par demi-période.

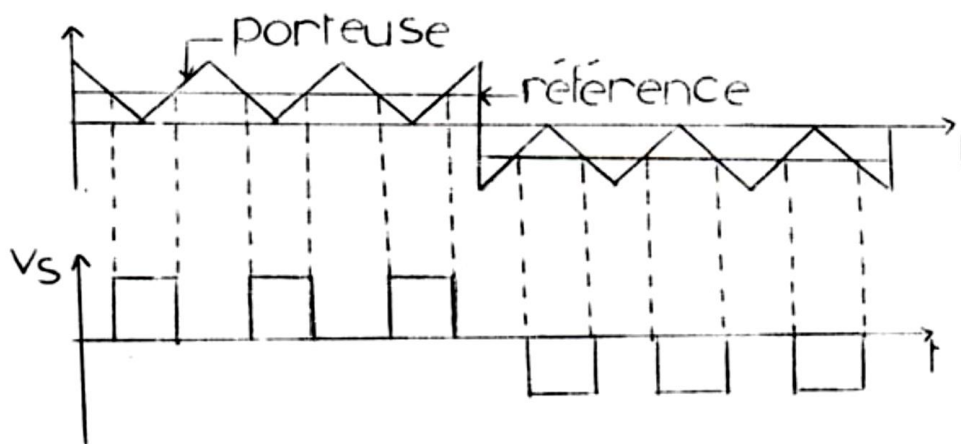


Figure II.9 La modulation de largeur d'impulsions multiples

II.4.1.2 La modulation sinusoïdale triangulaire unipolaire (SPWM) :

Dans ce cas, le signal de référence est sinusoïdal, on obtient à la sortie de l'onduleur une onde formée d'un train d'impulsion de largeur variable (figure II.10). Les instants de commutations sont déterminés par des points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse. Ce type de MLI est la plus utilisée dans les applications industrielles, car elle s'est avérée la plus efficace pour la neutralisation des harmoniques.

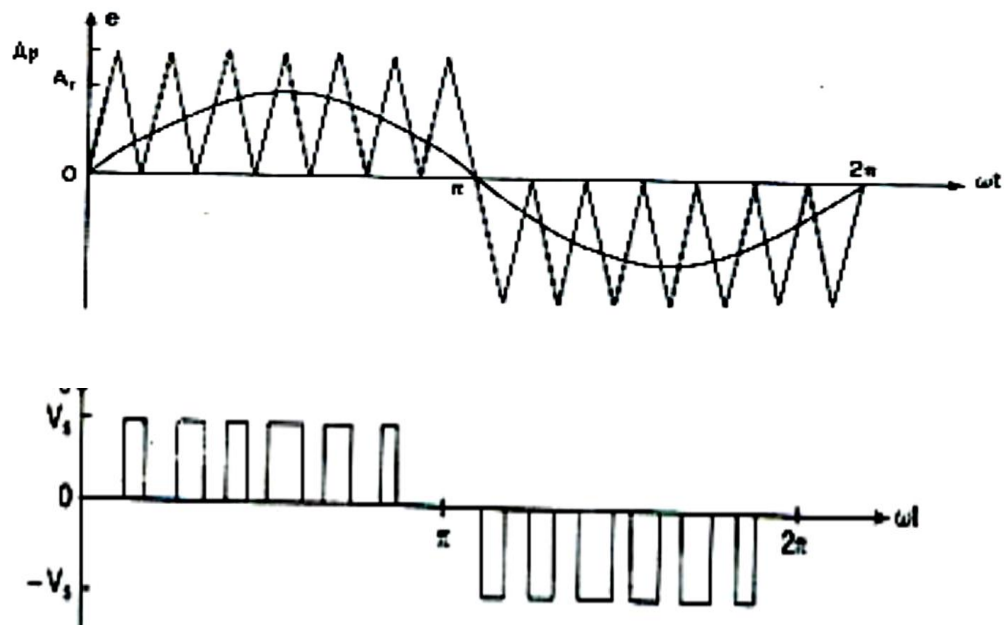


Figure II.10 MLI sinusoïdale triangulaire unipolaire

II.4.1.3 La modulation sinusoïdale partielle (ou modifiée) (MSPWM) :

Le signal de référence est toujours sinusoïdal, sauf que dans cette technique la porteuse n'est pas appliquée au milieu des alternances de la sinusoïde (Figure II.11).

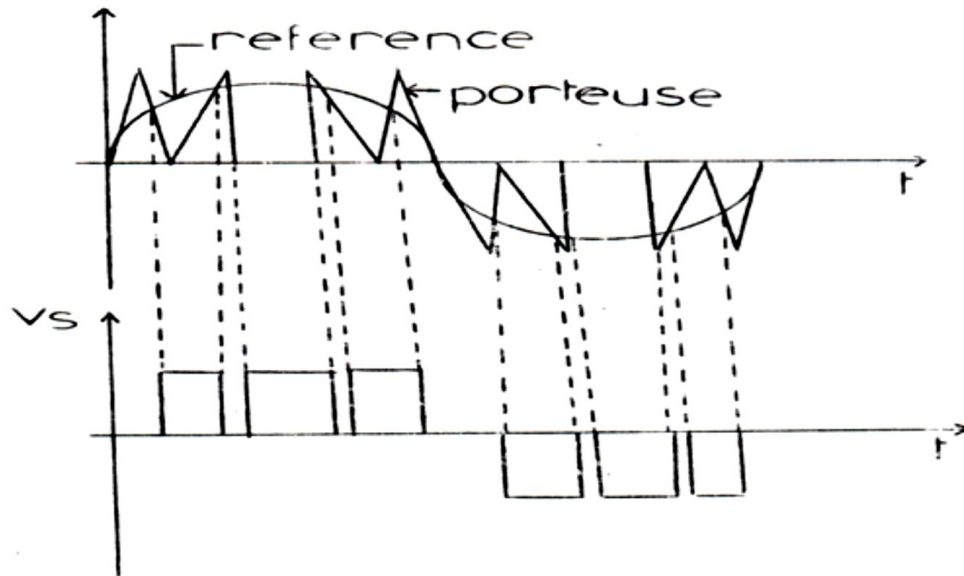


Figure II.11 La modulation sinusoïdale modifiée

II.4.1.4 L'injection d'un harmonique 3 dans la référence :

En triphasé, on peut améliorer les performances de la modulation en utilisant cette technique qui consiste à ajouter l'harmonique 3 à la sinusoïde de fréquence « f » pour former l'onde de référence (Figure II.12).

L'addition d'harmonique permet d'augmenter l'amplitude maximale du fondamental dans la référence, et par là dans les tensions de sortie.

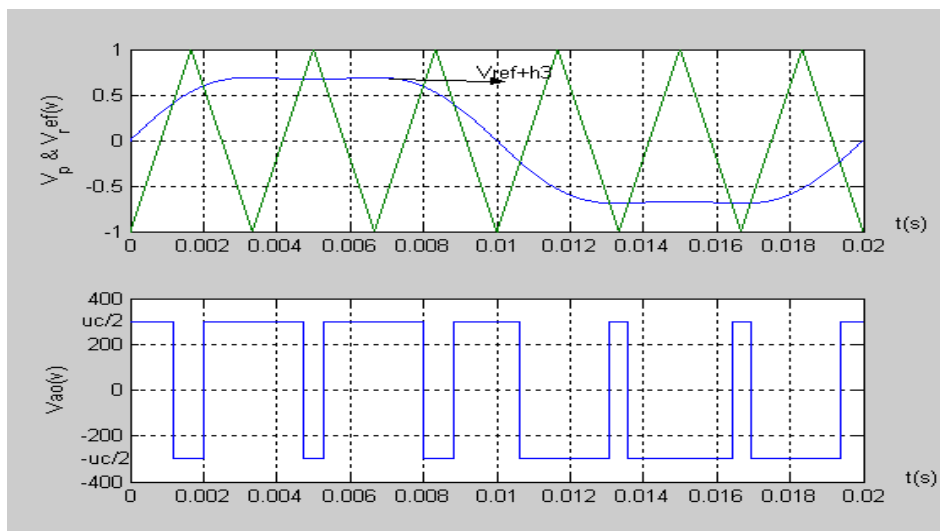


Figure II.12 MLI avec l'injection de l'harmonique 3

II.4.1.5 La modulation calculée :

Cette technique de MLI consiste à calculer les instants de commutation des interrupteurs de manière à répondre à certains critères portant sur le spectre fréquentiel de l'onde délivrée par l'onduleur. Les critères usuellement retenus sont :

- élimination d'harmoniques de rangs spécifiés,
- élimination d'harmoniques dans une bande spécifiée,
- minimisation d'un critère harmonique global.

II.4.1.6 La Modulation vectorielle :

La MLI vectorielle est la méthode récemment la mieux adaptée au contrôle des moteurs asynchrones. Contrairement à d'autres méthodes, la MLI vectorielle ne s'appuie pas sur des calculs séparés des modulations pour chacun des bras de l'onduleur.

II.4.1.7 Commande MLI triangle- sinusoidales :

Le principe de base de la modulation de largeur d'impulsion est sur le découpage d'une pleine onde rectangulaire. Ainsi la tension de sortie de l'onduleur est formée par une succession de créneaux d'amplitude égale à la tension d'alimentation (continue) et de largeur variable. La technique la plus répandue pour la reproduction d'un signal MLI est de comparer un signal triangulaire appelé porteuse de haute fréquence à un signal de référence appelé modulatrice et qui constitue l'énergie du signal recueilli à la sortie de l'onduleur, figure II.13.

