

*République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique*

*Université Ammar Tlidji Laghouat UATL
Faculté des Sciences de la technologie Département d'Électrotechnique*



Mémoire de fin d'études

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Automatique

Option : Automatique et system

Thème

Etude comparative des différents techniques MLI

Présenté par :

KOULLA Rostom

DADDI ADDOUN Seyfeddine

Encadré par :

Dr. BELKHIRI Ahmed

2020 / 2021

Remerciements

*Nous remercions en premier lieu notre DIEU
tout puissant de nous avoir donné la santé et le
pouvoir de terminer ce modeste travail.*

*Nous remercions particulièrement notre Encadreur
Dr. Ahmed BELKHIRI, pour sa précieuse directive,
sa très grande disponibilité, son suivi constant, et sa patience.*

*Notre reconnaissance va également
à tous ceux qui ont participé de près ou de loin
à la préparation de ce travail.*

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

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

*En premier lieu à mes parents qui ont consenti
beaucoup de sacrifices pour me permettre de réaliser
mes objectifs.*

*Qu'ils trouvent ici toute ma reconnaissance et ma
gratitude.*

*A mon frère Hamid. A mes sœurs. Et à toutes les
familles*

KOULLA et KHALFAOUI

sans exception.

A mes oncles, mes tantes.

A tous mes amis intimes

et surtout mon binôme et toute sa famille.

A tous mes voisins de mon village sans exception.

Dédicaces

Je tiens à dédier ce modeste travail avant tout :

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

A mon frère et toute la famille daddi addoun sans oublier Mon frère fares.

A tous mes amis

A mon binôme

A tous mes collègues de promotion

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

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

| | |
|--|----|
| Figure I. 1.Les différents types de convertisseurs statiques | 16 |
| Figure.I.2 Principe de base d'un hacheur | 17 |
| Figure I. 3 source de tension idéale | 18 |
| Figure I. 4 source de courant idéale | 18 |
| Figure I. 5 Hacheur série (abaisseur) | 19 |
| Figure I. 6 la tension aux bornes de la charge avec un hacheur série | 19 |
| Figure I. 7 La valeur moyenne en fonction de rapport cyclique (α) | 20 |
| Figure I. 8 Hacheur parallèle (élevateur) | 20 |
| Figure I. 9 Hacheur abaisseur-élevateur | 21 |
| Figure I. 10 Hacheur monophasé en pont (quatre quadrants) | 21 |
| Figure I. 11 la tension aux bornes de la charge avec un hacheur quatre quadrants | 22 |
| Figure I. 12 Principe du fonctionnement d'un Hacheur quatre quadrants. | 23 |
| Figure I. 13 photographie d'un Hacheur 1 quadrant. | 23 |
| Figure I. 14 Principe de la conversion continue - alternative (DC/AC) | 24 |
| Figure I. 15 Principe de fonctionnement de l'onduleur | 24 |
| Figure I. 16 K en position (1) | 24 |
| Figure I. 17 La tension avec K en position (1) et (2). | 25 |
| Figure.I.18 Onduleur monophasé avec transformateur de sortie à point milieu | 26 |
| Figure.I.19 Onduleur monophasé en pont | 27 |
| Figure.I.20 Onduleur en demi-pont | 27 |
| Figure I. 21 Onduleur triphasé | 27 |
| Figure I. 23 Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone | 30 |
| Figure I. 24 Alimentation de secours | 30 |
| Figure I. 25 transfère d'énergie entre deux réseau | 31 |
| Figure I. 26 commade MLI | 32 |

Chapitre II

| | |
|--|----|
| Figure II. 1 Injection de l'harmonique trois, pour une phase[19] | 36 |
| Figure II. 2 Injection de l'harmonique trois, avec facteur de correction, pour une phase[19] | 37 |
| Figure II. 3 Circuit de puissance d'un onduleur triphasé | 38 |
| Figure II. 4 Les huit configurations possibles. | 39 |
| Figure II. 5 les combinaisons possibles des interrupteurs [23] | 40 |
| Figure II. 6 La formation de la tension de référence [24] | 41 |
| Figure II. 7 Les périodes de commutation des interrupteurs [25] | 43 |

Chapitre III

| | |
|--|----|
| Figure III. 1 Schéma fonctionnel | 45 |
| Figure III. 2 modèle la SPWM | 46 |
| Figure III. 3 Les impulsions SPWM. | 47 |
| Figure III. 4 a) Tension de sortie de l'onduleur V_{ab} , V_{an} , b) Analyse de la tension V_{an} | 47 |
| Figure III. 5 Modèle de la THIPWM | 48 |
| Figure III. 6 Génération des impulsions THIPWM. | 49 |
| Figure III. 7 Résultats de simulation de THIPWM, a). Tension de sortie de l'onduleur composé et simple, b). Tension simple filtrée, c). Spectres de la tension filtrée. | 49 |
| Figure III. 8 Modèle de SVPWM. | 50 |
| Figure III. 9 Résultats de simulation d'impulsion et la source de MLI vectorielle. Erreur ! | |
| Signet non défini. | |
| Figure III. 10 Résultats de simulation de SVPWM, a). Tension composée et simple de sortie de l'onduleur, b). Tension simple filtrée, c). Spectres des harmoniques de la tension filtrée. | 51 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|------------------------------------|
| Tableau I. 1 les exemples des sources de tension et courant. | 18 |
| Tableau I. 2 Commande de 180° | 31 |
| Tableau II 1 Les combinaisons de vecteurs de tension d'un onduleur triphasé [24] | 41 |
| Tableau III. 1 les performances de chaque méthode. | Erreur ! Signet non défini. |

