

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الدكتور الطاهر مولاي سعيدة

Université Saida Dr Tahar Moulay –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Mémoire de fin d'études présenté pour l'obtention du Diplôme de MASTER

En : Électrotechnique

Spécialité : Électrotechnique Industrielle

Par : SAOUDI Hamza Abdenmour et BOUMADEINNE Chaimaa

Sujet

**Etude Expérimentale d'une Méthode de Contrôle Généralisée Pour
un Onduleur MLI Triphasé Deux Niveaux à Fréquence de
Commutation Constante Contrôlé par un Microcontrôleur
STM320F28379D**

Soutenue publiquement en 24/06/2024 devant le jury composé de :

Mr. MOHAMMED CHIKOUCHE Tarik

Professeur Univ. Saida

Président

Mr. BOUANANE Mokhtar

MAB Univ. Saida

Rapporteur

Mr. BELGACEM Kheira

MCA Univ. Saida

Examineur

Année universitaire 2023/2024

♠ Remerciement ♠

En préambule à ce mémoire nous remercions « **ALLAH** » le Tout-puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience durant toutes ces années d'études.

Nos remerciements aussi chaleureux respectueux vont à notre encadrant : « Dr BOUANANE Mokhtar », pour son aide très précieuse. Sans oublier ses qualités humaines et son professionnalisme dont il a toujours fait preuve, ainsi que pour ses conseils pertinents, et ses orientations judicieuses, qui nous ont facilité ce travail, Nous tenons à lui exprimer notre grand respect et notre admiration, on espère avoir été digne de sa confiance qu'il nous a accordée et que ce travail était finalement à la hauteur de ses espérances.

Nous exprimons notre gratitude au corps professoral et administratif du département « **Electrotechnique** » de l'université de **saida**, pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grands efforts et une grande technique pédagogique pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre thème en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions. Nous tenons encore à exprimer nos sincères remerciements à tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études. Sans oublier nos chères familles bien aimé qui nous ont soutenues durant toute ses années et qui ont fait de nous ce que nous sommes aujourd'hui.

Enfin, nous remercions toute personne qui a participé de près ou de loin pour l'accomplissement de ce modeste travail

♥ Dédicace ♠

Je dédie ce travail

A Mon père, et à ma chère maman pour l'éducation qu'ils nous ont
Prodigués; avec tous les moyens et au prix de toutes les sacrifices
qu'ils ont consentis à nos égards, pour le sens du devoir qu'ils nous ont
enseignés depuis l'enfance, *qu'ALLAH les garde pour moi aussi*
longtemps et les préserve.

A mes très chères sœurs «rawane », &
mon frère «djebril et ayoub», qui sont pour moi des exemples de
persévérance, et de courage.

A mes grands parents

A ma chère amie «mohamed et sid ahmed & kwider et djamel ,abdelhay » qui
était à mes côtés durant mon cursus de l'université de saida et avec qui j'ai
partagé de très bons moments.

A mon entraîneur et deuxième Père «Dr.M ghawti»

Sans oublier mon collègue et Binôme « B.chaimaa» avec qui j'ai
réalisé cette étude et réalisation.

A mes professeurs respectés « Dr. Bouannane Mokhtar», «Dr.Belgacem
.kheira»& «Mouhammed Chikouch Tarek» ainsi qu'à tous ceux qui ont
contribué à ma formation durant tout mon cursus.

A tous ceux que j'estime et qui sont chers à mon cœur.

TABLE DES MATIERES

CHAPITRE I.

Composants électroniques et convertisseurs principes et histoire

I.1 Introduction	1
I.2 Histoire d'invention des composants électronique de puissance:	1
I.2.1 LA DIODE	1
I.2.2 LA DIODE ELECTROLUMINESCENTE	2
I.2.3 DIODE TUNNEL	3
I.2.4 Le Transistor	4
I.2.5 Le transistor bipolaire IGBT	6
I.2.6 LA MOSFET (transistor à effet de champ à grille isolée)	6
I.2.7 Le Thyristors	7
I.2.8 La Résistance.....	8
I.3 L'évolution des composants électronique	8
I.3.1 La diode	8
I.3.1.1 Caractéristiques statiques	9
I.3.1.2 Critères de choix d'une diode	9
I.3.2 Le transistor bipolaire	10
I.3.2.1 Caractéristique d'un transistor	10
I.3.3 Transistor MOSFET	11
I.3.3.1 MOSFET à appauvrissement de canal N	13
I.3.3.2 MOSFET à appauvrissement de canal P	13
I.3.3.3 MOSFET à enrichissement canal N	13
I.3.3.4 MOSFET à enrichissement canal P	14
I.3.4 Le transistor bipolaire L'IGBT	14
I.3.5 Le thyristor :	15
I.3.5.1 Principe de fonctionnement	15
I.3.5.1.1 Blocage de thyristor	15
I.3.5.1.2 Amorçage du thyristor	16
I.3.6 Optocoupleur	16
I.4 Histoires des convertisseurs statiques	17
I.4.1 Les convertisseurs statiques	17
I.4.2 Les convertisseurs Alternatif – Alternatif.....	17
I.4.2.1 Gradateur	17
I.4.3 Convertisseurs Alternatif – continu	18
I.4.3.1 Les redresseurs	18
I.4.4 Convertisseur continu – alternatif	18
I.4.4.1 Les Onduleurs	18
I.4.5 Convertisseur continu – continu	18
I.4.5.1 Hacheur	18
I.5 Conclusion	18

CHAPITRE II.

Généralités sur les convertisseurs Statiques et les différentes stratégies de commande des onduleurs triphasés

II.1 Introduction	19
II.2 Principes et Intérêts des convertisseurs statiques	19
II.2.1 Intérêt du convertisseur continu –continu.....	20
II.2.2 Types de convertisseurs DC – D	20
II.2.2.1 Hacheur série	20
II.2.3 Intérêt du convertisseur Continu – Alternatif	20
II.2.4 Les types de convertisseurs DC-AC	21
II.2.5 L'intérêt des Convertisseurs statiques alternatifs-continus	21
II.2.6 Les type de convertisseurs AC-DC	21
II.2.6.1 Les redresseurs	21
II.2.7 L'intérêt des convertisseurs alternatif-alternatif	21
II.2.8 Les types de convertisseurs AC-AC	22
II.2.8.1 Les cyloconvertisseurs	22
II.2.8.2 Les gradateurs	22
II.3 Les onduleurs triphasés	22
II.3.1 Types d'onduleurs.....	23
II.3.1.1 Onduleur autonome	23
II.3.1.2 Onduleur non autonome	23
II.3.2 Les applications des onduleurs	23
II.3.2.1 Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone	23
II.3.2.2 Alimentation de secours	24
II.3.2.3 Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes.....	24
II.3.3 Stratégies de commande d'onduleur de tension triphasé.....	24
II.3.3.1 La commande en MLI des onduleurs triphasés	25
II.3.3.2 Technique de production d'onde MLI	25
II.3.3.3 Technique analogique.....	25
II.3.3.4 Technique numérique.....	26
II.3.3.5 Technique hybride.....	26
II.3.3.6 Principaux avantages de la MLI	26
II.3.3.7 Commande en pleine onde 180°	27
II.3.3.8 Commande 120°	27
II.4 Modélisation de l'onduleur de tension à deux niveaux	28
II.4.1 La commande MLI sinus-triangle	29
II.4.1.1 Caractéristiques de la MLI sinus-triangle.....	30
II.4.2 Model Simulink de l'onduleur	32
II.4.3 Résultat de simulation	32
II.5 Conclusion	33

CHAPITRE III

Réalisation expérimentale

III.1 Introduction	34
III.2 LAUNCHXL-F28379D	34
III.2.1 Définition d'un microcontrôleur	34
III.2.2 Principales caractéristiques du LAUNCHXL-F28379D	35
III.2.3 Brochage du LAUNCHXL-F28379D	35
III.3 Etude fréquentielle de La tension efficace de sortie	36
III.3.1 Détermination de la valeur efficace	37
III.3.2 Décomposition en série de Fourier	37
III.4 ONDULEUR TRIPHASE	39
III.4.1 Allures des tensions composées et tension simples et Chronogramme de commande	40
III.4.2 Module de puissance intelligent (IPM) IRAMY20UP60B	43
III.4.2.1 Circuit défaut onduleur	45
III.4.2.2 Générations des signaux de commande avec Simulink et la carte STM32F28379D	45
III.4.2.3 Résultat expérimental du test de l'onduleur	46
III.5 Conclusion	48
-Conclusion générale	
-Reference et Bibliographie.	

LISTE DES FIGURES

Figure I-1: Karl Ferdinand Braun (1850-1918) [7]	1
Figure I-2: diode a pointe [8].....	2
Figure I-3: photo de diodes électroluminescentes [11]	2
Figure I-4: Nick Holonyak Jr. [14]	3
Figure I-5: Oleg Vladimirovich Lósev(1903-1942)[15]	3
Figure I-6: diode a effet tunnel [17]	4
Figure I-7: Leo Esaki [17].....	4
Figure I-8: John Bardeen (1908-1991)[20]	5
Figure I-9: William Shockley (1910 – 1989)[21]	5
Figure I-10: Walter Brattain (1902-1987)[22]	5
Figure I-11: photo Une réplique du premier transistor[23]	6
Figure I-12: Carl Franklin Wheatley (1927-2014)[25]	6
Figure I-13: Julius Edgar Lilienfeld 1882-1963[28]	7
Figure I-14: photo LA MOSFET [27]	7
Figure I-15: photo du thyristor [30]	7
Figure I-16: photo des Résistances anciennes (vers 1950) [33]	8
Figure I-17: Symbol et structure de la diode [35].....	8
Figure I-18: polarisations direct et inverse de la diode à jonction [36].....	9
Figure I-19: caractérisation de la diode[35]	9
Figure I-20: Représentation symbolique d'un transistor bipolaire [39]	10
Figure I-21: Caractéristiques électriques d'un transistor bipolaire NPN en montage émetteur commun [41].....	11
Figure I-22: MOSFET à canal P[43]	12
Figure I-23: MOSFET à canal N[43]	12
Figure I-24: (a) canal N (b) canal P [44]	12
Figure I-25: Représentation schématique d'un transistor Mosfet [43]	13
Figure I-26: D- MOSFET avec la grille négative [44]	13

Figure I-27: D-MOSFET avec la grille positive [44]	14
Figure I-28: schéma d'un transistor bipolaire l'IGBT[37]	14
Figure I-29: schéma du thyristor [48]	15
Figure I-30: caractéristique et limitation de fonctionnement.[49]	16
Figure I-31: la position d'un convertisseur [41]	17
Figure I-32: les différents convertisseurs statiques [41]	17
Figure II-1: schéma d'un convertisseur DC/DC	20
Figure II-2: schéma d'un convertisseur DC-AC	20
Figure II-3: schéma d'un convertisseur AC-DC	21
Figure II-4: schéma d'un convertisseur AC-AC	21
Figure II-5: Structure d'un onduleur triphasé en pont	22
Figure II-6: Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone	24
Figure II-7: Alimentation de secours	24
Figure II-8: Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes	24
Figure II-9: Principe de la modulation	25
Figure II-10: technique analogique	26
Figure II-11: technique numérique	26
Figure II-12: technique hybride	26
Figure II-13: Schéma de l'onduleur de tension	28
Figure II-14: Le principe de base de la commande par MLI.	30
Figure II-15: Model Simulink de l'onduleur.	32
Figure II-16: Résultat de simulation de la MLI, Sa, Sb, Sc. et Van, Vbn, Vcn	33
Figure III-1: LAUNCHXL-F28379D	34
Figure III-2: BROCHAGE DU LAUNCHXL-F28379D	36
Figure III-3: décomposition du signale	37
Figure III-4 décomposition du signale en série de Fourier.	38
Figure III-5: circuit de l'onduleur triphasé.	40
Figure III-6: schéma du circuit 1ère séquence	41
Figure III-7: Relation de Charles	41

Figure III-8: Allures des tensions composées et tension simples	43
Figure III-8: Broches de connexion IRAMY20UP60B	43
Figure III-9 : Schéma interne de l'IRAMY20UP60B.....	44
Figure III-10: Circuit défaut onduleur	45
Figure III-11 : Model des signaux de la commande MLI	46
Figure III-12 : réalisation du circuit d'un onduleur triphasé via STM	47
Figure III-13 : Temps mort de $2\mu s$	47
Figure III-14 : PWM H et PWM L.....	48
Figure III-15 : tension de ligne de l'onduleur triphasé (sans filtre)	48
Figure III-16 : Tension de sortie de l'onduleur triphasé IPM (avec un filtre LC)	49

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau II-1: Commande de 180°. [47]</i>	27
<i>Tableau II-2: Commande de 120°. [47]</i>	27
<i>Tableau III-1: Les séquences de commande</i>	40
<i>Tableau III-2: Les tensions par rapport au point « O »</i>	42

INTRODUCTION GENERALE

Dans l'industrie lourd, Legé et même domestique notamment les ascenseurs, il est utilisé les moteurs asynchrones. Ces derniers nécessitent dans la plus part des temps un régime variable de vitesse, ce comportement doit être généralement accompagné par une constance de couple. Une alimentation variable ne suffira pas car cette dernière fait baisser le couple, en effet, il est fortement déconseillé d'utiliser un autotransformateur pour faire varier la vitesse d'un moteur asynchrone soulevant une cabine d'ascenseur. Car il fait baisser le couple, par conséquent, la cabine descend en chute libre [1]. Donc, une variation de vitesse nécessite une variation propositionnelle avec la fréquence. Comme le réseau ne délivre qu'une fréquence 50Hz, il est primordial de trouver un moyen pour en crée une tension à fréquence variable. L'élément capable de créer une tension à fréquence variable c'est l'onduleur [2]. C'est un convertisseur statique d'énergie électrique dont la fonction comme le son nom l'indique (onduleur). Alors c'est à partir d'une tension continue mise à son entrer, l'onduleur l'ondule vers une tension désirée sinusoïdale. Cette ondulation est assurée par des interrupteurs qui commutent tout le temps le chemin des courants électriques ainsi l'application de la tension, d'entrer périodiquement appliqué directe et inversement[3] Ces interrupteurs tantôt fermé tantôt ouvert, sont des composants électroniques de puissance qui nécessitent des mises de tension (faible tension) sur leurs gâtes pour fermer et le retrait de cette même tension pour s'ouvrir. Comme la vitesse de la fermeture et l'ouverture peut accéder des fréquences d'ordre 1 kHz, alors sont des calculateurs qui la délivre à partir d'un programme injecté au préalable. Ce programme gère ces fermetures et ouvertures des IGBT dans un ordre à créer une onde en escalier dont on souhaite qu'elle s'approche à l'allure sinusoïdale [4]

Le sujet est bien vaste et compliqué, pour cela nous nous limitons juste à la réalisation d'un onduleur triphasé fonctionnant à vide. Le calculateur utilisé va être un microcontrôleur STMF28379D.

C'est sur cet élément qu'est sujet de notre travail de mémoire.

Ainsi :

Notre mémoire va être structuré de la façon suivante :

- 1- Introduction générale
- 2- Le premier chapitre, donnera une vue générale sur les composants électronique de puissance notamment : histoire, évolution principe de fonctionnement de certains d'entre eux.
- 3- Le deuxième chapitre, investigation sur les convertisseurs et la simulation de la commande MLI sinus triangle
- 4- Pour le troisième chapitre, réalisation d'un onduleur triphasée utilisant le module de puissance intelligent IRAMY20UP60B

CHAPITRE I:

*Composants électroniques
et Convertisseurs principe*

I.1 INTRODUCTION

En électronique de puissance, les fonctions sont principalement liées aux opérations de contrôle et de conversion de l'énergie électrique. Ainsi, les semi-conducteurs de puissance sont principalement destinés à des fonctions d'interrupteurs dans la mise en œuvre des convertisseurs d'énergie (redresseur, hacheur, onduleur, etc...), toute fois, des fonctions spécifiques de protection des équipements électriques mettent également en jeu des semi-conducteurs de puissance. Les premiers composants de puissance (diodes, transistors bipolaires, thyristors) permettant de contrôler des tensions et des courants élevés furent commercialisés dans les années 50 et, depuis, les composants semi-conducteurs se sont progressivement substitués aux solutions électromécaniques pour la réalisation des convertisseurs d'énergie. [5] [78]

I.2 Histoire d'invention des composants électronique de puissance:

I.2.1 LA DIODE :

Le premier dispositif capable de laisser passer le courant électrique dans un sens, tout en le bloquant dans l'autre, fut découvert en 1874 par Karl Ferdinand Braun avec un cristal de galène. Cet appareil est aujourd'hui connu sous le nom de diode à pointe, bien que le terme diode n'ait été proposé qu'en 1919 pour la diode à vide (Fig I-1 & Fig I-2) . [6]



Figure I-1: Karl Ferdinand Braun (1850-1918) [7]



Figure I-2: diode a pointe [8]

En 1904 John Fleming met au point la première lampe électronique, la diode dans un tube à vide. 1906 Lee de Forest, invente la triode appelée alors « Audion ». [9]

I.2.2 LA DIODE ELECTROLUMINESCENTE :

C'est en 1962 que la première diode électroluminescente rouge a été créée par Nick Holonyak Jr. et Sam Bevacqua de la compagnie General Electric (GE). Cependant la première émission de lumière par un semi-conducteur date de 1907 et fut découverte par Henry Joseph Round (Fig I. 3 & Fig I. 4). [10]



Figure I-3: photo de diodes électroluminescentes [11]

Au cours de l'année 1927, le scientifique Oleg Vladimirovich Lósev fait part de sa découverte en publiant un article concernant la diode électroluminescente dans une revue scientifique. La même année, il décide d'en déposer le brevet. [12]

Dans les années 1990, les recherches, entre autres, de Shuji Nakamura et Takashi Mukai de Nichia, dans la technologie des semi-conducteurs InGaN permirent la création de LED bleus, et par conséquent de LED blanches, par l'utilisation couplée de LED bleues et de luminophores jaunes. [13]

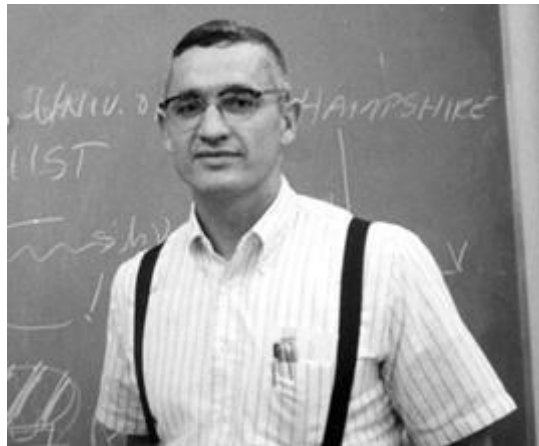


Figure I-4: Nick Holonyak Jr. [14]



Figure I-5: Oleg Vladimirovich Lósev(1903-1942)[15]