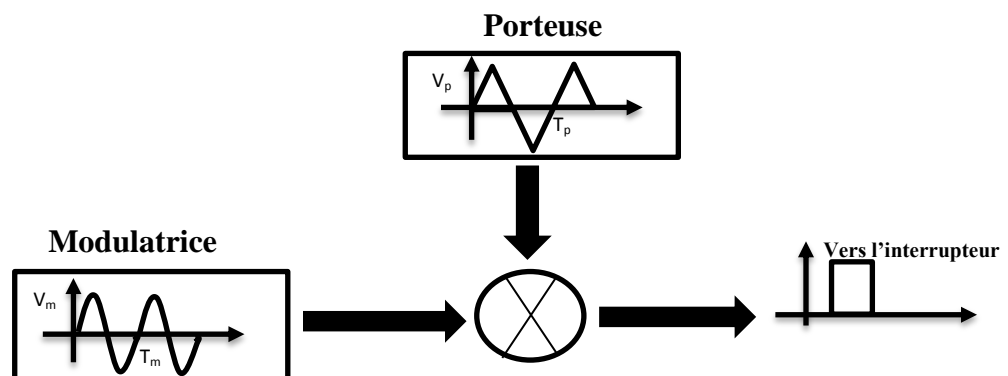


Figure II.13. Schéma de base MLI

II.4.2 Caractéristiques de la modulation :

La technique de la MLI se caractérise par deux grandeurs :

- **Le coefficient de réglage :** qui est défini comme étant le rapport de l'amplitude de l'onde modulante à celle de l'onde porteuse. Il permet de déterminer l'amplitude du fondamental de l'onde de modulation de largeur d'impulsion

$$r = \frac{V_m}{V_p} \quad (\text{II.1})$$

- **L'indice de modulation :** Il est défini comme étant le rapport de la fréquence de l'onde porteuse à celle d

$$m = \frac{f_p}{f_m} \quad (\text{II.2})$$

II.4.3 Principe de base :

La modulation de largeur d'impulsion sinus triangle est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante, la fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse. En triphasé, trois références sinusoïdale déphasées de $2\pi/3$ à la même fréquence f_s . Comme la sortie de l'onduleur de tension n'est pas purement sinusoïdale, l'intensité de courant ne l'est pas aussi, donc elle comporte des harmoniques, seuls responsables des parasites (pulsation de couple électromagnétique) ce qui engendre des pertes supplémentaires.

Le principe de cette stratégie peut être résumé par l'algorithme suivant :

$$V_m > V_p \rightarrow S(t) = 1 \text{ sinon } S(t) = 0$$

Avec :

V_m : la tension référence. V_p : la tension porteuse. $S(t)$: est le signal MLI résultant.

II.4.5 Le schéma de bloc :

Le schéma fonctionnel de la figure II.14 montre le principe de la commande triangulon-sinusoïdale MLI :

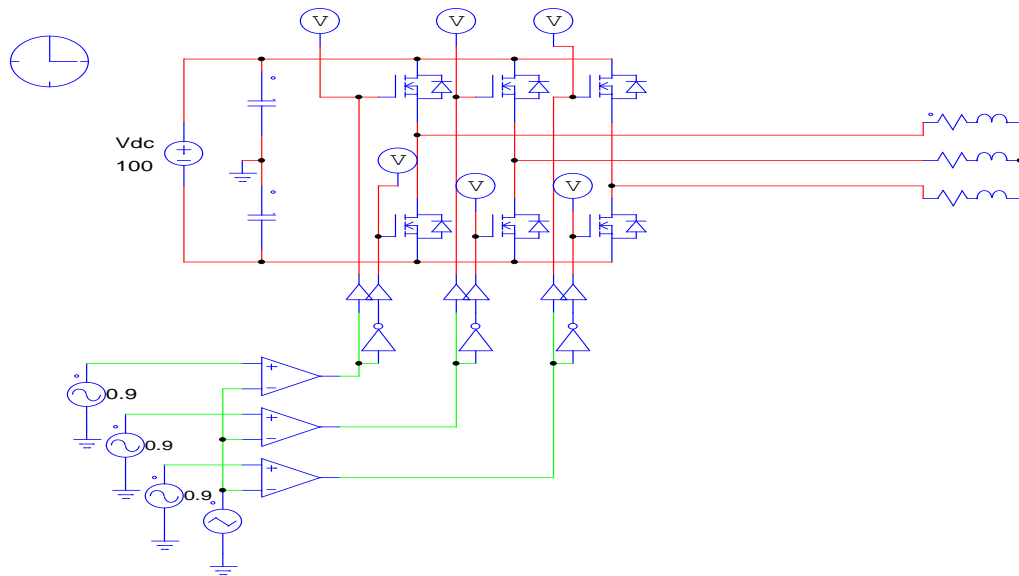


Figure II.14. Schéma fonctionnel de la commande MLI

II.4.6 Résultats de simulation :

Les résultats de simulation des figures (II.15, II.16, II.17, II.18) ont été obtenus lors de l'application de la MLI triangle-sinusoïdal sur l'onduleur triphasé où :

- La fréquence est égale 50Hz.
- La fréquence de commutation est égale 10kHz.
- La tension continue est 100 V.