SOMMAIRE

SOMMAIRE

| | |
|--|----|
| Introduction Generale | 12 |
| Introduction..... | 16 |
| I.1 Les interrupteurs utilisés dans les convertisseurs DC/DC et DC/AC..... | 17 |
| I.2 Présentation de convertisseur continu-continu (DC/DC) | 17 |
| I.3 Caractérisation des sources | 18 |
| I.3.1 Différents types des hacheurs | 19 |
| I.3.1.1 Hacheur série | 19 |
| I.3.1.2 Principe de Fonctionnement : | 19 |
| I.3.1.3 Hacheur parallèle..... | 20 |
| I.3.1.4 Hacheur abaisseur-élevateur..... | 21 |
| I.3.1.5 Hacheur monophasé en pont..... | 21 |
| I.3.2 Applications des hacheurs..... | 23 |
| I.4 Présentation de convertisseur continu-alternatifs (DC/AC)..... | 24 |
| I.4.1 Principe général de fonctionnement..... | 24 |
| I.4.2 Types des onduleurs..... | 25 |
| I.4.2.1 Onduleur autonome | 25 |
| I.4.2.2 Les onduleurs de tension | 25 |
| I.4.2.3 Les onduleurs de courant..... | 26 |
| I.4.2.4 Les onduleurs à résonance..... | 26 |
| I.4.3 Types d'onduleurs de tension | 26 |
| I.4.3.1 Les onduleurs monophasés | 26 |
| I.4.3.2 Les onduleurs triphasés | 27 |
| I.4.1 Fonctionnement des onduleurs triphasés : | 28 |
| I.4.1 Les applications des onduleurs | 29 |
| I.4.1.1 Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone | 30 |
| I.4.1.2 Alimentation de secours | 30 |
| I.4.1.3 Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes | 30 |
| I.4.1.4 Les onduleurs dans le transport : | 31 |
| I.4.2 Commande d'un onduleur triphasé :..... | 31 |
| I.4.2.1 Commande Plein onde (180°) : | 31 |
| I.4.2.2 Modulation de largeur d'impulsions ou (PWM): | 32 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| II. | Chapitre II..... | 34 |
| II.1 | THÉORIE GÉNÉRALE DES DIFFÉRENTES TECHNIQUES DE MLI..... | 35 |
| II.1.1 | Principe de la modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale | 35 |
| II.1.2 | la modulation de largeur d'impulsion par injection de troisième harmonique THIPWM | 36 |
| II.1.2.1 | Objective de THIPWM..... | 36 |
| II.1.2.2 | Principe de la modulation de largeur d'impulsion par injection de troisième harmonique | 36 |
| II.1.3 | MLI de Vectorielle..... | 38 |
| II.1.3.1 | Principe de base de SVPWM : | 38 |
| II.1.4 | Les calculs de temps de commutation des interrupteurs :..... | 41 |
| II.1.5 | Principaux avantages de la M.L.I | 43 |
| II.1.6 | Les inconvénients de la MLI : | 43 |
| III. | Chapitre III : Simulation et Interprétations des Résultats | 45 |
| III.1 | INTRODUCTION | 45 |
| III.2 | SIMULATIONS | 45 |
| III.2.1 | Simulation de la commande par SPWM..... | 46 |
| III.2.2 | Simulation de la commande THIPWM..... | 48 |
| III.2.3 | Simulation de la commande SVPWM | 50 |
| | <u>ConclusionGénéral</u> | <u>58</u> |

*INTRODUCTION
GENERALE*

Introduction générale

L'électronique de puissance est un domaine assez récent. Si ses prémices datent de l'utilisation des premiers tubes à vide (Thyristors, triodes, etc.) dans les années 1930, l'explosion des applications liées à cette discipline est due au développement des thyristors puis des transistors spécifiques dits « transistors de puissance » dans les années 1970 [1].

En réalité, l'électronique de puissance peut être définie par « la partie de l'électronique spécialisée dans le changement de forme de l'énergie électrique, et plus précisément des tensions et des courants qui y sont associés. En d'autres termes dès lors qu'un circuit électrique puise son énergie à partir d'une source donnée, les tensions et les courants produits par cette source ont des formes spécifiques dépendant de sa nature [1].

De même, les circuits électriques qui utilisent cette énergie nécessitent des tensions parfois alternatives, parfois continues, et présentant des valeurs précises liées à leur fonctionnement. Il y a donc très souvent nécessité d'utiliser une source de circuit « interface » permettant de rendre compatibles les sources et les récepteurs.

Les composants électroniques modernes, associés à des commandes évoluées, permettent de réaliser une très grande variété de transformations directement sur les tensions et courants produits par un seul type de source.

On désigne par « convertisseur » tout circuit électrique permettant de modifier les valeurs ou les natures des grandeurs électriques (tensions et courants) d'un générateur vers un récepteur, par cette définition, les structures de conversion d'énergie électrique sont classées en quatre catégories :

- ✓ Convertisseur Alternative-Continue (Redresseur)
- ✓ Convertisseur Alternative-Alternative (Gradateur)
- ✓ Convertisseur Continu-Continu (Hacheur)
- ✓ Convertisseur Continu-Alternative (Onduleur)

La commande des convertisseurs statiques a vu une grande évolution due à la prolifération de l'utilisation de l'informatique, ce qui a permis de réaliser des commandes complexes impossible en analogique. Les dispositifs de commande numérique sont : le micro-processeur, microcontrôleur et les DSP (Digital Signal Processor).

Introduction générale

Dans ce travail, on s'intéresse à la commande de convertisseur continu-continu (hacheur) et continu-alternatif (onduleur) par différents techniques MLI.

Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à une présentation des structures de base des hacheurs et des onduleurs ainsi que leurs principes de fonctionnement et quelque domaine d'application.

Le deuxième chapitre de ce mémoire est dédié à l'étude de la commande et la mise en œuvre des techniques de commande MLI de l'onduleur triphasé.

Les techniques MLI étudiés sont : Modulation Sinus-triangle SPWM, injection de trois harmonique THIPWM, modulation vectorielle SVPWM.

Dans le troisième chapitre, une simulation sous MATLAB/Simulink à permet de vérifier et comparer les techniques étudiées.

CHAPITRE I

Généralités
Sur les convertisseurs
DC/DC – DC/AC

Introduction

Ce chapitre présente des généralités sur les convertisseurs continus-continus et continus-alternatifs (DC/DC et DC/AC), on prend par considération le hacheur série et l'onduleur triphasé.

Nous commençons ce chapitre par les différents interrupteurs utilisés dans les convertisseurs statiques. Ensuite, nous présentons les différentes topologies des convertisseurs continus-continus et continus-alternatifs et aussi nous citons leurs applications dans des nombreux domaines.

Enfin, nous donnons quelques stratégies de commande de ces convertisseurs, parmi ces stratégies nous nous intéressons à la commande MLI. (Nous allons détailler cette technique de commande dans le prochain chapitre II.