I.2.3 DIODE TUNNEL :

En 1960, Leo Esaki construit une diode – la diode à effet tunnel qui porte son nom – dont le fonctionnement est fondé sur cet effet. Court-circuit pour un courant se propageant dans un sens, ce composant a une résistance effective négative. Sa rapidité, sa petite taille et sa faible consommation – font adopter cette diode dans de nombreuses applications électroniques (Fig I. 6 & Fig I. 7). [16]

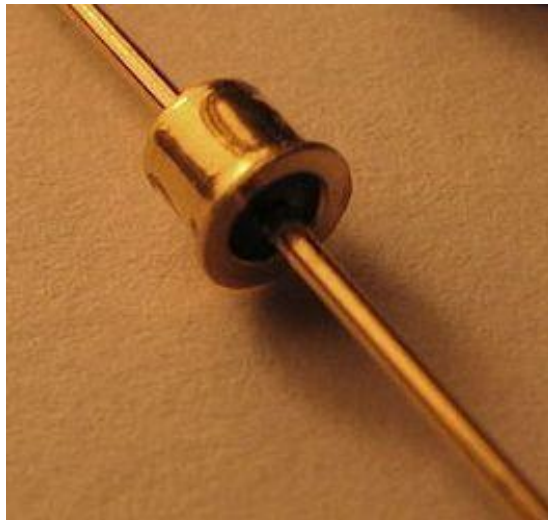


Figure I-6: diode a effet tunnel [17]



Figure I-7: Leo Esaki [17]

I.2.4 Le Transistor :

Transistor a été inventé le 23 décembre **1947** par les Américains John Bardeen, William Shockley et Walter Brattain, chercheurs de la compagnie Bell Téléphone. Ces chercheurs ont reçu pour cette invention le prix Nobel de physique en **1956** (Fig I.8 & Fig I. 9 & Fig I. 10 & Fig I. 11). [19]

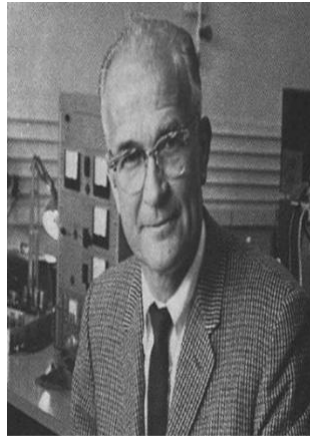


Figure I-8: *John Bardeen (1908-1991)[20]*



Figure I-9: *William Shockley (1910 – 1989)[21]*

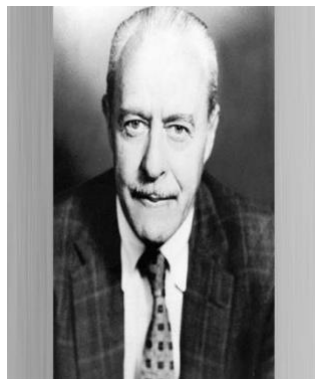


Figure I-10: *Walter Brattain (1902-1987)[22]*



Figure I-11: photo Une réplique du premier transistor[23]

I.2.5 Le transistor bipolaire IGBT :

La technologie IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) a été brevetée aux États-Unis en 1982 par Hans W. Beck et Carl F. Wheatley (Fig I. 12), Jr., sous le nom de MOSFET de puissance avec une région d'anode (Power MOSFET with an Anode Région). C'est une technologie récente qui succède aux thyristors, aux transistors Darlington et aux thyristors GTO. La première génération d'IGBT a connu des problèmes importants de verrouillage (ou latching), qui ont été corrigés dans la deuxième génération apparue au début des années 1990. [24]



Figure I-12: Carl Franklin Wheatley (1927-2014)[25]

I.2.6 LA MOSFET (transistor à effet de champ à grille isolée):

Le MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) a été conçu de façon théorique en 1920 par Julius Edgar Lilienfeld qui le breveta comme étant un composant servant à contrôler le courant. Mais le premier MOSFET n'a été construit qu'en 1959 par Atalla et Khang des laboratoires Bell car la complexité du MOSFET requiert des techniques plus précises que ce qui était disponible avant cette époque (Fig I.13 & Fig I. 14). [26]



Figure I-14: photo LA MOSFET [27]



Figure I-13: Julius Edgar Lilienfeld 1882-1963[28]

I.2.7 Le Thyristors :

Le thyristor ou SCR pour Silicon Controlled Rectifier redresseur commandé au silicium inventé en 1956 au Bell Laboratories et qui remplace avantageusement l'ancien tube thyatron à gaz (Fig I. 15). [29]



Figure I-15: photo du thyristor [30]

I.2.8 La Résistance :

Physicien et mathématicien allemand, Ohm est à l'origine de la loi fondamentale des courants électriques en 1827. Par ses travaux, il détermine les relations entre courant, tension et résistance, permettant de donner une base à l'étude des circuits électriques. [31]

Selon la loi d'Ohm, l'intensité d'un courant électrique traversant un conducteur métallique est proportionnelle à la tension U entre les bornes de ce conducteur. Cette loi permet de déterminer les différences fondamentales entre courant, tension et résistance. [31]

Ohm a découvert l'existence d'une relation de proportionnalité directe entre la différence de potentiel appliquée aux bornes d'un conducteur et le courant électrique qui le traverse, ce qu'on appelle maintenant la loi d'Ohm. Ces résultats expérimentaux lui ont permis de déterminer les relations fondamentales entre courant, tension et résistance électrique (fig I. 16). [32]



Figure I-16: photo des Résistances anciennes (vers 1950) [33]

I.3 L'évolution des composants électronique

I.3.1 La diode :

La diode est un semi-conducteur non commandé, (comportant deux régions P (anode) et N (cathode) (voir Fig I. 17), et qui laisse passer le courant que dans un seul sens, de l'anode vers la cathode. [34]

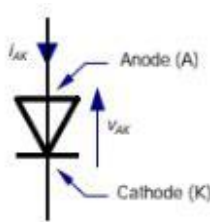
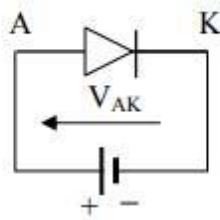


Figure I-17: Symbol et structure de la diode [35]

Polarisation de la diode:

2-1- Polarisation directe



2-2- Polarisation inverse

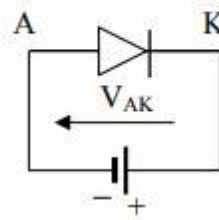


Figure I-18: polarisations direct et inverse de la diode à jonction [36]

En polarisation directe, la tension appliquée ($V_{AK} > 0$) permet le passage d'un courant électrique de l'anode vers la cathode appelé courant direct.[36]

En polarisation inverse, la tension appliquée ($V_{AK} < 0$) empêche le passage du courant. Le courant inverse est pratiquement nul (voir Fig I. 18). [36]

I.3.1.1 Caractéristiques statiques :

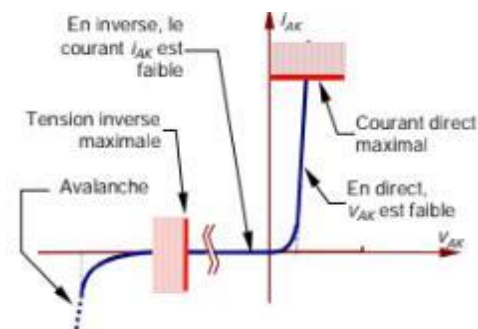


Figure I-19: caractérisation de la diode[35]

Le fonctionnement réel est toujours caractérisé par ses deux états :

à l'Etat passant : I_{AK} , le courant direct est limité au courant direct maximal ;

à l'état bloqué : V_{AK} , la tension inverse est limitée (phénomène de claquage par avalanche) à la tension inverse maximale.[35]

I.3.1.2 Critères de choix d'une diode

Le choix d'une diode de commutation dépend de son application dans la structure.

VRRM : tension inverse maximale répétitive

VRSM : tension inverse maximale non répétitive

VF : tension direct

IF : courant direct

TON et TOFF minimaux

IF max : courant maximal répétitif. [37]

I.3.2 Le transistor bipolaire

Un transistor à jonction bipolaire est un composant à semi-conducteur constitué de 2 jonctions P-N, très proches l'une de l'autre. Un transistor est formé de 3 couches (N-P-N ou P-N-P selon son type), tel qu'illustré sur le dessin ci-dessous. Chaque "couches" est reliée à une électrode: base (B), émetteur (E), collecteur (C)(voir Fig I. 20).[38]

Le transistor peut avoir trois états : bloqué, saturé et passant en régime linéaire

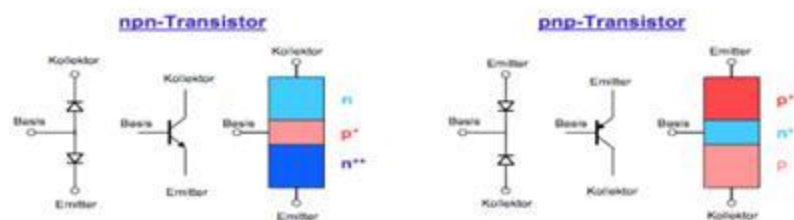


Figure I-20: Représentation symbolique d'un transistor bipolaire [39]

I.3.2.1 Caractéristique d'un transistor:

La figure I.21 représente les caractéristiques d'un transistor bipolaire NPN en montage émetteur-commun dont les différentes fonctions et régimes sont :

- La fonction $I_c = f(V_{ce})$ (courbes vertes) correspond aux caractéristiques de sortie. Le courant dépend de la valeur du courant de base (I_b).
- La caractéristique d'entrée du transistor correspond à la fonction $V_{be} = f(I_b)$ (courbe bleue), elle est représentative d'une jonction PN polarisée en direct entre la base et l'émetteur
- La fonction $I_c = f(I_b)$ (courbe rouge) est la caractéristique de transfert en courant. C'est un faisceau de droites de pente β (ordre de grandeur de $\beta \sim 100$), le facteur β est appelé gain de courant. On peut donc dire que le transistor se comporte comme un générateur de courant commandé par un courant. [40]

On peut séparer deux domaines:

- un domaine linéaire: $I_c = \beta I_b$ qui correspond sur les caractéristiques de sortie aux positions de courbes où I_c varie peu avec V_{ce} pour une valeur de I_b donnée

un domaine de saturation : du courant de sortie I_C qui correspond à la partie coudée des courbes de sortie ; en effet quand la tension V_{CE} diminue pour devenir très faible, la jonction collecteur-base cesse d'être polarisée en inverse, et le courant I_c décroît alors très rapidement (voir Fig I. 21). [40]

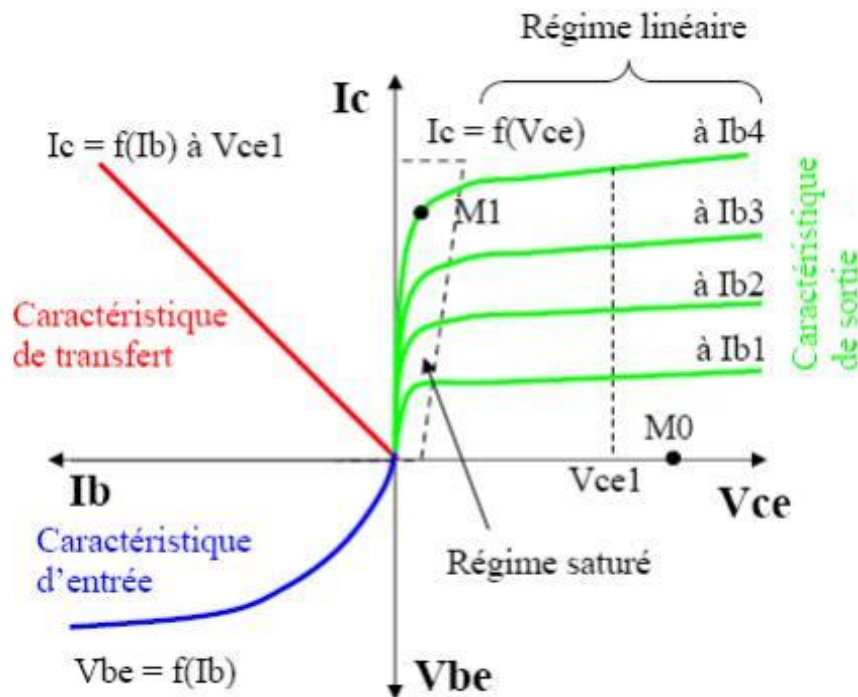


Figure I-21: Caractéristiques électriques d'un transistor bipolaire NPN en montage émetteur commun [41]

En commutation, le transistor bipolaire est équivalent à un interrupteur fermé ou ouvert commandé en courant. Lorsqu'on injecte un courant I_b suffisant (I_{bsat}) dans la base B, le transistor est dit saturé (point M1 de la figure I.21), c'est-à-dire qu'il se comporte comme un interrupteur fermé : le courant I_c de puissance va pouvoir circuler. Si $I_b = 0$ (pas de courant dans la base) alors le transistor est dit bloqué (point M0 de la figure I.21), c'est-à-dire qu'il se comporte comme un interrupteur ouvert : le courant I_c de puissance ne peut pas circuler. [41]

En faisant varier I_b tout en conservant le transistor en régime linéaire on peut utiliser le transistor en amplificateur de courant. On définit alors son gain d'amplification :

$$\beta = I_c / I_b$$

Pour un transistor PNP, le principe est le même, mais les courants I_c et I_b sont inversés.[41]

I.3.3 Transistor MOSFET :

Le Transistor à Effet de Champ à Métal Oxyde Semi-conducteur (MOSFET : Metal Oxyde Semi-conducteur Field Effect Transistor) a sa grille isolée du canal par une couche de dioxyde de silicium (SiO_2). Le transistor MOS possède 4 électrodes : la Source (Source) S: point de départ des porteurs, le Drain (Drain) D : point de collecte des porteurs. La Grille (Gate) G et le Substrat (Body) B sont les électrodes de la capacité MOS qui contrôle le nombre de porteurs présents dans le canal(voir Fig I-22 & Fig I-23) .[42]

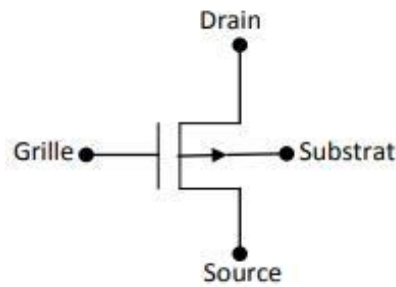


Figure I-22: MOSFET à canal P[43]

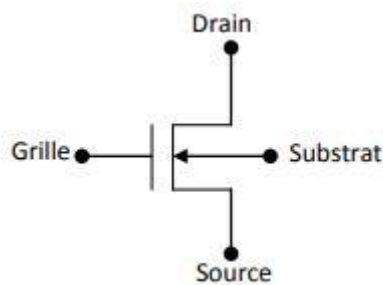


Figure I-23: MOSFET à canal N[43]

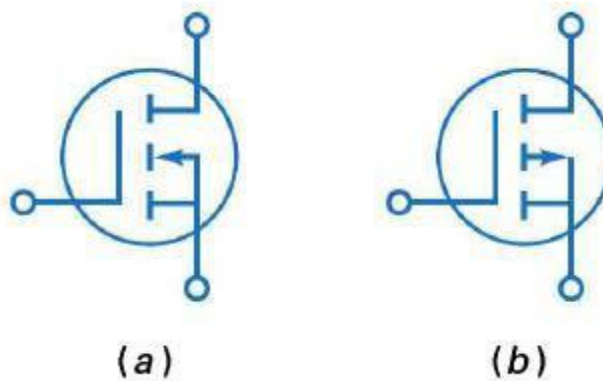


Figure I-24: (a) canal N (b) canal P [44]

Le transistor MOSFET à enrichissement de canal, qu'on représente sur (figure I-25), est constitué d'un substrat cristallin de semi-conducteur (Si) dopé positivement, avec de part et d'autre, deux zones dopées négativement. Ces deux zones correspondent à la source et au drain du transistor, entre les quelles est appliquée une tension donnant lieu à la circulation du courant. [45]

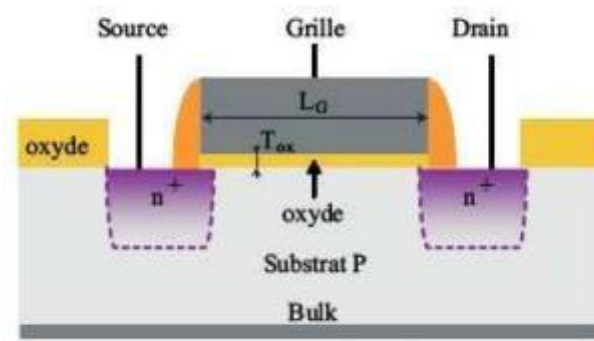


Figure I-25: Représentation schématique d'un transistor Mosfet [43]

Les types fondamentaux de MOSFET :

I.3.3.1 MOSFET à appauvrissement de canal N

pour le cas du Mosfet canal N, si on applique une tension négative sur la grille par rapport au substrat, les électrons sont repoussés et la conductivité du canal diminue. [43]

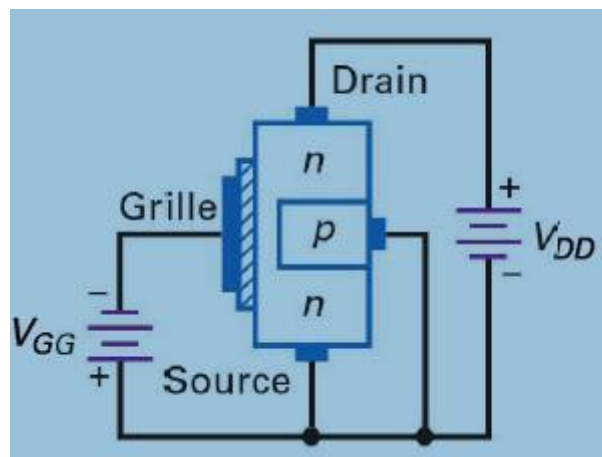


Figure I-26: D- MOSFET avec la grille négative [44]

I.3.3.2 MOSFET à appauvrissement de canal P :

Pour le cas du Mosfet canal P : si on applique une tension positive sur la grille par rapport au substrat, les trous sont repoussés et la conductivité du canal diminue. [43]

I.3.3.3 MOSFET à enrichissement canal N :

En appliquant une tension positive sur la grille, on attire les électrons à l'interface isolant-semi-conducteur et on repousse les trous. A partir d'une certaine valeur : tension de seuil V_{th} (Threshold Voltage), une couche d'inversion apparaît et le transistor devient de plus en plus passant (voir Fig I-27).[46]

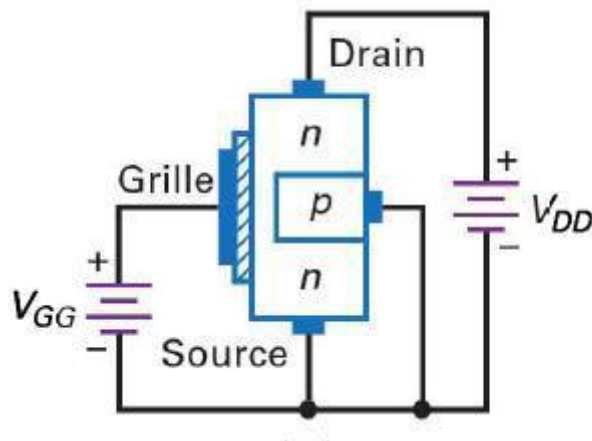


Figure I-27: D-MOSFET avec la grille positive [44].