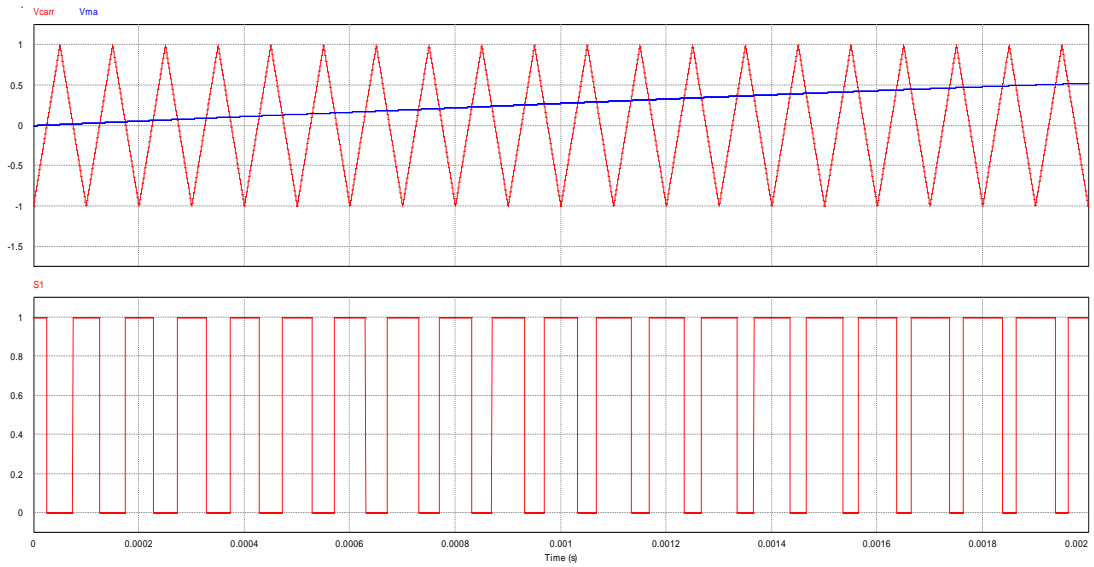


Figure II.15. Allure de tensions des signaux de commande

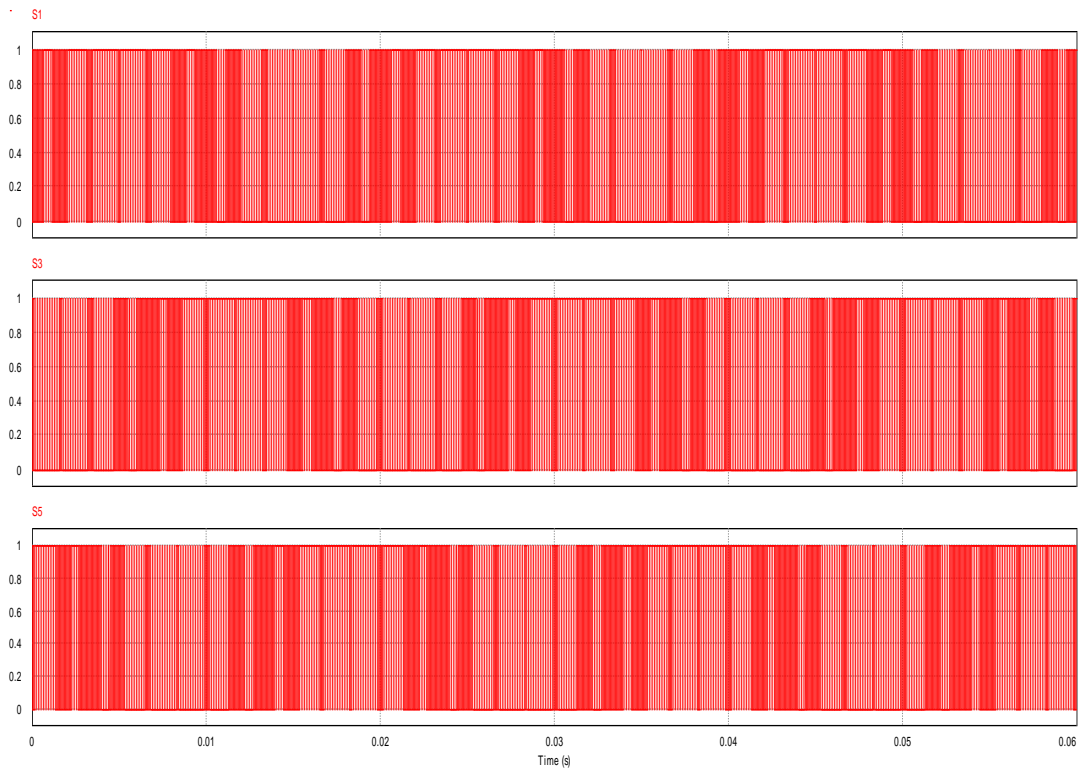


Figure II.16. Signaux de la commande MLI

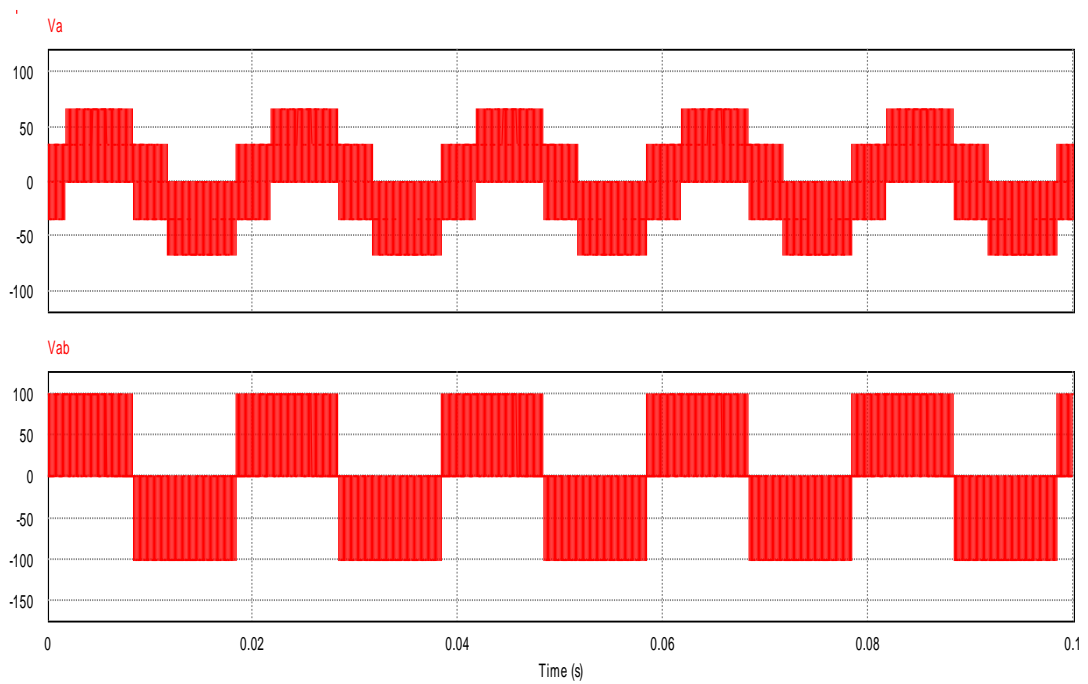


Figure II.17. Allure des tensions V_a , V_{ab}

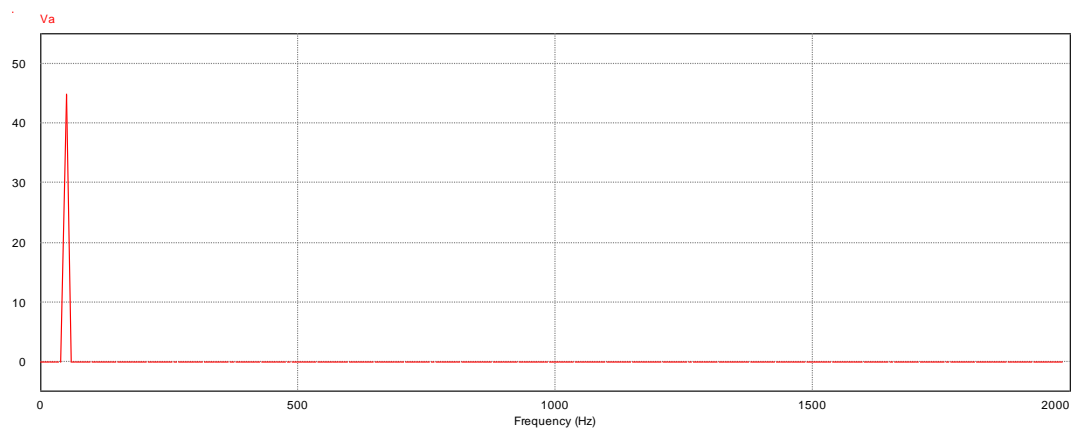


Figure II.18. Le spectre d'harmonique de la tension V_a

II.4.7 Interprétation :

La figure (II.15) montre bien le principe de fonctionnement de la technique MLI

Si $V_{réf} > V_{por} \Rightarrow S1=1$ Sinon $S1=0$.

On montre qu'il est possible en calculant soigneusement les angles de commutation, d'annuler complètement les harmoniques de rang faible. Cela est assuré dans les onduleurs industriels par un système à microprocesseur dans lequel sont mis en mémoire les valeurs des angles de commutation.

En se limitant aux harmoniques de rang faible, le THD est alors voisin de zéro. Il est facile par un simple filtrage passe-bas d'éliminer les harmoniques ; Figure (II.17).

II.5. CONCLUSION :

La simulation des différentes techniques de commande de l'onduleur triphasé a montré que la technique de modulation de largeur d'impulsion MLI possède un meilleur résultat par rapport aux deux techniques étudiées car, elle repousse les harmoniques vers les fréquences les plus élevées ce qui :

- ✓ Facilite le filtrage
Minimise la distorsion du courant.
- ✓ Faire réduire le coût du filtre de sortie.
Et elle donne des formes des tensions très proches à la forme sinusoïdale.

La commande 150° donne des bons résultats par rapport à la commande 180° mais la réalisation de son algorithme est très compliquée.

Donc, nous validerons expérimentalement la commande MLI sur un onduleur triphasé qui nous le réaliserons à base des MOSFETs. Ceci l'objectif du dernier chapitre.

Chapitre 3

Validation expérimentale

III.1 Introduction :

Ce dernier chapitre est réservé à la validation expérimentale de la commande MLI sinusoïdale, pour notre onduleur triphasé réalisé au niveau du laboratoire de génie électrique.

L'onduleur réalisé comporte trois parties essentielles, qui sont : Alimentation 15 V DC, Circuit de commande et Circuit de puissance.

Premièrement, nous présenterons chaque partie de l'onduleur en détaille, ensuite nous exposerons la carte de développement STM32F407 utilisé pour générer l'algorithme de la modulation de largeur d'impulsion MLI dans l'environnement Matlab.

Finalement nous donnerons les résultats expérimentaux de cette technique avec, bien sûr, une comparaison aux résultats de simulations.

III.2 Présentation de la plateforme du banc d'essai :

Toutes les taches concernant la réalisation de notre onduleur triphasé (test sur une plaque d'essai, tirage et perçage de la carte du circuit imprimé, soudage des composants électroniques et test final de l'onduleur), ont été réalisées au niveau du laboratoire de génie électrique et de l'électronique.

Donc, pour bien dimensionner l'onduleur triphasé, nous avons réalisé un onduleur monophasé en demi-point sur une plaque d'essai.

Ce test nous a permet de déterminer les valeurs de tous composants nécessaires au fonctionnement d'un bras de l'onduleur, ce dernier est utilisé pour alimenter une charge résistive (lampe électrique), figure III.1.

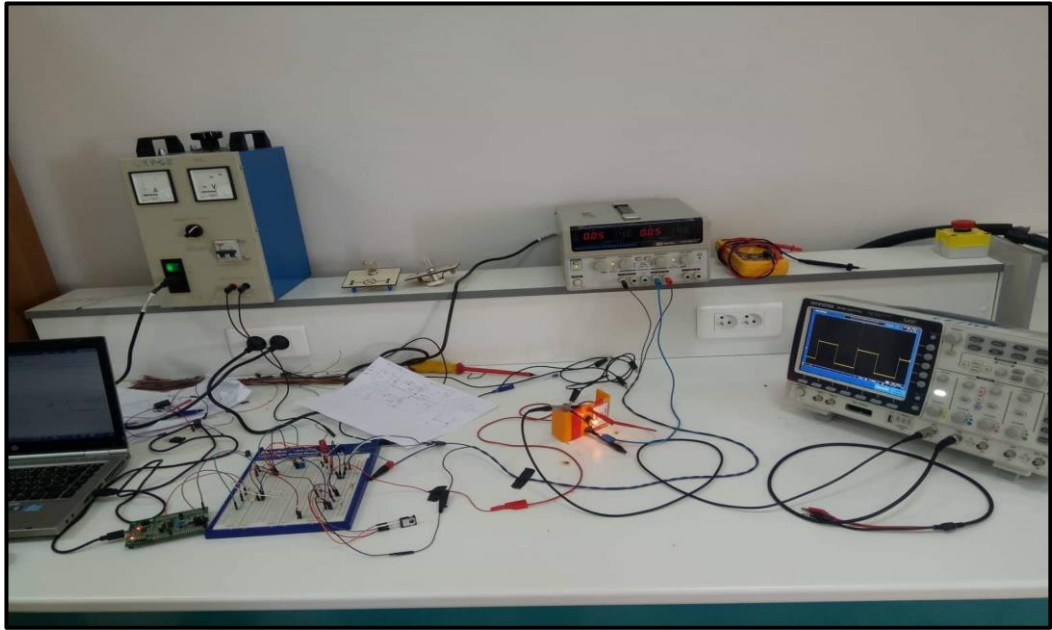


Figure III.1 banc d'essai de l'onduleur monophasé

Pour tester notre onduleur triphasé, nous avons utilisé le banc d'essai de la figure (III.2).

L'onduleur triphasé est piloté par la technique MLI, pour alimenter un moteur asynchrone triphasé de puissance 0.9 kW, pour plusieurs fréquences : 25Hz, 50Hz et 75Hz.