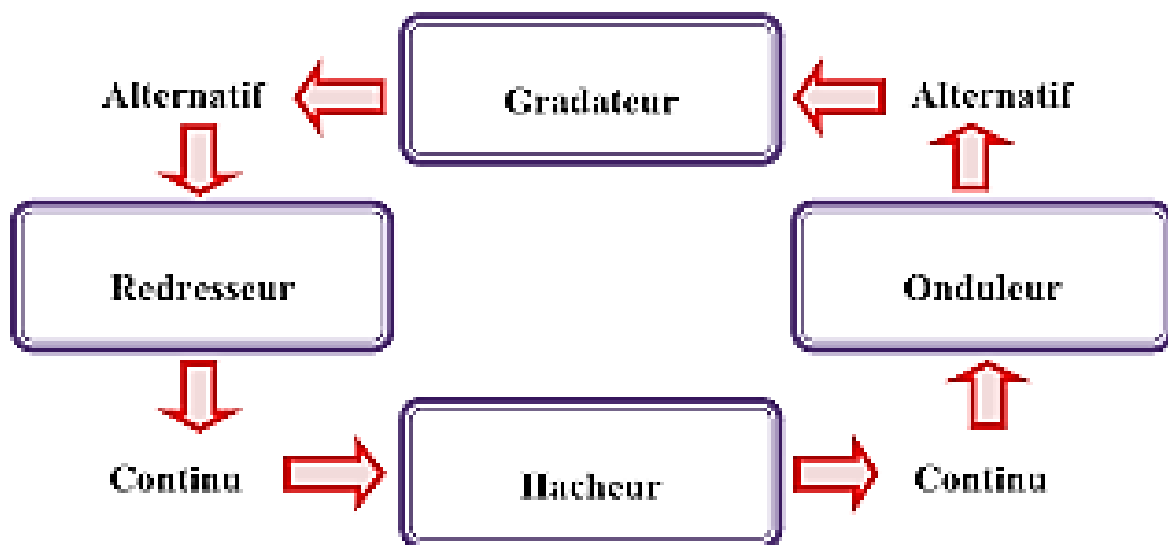


Figure I. 1. Les différents types de convertisseurs statiques

I.1 Les interrupteurs utilisés dans les convertisseurs DC/DC et DC/AC

Les convertisseurs statiques utilisent des interrupteurs à base de semi-conducteurs de puissance fonctionnant en commutation. L'utilisation de ces interrupteurs permet d'adapter un bon rendement grâce à la fermeture et l'ouverture rapide des interrupteurs. On distingue plusieurs types des interrupteurs :

- ✓ Les interrupteurs commandables seulement à la fermeture : le thyristor.
- ✓ Les interrupteurs commandables à la fermeture et à l'ouverture :
 - Le thyristor à ouverture commandée (GTO).
 - Le transistor bipolaire (BJT).
 - Le transistor (MOSFET) de puissance.
 - Le transistor bipolaire à grille isolée (IGBT).

Nous pouvons considérer un interrupteur comme parfait :

- S'il est possible de commander ou de contrôler son ouverture et sa fermeture.
- Si la durée de la commutation est très courte devant la période de fonctionnement du convertisseur.
- S'il ne provoque pas de perturbation dans un montage, à cause de ses caractéristiques propres.
- S'il ne consomme aucune puissance.

I.2 Présentation de convertisseur continu-continu (DC/DC)

Un hacheur est un convertisseur continu/continu permettant de convertir une énergie continue fixe à un niveau donné de tension ou courant en une énergie continue variable à un autre niveau de tension ou de courant [2]. On obtient une tension de valeur moyenne variable en établissant et interrompant périodiquement l'alimentation de la charge par la source grâce à des

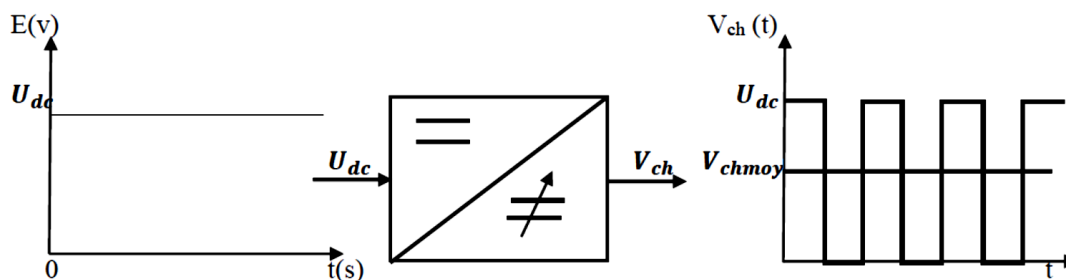


Figure.I.2 Principe de base d'un hacheur

interrupteurs.

I.3 Caractérisation des sources

Les sources électriques existantes sont des générateurs de tension ou de courant continu ou alternatifs.

Par définition, on parle de sources statiques :

Une source de tension idéale impose une tension indépendamment du courant qui la parcourt,

Une source de courant idéale impose un courant indépendamment de la tension à ses bornes

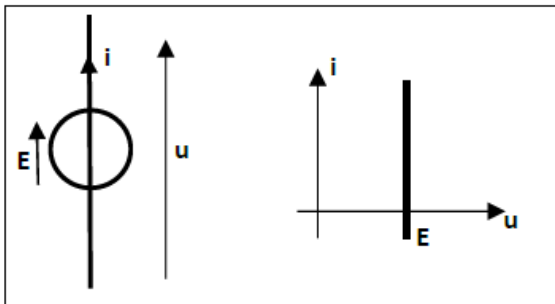


Figure I. 3 source de tension idéale

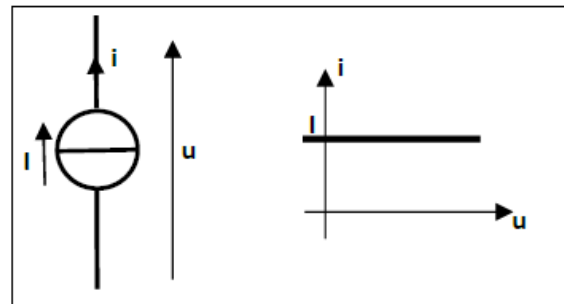


Figure I. 4 source de courant idéale









La tension est constante quelle que soit la valeur du courant



Le courant est constant quelle que soit la valeur de la tension

Tableau I. 1 les exemples des sources de tension et courant.

| | | | |
|--------------------|---|---|---|
| Sources de tension |  |  |  |
| | Condensateur | batterie | réseau de distribution |
| sources de courant |  |  |  |
| | Electro-aimant | Mcc | self |

I.3.1 Différents types des hacheurs

On distingue plusieurs types des hacheurs :

- Hacheur abaisseur « Buck Converter »
- Hacheur élévateur « Boost Converter »
- Hacheur abaisseur élévateur « Buck-Boost Converter »
- Hacheur monophasé en pont « Full Bridge Converter »

I.3.1.1 Hacheur série

Hacheur série, hacheur abaisseur ou bien dévolteur est un appareil qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant [4].