I.3.3.4 MOSFET à enrichissement canal P :

Dans le cas de l'E-MOSFET canal P, si on applique une tension négative sur la grille par rapport au substrat, les électrons sont repoussés et les trous minoritaires sont attirés. A partir d'une certaine valeur : tension de seuil V_{th} (Threshold Voltage), une couche d'inversion apparaît et le transistor devient de plus en plus passant. [46]

Les transistors MOS à enrichissement sont bloqués sans tension de commande sur la grille (NORMALLY OFF), ils deviennent passants à partir d'une certaine tension de grille V_{th} . Plus $|V_{GS}| > |V_{th}|$, plus le E-MOS devient passant [46]

I.3.4 Le transistor bipolaire L'IGBT :

Dans les convertisseurs de puissance, les modules IGBT sont associés à une carte appelée "driver". Le driver a pour fonction de piloter son module IGBT associé et de garantir son intégrité en cas de défauts (surintensité et surtension). Le driver constitue un sous système au sein du convertisseur. Il devient aussi important que le module IGBT. L'enjeu est de taille car certains modules coûtent plus de 1000 l'unité. [47]



Figure I-28: schéma d'un transistor bipolaire l'IGBT[37]

L'IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) est un transistor bipolaire à porte isolée. Il associe le MOS et le Bipolaire (figure I.28). Il cumule les avantages des transistors bipolaires (tensions et courants élevés) et ceux des transistors MOSFET (rapidité des commutations, énergie de commande faible) sans en éliminer totalement les inconvénients. L'IGBT présente l'inconvénient d'un blocage moins rapide que le MOSFET, ce qui limite sa fréquence de commutation à quelques dizaines de kHz, et son coût est très élevé. [37]

I.3.5 Le thyristor :

Le thyristor est un interrupteur statique. Il est composé de quatre couches PNPN formant trois jonctions J_a , J_c et J_k . Il est réversible en tension et supporte des tensions anode/cathode VAK aussi bien positives que négatives; unidirectionnelle en courant (c'est à dire qu'il ne peut conduire un courant notable que dans un sens), [48]

(Fig I. 29) représente trois jonctions en série :

Jk : jonction cathode

Jc : jonction de commande

Ja : jonction anode

Le thyristor est un dispositif semi-conducteur formé de quatre couches de dopages alternés et possédant trois électrodes:

La couche de cathode de type N est mince (autour de 20 μm) et fortement dopée. Elle est reliée par métallisation à l'électrode de cathode (K en abrégé).

La couche de commande de type P est mince (autour de 50 μm) et moyennement dopée. Elle est reliée à l'électrode de gâchette (G en abrégé).

La couche de blocage de type N est épaisse (autour de 250 μm) et faiblement dopée.

La couche d'anode de type P est mince (autour de 70 μm) et moyennement dopée. Elle est reliée par métallisation à l'électrode d'anode (A en abrégé). [48]

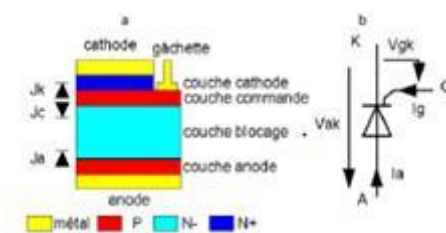


Figure I-29: schéma du thyristor [48]

I.3.5.1 Principe de fonctionnement :

I.3.5.1.1 Blocage de thyristor :

L'une au moins des jonctions PN du thyristor est bloquée :

Sous une tension inverse :

La tension anode/cathode est négative et les deux jonctions J_a et J_k sont polarisées en inverse ce qui bloquent le courant de fuite à une intensité très faible en raison des différences de dopage entre les 4 couches PNPN. C'est la jonction d'anode qui supporte la plus grande partie de la tension inverse. [49]

Sous une tension directe :

la tension anode cathode est positive $V_{AK} > 0$ et le courant de gâchette « i_g » est nul ou très faible, le thyristor n'est pas amorcé au préalable. [49]

I.3.5.1.2 Amorçage du thyristor :

L'amorçage d'un thyristor est obtenu par différents phénomènes physiques, dans tous les cas l'amorçage rend le thyristor conducteur de l'anode vers la cathode ($i_{AK} > 0$). La tension V_{AK} est alors faible de l'ordre de quelques dixièmes de volts. Dans un amorçage par tension : le courant de gâchette à une intensité i_g nulle. Si la tension V_{AK} dépasse une certaine valeur V_{b0} toujours élevée, il y a amorçage et conduction du thyristor (voir Fig I-30). [49]

Caractéristique et limites de fonctionnement :

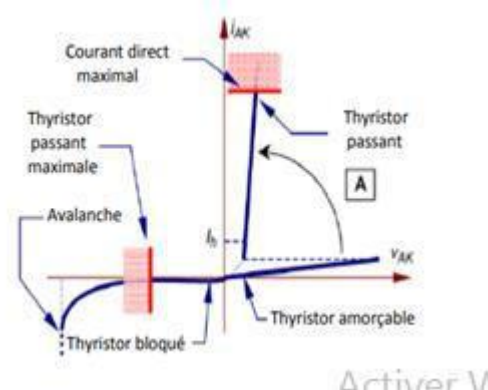


Figure I-30: caractéristique et limitation de fonctionnement. [49]

I.3.6 Optocoupleur :

Un optocoupleur est un composant ou un ensemble de composants qui permet le transfert d'informations entre deux parties électroniques isolées l'une de l'autre d'un point de vue électrique. La première partie est un émetteur, et la seconde partie est un récepteur. On peut l'assimiler à un composant qui a une entrée (émetteur) et une sortie (récepteur). [50]

Quand on parle d'émission, c'est en général parce que l'on émet quelque chose. Ici, il s'agit d'une émission de lumière. D'où le préfixe Opto de Optocoupleur. L'émetteur produit donc de la lumière (qui peut être visible ou invisible), et le récepteur, qui est sensible à la lumière émise par l'émetteur (sensibilité maximale à la longueur d'onde utilisée pour la partie émission), réagit plus ou moins en fonction de la quantité de lumière reçue. [50]

Le couplage entre l'émetteur et le récepteur s'effectue donc intégralement par de la lumière. L'intégration dans un même boîtier d'une source lumineuse et d'un récepteur photosensible

peut être assimilée à un relais, à un amplificateur, et même à un transformateur. Il existe une quantité assez impressionnante d'optocoupleurs. [50]

I.4 Histoires des convertisseurs statiques :

I.4.1 Les convertisseurs statiques :

C'est dans le domaine du redressement de forte puissance que se développent les premiers convertisseurs statiques destinés à remplacer les convertisseurs électromécaniques. Dans les années 1950, pour la traction électrique, on s'oriente vers la solution – transport en alternatif + motorisation en continu. Les convertisseurs statiques nécessaires sont réalisés à l'aide de redresseurs à vapeur de mercure (ignitrons) ayant la même fonctionnalité que les thyristors. [51]



Figure I-31: la position d'un convertisseur [41]

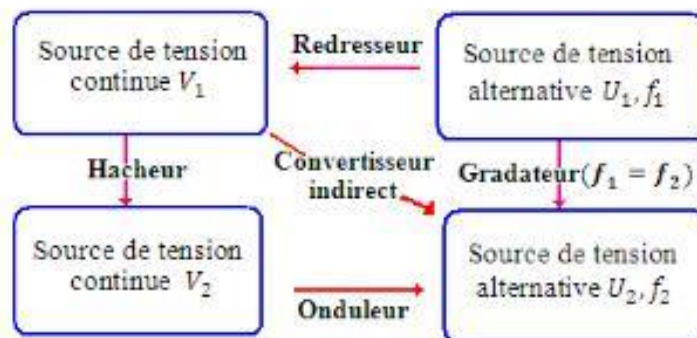


Figure I-32: les différents convertisseurs statiques [41]

I.4.2 Les convertisseurs Alternatif – Alternatif :

I.4.2.1 Gradateur :

L'inventeur afro-américain Granville Woods, qui était aussi l'un des premiers ingénieurs afro-américains en génie mécanique et électrique, est considéré comme le père du premier « gradateur sécurisé » destiné au théâtre et inventé en 1890. Avant cette invention, les

gradateurs étaient commandés manuellement au moyen de panneaux qui produisaient généralement une grande quantité de chaleur potentiellement dangereuse. [52]

I.4.3 Convertisseurs Alternatif - continu

I.4.3.1 Les redresseurs :

Entre 1950 et 1956, la technologie utilisée dans ces commutateurs a pris un nouveau tournant avec le développement du redresseur commandé au silicium (SCR), un dispositif semi-conducteur également connu sous le nom de thyristor. Ces composants, beaucoup plus efficaces que leurs prédécesseurs et moins dangereux car ils émettent beaucoup moins de chaleur, ont aussi rendu possible l'utilisation de systèmes de commande à distance analogiques. [52]

I.4.4 Convertisseur continu – alternatif :

I.4.4.1 Les Onduleurs :

1973 : Le premier Onduleur Salicru entre dans le marché des systèmes d'alimentation ininterrompue (Onduleurs) avec la conception de son premier prototype. [16]1980, l'amélioration de la technologie des microprocesseurs a facilité la mise en œuvre de divers algorithmes d'optimisation. Vers la fin des années 1980, la technologie d'onduleur VVVF des pays développés tels que les États-Unis, le Japon, l'Allemagne et la Grande-Bretagne a été mise en pratique et les produits ont été mis sur le marché et largement utilisés. Les premiers onduleurs ont été développés par un Japonais qui a acheté un brevet britannique. [53]

I.4.5 Convertisseur continu – continu :

I.4.5.1 Hacheur :

L'invention se rapporte à un convertisseur DC/DC de tension, c'est-à-dire un dispositif qui a pour objet d'assurer la fluence d'énergie entre deux sources de tension. L'invention se rapporte en particulier à un convertisseur du type couramment appelé hacheur, correspondant aux applications moyennes et forte puissance. [54]

I.5 CONCLUSION

Dans ce chapitre on a étudié les différentes histoires d'invention des composants électronique et le fonctionnement des trois types de semi-conducteurs: -semi-conducteurs non commandé: diode

-semi-conducteurs contrôlé sans commande de blocage : thyristor,

- semi-conducteurs contrôlés avec commande de blocage : les transistors, GTO et enfin nous avons clôturé notre chapitre par les histoires des quatre convertisseurs statiques (hacheur, onduleur, redresseur, gradateur).

CHAPITRE II:

*Généralités sur les convertisseurs
statiques et les différentes stratégies de
commande des onduleurs triphasés*

II. 1 Introduction:

Les éléments de puissance permettant de réaliser des montages concrets pour convertisseur d'énergie basée sur des systèmes statiques. [35]

En définitif les convertisseurs statiques ne sont que des composants électrique à base de semi-conducteurs capables de modifier la tension et /ou la fréquence de l'onde électrique suivant la nature de la source :

- Source de la tension continue
- Source de la tension alternative. [35]

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 deuxième chapitre présente l'onduleur triphasé. [55]

II.2 Principes et Intérêts des convertisseurs statiques

Les convertisseurs statiques ont été conçus pour réaliser des transferts d'énergie de façon contrôlable d'une source électrique vers une charge. Ils sont principalement construits à partir d'un ensemble de semi-conducteurs. L'énergie transférée est contrôlée par commande à l'ouverture et à la fermeture de ces derniers. [56]

Dans certains cas, des composants supplémentaires, tels que des condensateurs ou des inductances, peuvent être utilisés pour réaliser des stockages temporaires d'énergie. Le concepteur doit alors agencer tous ces composants pour pouvoir réaliser sa structure. [56]

II.2.1 Intérêt du convertisseur continu – continu :

Convertisseurs continu-continu, permettent d'obtenir une tension continue constante et ce, avec un rendement voisin de l'unité. Ils jouent le même rôle que les transformateurs en courant alternatif. Ils sont principalement utilisés pour la variation de vitesse des moteurs à courant continu ainsi que dans les alimentations à découpage à courant continu. Ces convertisseurs permettent le contrôle du transfert d'énergie entre une source et une charge qui est, soit de nature capacitive (source de tension), soit de nature inductive (source de courant)(voir Figure II-1). [57]

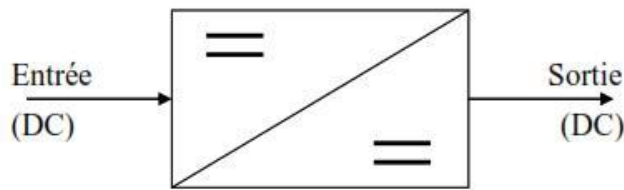


Figure II-1: schéma d'un convertisseur DC/DC.[57]

II.2.2 Types de convertisseurs DC – DC

II.2.2.1 Hacheur série :

Le hacheur série, dit aussi abaisseur de tension ou « buck converter », commande le débit :

- D'un générateur de tension dont la tension est toujours positive.
- Dans un récepteur de courant dont le courant ne peut devenir négatif. [58]

II.2.2.2 Hacheur parallèle ou Boost:

Le hacheur parallèle ou élévateur ou « boost converter » commande le débit

- d'un générateur de courant dont le courant i est toujours positif,
- dans un récepteur de tension dont la tension u ne peut devenir négative.[58]

II.2.3 Intérêt du convertisseur Continu – Alternatif :

Un convertisseur continu-alternatif permet d'obtenir une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace à partir d'une tension continue donnée (voir Figure II-2).. [57]

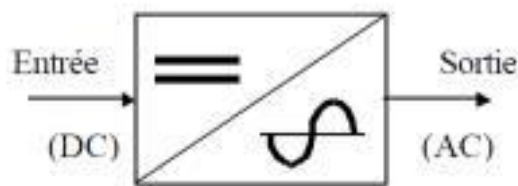


Figure II-2: schéma d'un convertisseur DC-AC.[38]

Quelques domaines d'application :

- production de tension sinusoïdale de fréquences moyennes (de quelques kHz à quelques 10Khz): soudage, chauffage par induction,
- alimentations alternatives de secours fonctionnant sur batteries d'accumulateurs,
- alimentation des moteurs à courant alternatif à fréquence variable. [59]

II.2.4 Les type de convertisseurs DC-AC :

Onduleur autonome et onduleur non autonome

II.2.5 L'intérêt des Convertisseurs statiques alternatifs-continus :

Un convertisseur alternatif-continu, est utilisé principalement pour alimenter les charges fonctionnant avec une tension continue lorsqu'on dispose d'une source Alternatif, la tension de sortie est non alternative (valeur moyenne non nulle). Cette valeur moyenne peut être réglée dans le cas d'un redresseur commandé. Ils sont utilisés principalement pour alimenter des charges fonctionnant avec une tension continue ou pour recharger des batteries (voir Figure II-3).. [60]

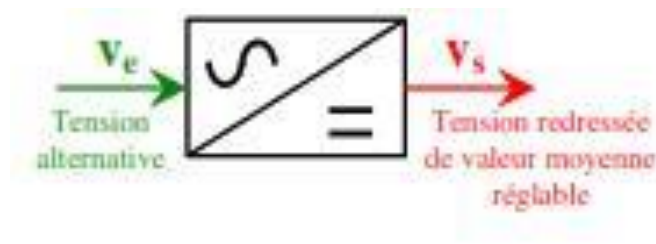


Figure II-3: schéma d'un convertisseur AC-DC.[60]

II.2.6 Les type de convertisseurs AC-DC :

II.2.6.1 Les redresseurs :

Ce sont des convertisseurs statiques alternatifs continus permettant d'obtenir des tensions (ou courant) de valeur moyenne réglable. Utilisé pour l'alimentation des moteurs à courant continu, charge des batteries. [61]

II.2.7 L'intérêt des convertisseurs alternatif-alternatif :

Un convertisseur alternatif-alternatif, qui donne en sortie une tension alternative de même fréquence que la tension d'entrée et dont on peut réduire la valeur efficace de façon continue. Ce convertisseur est essentiellement utilisé pour varier la vitesse des moteurs alternatifs comme les moteurs asynchrones ou synchrones en variant leur tension d'alimentation (voir Figure II-4). [60]

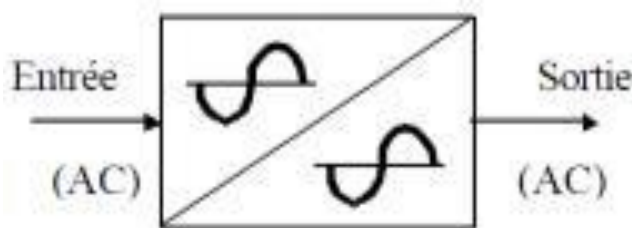


Figure II-4: schéma d'un convertisseur AC-AC[38]

II.2.8 Les type de convertisseurs AC-AC :

II.2.8.1 Les cyclo convertisseurs :

Ce sont des convertisseurs alternatif-alternatif (ou convertisseur de fréquence), c'est à-dire qu'il permet la conversion d'une tension alternative de fréquence f_1 en tension alternative de fréquence f_2 . [62]

II.2.8.2 Les gradateurs

Le gradateur est un convertisseur qui permet de convertir une tension alternative de fréquence fixe et de valeur efficace constante en une tension alternative de valeur efficace réglable. [67]

II.3 Les onduleurs triphasés :

L'onduleur triphasé en pont est constitué d'une source de tension continue et de six interrupteurs monté en pont (Figure II.5) [57]

Chaque interrupteur de puissance est en réalité réalisé par un transistor (ou un thyristor) en antiparallèle avec une diode [62].