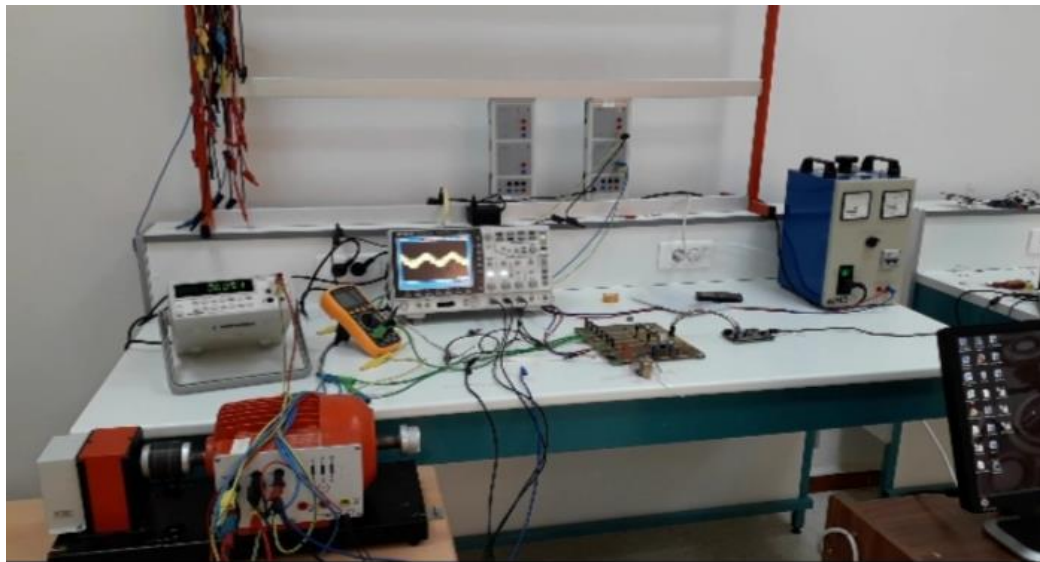


Figure III.2. Présentation de la plateforme du banc d'essai

III.3 Description de l'onduleur triphasé réalisé :

Notre onduleur réalisé comporte trois parties essentielles Figure III.3 :

1. Alimentation 15v DC.
2. Circuit de commande.
3. Circuit de puissance.

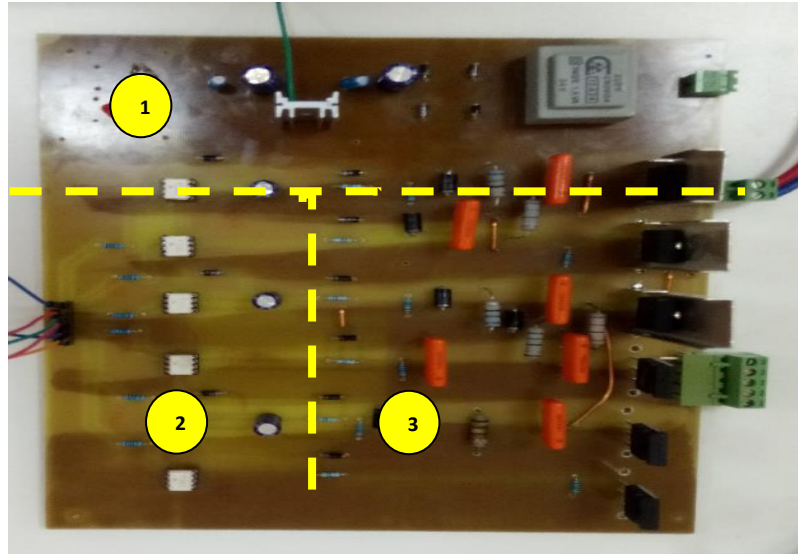


Figure III.3. Onduleur de tension triphasé réalisé

III.4 Alimentation 15 V DC :

Pour alimenter les optocoupleurs (TLP 250) du côté puissance, nous avons réalisé une alimentation 15 v DC à partir de 220 AC dont son schéma électrique est illustré sur la figure III.4.

La tension alternative devenue du secondaire du transformateur 220/24 AC, est redressé à l'aide d'un pont de Graetz, et est filtré par des condensateurs pour garantir une tension lisse à l'entrée du régulateur LM 7815, dont sa sortie est filtrée aussi pour assurer une 15 v DC stable.

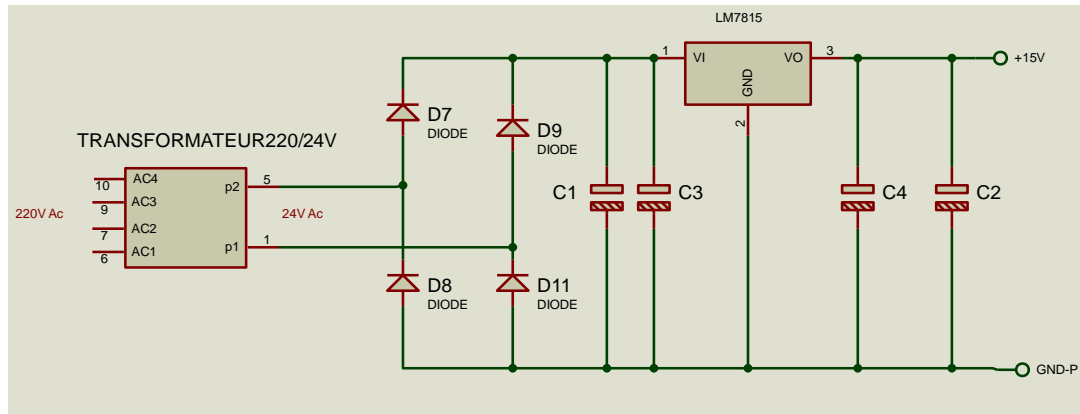


Figure III.4. Schéma du circuit d'alimentation.

III.5 Circuit de commande :

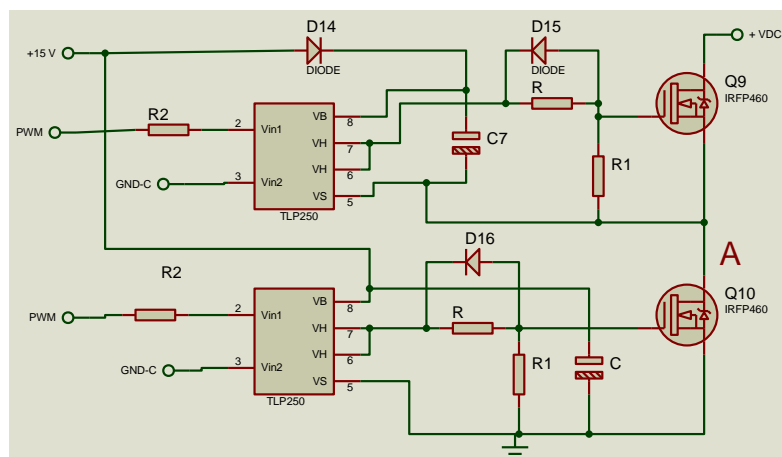


Figure III.5. Schéma de principe du circuit de commande des MOSFETs.

L'isolation galvanique entre le circuit de puissance et le circuit de commande est assuré par l'optocoupleur TLP250. Figure III.6. (a).

Un optocoupleur est un composant électronique capable de transmettre un signal électrique à un autre sans aucun contact galvanique entre eux. Figure III.6 (b) Le principe de fonctionnement de TLP 250 est résumé dans la table de vérité suivante :

		Tr1	Tr2
Led d'entrée	On	On	Off
	Off	Off	On

Tableau III.1. Table de vérité de l'optocoupleur TLP 250

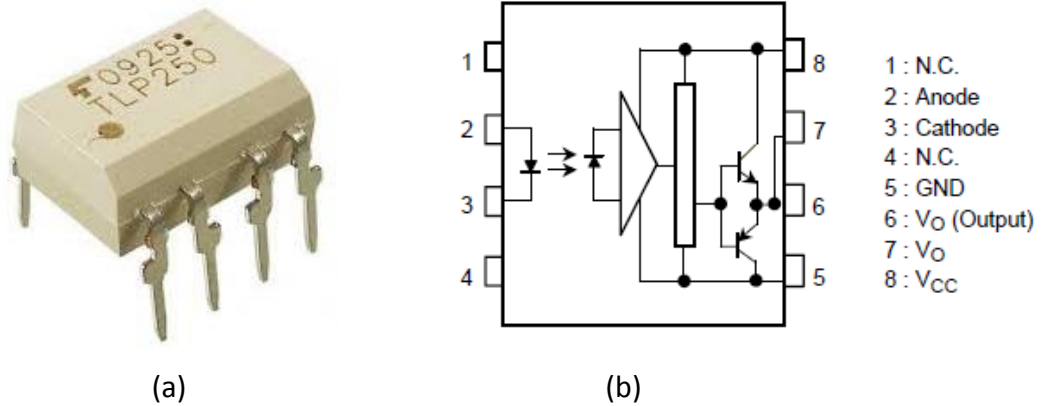


Figure III.6. (a) TLP 250, (b) Configuration des pines de TLP 250

III.6 Circuit de Puissance :

Nous avons utilisé pour notre onduleur le transistor MOSFET IRFP 460 qu'est capable de supporter une tension maximale de 500 V et un courant maximum de 20 A, sa fréquence de commutation maximale est 1MHz figure III.7. (a).

Un circuit de protection est ajouté pour protéger les interrupteurs contre les $\frac{du}{dt}$ lors de la commutation On-Off, et contre les $\frac{di}{dt}$ lors de la commutation Off-On

Figure III.7. (b)

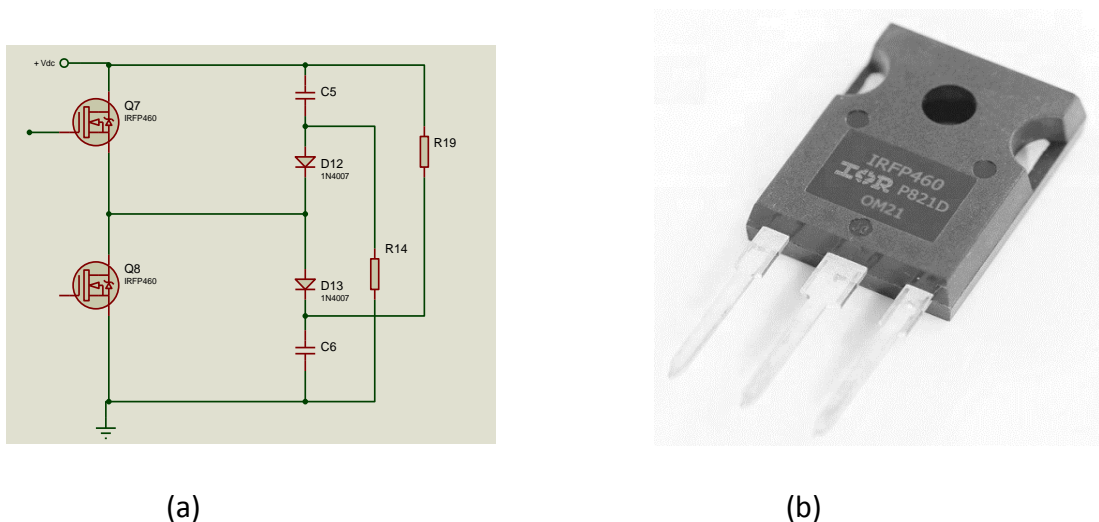


Figure III.7. (a) Schéma de principe du circuit de puissance d'un bras de l'onduleur,

(b) Le transistor MOSFET IRFP 460.