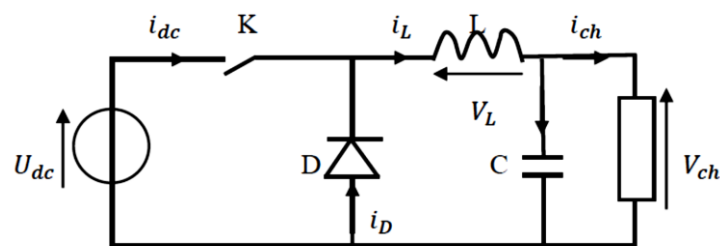


Figure I. 5 Hacheur série (abaisseur)

I.3.1.2 Principe de Fonctionnement :

Le cycle de fonctionnement, de période de hachage ($T = \frac{1}{f}$), comporte deux Etapes. Lors de la première étape, on rend le transistor passant et la diode, polarisée en inverse, est bloquée. Cette phase dure de $(0 \leq t \leq \alpha T)$. Lors de la seconde étape on bloque le transistor, la diode devient passante, cette phase dure de $\alpha T \leq t \leq T$.

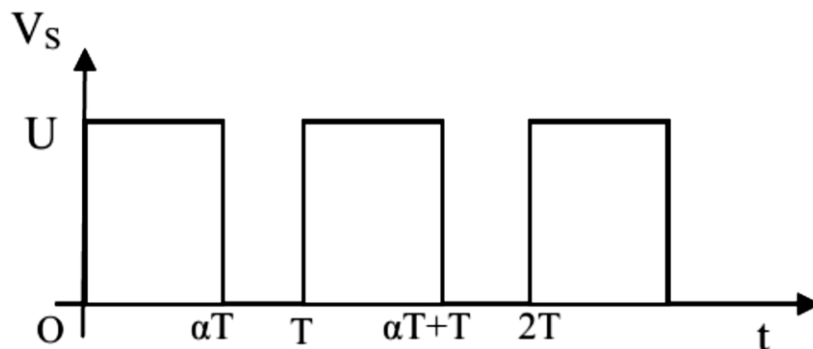


Figure I. 6 la tension aux bornes de la charge avec un hacheur série

❖ Valeur moyenne de la tension:

$$V_{Smoy} = \frac{1}{T} \int_0^T V_S(t) d(t) = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} U d(t) + \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T 0 \cdot d(t) \quad (I.1)$$

$$V_{Smoy} = \frac{U}{T} (\alpha T - 0) = \alpha U$$

La valeur moyenne de la tension V_{Smoy} peut être ajustée en jouant sur la valeur du rapport cyclique α . Quand on fait varier α de 0 à 1, V_{Smoy} varie linéairement de 0 à U .

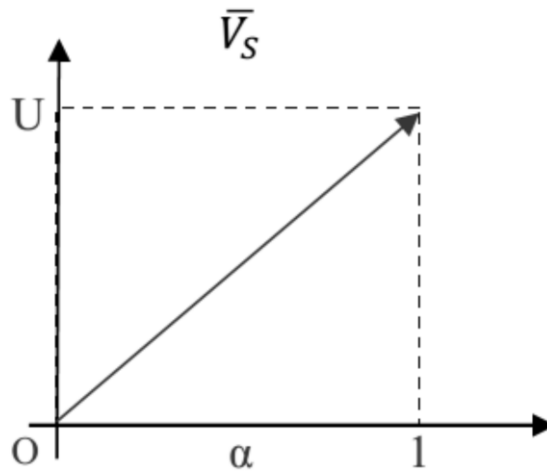


Figure I. 7 La valeur moyenne en fonction de rapport cyclique (α)

I.3.1.3 Hacheur parallèle

Hacheur parallèle, hacheur élévateur, hacheur survolteur, hacheur de type Boost. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur « K » peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [5].

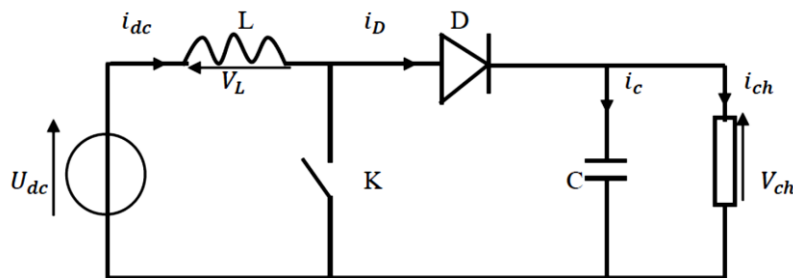


Figure I. 8 Hacheur parallèle (élévateur)

I.3.1.4 Hacheur abaisseur-élevateur

Hacheur abaisseur-élevateur, dévolteur-survolteur, de type Buck-Boost. Le hacheur abaisseur-élevateur est un convertisseur indirect DC-DC à stockage inductif. La source d'entrée est de type tension continue (filtrage capacitif en parallèle avec une source de tension) et la charge de sortie continue de type source de tension (condensateur en parallèle avec la charge résistive). Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des deux convertisseurs précédents [6].