Pour assurer la continuité des courants de sortie alternatif i_A , i_B et i_C , les paires des interrupteurs (K_1, K_4) , (K_3, K_6) et (K_5 et K_2) doivent être complémentaires deux à deux [63]

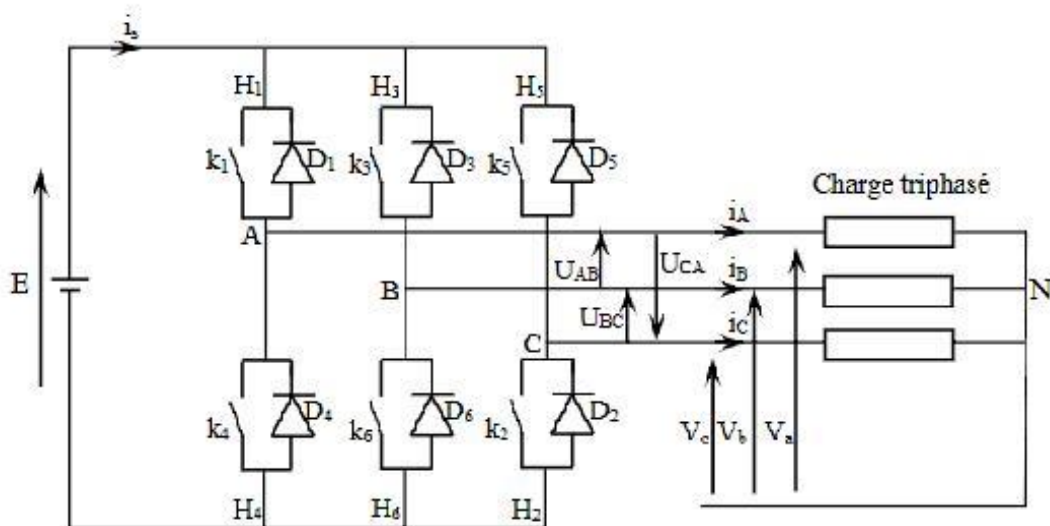


Figure II-5: Structure d'un onduleur triphasé en pont.[63]

II.3.1 Types d'onduleurs :

II.3.1.1 Onduleur autonome :

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. Il dépend essentiellement de la nature du générateur et du récepteur entre lesquels il est monté cela conduit à distinguer. [64]

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

II.3.1.2 Onduleur non autonome :

C'est le nom donné au montage redresseur tout thyristors (pont de Graëtz) qui, en commutation naturelle assistée par le réseau auquel il est raccordé, permet un fonctionnement en onduleur (par exemple par récupération de l'énergie lors des périodes de freinage dans les entraînements à moteurs électriques). À la base du développement des entraînements statiques

à vitesse variable pour moteurs à courant continu et alternatif, cyclo convertisseurs, onduleurs de courant pour machines synchrones et asynchrones, jusqu'à des puissances de plusieurs MW.[65]

II.3.2 Les applications des onduleurs :

Parmi les nombreux domaines d'emploi des onduleurs autonomes, on trouve principalement Les onduleurs à fréquence fixe à commutation forcée : Alimentés le plus souvent par une batterie d'accumulateur, ils jouent d'ordinaire le rôle d'alimentation de sécurité, ils constituent à ce titre, le principe déboucle actuel des onduleurs autonomes. [65]

Les onduleurs à fréquence variable à commutation forcées : Alimentés à partir du réseau industriel par l'intermédiaire d'un montage redresseur, ils délivrent une tension de fréquence et de valeur efficace nécessaires pour faire tourner à vitesse variable un moteur à courant alternatif. [65]

II.3.2.1 Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone

La vitesse d'un moteur synchrone est fixée par la pulsation des courants statiques. Pour changer de vitesse il faut donc changer la fréquence des tensions d'alimentation. Il faut donc redresser la tension du réseau puis l'onduler à la fréquence désirée (voir Figure II-6). [66]

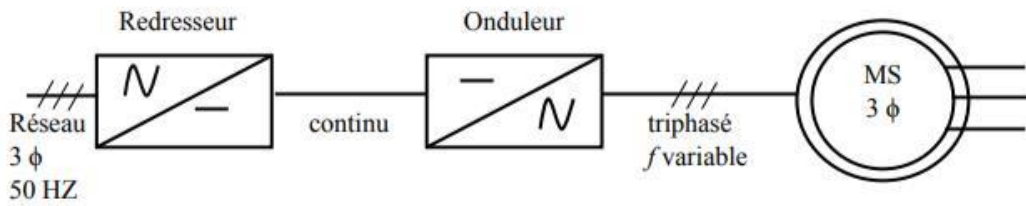


Figure II-6: Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone. [66]

II.3.2.2 Alimentation de secours

Lors d'une panne d'électricité, un onduleur assure la continuité de l'alimentation des machines à partir de batteries. En informatique professionnelle, un onduleur est indispensable pour éviter la perte d'informations en cas de panne du secteur (voir Figure II-7). [66]

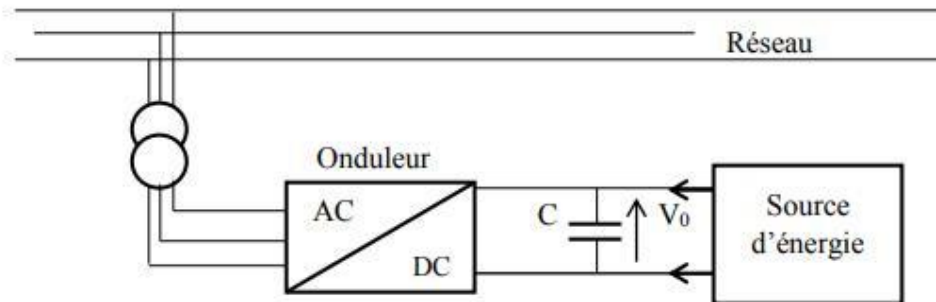


Figure II-7: Alimentation de secours [66].

II.3.2.3 Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes

La France fournit de l'énergie électrique à la Grande-Bretagne, mais la fréquence du réseau anglais est 60 Hz. Il faut donc adapter la fréquence. (voir Figure II-8). [67]

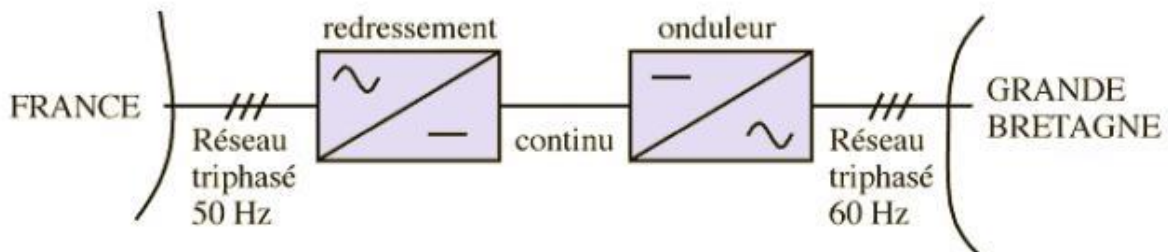


Figure II-8: Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes. [67]

II.3.3 Stratégies de commande d'onduleur de tension triphasé

Pour découper la tension appliquée à l'entrée de l'onduleur, il faut intervenir à la commande des interrupteurs qui constituent l'onduleur. Donc on distingue plusieurs stratégies de commande des onduleurs. [63]

II.3.3.1 La commande en MLI des onduleurs triphasés

Dans un onduleur à modulation de largeur d'impulsion, au lieu de former chaque alternance d'une tension de sortie avec un seul créneau rectangulaire, on la forme de plusieurs créneaux de largeur convenable. Le schéma de l'onduleur reste le même *figure II.5*, c'est la commande des interrupteurs qui est modifiée. Les instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs sont donnés par les intersections de signal de référence avec la porteuse. [68]

Le transfert d'énergie est contrôlé par le rapport entre intervalles d'ouverture et de fermeture (rapport cyclique) de chaque interrupteur, donc par la modulation de largeurs d'impulsions de contrôle de ces interrupteurs (MLI), cette technique est basée sur la comparaison d'un signal de référence appelé aussi modulatrice d'amplitude A_r et de fréquence f , avec un signal appelé porteuse d'amplitude A_p et de fréquence f_p très élevée, (*Figure II.9*). [68]

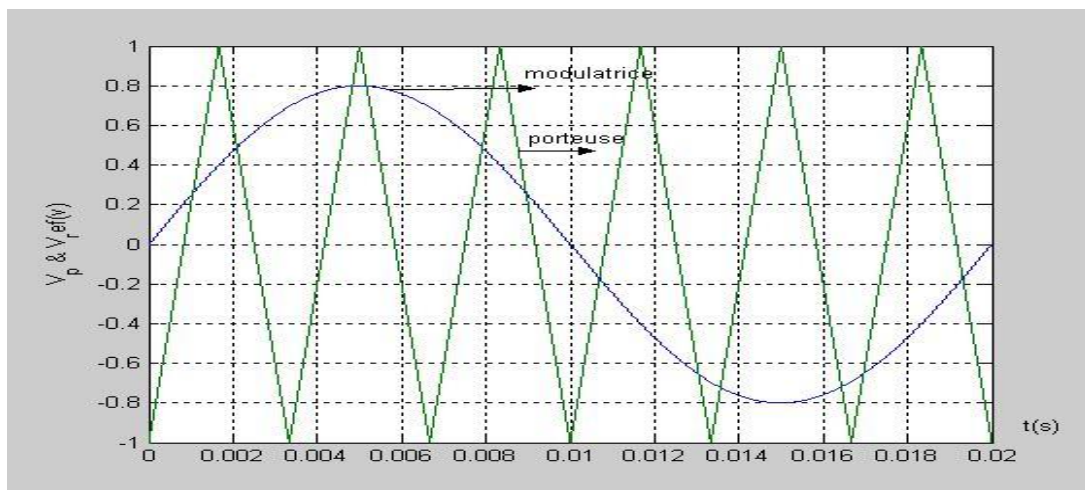


Figure II-9: Principe de la modulation.

II.3.3.2 Technique de production d'onde MLI:

Plusieurs techniques d'obtention d'onde MLI sont utilisées pour générer le signal de contrôle nécessaire à la commande et au blocage des éléments semi-conducteurs par exemple :

Impulsions de commande pour thyristors et courant de base pour les transistors. Le plus souvent, on fait appel à la technique analogique, numérique ou en utilisant les deux au même temps. [69]

II.3.3.3 Technique analogique:

Cette technique est basée sur la comparaison entre une porteuse triangulaire et la référence, la comparaison est réalisée à l'aide d'un amplificateur opérationnel (*figure II.10*). [69]

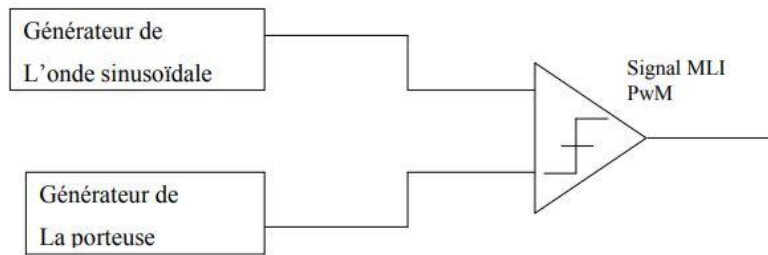


Figure II-10: technique analogique [68]

II.3.3.4 Technique numérique:

Elle est basée sur l'utilisation des microprocesseurs qui assurent la génération des impulsions en se servant d'un programme définissant les angles d'amplitudes calculés au préalable. Cette technique a apporté une grande amélioration significative en matière de simplicité et performance du circuit de commande (Figure II.11) [64]

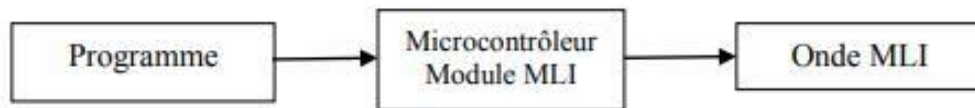


Figure II-11: technique numérique [68]

II.3.3.5 Technique hybride :

Elle consiste à combiner les deux techniques précédentes analogique et numérique : L'onde de référence est obtenue d'une manière numérique (programmer sa fonction), par contre l'onde porteuse est obtenue d'une manière analogique, La comparaison entre les deux signaux se fait par un comparateur analogique (Figure II.12). [64]

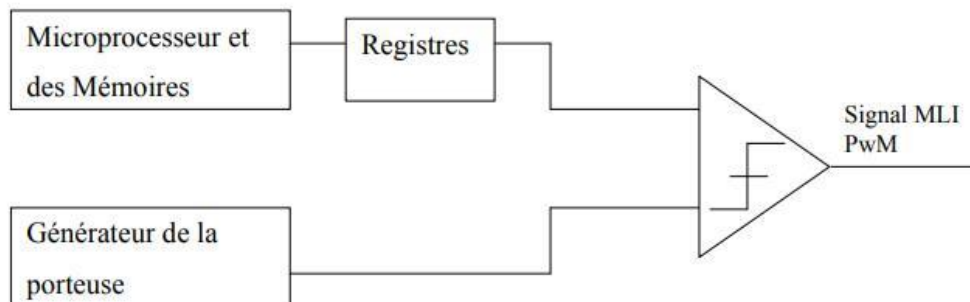


Figure II-12: technique hybride [68]

II.3.3.6 Principaux avantages de la MLI:

La modulation de largeur d'impulsion présente les avantages suivants :

- Une bonne neutralisation d'harmonique par rapport aux onduleurs à onde carrée ou en un seul créneau.

- Elle permet de repousser vers des fréquences élevées les harmoniques de la tension de sortie, ce qui facilite le filtrage.
- Elle permet de faire varier la valeur du fondamental de tension de sortie.
- La MLI permet aussi l'alimentation de plusieurs ensembles onduleurs, moteurs asynchrones à partir d'une même source continue. [70]

II.3.3.7 Commande en pleine onde 180°

Lorsque la séquence de commande de fermeture d'un interrupteur coïncide avec la commutation d'ouverture de l'interrupteur situé sur le même bras, on parle dans ce cas, d'un onduleur de type 180°, figure (II.1) [71]

Pour le premier bras de l'onduleur, l'interrupteur K_1 est fermé pendant une demi-période (180°), et K_1' est fermé pendant l'autre demi période. Pour les deux autres bras de l'onduleur, on applique la même procédure, mais avec un décalage de $2\pi/3$ et $4\pi/3$ respectivement, par rapport au premier bras (voir le Tableau II-1).. [71]

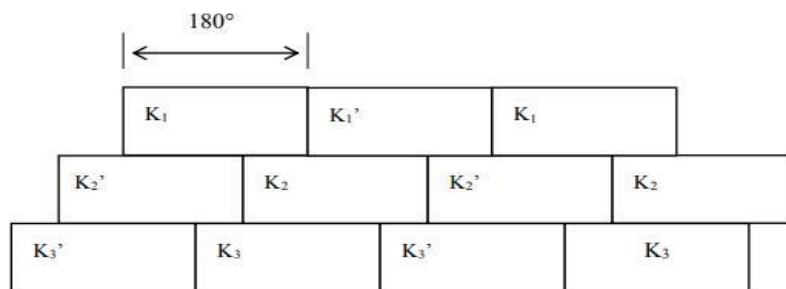


Tableau II-1: Commande de 180°. [47]

En appliquant ce type de commande pour l'onduleur, on obtient un système de tensions alternatives triphasées caractérisées par l'absence des harmoniques de rangs multiples de trois. [71]

II.3.3.8 Commande 120°

Dans la commande 120° chaque interrupteur est commandé pour une durée un tiers d'une période. D'après le *tableau II.2*, la commande de fermeture d'un interrupteur ne coïncide pas avec l'ouverture de l'autre interrupteur située dans le même bras, on parle dans ce cas d'un onduleur de type 120°. [72]

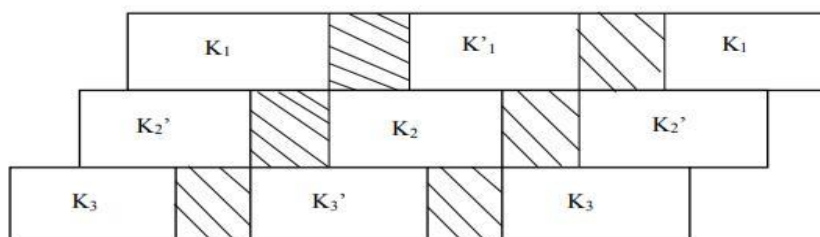


Tableau II-2: Commande de 120°. [47]

Avec cette technique de commande, chaque interrupteur fonctionne pendant 120°, telle que la séquence est K1, K2 puis K3 successivement. De mêmes pour les interrupteurs K'1, K'2 et K'3 avec un décalage de 60° par rapport à K1, k2, k3. (voir Tableau II-2). [72]

II.4 Modélisation de l'onduleur de tension à deux niveaux

L'objectif de la modélisation est de trouver une relation entre les grandeurs de commande et les grandeurs électriques de la partie alternative et continue de l'onduleur. Dans cette étude on considère le cas idéal d'un onduleur triphasé à deux niveaux de tension qui est modélisé par des interrupteurs parfaits à commutation instantanée. Le schéma de cet onduleur est donné dans la II-13.

Sachant que dans un régime équilibré $v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = 0$, nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} V_{an} = v_{ao} + v_{on} \\ V_{bn} = v_{bo} + v_{on} \\ V_{cn} = v_{co} + v_{on} \end{cases} \quad (II.1)$$

En faisant la somme des équations du système (1.23), on obtient :

$$v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = v_{ao} + v_{bo} + v_{co} + 3v_{on} = 0 \quad (II.2)$$

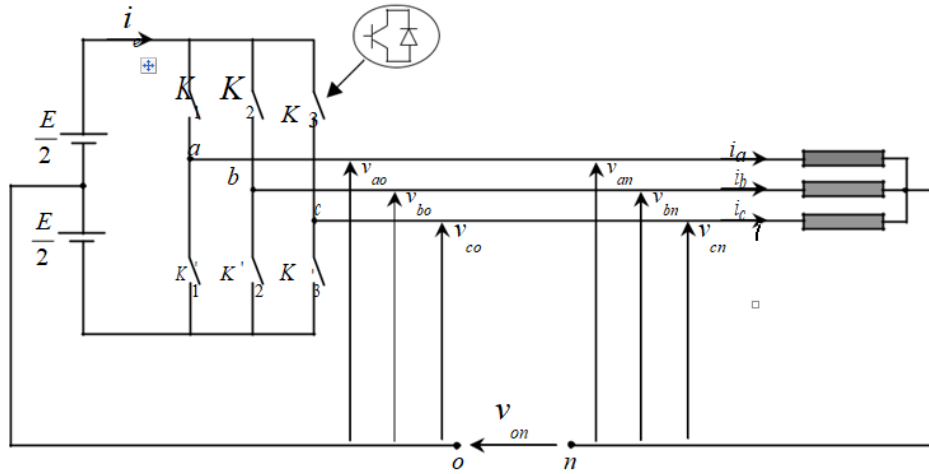


Figure II-13: Schéma de l'onduleur de tension

D'où :

$$v_{ao} + v_{bo} + v_{co} = -3v_{on} \quad (II.3)$$

Donc :

$$v_{on} = -\frac{1}{3}(v_{ao} + v_{bo} + v_{co}) \quad (II.4)$$

En substituant l'équation (4) dans le système (1), il vient alors :

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ao} \\ v_{bo} \\ v_{co} \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

Les deux interrupteurs de chaque branche de l'onduleur sont commandés de manière complémentaire, en appliquant une modulation de largeur d'impulsion.