III.7 Carte de développement des commandes STM32F407-Discovery

La carte STM32F4Discovery permet aux utilisateurs de développer facilement des applications avec un microcontrôleur haute performance STM32F4 muni d'un processeur ARM Cortex-M4 32 bits. Elle inclut tout ce qui est nécessaire pour les débutants ou pour les utilisateurs expérimentés pour commencer rapidement à effectuer des développements.

Peu coûteuse et facile à utiliser, la carte STM32F4Discovery aide à découvrir les fonctionnalités haute performance du microcontrôleur STM32F4 et à développer facilement des applications. Figure III.8.

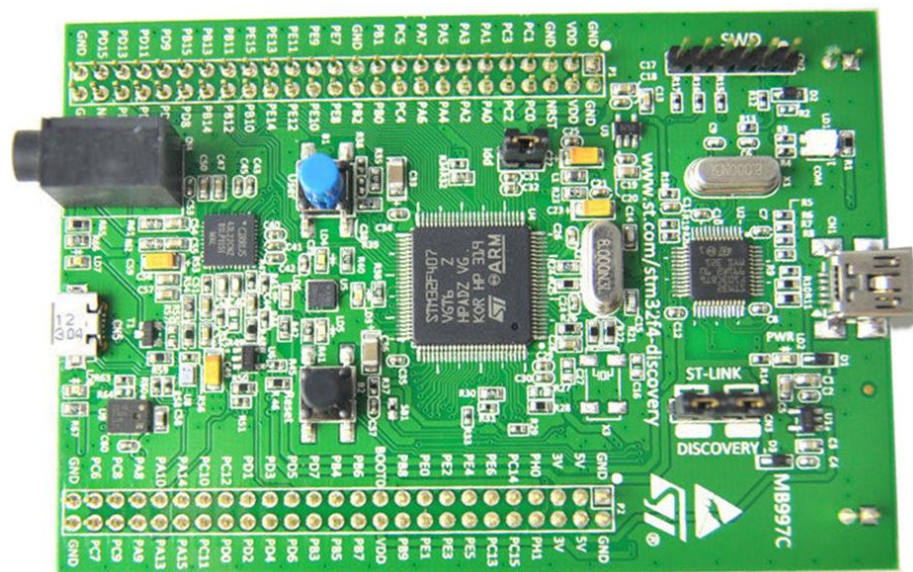


Figure III.8. Carte de développement des commandes STM32F407

III.8 Résultat expérimentaux :

Afin de valider pratiquement les résultats de simulation de la technique de modulation de largeur d'impulsion MLI de l'onduleur triphasé, nous avons alimenté un moteur asynchrone triphasé de puissance 0.9 kW par notre onduleur réalisé. Ce dernier est piloté par la technique MLI dont ses caractéristiques sont :

La fréquence du signal de référence est : 50Hz

La fréquence d'échantillonnage est : 10Khz

La fréquence de commutation est : 2.5 kHz

Le type de porteuse est : Mode centré.

Les résultats expérimentaux ont été présentés comme suit :

- Signaux de commande Sa, Sb, Sc. figure III.9.
- Zoom d'un signal de commande. Figure III.10.
- Tension simple Va. figure III.11.
- Tensions simples Va, Vb, et tension composé Uba. Figure III.12.
- Zoom de tensions simples Va, Vb, et tension composé Uba. Figure III.13.
- Tensions simples Va, Vb et Vc. Figure III.14.