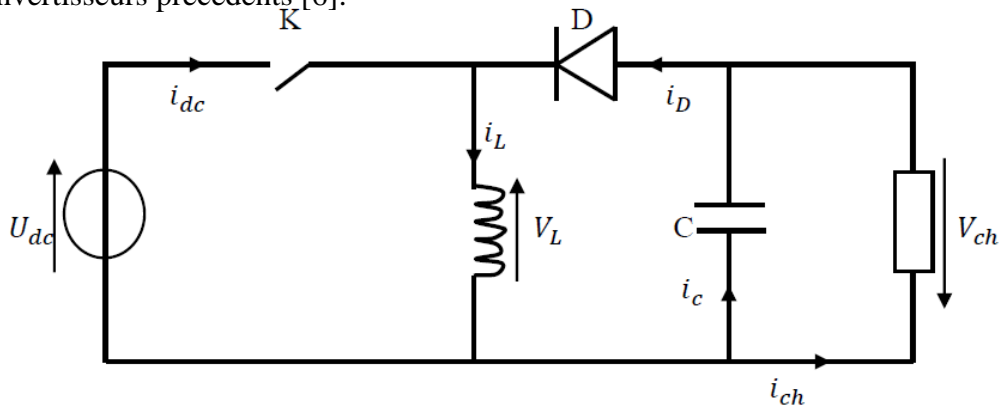


Figure I. 9 Hacheur abaisseur-élevateur

I.3.1.5 Hacheur monophasé en pont

Hacheur réversible en courant et en tension, Hacheur en pont, Hacheur à quatre quadrants, type Full Bridge. Il permet de délivrer une tension moyenne de sortie et un courant moyen de sortie peuvent être positif ou négatif, à partir d'une source d'entrée de type continue.

La réversibilité en courant et en tension entrainer une machine à courant continu dans les deux sens (marche avant / marche arrière). Ce hacheur peut faire fonctionner la MCC dans les quatre quadrants, mais il faut insérer une résistance d'absorption, pour les deux phases ou la machine est en génératrice puisse dissiper l'énergie dans cette résistance.

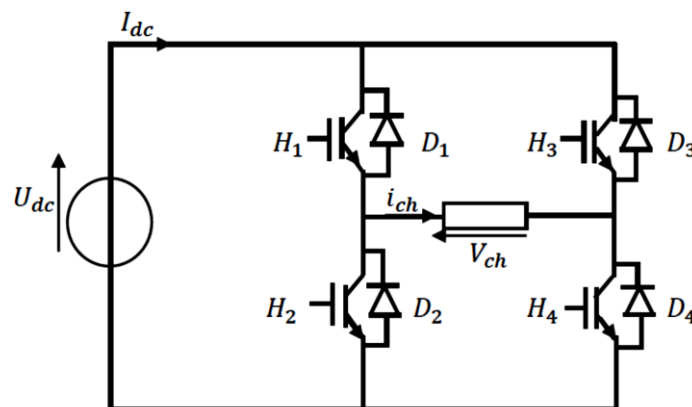


Figure I. 10 Hacheur monophasé en pont (quatre quadrants)

On procède ainsi :

A chaque période T :

On commande la fermeture de K1 et K2 pendant $(0 \leq t \leq \alpha T)$.

On commande la fermeture de K3 et K4 pendant $(\alpha T \leq t \leq T)$.

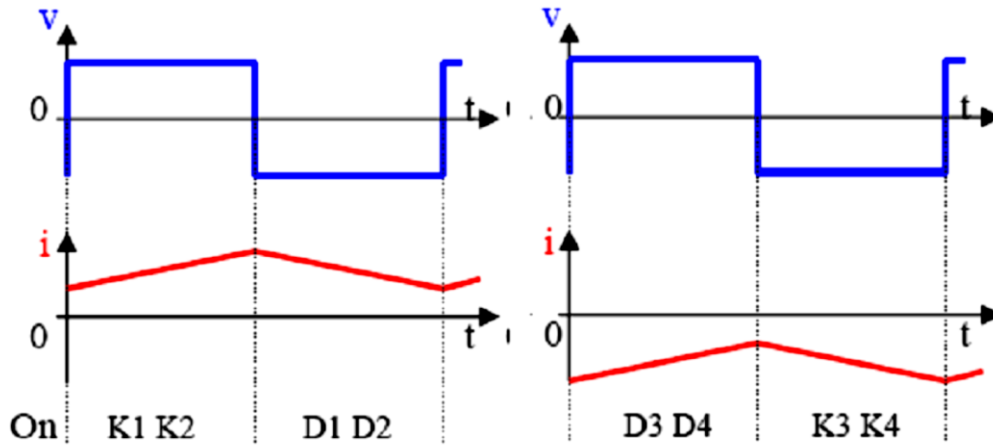


Figure I. 11 la tension aux bornes de la charge avec un hacheur quatre quadrants

✓ **Valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge:**

$$V_{Smoy} = \frac{1}{T} \int_0^T V_S(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} U dt + \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T -U dt \quad (I.2)$$

$$V_{Smoy} = U(2\alpha - 1)$$

Maintenant on peut avoir ($V_{Smoy} < 0$) (formule), le courant pouvant également être négatif donc on peut avoir un sens de rotation négatif. Quand (α) varie de (0 à 1), la tension moyenne varie de ($-U$ à $+U$).

On dispose de 4 quadrants modes de fonctionnement :

$V > 0$ et $I > 0$, Rotation dans le premier sens.

$V < 0$ et $I > 0$, Phase de freinage (récupération de l'énergie).

$V < 0$ et $I < 0$, Rotation dans le deuxième sens.

$V > 0$ et $I < 0$, Phase de freinage (récupération de l'énergie).

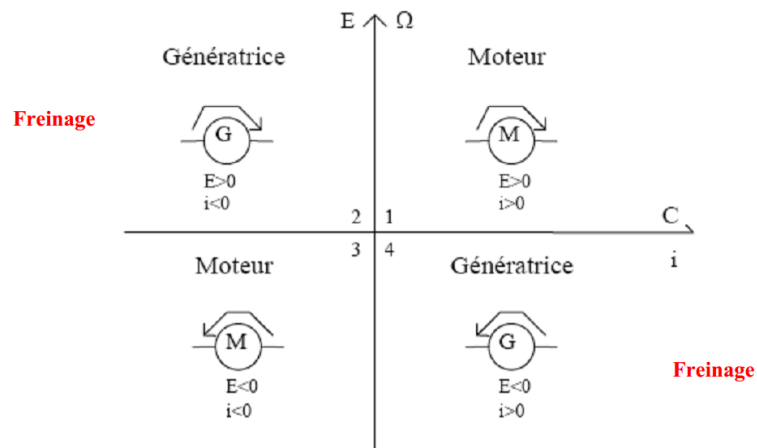


Figure I. 12 Principe du fonctionnement d'un Hacheur quatre quadrants.