A partir du schéma de l'onduleur, les tensions fournies par les demi-ponts sont:

$$v_i - v_o = \begin{cases} +\frac{E}{2} & \text{si } k_i : \text{fermé} \\ -\frac{E}{2} & \text{si } k'_i : \text{fermé} \end{cases} \quad \text{avec : } i = a, b, c \quad (\text{II.6})$$

Les tensions aux bornes de la sortie de l'onduleur sont données par :

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

Avec S_i est l'état de l'interrupteur K_i , supposé parfait, tel que pour le i ème bras de l'onduleur ($i = a, b, c$) :

- $S_i = 1$ si l'interrupteur en haut est fermé et l'interrupteur en bas est ouvert ;
- $S_i = 0$ si l'interrupteur en haut est ouvert et l'interrupteur en bas est fermé ;

II.4.1 La commande MLI sinus-triangle

Le bloc de commande du convertisseur reçoit les tensions de référence pour les trois phases. Ces tensions sont comparées avec un signal triangulaire et, en fonction du signal d'erreur, on commande les semi-conducteurs de l'onduleur. Le mode de fonctionnement est très simple :

- si $v_{ref} > v_p$: l'interrupteur supérieur du bras de pont conduit ;
- si $v_{ref} < v_p$: l'interrupteur inférieur du bras de pont conduit ;

Où v_{ref} représente une des trois tensions de référence et v_p représente le signal triangulaire ou l'onde porteuse. Ce type de commande est appelé commande par modulation de largeur d'impulsion où commande MLI (PWM en anglais). La II-14 illustre le principe de base de cette technique.

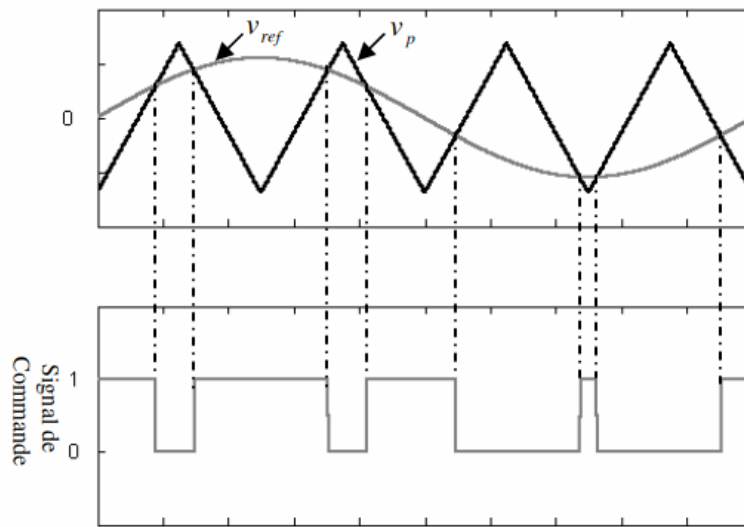


Figure II-14: Le principe de base de la commande par MLI.

II.4.1.1 Caractéristiques de la MLI sinus-triangle

Si la tension de référence est sinusoïdale, deux paramètres caractérisent la commande :
L'indice de modulation m et le taux de modulation r .

- **Indice de modulation**

$$m = \frac{f_p}{f_r} \quad (\text{II.8})$$

Où f_r est la fréquence de la tension de référence et f_p est celle de la porteuse.

- **Taux de modulation**

$$r_m = \frac{V_r}{V_p} \quad (\text{II.9})$$

Où V_r est l'amplitude de la tension de référence et V_p est celle de la porteuse.

- **Equation de la porteuse**

La porteuse est un signal triangulaire caractérisé par sa fréquence f_p et sa valeur de crête V_p . On définit l'équation de la porteuse dans sa période $[0, T_p]$ par :

$$\begin{aligned} v_p &= \left(-1 + 4 \frac{t}{T_p} \right) \quad \text{si } t \in \left[0, \frac{T_p}{2} \right] \\ v_p &= V_p \left(3 - 4 \frac{t}{T_p} \right) \quad \text{si } t \in \left[\frac{T_p}{2}, T_p \right] \end{aligned} \quad (\text{II.10})$$

- **Equations des tensions de référence**

La référence est un signal sinusoïdal d'amplitude V_r et de fréquence f_r . En triphasé, les trois tensions sinusoïdales de référence sont données par :

$$\begin{cases} v_{ref-a} = V_r \sin(2\pi f_r t) \\ v_{ref-b} = V_r \sin\left(2\pi f_r t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{ref-c} = V_r \sin\left(2\pi f_r t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

- **Equations des états des interrupteurs**

La commande MLI sinus triangle utilise la comparaison avec les trois composantes de la tension de référence afin de calculer les états S_a , S_b et S_c des interrupteurs de l'onduleur. Ceux-ci sont donnés par l'équation 12 suivante :

$$S_i = \begin{cases} 1 & \text{si } (v_{ref-i} - v_p) \geq 0 \\ 0 & \text{si } (v_{ref-i} - v_p) < 0 \end{cases} \quad \text{avec } i = a, b, c \quad (\text{II.12})$$

II.4.2 Model Simulink de l'onduleur

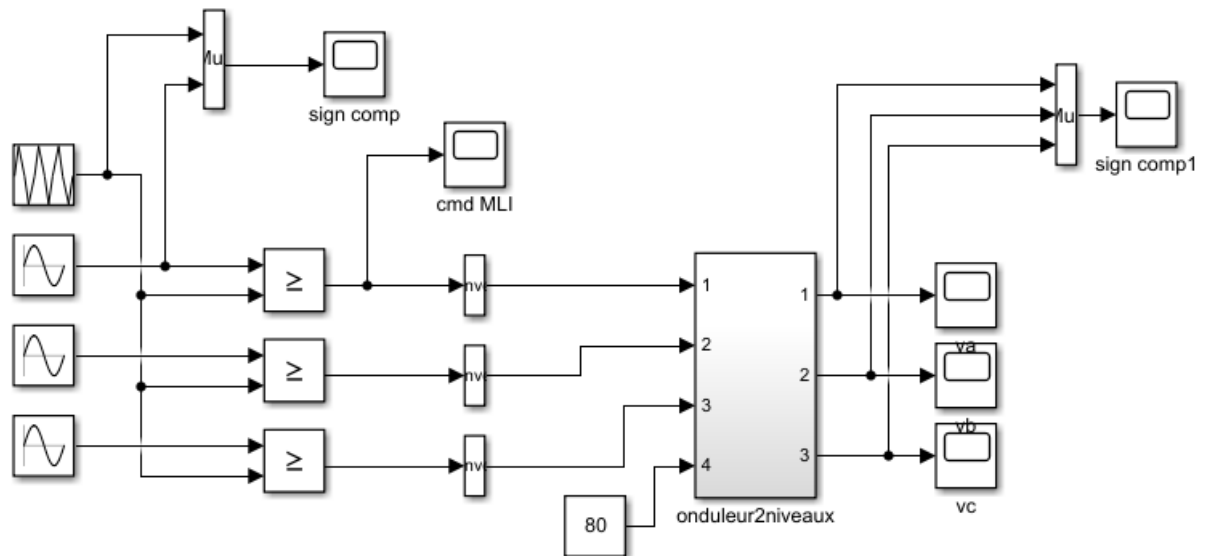
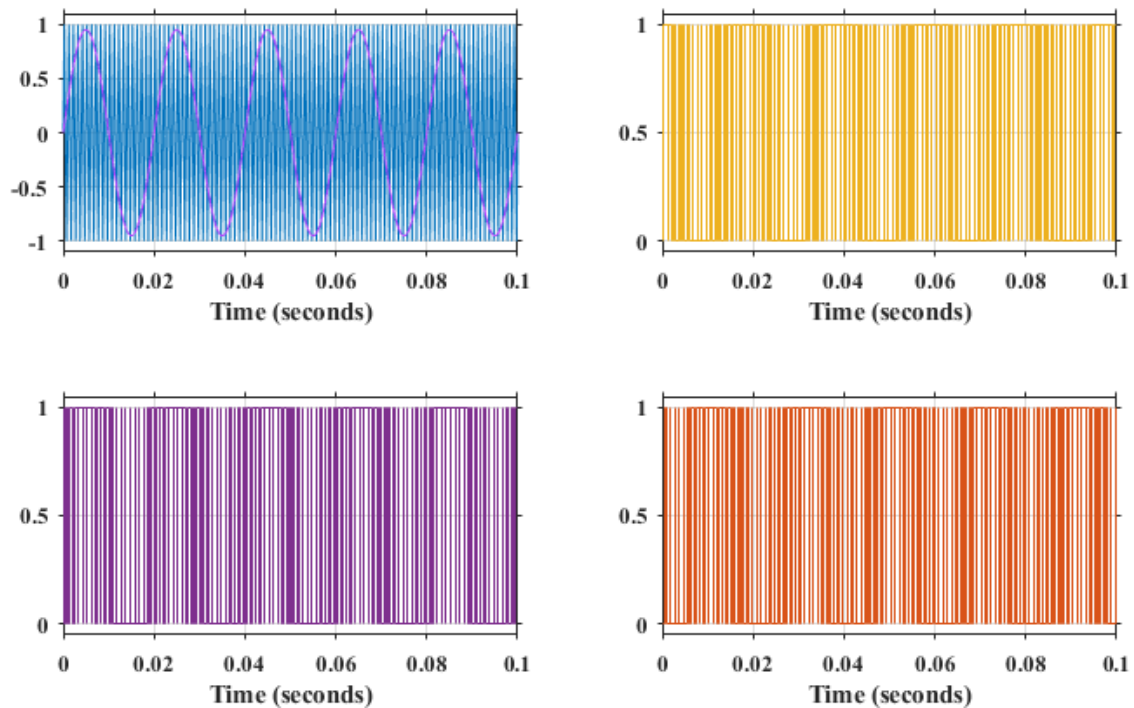


Figure II-15: Model Simulink de l'onduleur.

II.4.3 Résultat de simulation

Les résultats de simulation seront présentés dans cette section. Les différentes formes d'ondes ont été relevées avec une Tension d'entrée 80V et un temps de simulation de 0.1S pour bien visualiser notre résultat



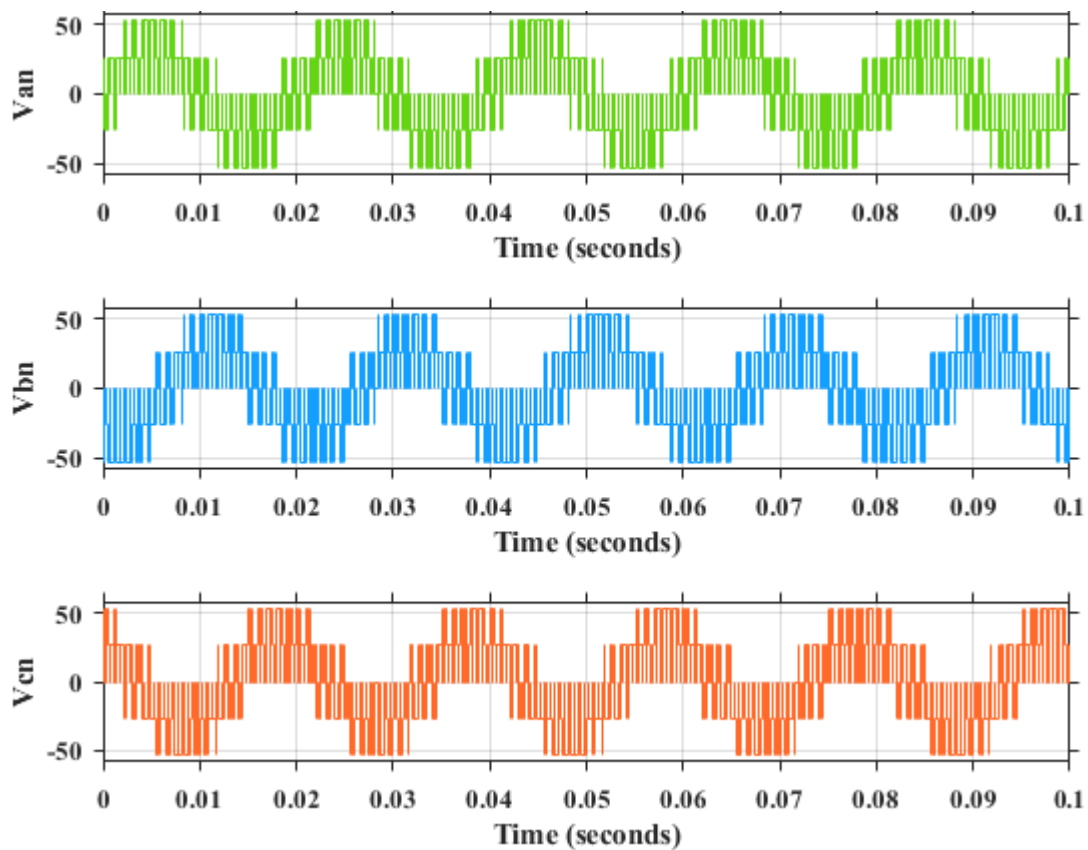


Figure II-16: Résultat de simulation de la MLI, S_a , S_b , S_c et V_{an} , V_{bn} , V_{cn}

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents convertisseurs statiques ainsi une analyse de fonctionnement des onduleurs triphasés et leurs différentes techniques de commandes et nous avons présenté une simulation par la commande MLI.

Dans le prochain chapitre nous allons présenter notre le microcontrôleur STM32F283779D installer dans une LAUNCHXL ce microcontrôleur qui sera l'élément de commande de notre réalisation et le module de puissance (onduleur).

CHAPITRE III :

Réalisation expérimentale

III.1 Introduction :

Nous venons faire une investigation sur les différents convertisseurs, leurs conceptions leurs principes de fonctionnement. Tous les convertisseurs se basent sur les interrupteurs commandés. Dans ce chapitre, nous allons étudier un onduleur triphasé. Cette étude se concrétise sur une réalisation avec l'utilisation d'un microcontrôleur gérant les interrupteurs. Une étude fréquentielle du signal cible. En effet, des degrés de liberté comme angle de fermeture ou d'ouverture de l'interrupteur, nous offre l'opportunité de décider sur un taux de distorsion harmonique minimale, a partir de quoi, nous déciderons sur la valeur de la tension d'entrée continue.

III.2 LAUNCHXL-F28379D :

Le C2000™ Delfino™ LaunchPad™, LAUNCHXL-F28379D, est une carte de développement complète à faible coût. pour les dispositifs Texas Instruments Delfino F2837xD. Le kit LAUNCHXL-F28379D comprend tout le matériel et le logiciel nécessaires au développement d'applications basées sur les dispositifs Delfino F2837xD de Texas Instruments. matériel et le logiciel nécessaires pour développer des applications basées sur les microcontrôleurs F2837xD. Le LaunchPad est basé sur le dispositif super set F28379D, et permet facilement aux utilisateurs de migrer vers un jeu de fonctionnalités inférieur et/ou un nombre de broches inférieur pour le F2837xD. de fonctionnalités et/ou un nombre de broches plus faible une fois que les besoins de conception sont connus. Il offre un outil d'émulation JTAG intégré permettant une interface directe avec un PC pour faciliter la programmation, le débogage et l'évaluation.

En plus de l'émulation JTAG, l'interface USB fournit une connexion série UART entre le dispositif F28379D et le PC

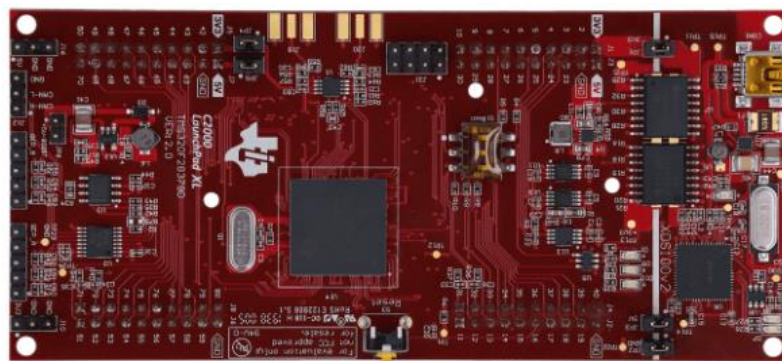


Figure III-1: LAUNCHXL-F28379D

III.2.1 Définition d'un microcontrôleur :

Un microcontrôleur est un circuit intégré micro-programmés dont plusieurs langages sont utilisés : assembleur (bas niveau), Basic, langage C et plus récemment C++, rassemblant dans un même boîtier un microprocesseur (généralement peu puissant), plusieurs types de mémoires et des périphériques de communication (Entrées-Sorties). [80]

III.2.2 Principales caractéristiques du LAUNCHXL-F28379D :

Caractéristiques matérielles:

- Sonde de débogage JTAG XDS100v2 isolée connectée à l'USB pour le débogage en temps réel et la programmation flash
- 4 x connecteurs/en-têtes à 20 broches
- Boutons et LEDs programmables
- Les fichiers matériels peuvent être trouvés en téléchargeant C2000Ware dans ce dossier : boards\LaunchPads\LAUNCHXL_F28379D
- TMS320F28379D : 200 MHz dual C28xCPU's and dual CLAs, 1 MB Flash, 16-bit or 12-bit ADCs, comparators, 12-bit DACs, delta-sigma sinc filters, HRPWMs, eCAPs, eQEPs, CANs and more
- C2000 Delfino™ MCU prêt à gérer la position TMS320F28379D MCU capable de s'interfacer avec des codeurs absolus ainsi qu'avec des résolveurs et des transducteurs SINCOS.
- Prend en charge deux modules enfichables BoosterPack™
- Deux connecteurs d'interface codeur
- Connecteur émetteur-récepteur CAN isolé

Caractéristiques du logiciel:

- Téléchargement gratuit de Code Composer Studio™ IDE
- Téléchargement gratuit de C2000Ware pour les pilotes de périphériques et les projets d'exemple
- Prise en charge de la plate-forme DesignDRIVE
- Prise en charge du logiciel powerSUITE
- Prise en charge de la cible MathWorks Embedded
- Support solidThinking Embedded

III.2.3 Brochage du LAUNCHXL-F28379D :

Le boîtier figure II.14 décrit l'architecture externe **LAUNCHXL-F28379D** qui comprend:

- les pins d'entrées /sorties, pins PWM, pins GPIO multiplexées avec d'autres fonction.
- La broche **MCLR** sert à initialiser le pic qui dispose de plusieurs sources de RESET.[75]