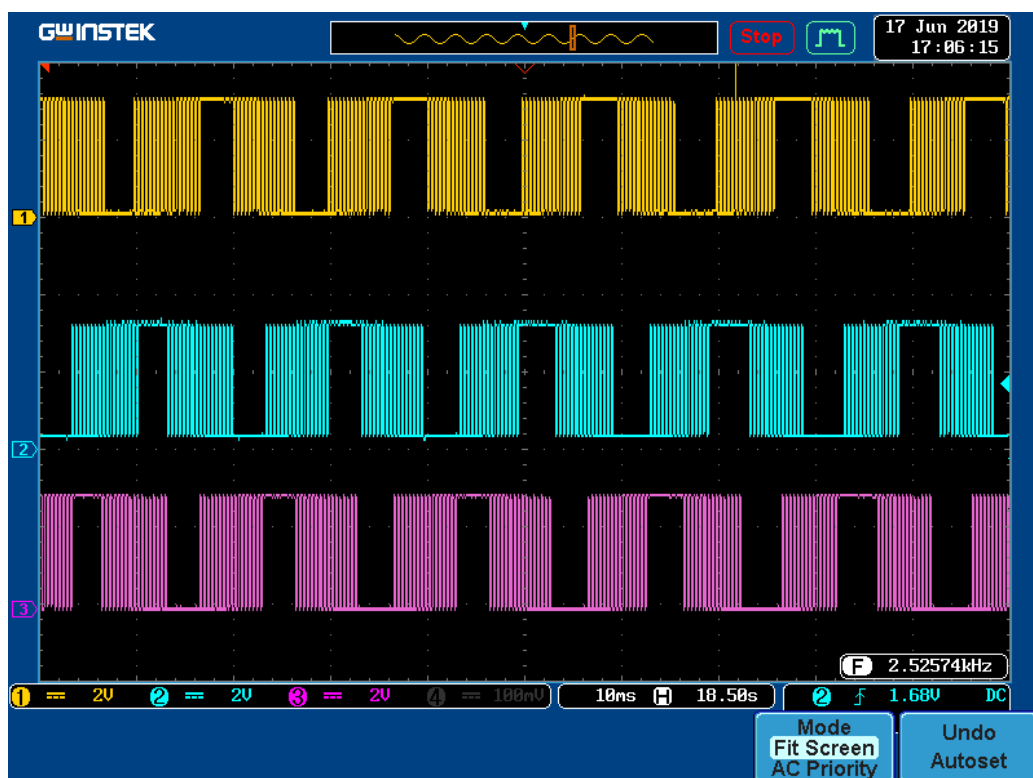


Figure III.9. Signaux de commande Sa, Sb et Sc

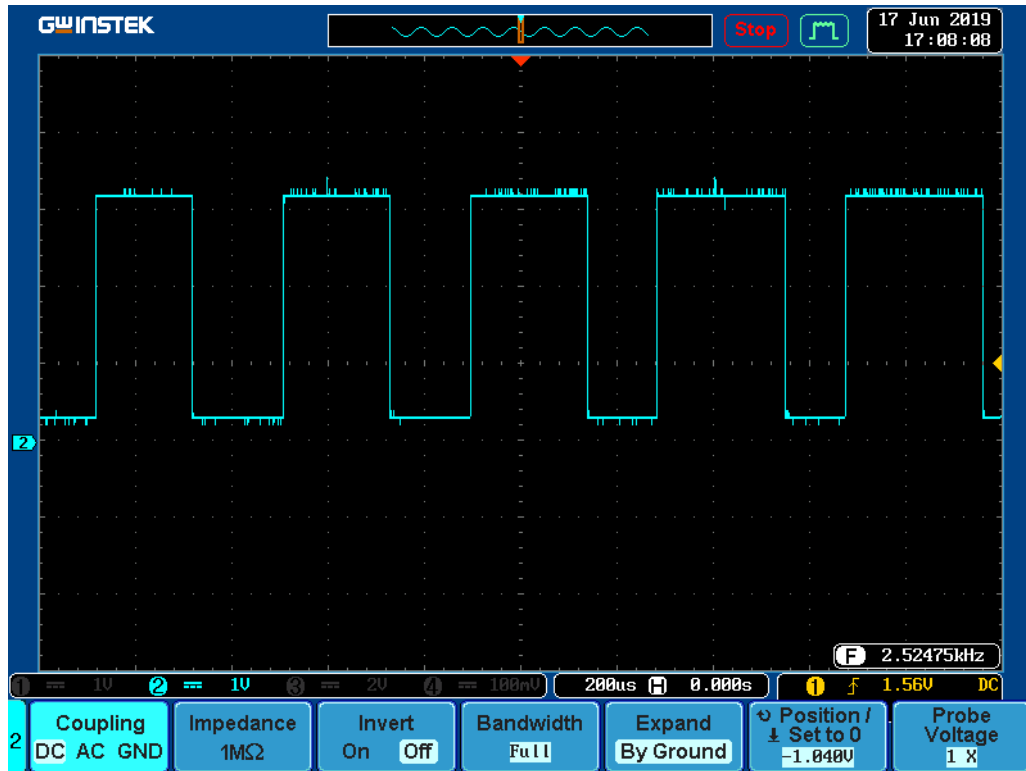


Figure III.10. Zoom d'un signal de commande S_b

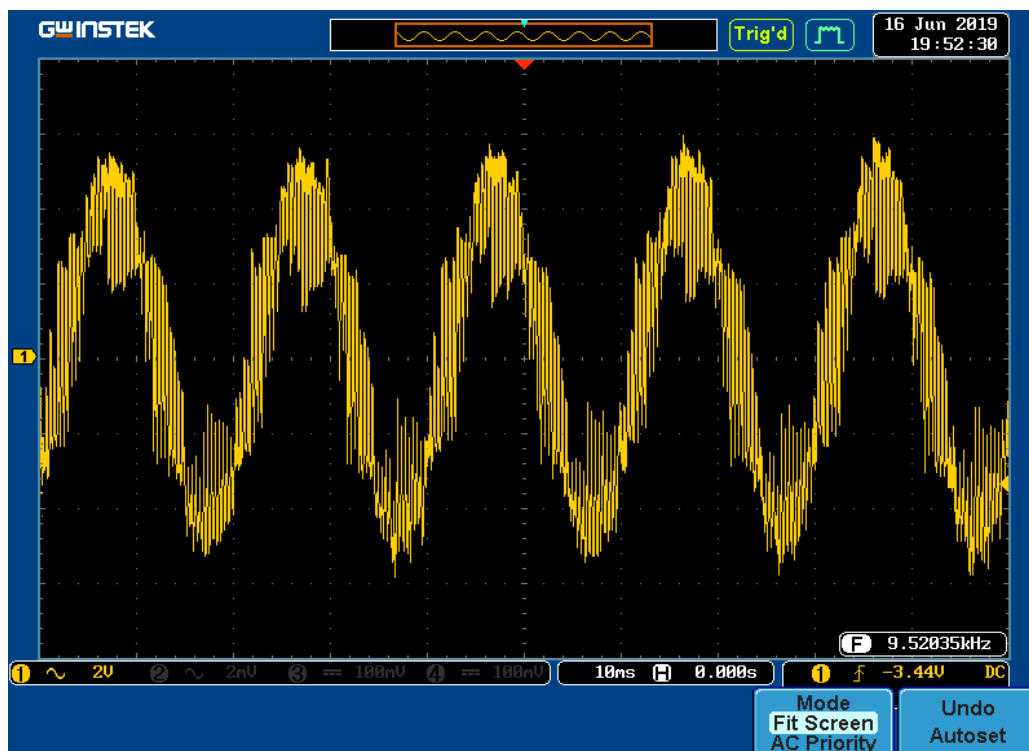


Figure III.11. Tension simple V_a

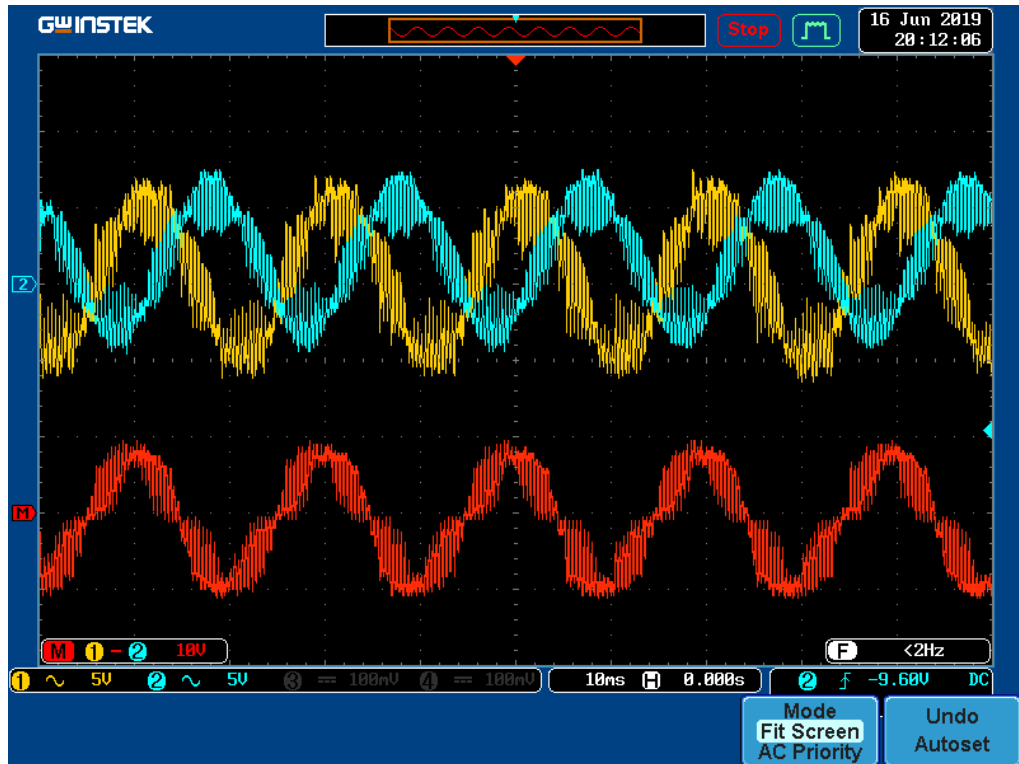


Figure III.12. Tensions simples V_a , V_b , et tension composé U_{ab}

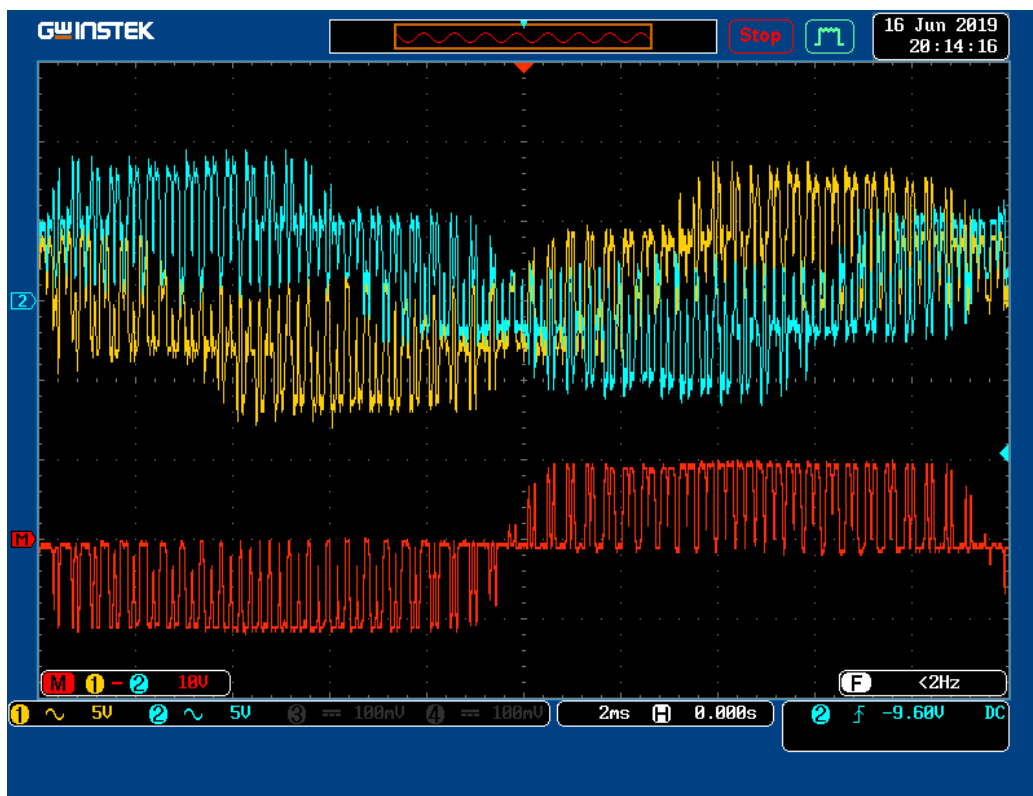


Figure III.13. Zoom de tensions simples V_a , V_b , et tension composé V_{ab}

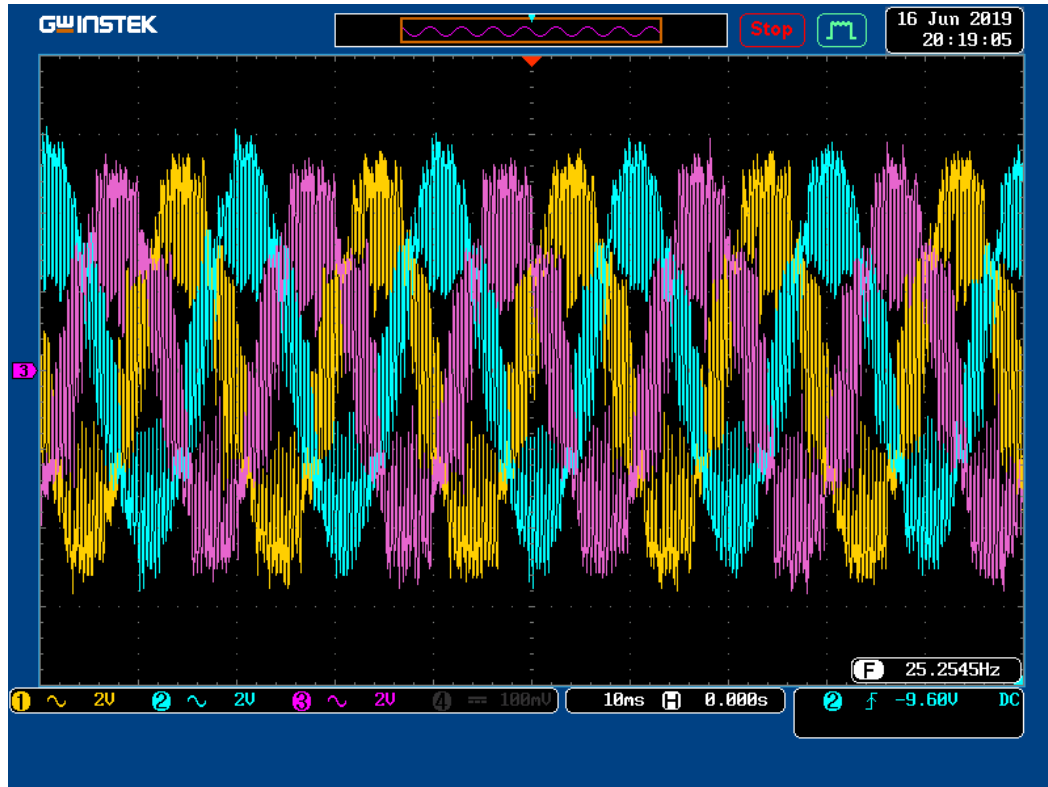


Figure III.14. Tensions simples V_a , V_b et V_c

III.9 Interprétation :

Les résultats expérimentaux montrent bien l'efficacité de notre onduleur réalisé pour générer un système triphasé équilibré de tensions décalés de $\frac{2\pi}{3}$ et de fréquence qui nous le choisis, et des amplitudes réglables, ce qui nous a laissé commander le moteur asynchrone triphasé en boucle ouverte pour n'importe quelle vitesse choisie.