I.3.2 Applications des hacheurs

Certaines applications connues les systèmes de récupération de l'énergie (variateur de vitesse, monte-charge, systèmes à énergie renouvelable), nécessitent des convertisseurs capables d'acheminer l'énergie d'un générateur vers un récepteur et inversement, du récepteur vers le générateur : on dit qu'ils sont réversibles.

Ce procédé est cependant peu employé et de toute façon réservé aux puissances relativement importantes. Aux faibles et moyennes puissances, on utilise généralement les alimentations à découpage.

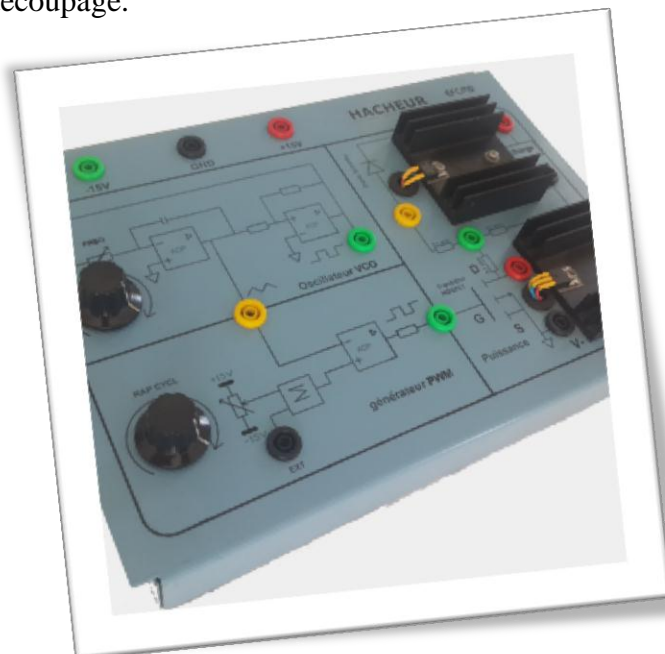


Figure I. 13 photographie d'un Hacheur 1 quadrant.

I.4 Présentation de convertisseur continu-alternatifs (DC/AC)

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC) (**Figure.I.15**). En fait, cette conversion d'énergie est assurée à l'aide d'un dispositif de commande (semi-conducteurs). Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace. La tension de sortie d'un onduleur a une forme d'onde périodique qui n'est pas sinusoïdale, mais qui peut être très proche de la forme d'onde souhaitée.

Il existe plusieurs types d'onduleurs, lesquels sont classés selon le nombre de phases, l'utilisation de dispositifs semi-conducteurs de puissance, les principes de commutation et les formes d'ondes de sortie.

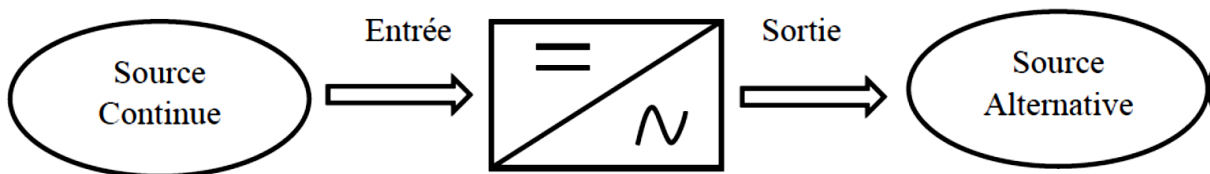


Figure I. 14 Principe de la conversion continue - alternative (DC/AC)

I.4.1 Principe général de fonctionnement

Pour réaliser un onduleur, il suffit de disposer d'un interrupteur inverseur K et d'une source de tension continue (U_{dc}) comme la montre la (**Figure I.16**) :

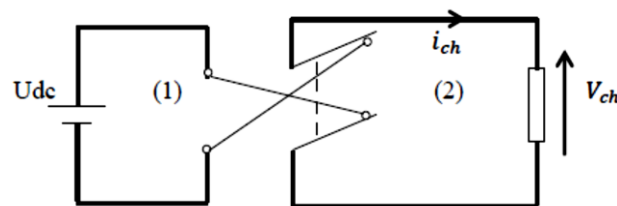


Figure I. 15 Principe de fonctionnement de l'onduleur

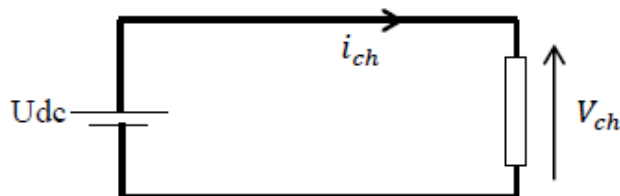


Figure I. 16 K en position (1)

Lorsque K est en position (1), on obtient : $V_{ch} = U_{dc}$

Lorsque K est en position (2), on obtient : $V_{ch} = -U_{dc}$

La **figure.I.18** donne la forme de $V_{ch}(t)$ sur une période complète de fonctionnement

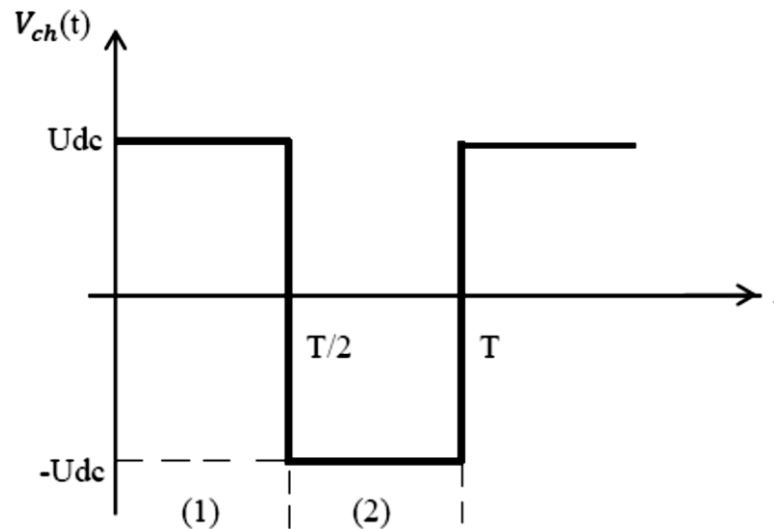


Figure I. 17 La tension avec K en position (1) et (2).