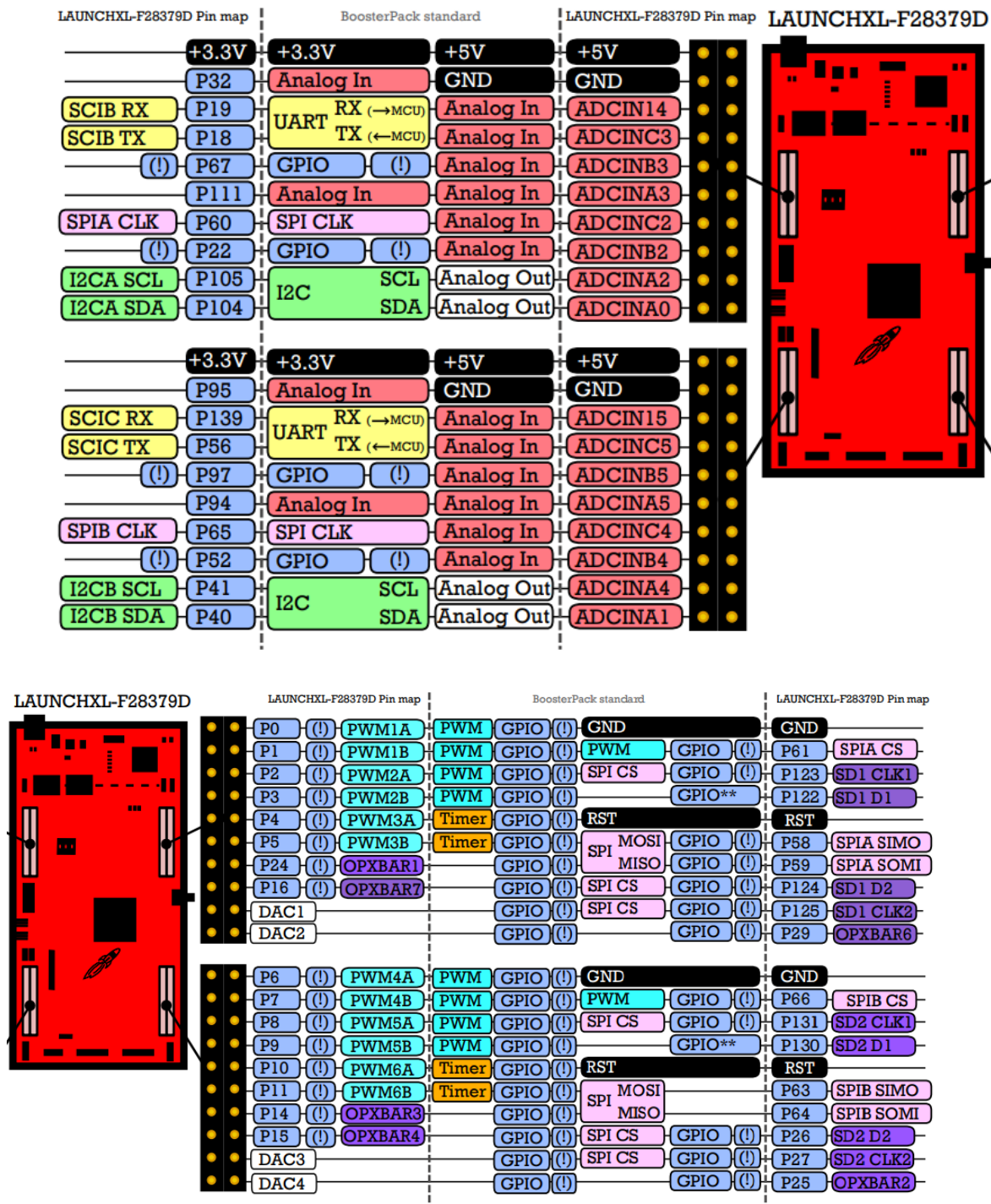


Figure III-2: BROCHAGE DU LAUNCHXL-F28379D

III.3 Etude fréquentielle de La tension efficace de sortie :

Cette étude nécessite de trouver la fonction de la tension de sortie, la décomposer en série de Fourier, et à pour rôle de faire apparaître un terme à pulsation de la charge (moteur Asynchrone ou synchrone). L'apparitions de ce terme, fait apparaître d'autres qui sont aux

multiples de cette pulsation. Tous ces termes sont appelés harmoniques. Seul le premier terme qu'est à désirer, le reste sont inutile, nous causeront que du bruit et pertes.

A cet effet, un paramètre de performance appelé taux de distorsion harmonique est pris en compte pour valoriser le signal désiré. Il se calcul de la façon suivante :

Trouver la fonction efficace de cette tension

Trouver sa décomposition de la tension en série de Fourier

III.3.1 Détermination de la valeur efficace :

Nous allons déterminer la valeur efficace de ce signal (voir Figure III-3) :

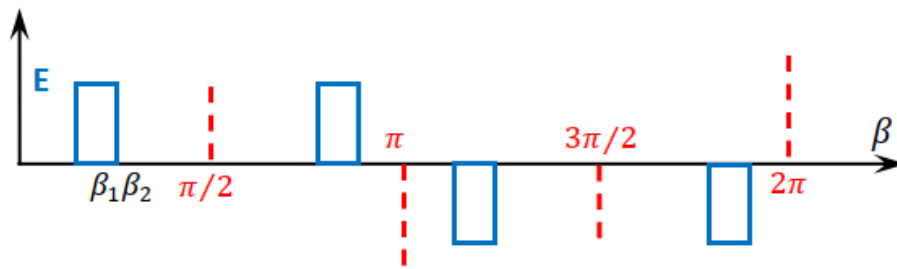


Figure III-3: décomposition du signal

$$V_{eff} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v^2 d\beta} \quad (III.1)$$

$$V_{eff} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} v^2 d\beta} \quad (III.2)$$

$$V_{eff} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\int_{\beta_1}^{\beta_2} E^2 d\beta + \int_{\pi-\beta_2}^{\pi-\beta_1} E^2 d\beta \right)} \quad (III.3)$$

$$V_{eff} = \sqrt{\frac{2}{\pi} \left(\int_{\beta_1}^{\beta_2} E^2 d\beta \right)} \quad (III.4)$$

$$V_{eff} = \sqrt{\frac{2}{\pi} E^2 (\beta_2 - \beta_1)} \quad (III.5)$$

III.3.2 Décomposition en série de Fourier :

Nous allons décomposés ce signal en série de Fourier (voir Figure III-4):

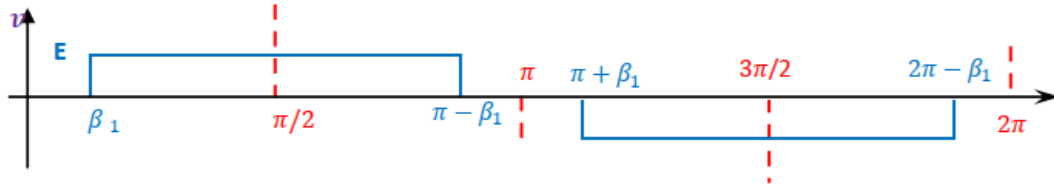


Figure III-4 décomposition du signal en série de Fourier

En premier temps, on va explorer cette méthode de décomposition
Toute fonction périodique peut être décomposée en série Fourier

$$f(\beta) = f_{\text{moy}} + A_n \cos(n\beta) + B_n \sin(n\beta) \quad (\text{III.6})$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_{\beta_1}^{2\pi-\beta_1} f(\alpha) \cos(n\beta) d\beta \quad (\text{III.7})$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_{\beta_1}^{2\pi-\beta_1} f(\beta) \sin(n\beta) d\beta \quad (\text{III.8})$$

Si f est impaire (symétrique par rapport à l'origine) alors $A_n = 0$

Si f est paire (symétrique par rapport à l'axe des ordonnées) $B_n = 0$

Si f présente une symétrie de glissement ($f(\beta + \pi) = -f(\beta)$) Alors :

$$A_{2k} = 0 \quad \text{et} \quad B_{2k} = 0$$

Avec $n = 2k$

Cette fonction est périodique est :

1- Impair alors $A_n = 0$

2- admet une symétrie de glissement alors $A_{2k} = 0$ et $B_{2k} = 0$

$$B_n = \frac{2}{2\pi} \int_{\beta_1}^{2\pi-\beta_1} v(\beta) \sin(n\beta) d\beta \quad (\text{III.9})$$

$$B_n = \frac{2}{\pi} \int_{\beta_1}^{\pi-\beta_1} E \sin(n\beta) d\beta \quad (\text{III.10})$$

$$B_n = \frac{2E}{\pi} \int_{\beta_1}^{\pi-\beta_1} \sin(n\beta) d\beta \quad (\text{III.11})$$

$$B_n = \frac{2E}{\pi} \left| -\frac{1}{n} \cos(n\beta) \right|_{\beta_1}^{\pi-\beta_1} \quad (\text{III.12})$$

$$B_n = \frac{2E}{\pi} \frac{1}{n} \left[-\cos(n(\pi - \beta_1)) + \cos(n\beta_1) \right] \quad (\text{III.13})$$

Comme n est impaire alors:

$$-\cos(n\pi - n\beta_1) = \cos(n\beta_1) \quad (\text{III.14})$$

Soit :

$$B_n = \frac{4E}{\pi} \frac{1}{n} [\cos(n\beta_1)] \quad (\text{III.15})$$

Soit alors :

$$TF(v) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} E [\cos(n\beta_1)] \sin(n\beta) \quad (\text{III.16})$$

Jusqu'à 9ème harmonie l'équation 17 s'écrit :

$$TF(v) = \frac{4}{\pi} E \left[\cos(\beta_1) \sin(\beta) + \frac{1}{3} \cos(3\beta_1) \sin(3\beta) + \frac{1}{5} \cos(5\beta_1) \sin(5\beta) + \frac{1}{7} \cos(7\beta_1) + \frac{1}{9} \cos(9\beta_1) \sin(9\beta) \right] \quad (\text{III.17})$$

III.4 ONDULEUR TRIPHASE :

C'est un pont en H dont on ajoute un troisième bras, les tensions fournies à la charge triphasée sont relevées à partir des drains de chaque bras (voir Figure III-5). Les semi-conducteurs sont des IGBTs.

La commande est représentée dans le tableau (voir Tableau III-1). Sont des tensions soumises sur les gates des IGBTs afin de les fermer (interrupteur). Ces tensions sont épuisées à partir d'un microcontrôleur. [47]

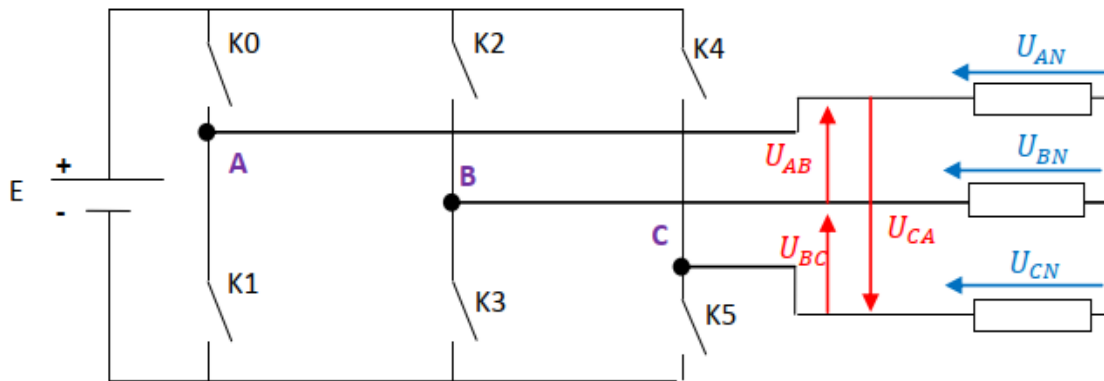


Figure III-5: circuit de l'onduleur triphasé a deux niveaux

III.4.1 Allures des tensions composées et tension simples et Chronogramme de commande :

	1er	2eme	3eme	4eme	5eme	6eme
K0						
K1						
K2						
K3						
K4						
K4						

Tableau III-1: Les séquences de commande

A chaque séquence des six séquences on a deux impédances en parallèles avec la troisième en série (voir Figure III-6). Alors les tensions des phases par rapport au neutre (tensions simple) se calculent par la simple règle du diviseur de tension.

Exemple prenons la 1^{ère} séquence où $k_0=k_3=k_4=1$, le schéma du circuit est donc :

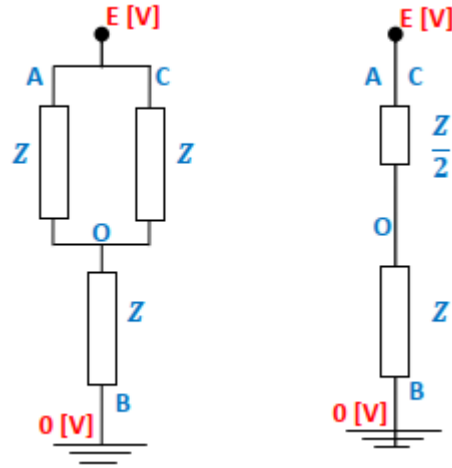


Figure III-6: schéma du circuit 1ère séquence

Nous déterminerons les tensions U_{AO} ; U_{OB} ; U_{CO}

Ces tensions peuvent être déterminées par la loi de diviseur de tension ainsi :

$$U_{AO} = U_{CO} = \frac{Z}{2} \frac{E}{2 \frac{Z}{2} + Z} = \frac{1}{3} E \quad (\text{III.18})$$

$$U_{OB} = Z \frac{E}{\frac{Z}{2} + Z} = \frac{2}{3} E \quad (\text{III.19})$$

Alors :

$$U_{BO} = U_{OB} = -\frac{2}{3} E \quad (\text{III.20})$$

Nous appliquons cette procédure pour toutes les cinq séquences restantes, alors on obtient les résultats figurés sur le tableau (voir Tableau III-2). Dans le même tableau, nous appliquons la relation de Charles pour déterminer les tensions composées comme par exemple :

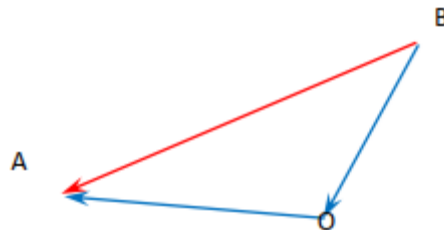


Figure III-7: Relation de Charles

$$\vec{U}_{AB} = \vec{U}_{AO} + \vec{U}_{OB} \quad (\text{III.21})$$

Puisque on a sur le tableau toutes les tensions sont par rapport au point « O » alors :

$$\overrightarrow{U_{AB}} = \overrightarrow{U_{AO}} - \overrightarrow{U_{OB}} \quad (\text{III.22})$$

	$\overrightarrow{U_{AO}}$	$\overrightarrow{U_{BO}}$	$\overrightarrow{U_{CO}}$	$\overrightarrow{U_{AB}} = \overrightarrow{U_{AO}} - \overrightarrow{U_{BO}}$	$\overrightarrow{U_{BC}} = \overrightarrow{U_{BO}} - \overrightarrow{U_{CO}}$	$\overrightarrow{U_{CA}} = \overrightarrow{U_{CO}} - \overrightarrow{U_{AO}}$
1 ^{ère}	1/3 E	- 2/3 E	1/3 E	E	-E	0
2 ^{ème}	2/3 E	-1/3 E	-1/3 E	E	0	-E
3 ^{ème}	1/3 E	1/3 E	-2/3 E	0	E	-E
4 ^{ème}	-1/3 E	2/3 E	-1/3 E	-E	E	0
5 ^{ème}	-2/3 E	1/3 E	1/3 E	-E	0	E
6 ^{ème}	-1/3 E	-1/3 E	2/3 E	0	-E	E

Tableau III-2: Les tensions par rapport au point « O »

Sur la figure nous représentons les allures des tensions simples et composées (voir Figure III-8).

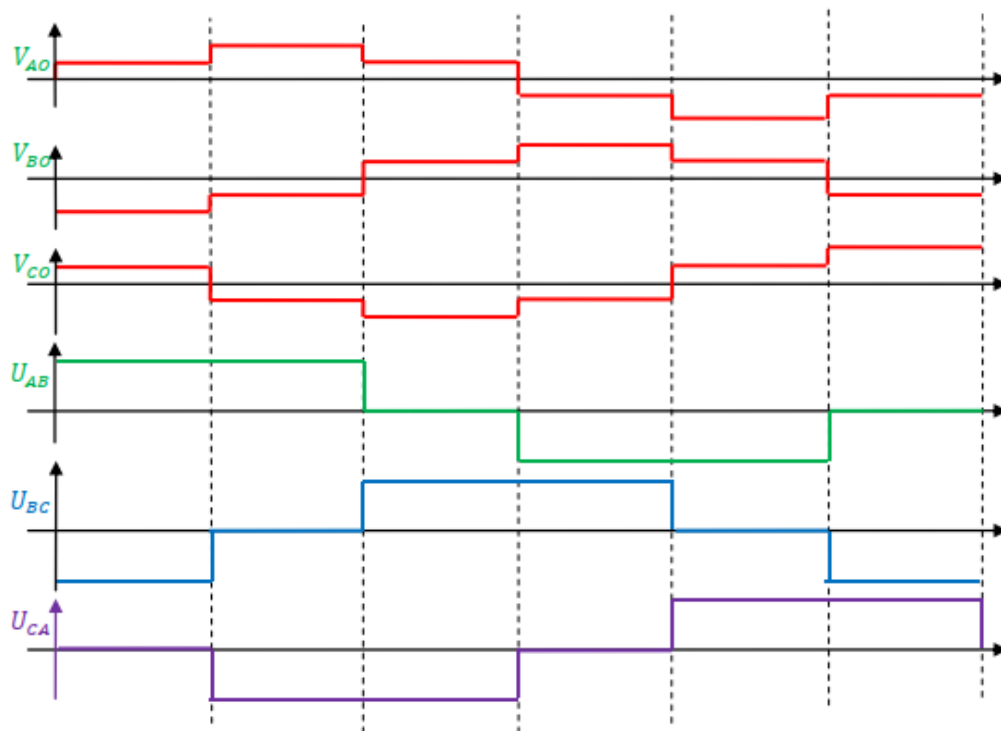


Figure III-8: Allures des tensions composées et tension simples

III.4.2 Module de puissance intelligent (IPM) IRAMY20UP60B

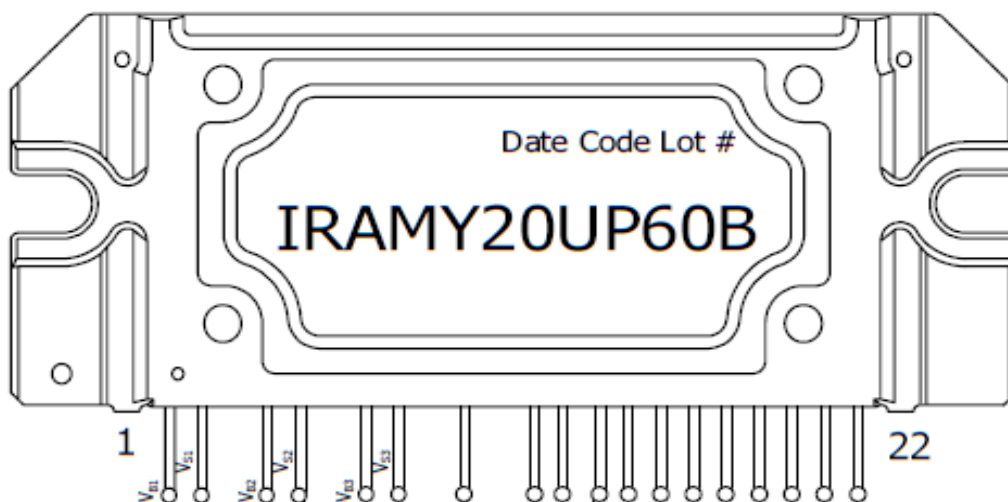


Figure III-8: Broches de connexion IRAMY20UP60B

L'IRAMY20UP60B d'International Rectifier est un circuit intégré hybride de puissance intégré de 20 A, 600 V avec résistance de shunt interne pour les applications d'entraînement

de moteurs d'appareils tels que les systèmes de climatisation et les pilotes de compresseur ainsi que pour les applications industrielles légères.