Dans les figures III.9 et III.10 illustrent clairement les sorties MLI de la carte STM32F407 avec une fréquence de référence de 50Hz (20 ms), Et une fréquence de commutation de 2.5 kHz (400us), qui nous avons choisis.

Les figures III.11 et 12 et 13. Présentent les tensions simples V_a et V_b avec, bien sûr, les niveaux $2V_{dc}/3$, $V_{dc}/3$, $-2V_{dc}/3$ et $-V_{dc}/3$ qui sont bien observés. La même chose pour la tension composée où les deux niveaux sont également bien remarqués.

La dernière figure III.14. Montre bien le système triphasé qu'est composé par les trois tensions V_a , V_b , et V_c . Ces tensions sont très proches à la sinusoïde et avec un simple filtre LC on peut extraire leurs tensions fondamentales.

III.10 Conclusion :

Ce dernier chapitre est réservé à la validation pratique de la technique de modulation de largeur d'impulsion MLI pour un onduleur triphasé de tension.

Nous avons commencé ce chapitre par les différentes étapes de la réalisation de l'onduleur et de l'implantation de l'algorithme MLI en détail, ensuite une description générale pour la carte de développement STM32F407 est bien illustrée. En fin, nous avons donné les résultats expérimentaux avec leurs interprétations.

Les résultats expérimentaux et de la simulation lors de ce projet de fin d'étude sont identiques, ce qui montre notre réussite pour la réalisation de l'onduleur et pour l'implantation de la technique MLI.

Conclusion générale :

L'objectif principal de ce travail est l'étude et la réalisation d'un onduleur de tension triphasé à MLI. Ce travail est organisé en trois parties, dans la première partie nous avons donné le modèle mathématique de l'onduleur dont sa forme est une matrice carré. la deuxième partie est réservée à la simulation de différentes techniques de commande de l'onduleur triphasé à savoir commande 180° , commande 150° et commande MLI. Cette dernière technique a présenté les meilleures formes de tension qu'ont très proches à la forme sinusoïdale avec moins d'harmonique.

La dernière partie a exposé la validation pratique de la technique MLI sur l'onduleur triphasé que nous avons réalisé. Les résultats expérimentaux ont été similaires avec les résultats de simulation ce qui montre l'efficacité de notre onduleur.

En outre, ce dernier a énormément contribué à consolider nos connaissances dans la réalisation d'un onduleur de tension triphasé, surtout avec son importance dans le domaine industriel. Des difficultés rencontrées nous lors de la réalisation pratique, qui se résume uniquement sur la disponibilité des composants électroniques.

A travers ce projet on a su acquérir l'esprit du travail en groupe avec tout l'échange d'idées qui vient avec, et la capacité de bien coordonner et répartir les tâches.

Comme perspectives, nous pouvons proposer la continuité des études suivantes

- ✓ Recherche d'autres techniques de commande qui permettent d'avoir une tension à la sortie la plus sinusoïdale possible.
- ✓ Envisager d'associer ce type de convertisseurs à charges pratiques telles que les moteurs électriques pour la variation des vitesses de rotation.

Bibliographie :

[1]-BOUKAROURA Abdelkader, « Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé par l'Approche Bond-Graph », Magister en électrotechnique, Université Ferhat Abbas de Sétif 2009.

[2] Application ASI , « onduleur de tension description », www.wikipédia.com

[3]-Adjimi Nadia et Belaidi Wahiba, « modélisation et commande d'un onduleur MLI », Mémoire master, Université Larbi Ben M'hidi Oum El-Bouaghi, 2009.

[4]- G. Segulier and F. Labrique, '*Les Convertisseurs de l'Electronique de Puissance*', Tome 4 : La Conversion Continu-Alternatif', Edition Lavoisier, Technologie et Documentation, 1989.

[5]- Benadel HANI Chouidira MESSAOUD, technique de commande d'un onduleur triphasé, projet de fin d'étude licence génie électrique .

[6] Discovery kit with STM32F407VG MCU User Manual, www.st.com/resource/en/user_manual/dm00039084.pdf

ANNEXE 01

1. Transistor à Effet de Champ de Puissance « MOSFET » :

Le transistor MOSFET (Métal-Oxyde Semi-conducteur Field Effect Transistor) est un élément Trans conducteur, c'est à dire un composant actif destiné à fournir une variation de courant circulant entre deux bornes Source (S) et Drain (D), à partir d'une faible variation de tension appliquée sur une électrode de commande Grille(G) figure 1 (a).

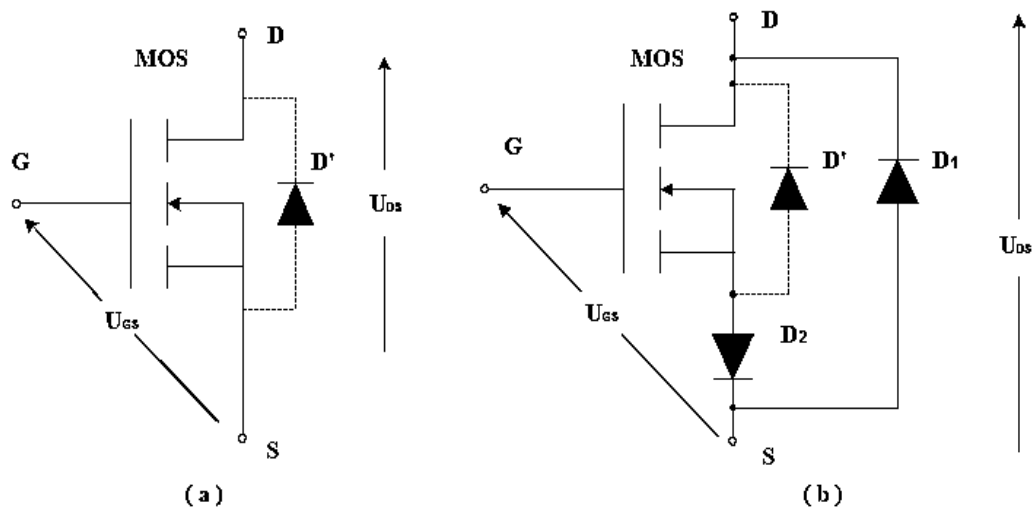


Figure 1. (a) schéma électrique du MOSFET ;(b) schéma de l'élimination de la diode interne

Ce transistors à effet de champ possède par construction une diode « D' » en parallèle inverse mais cette dernier, elle a un temps de recouvrement lent.

Notre utilisation de ce semi-conducteur nécessite un temps de recouvrement rapide, pour cela on branche une diode rapide « D1 » en antiparallèle avec le transistor « MOS » (voir figure 1 (b)) et pour empêche la conduction de la diode lent intégrée « D' » en branchant une diode rapide « D2 » directe en série avec le transistor « MOS ».

2. Critère de choix de l'élément Semi-conducteur

La figure 2 illustre la gamme des semi-conducteurs en fonction de la puissance et de la fréquence d'utilisation elle, nous aide selon la puissance de notre convertisseur, et d'autres paramètres à prendre en compte, à choisir le transistor MOSFET de puissance adéquat pour notre onduleur.

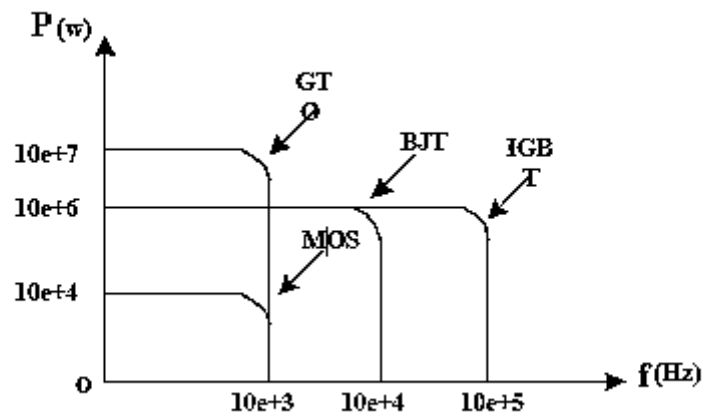


Figure 2. L'échelle des semi-conducteurs (interrupteurs).

3. Commande d'un transistor MOSFET

L'application d'une tension U_{GS} nulle ou négligeable entre la grille et la source provoque le blocage du transistor MOSFET, par contre une tension U_{GS} positive permet le passage au l'état de saturation du transistor MOS voire figure 3.

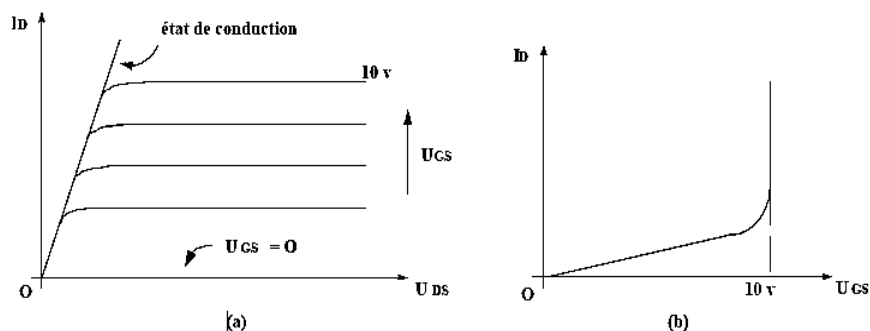


Figure 3. Caractéristiques d'un transistor MOSFET.
(a) caractéristique de sortie ; (b) caractéristique de commande.