I.4.2 Types des onduleurs

I.4.2.1 Onduleur autonome

C'est un système qui nécessite des composants commandés à la fois à la fermeture et à l'ouverture, de fréquence variable, dont les instants de commutation sont imposés par des circuits externes. La charge est quelconque. Cet onduleur n'est pas réversible. On distingue deux types d'onduleurs autonomes :

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

I.4.2.2 Les onduleurs de tension

Un onduleur de tension est un onduleur qui est alimenté par une source de tension continue, la tension « U_{dc} » n'est pas affecté par les variations du courant « i_{dc} » qui la traverse, la source continue impose la tension à l'entrée de l'onduleur et donc à sa sortie. Le courant à la sortie « i_{ch} » et donc le courant à l'entrée « i_{dc} » dépendent de la charge placée du côté alternatif. Cette charge peut être quelconque à la seule condition qu'il ne s'agisse pas

d'une autre source de tension (capacité ou f. e. m alternative) directement branchée entre les bornes de sortie [7].

I.4.2.3 Les onduleurs de courant

Un onduleur de courant (souvent appelé commutateur de courant) est alimenté par une source de courant continu, c'est-à-dire par une source d'inductance interne si grande que le courant « i_{dc} » qui la traverse ne peut être affecté par les variations de la tension « U_{dc} » à ses bornes [7].

I.4.2.4 Les onduleurs à résonance

Les onduleurs à résonance sont des onduleurs de tension ou de courant à un créneau par alternance fonctionnant dans des conditions particulières. La charge doit être un circuit oscillant peu amorti. On commande les interrupteurs par une fréquence voisine de la fréquence de résonance de la charge. Si celle-ci varie, il faut faire varier la fréquence de commande. L'onduleur doit donc être piloté par la charge, il n'est plus autonome [8].

I.4.3 Types d'onduleurs de tension

I.4.3.1 Les onduleurs monophasés

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

- ✓ L'onduleur monophasé avec transformateur de sortie à point milieu appelé onduleur push-pull (**figure.I.19**).
- ✓ L'onduleur monophasé avec diviseur capacitif à l'entrée appelé onduleur en demi-pont. (**figure.I.21**).

Si on veut varier la largeur relative des créneaux formant les alternances de la tension de sortie, il faut quatre interrupteurs c'est : l'onduleur monophasé en pont (**figure.I.20**) [7].

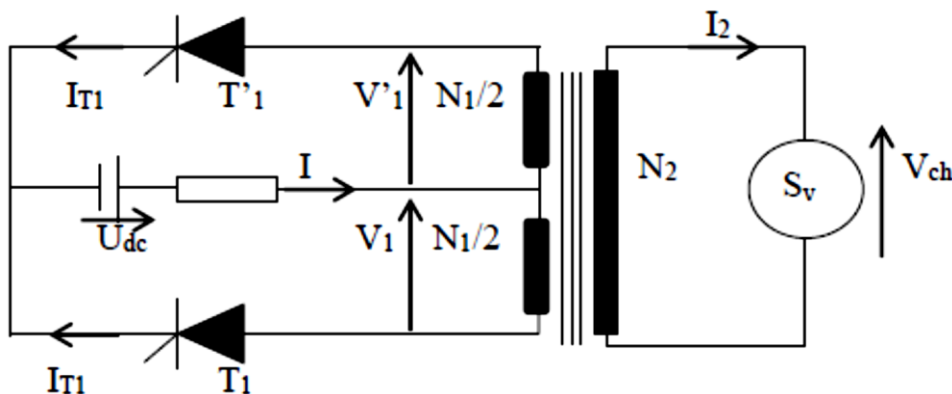


Figure.I.18 Onduleur monophasé avec transformateur de sortie à point milieu

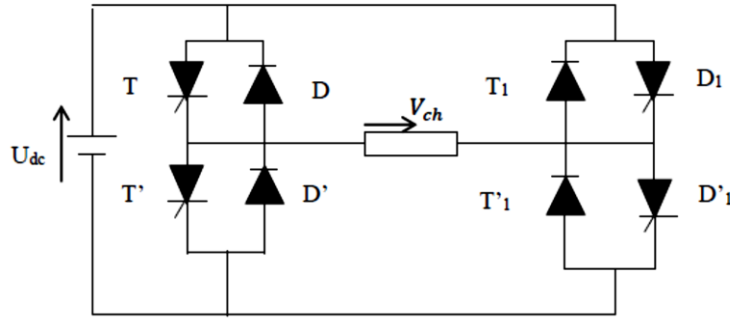


Figure.I.19 Onduleur monophasé en pont

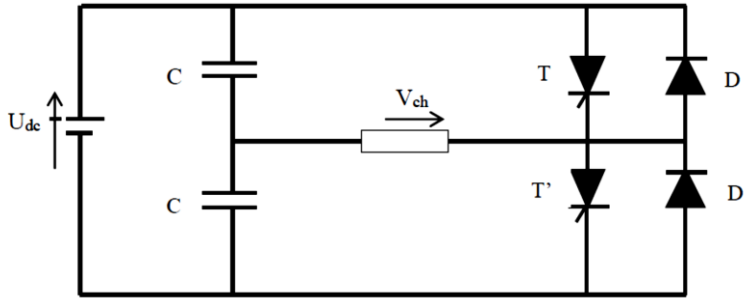


Figure.I.20 Onduleur en demi-pont

I.4.3.2 Les onduleurs triphasés

L'onduleur de tension triphasé découle immédiatement de trois demi pont monophasé en parallèle, on obtient l'onduleur triphasé à six interrupteurs (**figure.I.22**). Chaque demi pont comprend un thyristor (ou un transistor) et une diode. La source de tension continue est obtenue à partir d'un pont redresseur.