La technologie IR offre un pilote de moteur AC extrêmement compact et hautes performances dans un seul boîtier isolé pour simplifier la conception. La partie puissance est constituée de six interrupteurs de puissance IGBT à faible VCE à la fermeture.

Le control est assure par un driver intelligent qui protège l'onduleur contre l'échauffement excessif, et contre les courts circuits, ainsi qu'un verrouillage en sous tension, ce qui assure un degré élevé de protection pour un fonctionnement sans faute. Sa structure moulée en ligne minimise l'encombrement sur le circuit imprimé et simplifie l'isolation du montage du dissipateur.

La Figure III-9 montre l'architecture interne de l'IRAMY20UP60B.

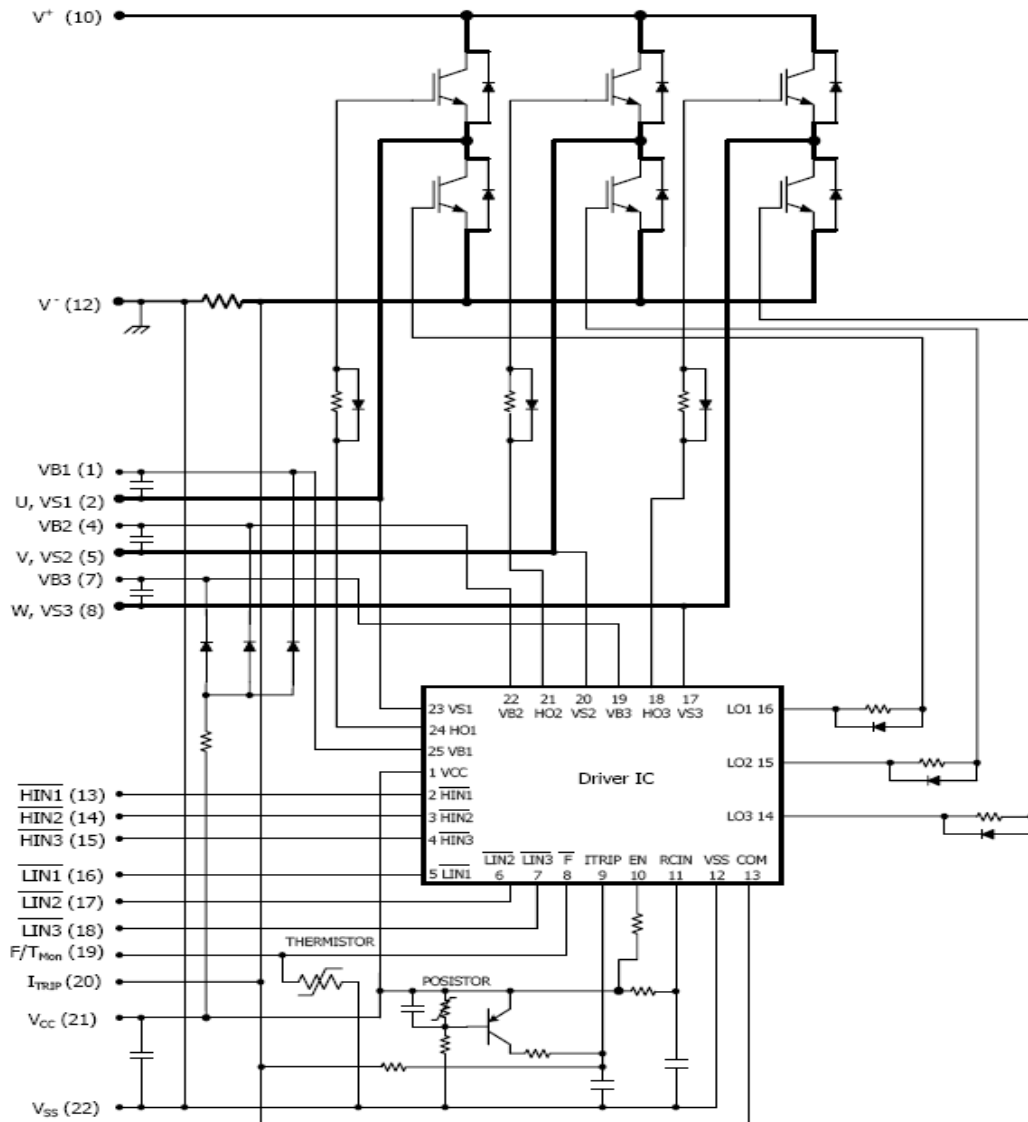


Figure III-9 : Schéma interne de l'IRAMY20UP60B

III.4.2.1 Circuit défaut onduleur

Le rôle de ce circuit est de générer un front descendant à l'entrée FAULT de DSPIC en cas d'un défaut sur l'onduleur. Dans ce là, le DSPIC exécute une interruption qui bloc les six sorties MLI à un état définie par l'utilisateur. Et même si le défaut disparaître la remise en fonctionnement normal du système se fait que après une reset hardware. C'est une méthode très utile pour mieux protégé l'onduleur et le moteur.

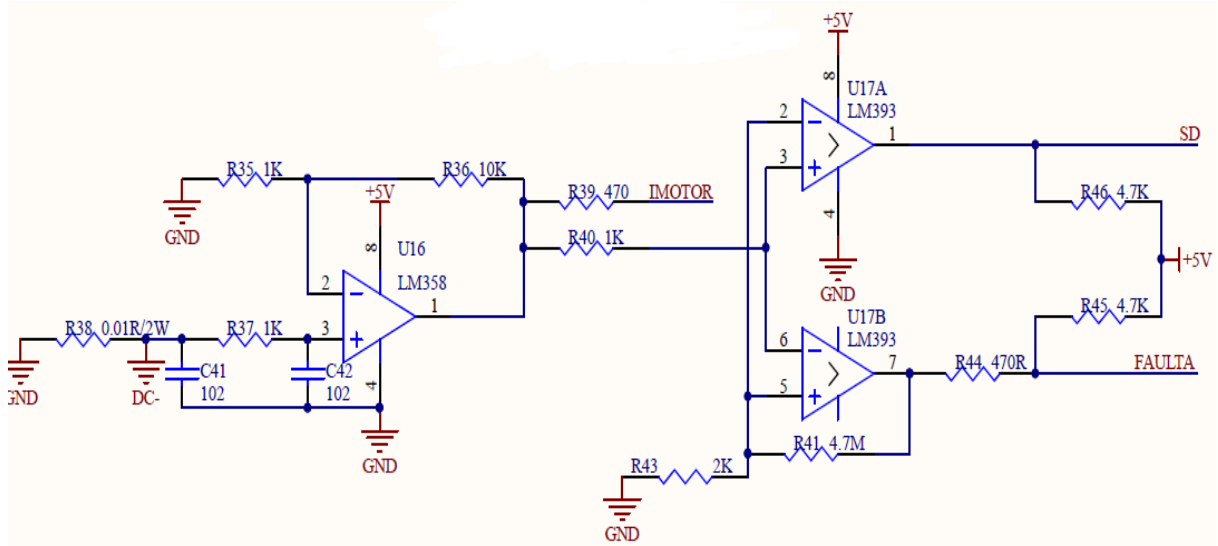


Figure III-10: Circuit défaut onduleur

III.4.2.2 Générations des signaux de commande avec Simulink et la carte STMF28379D

Par la configuration et l'utilisation de la bibliothèque de notre microcontrôleur on peut générer les signaux de la commande MLI

La figure III.11 présente le model Simulink de notre configuration.

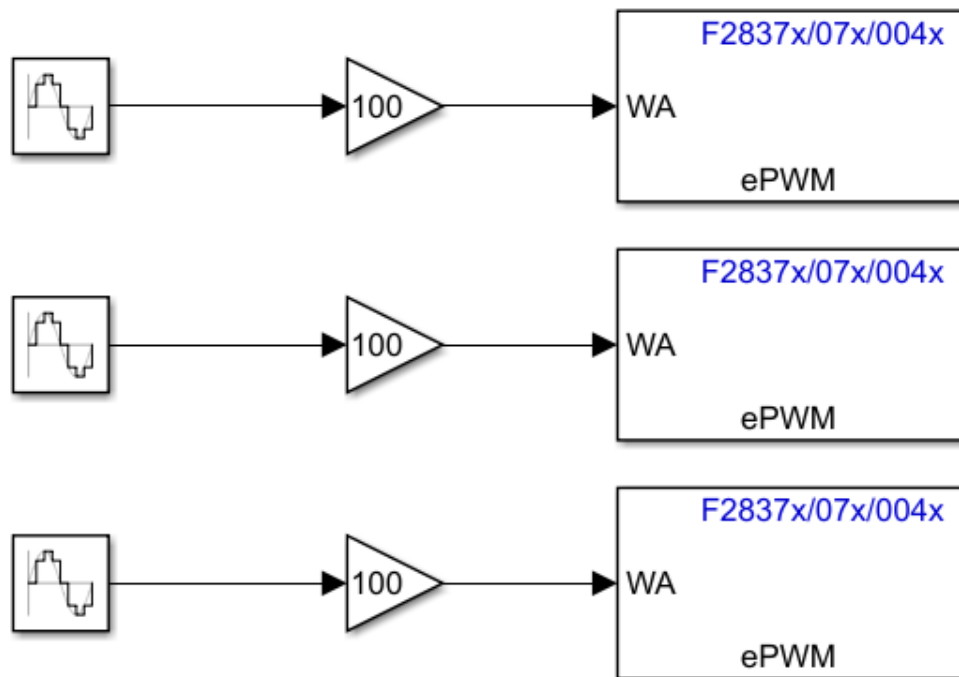


Figure III-11 : Model des signaux de la commande MLI

III.4.2.3 Résultat expérimental du test de l'onduleur

Dans ce test, un onduleur triphasé IRAMY20UP60B et un contrôleur de signal numérique STMF28379D sont utilisés pour montrer que notre onduleur IPM proposée obtient des performances élevées. La tension de l'alimentation de l'onduleur est 24V

Temps mort de 2 μ s, PWM H PWM L est présenté dans les figure III-12 et III-13 respectivement. Les résultats montrent aussi les formes d'onde de sortie de tension avec et sans filtrage dans les figure III-14 et III-15.

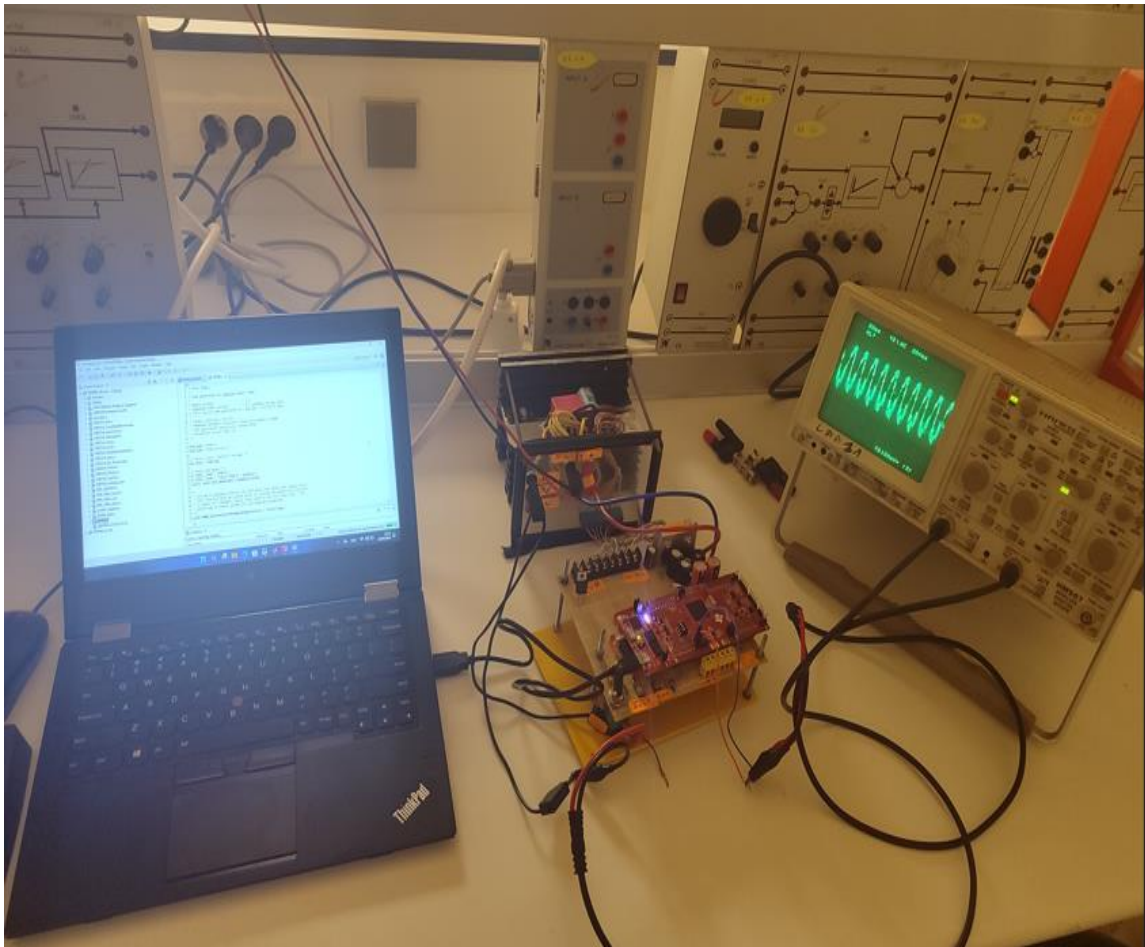


Figure III-12 : réalisation du circuit d'un onduleur triphasé via STM

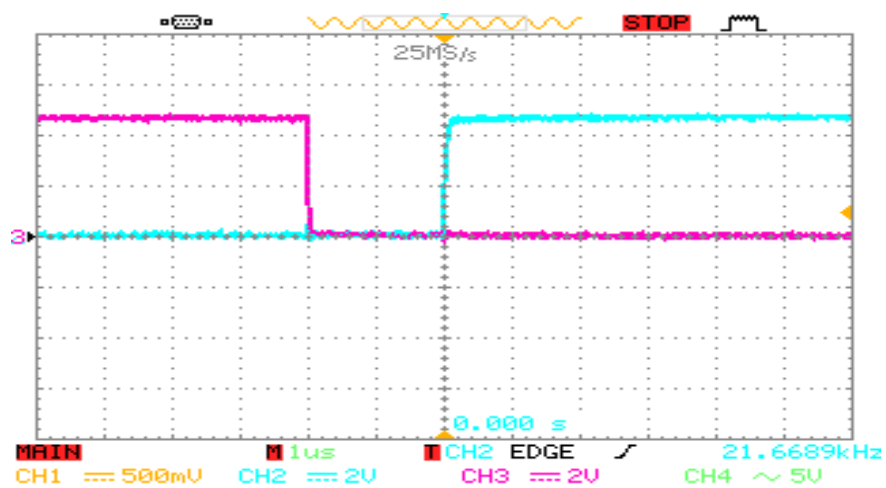


Figure III-13 : Temps mort de $2\mu s$

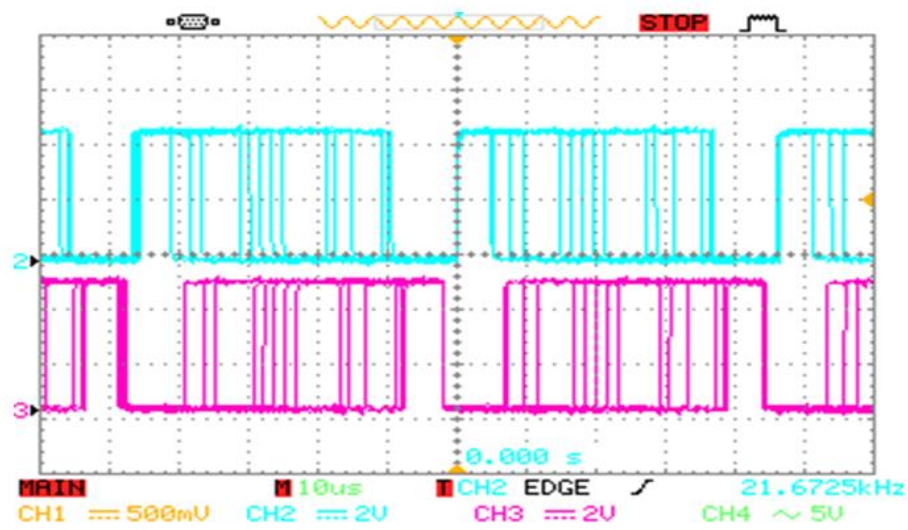


Figure III-14 : PWM H et PWM L

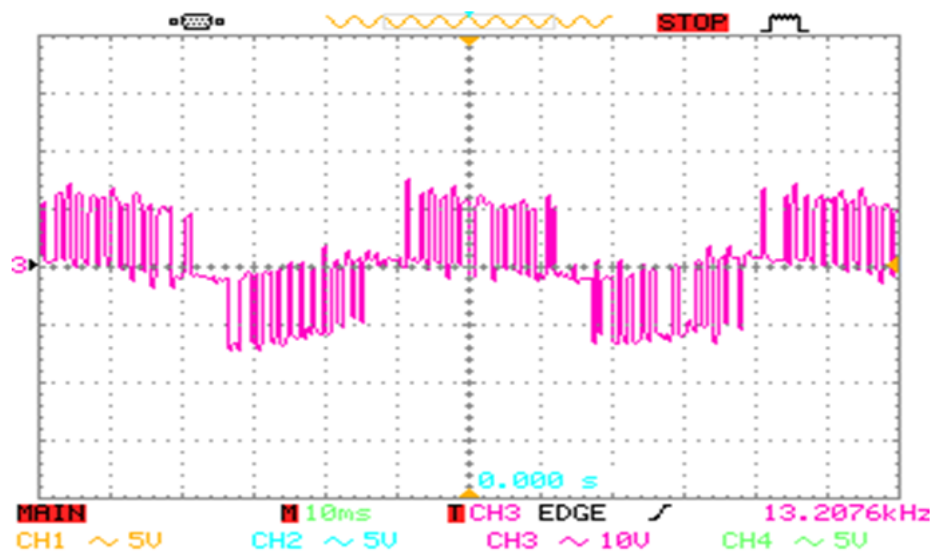


Figure III-15 : tension de ligne de l'onduleur triphasé (sans filtre)

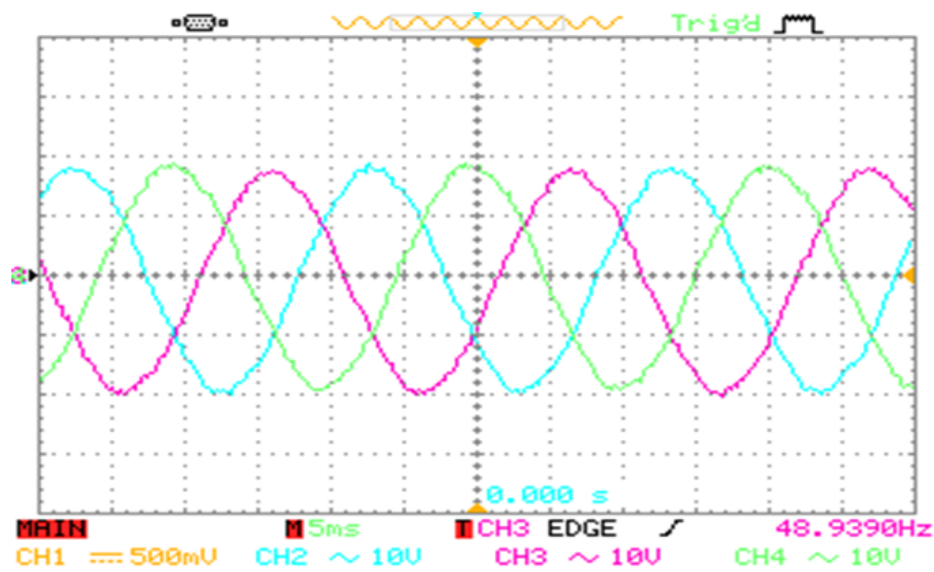


Figure III-16 : Tension de sortie de l'onduleur triphasé IPM (avec un filtre LC)

III.5 Conclusion :

Nous avons étudié dans ce chapitre la conception et la réalisation d'un onduleur triphasé, nous avons obtenue à la sortie de l'onduleur un système de tensions simples et système de tensions composées, tous deux de fréquence 50 Hz et dont les tensions de chaque système sont égales et déphasées l'une par rapport aux autres de 120° .