4. Aire de sécurité d'un transistor MOSFET

L'aire de sécurité fixe les limites de la tenue courant tension pour le drain d'un transistor MOSFET qui est définies par la figure 4.

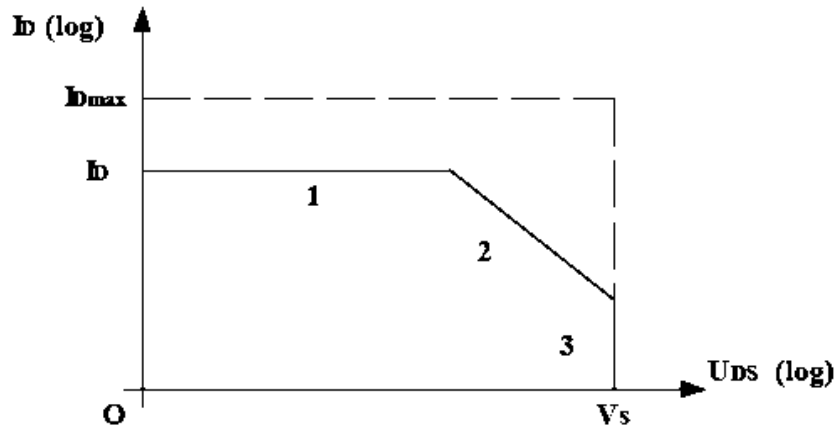


Figure 4 Aire de sécurité d'un transistor MOSFET.

1 : La limite du courant maximal I_D .

2 : La limite de la puissance de dissipation maximale P_{MAX} .

3 : La limite de la tension U_{DS} maximale V_S .

Le courant en trait interrompue limite l'aire de sécurité pour un fonctionnement en régime impulsionnel d'une durée de $1\mu s$.

5. Phénomènes de commutation d'un transistor MOSFET

Les temps d'enclenchement et de déclenchement du transistor MOS sont extrêmement courts (quelques dizaines de ns).

La figure 5. (a) représente le montage d'un transistor MOS sur une charge résistive pour la définition des temps de commutation, figure 5. (b) donnés par le constructeur.

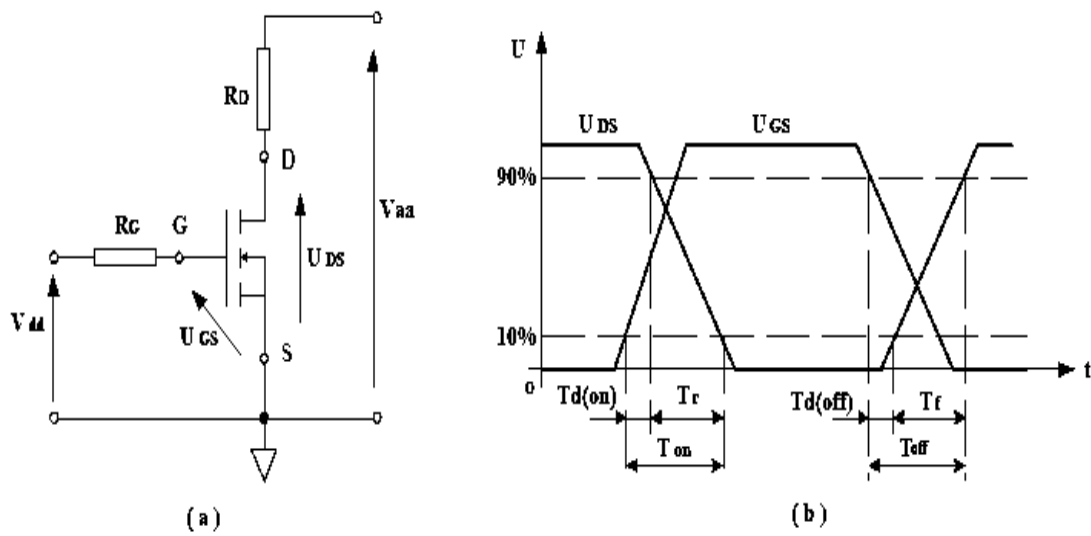


Figure 5. Commutation d'un transistor MOSFET. (a) Circuit de test ; (b) Allures des tensions U_{GS} et U_{DS} .

$T_d(on)$: retard à l'enclenchement ou temps de réponse.

T_r : temps de croissance d'une impulsion.

$T_{on} = T_d(on) + T_r$: temps total d'établissement.

$T_d(off)$: retard au déclenchement.

T_f : temps de décroissance d'une impulsion.

$T_{off} = T_d(off) + T_f$: temps total de coupure.

Annexe 02

1. Caractéristiques de la carte STM32F4Discovery :

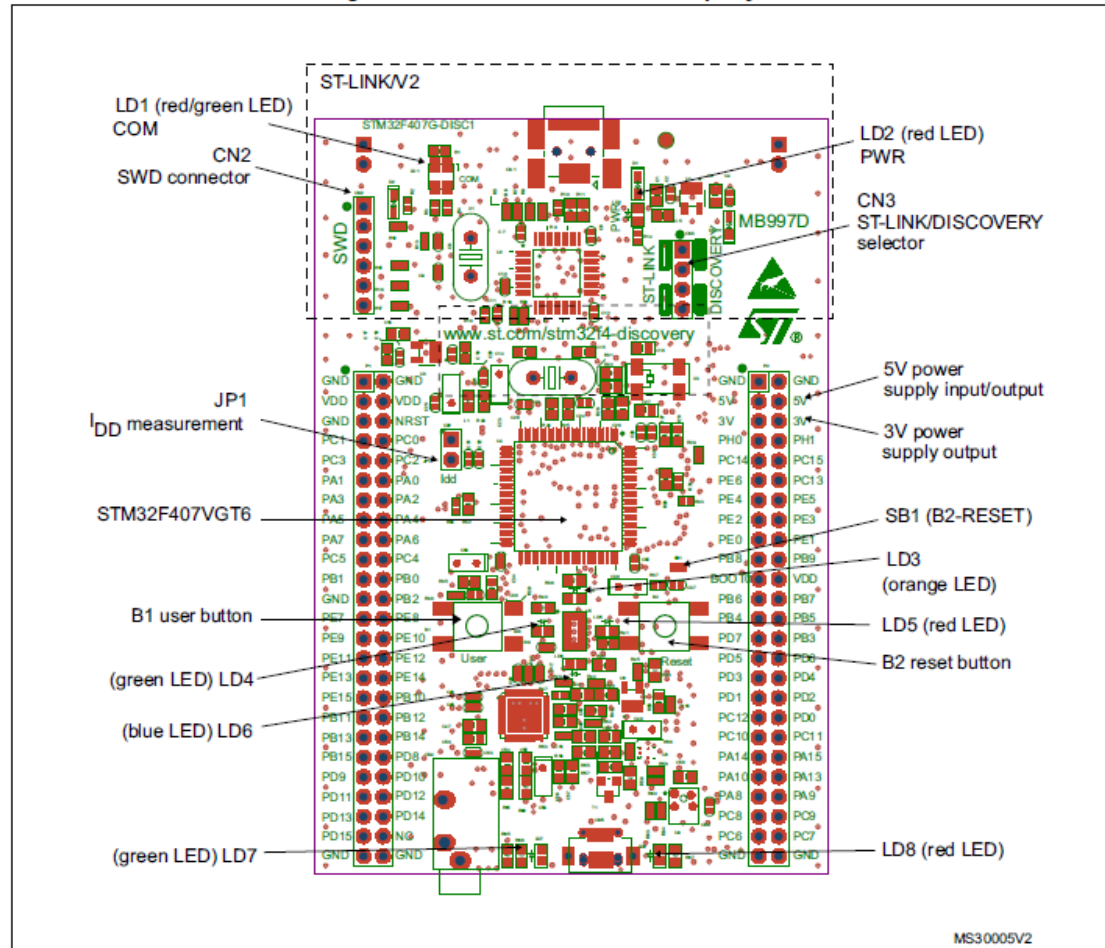


Figure .1. la carte STM32F4

La carte STM32F4Discovery offre les caractéristiques suivantes :

- Un microcontrôleur STM32F407VGT6 avec processeur ARM Cortex-M4 32 bits doté de :
 - une mémoire Flash de 1 Mo
 - une mémoire vive de 192 Ko
 - une FPU,
 - Un ST-LINK/V2 intégré.

Alimentation de la carte :

- par bus USB,
- par alimentation externe : 3 V ou 5 V.
- Un accéléromètre à 3 axes ST MEMS LIS3DSH,
- Un capteur audio (microphone) digital omnidirectionnel ST MEMS MP45DT02.
- Un DAC audio avec haut-parleur de classe D intégré.
- Huit LEDs :
- LD1 (rouge/vert) pour la communication USB,
- LD2 (rouge) pour la mise sous tension 3.3 V,
- Quatre LEDs Utilisateur : LD3 (orange), LD4 (vert), LD5 (rouge) et LD6 (bleu),
- 2 LEDs USB OTG (USB On-The-Go):
- LD7 (vert) VBUS,
- LD8 (rouge) surintensité.
- Deux boutons poussoir (utilisateur et réinitialisation).
- Interface USB OTG avec connecteur micro-AB.
- En-têtes d'extension pour les E/S pour une connexion rapide à la carte.
- Logiciel gratuit, complet et comprenant une variété d'exemples, constituant le package logiciel

STM32CubeF4. [6]