CONCLUSION GENERALE

L'élaboration de ce travail dans le cadre du projet de fin d'étude, nous a permis d'approfondir nos connaissances théoriques et d'acquérir une bonne expérience au niveau de la réalisation pratique.

Notre projet consiste à étudier et réaliser un onduleur triphasé à base d'un microcontrôleur **STM F28379D**, ce qui nous a poussé à choisir les microcontrôleurs STM c'est qu'ils sont plus fiables, moins encombrants et peuvent être programme avec le Simulink

- Le premier chapitre est consacré à un rappel historique et l'évolution des composants électroniques, et les convertisseurs Statiques.
- Le deuxième chapitre donne une petite description sur les onduleurs triphasés et ses différentes stratégies. Avec une simulation par Simulink d'une commande MLI sinus triangle.
- Le troisième chapitre présente la réalisation et les résultats de notre expérience Suivant les résultats obtenus.

Notre intérêt c'est porté sur le signal de sortie ainsi que le fonctionnement de notre onduleur.

En fait, ce projet a été une source de découverte de plusieurs domaines d'études tels que l'informatique pour la programmation et le design des schémas électroniques, sans oublier le savoir-faire dans le domaine électronique qui consiste à réaliser pratiquement les circuits électroniques.

On note que pendant l'élaboration de notre travail, nous avons rencontré plusieurs difficultés, parmi lesquels :

- Dans la partie réalisation, le non disponibilité de quelques composants électronique

Comme perspectives, on peut proposer à ceux qui développent ce thème de se pencher vers les points suivants :

- Optimiser l'utilisation du STM en profitant de ces capacités (utilisation des capteurs qui nous permet de mesurer le courant, le retour de la tension de sortie.
- Intégrer le dispositif dans les systèmes à énergie renouvelables ou la commande des moteurs synchrones et asynchrones

□ utiliser la commande MLI vectorielle pour améliorer les résultats.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIE

1. groupe SCHNEIDER ; « *Les techniques de commandes du moteur asynchrone* » Intersections ; le magazine Schneider de l'enseignement technologique et professionnel ; France ; juin 1998.
2. chauvin-arnoux Group; Catalogue : « *ETUDE D'UN VARIATEUR DE VITESSE AVEC LE SCOPIX IV* » ; 190, rue Championnet 75876 PARIS Cedex 18 ; France. 03 juin 2019 ;
3. <https://studylibfr.com/doc/38774/l-onduleur-est-un-convertisseur-continu-alternatif--il>; consulté le 08 juin 2020.
4. G.Séguier, F.Labrique, P.Delarue ; « *Électronique de puissance ; Structures, commandes, applications* » ; 10e édition ; DUNOD ; 11 rue Paul bert, 92240 Malakoff,, France ; 2015.
5. A.HNEINE ; « thèse de Doctorat : *Approche de modélisation distribuée appliquée aux composants semi-conducteurs bipolaires de puissance en VHDL-AMS. Application à la diode PIN de puissance et à l'IGBT* » ; Université Toulouse III - Paul Sabatier ; France ; Le 18 Juin 2012.;
6. <http://www.robotiny.com/diode.htm> ; consulté le 04 Mai 2020 11h16.
8. <http://www.ta-formation.com/Images/detecteur.jpg>; consulté le 13/05/2020.
9. F.Chavand ; « *Des données à l'information de l'invention de l'écriture à l'explosion numérique* » ; ISTE editions Ltd; Great Britain. 2017
10. REE REVUE DE L'ÉLECTRICITÉ ET DE L'ÉLECTRONIQUE ; « *La révolution des LED* » ; 17 rue de l'Amiral Hamelin - 75116 Paris – France. MARS - AVRIL 2020
11. <https://ecolicht.com/histoire-de-la-led/>; consulté le 13/05/2020 ; 11h24
12. <https://www.futura-sciences.com/sciences/personnalites/physique-oleg-vladimirovich-losev-1103/> ; 04 Mai 2020 ; 11h37.
13. <http://www.crealed.ch/site/led/la-technologie-led/>; consulté le 04 Mai 2020 11h50 ; 11h42
14. <https://www.barcelonaled.fr/blog/led-et-economie-d-energie/nick-holonyak-inventeur-de-la-led/>; consulté le 13/05/2020 ; 11h53
15. <https://www.futura-sciences.com/sciences/personnalites/physique-oleg-vladimirovich-losev-1103/>; consulté le 13/05/2020 ; 11h58
16. B.PIRE ; article ; « *Physiciens, de 1900 à nos jours ESAKI LEO (1925)* » ; centre de physique théorique de l'École polytechnique, Palaiseau ; France.
17. <https://www.sciencephoto.com/media/224910/view/leo-esaki-japanese-us-physicist>; consulté le 13/05/2020 ; 12h03
18. <https://electrovo.com/tunnel-diode/>; consulté le 13/05/2020 ; 12h10
19. <http://www.espace-turing.fr/Invention-du-transistor.html>; consulté le 04 Mai 2020 12h19.
20. <https://www.thefamouspeople.com/profiles/walter-houser-brattain-7596.php>; consulté le 13/05/2020 ; 12h24 ;
21. <https://www.thefamouspeople.com/profiles/william-shockley-7085.php#myCarousel>; consulté le 13/05/2020 ; 12h28 ;
22. <https://www.thefamouspeople.com/profiles/john-bardeen-5429.php>; consulté le 13/05/2020 ; 12h31 ;
23. <https://slideplayer.fr/slide/1146040/>; consulté le 13/05/2020 ; 12h37 ;
24. M.ZERARKA ; « Thèse Doctorat : *Étude des régimes extrêmes de fonctionnement en environnement radiatif des composants de puissance en vue de leur durcissement pour les applications aéronautiques et spatiales* » ; Université Toulouse III - Paul Sabatier; France. juillet 2013.

25. <https://eng.umd.edu/ihof/c-frank-wheatley-jr>; consulté le 13/05/2020 ;12h48
26. http://www.composelec.com/transistor_a_effet_de_champ_a_grille_metal-oxyle.php#cite_note-0 ;consulté le 13/05/2020 ;12h54 ;
27. <http://rine.itis.gue45.mohammedshrine.org/mosfet-metal-oxide-semiconductor-transistor.html>; consulté le 13/05/2020 ;13h00
28. <https://pt.slideshare.net/sanusinghskt/power-mosfet-characteristics>; consulté le 13/05/2020 ;13h12 ;
29. H.Lilen ; « *La belle histoire des révolutions numériques* »: De Boeck Supérieur ; Paris ; France Octobre 2019.
30. <http://for-ge.blogspot.com/2015/07/le-thyristor-scr.html>; 13/05/2020.
31. <https://lenergeek.com/2013/02/25/ils-ont-fait-lelectricite-ohm-et-la-resistance/>; consulté le 04Mai2020 ;18h20 ;
32. <https://fezensaguet.mon-ent-occitanie.fr/disciplines/sciences-experimentales/physique-chimie-cycle-4/cycle-4-4e-chapitre-1-realiser-des-mesures-dans-un-circuit-25136.htm>; consulté le 04 Mai 2020 ;18h42.
33. <https://hackaday.com/2020/01/13/why-do-resistors-have-a-color-code/>; consulté le 13/05/2020 ;19h02
34. J-L.Cocquerelle ; « *Collection Sciences et technologies* » ;Page10 ;Paris: Ed. Technip;france. 1999.
35. A.CHINE , S.Boulakroune; « mémoire de master ; commande à vitesse variable d'un moteur à courant continu alimenté par hacheur bidirectionnel en courant » ; université MOKHTAR BADJI U ;annaba ;Algérie;juin 2018
36. A.SAID; « Cour ;electronique générale »;Technologue à l'ISSET de Nabeul;France ;2013-2014
37. A.ELAKKARY ; « mémoire master ; Systèmes Photovoltaïques raccordés au réseau électrique » ;Université Mohammed V -Rabat Ecole Supérieure de Technologie de Salé ;Rabat ;Maroc ;2015.
38. I.Hidri.; « Support de cours ;D'électronique de puissance Les convertisseurs AC-DC et AC-AC »; Institut supérieur des études technologiques de Nabeul ;France.2015-2016
39. MECHAOUF MED LAMINE; MÉMOIRE; Gradateur monophasé et triphasé, modélisation et application; université Badji Mokhtar annaba ;Algérie ;2019 .
40. B.KHONG; « thèse de doctorat : *Fiabilité prédictive de composants de puissance soumis à des tests de fatigue accélérée* » L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES DE TOULOUSE,France;2007
41. A.Besra ; « mémoire de master; amélioration des performances des composants électroniques par simulation »; université badji mokhtar - annaba badji mokhtar – annaba university;Algérie année 2010.
42. A.BENMERIOUMA, A.MIMECHE; « mémoire master ;Etude de l'impact des paramètres structuraux sur les caractéristiques électriques d'un MOSFET-SOI »; Université Mohamed Seddik Benyahia–Jijel ;Algérie ;2018-2019.
43. F.MERAD; « mémoire magister ; conception et simulation des caractéristiques électriques d'un transistor MOSFET nanométrique à conduction latérale de type Tri-Gate(FinFET) »;université Abou Bekr Belkaid ; année 2014.
44. A.P.MALVINO ; « principes d'électronique » ;DUNOD,11 rue Paul bert,92240 Malakoff,France,2016.
45. R.BENSEGUENI; « thèse; Contribution à l'étude du transport électrique à travers des oxydes très minces (<10nm) dans des structures MOS »; université frères mentouri Constantine ;Algérie ;2016;
46. H.GUEDD ; « mémoire master : Etude des Effets Indésirables dans les Transistors MOSFETS à Canaux Courts » ; UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID-TLEMCEN ; 2012.

47. P.LEFRANC; « THÈSE doctorat; *Étude, conception et réalisation de circuits de commande d'IGBT de forte puissance* »; ÉCOLE DOCTORALE : ÉLECTRONIQUE ÉLECTROTECHNIQUE AUTOMATIQUE ; France ;2005.
48. http://public.iutenligne.net/electricite/marty/ELPU/fichiers/14_Thy/ElPui10_Thyr.htm
49. O.SIAR; M.KEBOUR; « *Mémoire de master; Alimentation d'une pompe alimentaire via un cycloconvertisseur* »; université de Boumerdes ;Algérie ;2016-2017.
50. M.MERAH ,M.Z.KARI; « *mémoire de master ; Conception, simulation et réalisation d'un onduleur assisté (Grid-Tie Inverter)* » ; Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen UABT;Algerie ;2014 – 2015 ;
51. E.KABANSKI; « *mémoire de magister Etude et conception d'un système de régulation automatique de la fréquence et de la tension de sortie d'une hydrolienne en fonction de la vitesse de la roue* » Université de Lubumbashi ; lubumbashi , Congo ;2006-2007 ;
52. <https://fr.rs-online.com/web/generalDisplay.html?file=automatisme/dimmer-switch&id=infozone>; visité le 14/05/2020 ;22h47 ;
53. <http://fr.delixihomelc.com/info/inverter-history-development-26765142.html>; consulté le 05 Mai2020 ; 19h30.
54. <https://patents.google.com/patent/EP2599206A2/fr>; consulté le 05 Mai 2020 ;22h30
55. S.OKBA, W.BEDDIAR ; « *mémoire de master ;Etude et réalisation d'un onduleur de tension triphasé à MLI* » ; Université de M'sila ;M'sila ;Algérie.2019 ;
56. C.LECHEVALIER ; « *thèse de doctorat ; Analyse fonctionnelle des convertisseurs statiques en vue de la conception* ». Energie électrique. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG,France ; 1998 ;
57. I.HIDRI; « *Support de cours ;électronique de puissance Les convertisseurs DC-DC et DC-AC* »; Institut supérieur des études technologiques de Nabeul ;France ;2015-2016 ;
58. I.BOUYAKOUB ; « *Cour ; électronique de puissance avancé ; Les hacheurs –techniques des convertisseurs statiques* »,Université Hassiba Ben Bouali De Chelf ;Algerie.2020.
59. "*Energie et convertisseurs d'énergie*", Licence EEA Module U6, Université de Savoie.
60. <http://elec13.wordpress.com/2016/03/05/les-convertisseurs-statiques/>; consulté le 06 Mai 2020,22h56.
61. H.DAMMAH, « *cour : Les Convertisseurs Alternatif-Continu Les redresseurs* » ; université international de Casablanca ;Maroc ;2018 2019 ;
62. A.AHMANE; « *mémoire de fin d'étude :Etude et Réalisation d'une Carte de Commande d'un Onduleur Monophasé PWM* »; Université Larbi Ben M'Hidi - Oum El Bouaghi;Algérie ; 2015-2016. ;
63. S.KHALEM, A.GHERBI « *mémoire de Master: Technique MLI aléatoire en vue de la réduction des perturbations conduites dans les convertisseurs continus-continus et continus-alternatifs* » Université m'hamed bougara boumerdes ; Algerie ; 2015-2016 ;
64. M.BOUSEHABA; « *mémoire de fin d'étude : Réalisation d'une commande MLI a choix multiple* »; université de Tlemcen Année; tlemcen ;Algérie.2016-2017 ;
65. A.BOUKAROURA ; « *mémoire de Magister en electrotechnique : Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé par l'Approche Bond Graph* » ; UNIVERSITE FERHAT ABBAS DE SETIF ; setif ;Algérie.2009 ;
66. K.CHETTIH ; « *memoire de master : réalisation d'un onduleur monophasé avec un bras redondant* » ; universite des freres mentouri constantine ; constantine ; algerie.2015 ;
67. H.ELFERD, M.ZEGAAR; « *Mémoire de fin d'étude : Fonctionnement en mode dégrade d'un onduleur multi niveaux application au filtre actif parallèle* »; Université de M'sila;Algerie ; 2016 /2017 ;
68. F.BERREZZEK ; « *mémoire magister : Etude des Différentes Techniques de Commande des Onduleurs à MLI Associés à une Machine Asynchrone* » ; UNIVERSITE BADJI MOKHTAR

- ANNABA ;Annaba ;Algerie.2006
69. K.Dellalou; « mémoire de fin d'étude : *stratégie de commande des onduleurs multiniveaux* » ; université Badji Mokhtar annaba ;Algerie.2019.
 70. W.Bensalah; N.H.Boutaleb; « mémoire de master; *Etude de la commande des redresseurs MLI* »; centre universitaire Belhadj Bouchaib ; Algerie ;2015/2016.
 71. F.Zaamouche; « Thèse de doctorat; *Amélioration des tensions de sorties des onduleurs par l'utilisation des nouvelles topologies et techniques de commandes* »; université Badji Mokhtar annaba ;Algerie.17 janvier 2018.
 72. A.BENHADJER; « mémoire de fin d'étude ; *étude, simulation et réalisation d'un onduleur triphasé pour les trains électro-diesel* »; essa tlemcen; Algerie ;2018/2019
 73. S.ATTAR, S.KARA ; « mémoire de master : *mesures et affichage digital de largeur d'impulsions par pic -microcontrôleur (avec simulation S/ ISIS Proteus et réalisation pratique)* »;Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen ;Algérie ;Année 2018-2019 ;
 74. A.SOUAG; M.A.ALI AMAR CHERIF; « mémoire : *Etude et conception d'un système de contrôle de température à base du pic 18F45K22* »; UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI JILLALI LIABES DE SIDI-BEL BEL-ABBES ;Algerie ; Juin 2016 ;
 75. K.SAAD ; « mémoire de Licence : *Programmation en C du microcontrôleur PIC 16F877* » ; Université des sciences et technologies d'oran Usto ; Oran ;Algérie ;2008 ;
 76. M.M.BOUDOUAIA; « mémoire de fin d'étude ;*Etude et réalisation d'un inclinomètre à base d'un microcontrôleur (PIC")* »; Université Abou Bekr Belkaid ; Tlemcen ;Algérie ; 2016-2017 ;
 77. S.HADJI ; « mini projet de master 1 :*programmation en C du microcontrôleur pic 16F877* » ;; université Abderrahmane Mira –bejaia ;Algérie. 2009-2010.
 78. M. BREIL, F.MORANCHO ;« article : *Évolution de l'intégration en électronique de puissance* » ; Journal sur l'enseignement des sciences et technologies de l'information et des systèmes, Volume 2, Hors-Série 2, 9 ; EDP Sciences ; 7 avenue du colonel Roche F-31077 Toulouse Cedex 4, France ;2003 ;
 - 79 https://techweb.rohm.com/knowledge/dcdc/dcdc_sr/dcdc_sr02/6997 ; consulté le 14 Juin 2020
 - 80 <https://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-F28379D>