Pour assurer la continuité des courants de sortie alternatif i_a , i_b , i_c , les interrupteurs K_1 , $K'1$ et K_2 , $K'2$, K_3 et $K'3$ doivent être complémentaires deux à deux [7]

On définit $K_i = (T_i, D_i)$

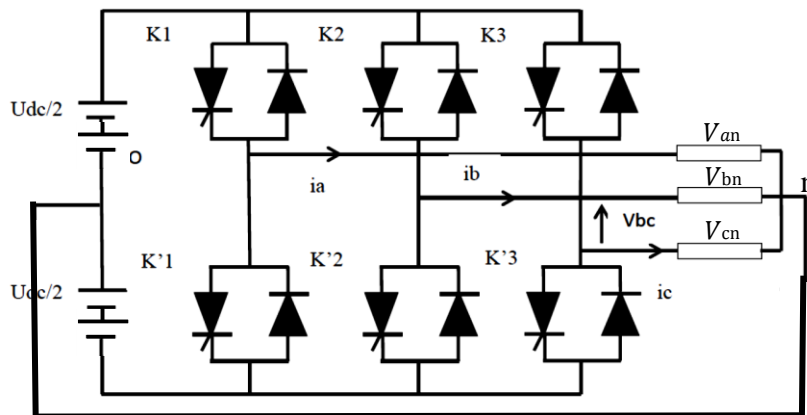


Figure I. 21 Onduleur triphasé

I.4.1 Fonctionnement des onduleurs triphasés :

Les tensions V_{ao} , V_{bo} et V_{co} mesurées entre les points a, b, c et le point o sont exprimées comme suit :

$$V_{ao} = V_a - V_o = \begin{cases} \frac{+U}{2} & \text{si } K1 \text{ fermé} \\ \frac{-U}{2} & \text{si } K1' \text{ fermé} \end{cases} \quad (\text{I.3})$$

$$V_{bo} = V_b - V_o = \begin{cases} \frac{+U}{2} & \text{si } K2 \text{ fermé} \\ \frac{-U}{2} & \text{si } K2' \text{ fermé} \end{cases} \quad (\text{I.4})$$

$$V_{co} = V_c - V_o = \begin{cases} \frac{+U}{2} & \text{si } K3 \text{ fermé} \\ \frac{-U}{2} & \text{si } K3' \text{ fermé} \end{cases} \quad (\text{I.5})$$

La charge est équilibrée. A cet effet on peut écrire la relation :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{I.6})$$

Au niveau de la charge on peut déduire les relations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ab} = V_{an} - V_{bn} \\ V_{bc} = V_{bn} - V_{cn} \\ V_{ca} = V_{cn} - V_{an} \end{array} \right. \quad (\text{I.7})$$

Ainsi :

$$\begin{aligned} V_{ab} - V_{ca} &= V_{an} - V_{bn} - (V_{cn} - V_{an}) = 3V_{an} \\ V_{bc} - V_{ab} &= V_{bn} - V_{cn} - (V_{an} - V_{bn}) = 3V_{bn} \\ V_{ca} - V_{bc} &= V_{cn} - V_{an} - (V_{bn} - V_{cn}) = 3V_{cn} \end{aligned} \quad (\text{I.8})$$

En effectuant la différence entre les membres, on obtient :

$$\begin{aligned}
 V_{ab}-V_{ca} &= V_{ao}-V_{bo}-(V_{co}-V_{ao}) = 2V_{ao}-V_{bo}-V_{co} \\
 V_{bc}-V_{ab} &= V_{bo}-V_{co}-(V_{ao}-V_{bo}) = 2V_{bo}-V_{ao}-V_{co} \\
 V_{ca}-V_{bc} &= V_{ao}-V_{co}-(V_{bo}-V_{co}) = 2V_{co}-V_{ao}-V_{bo}
 \end{aligned}
 \tag{I.9}$$

D'après ces équations on tire les tensions :

$$\begin{cases}
 V_{an} = \frac{1}{3}(2V_{ao}-V_{bo}-V_{co}) \\
 V_{bn} = \frac{1}{3}(2V_{bo}-V_{ao}-V_{co}) \\
 V_{cn} = \frac{1}{3}(2V_{co}-V_{ao}-V_{bo})
 \end{cases}
 \tag{I.10}$$

La figure (I.23) montre les chronogrammes des tensions V_{ao} , V_{bo} , V_{co} .

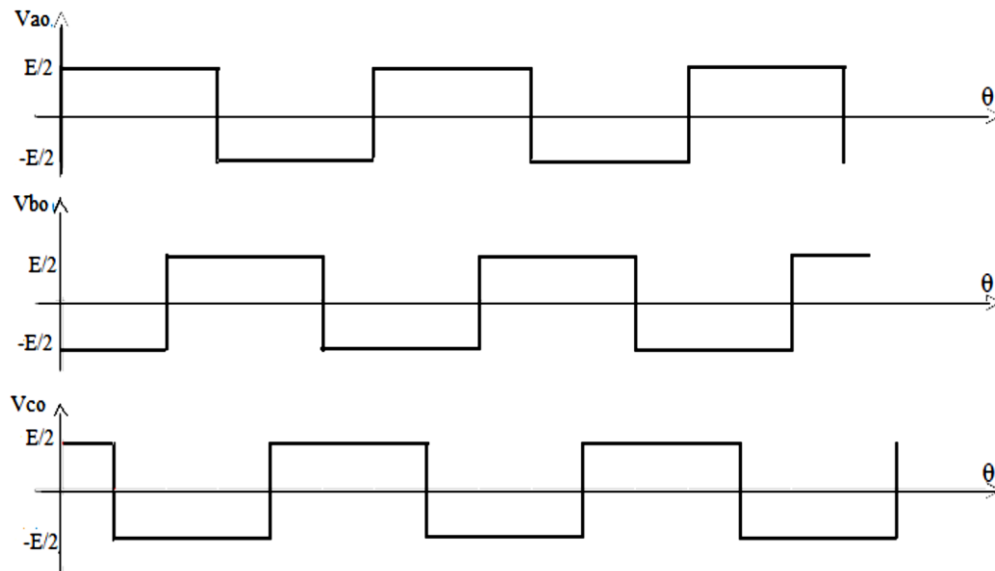


Figure I. 22 Chronogrammes des tensions V_{ao}, V_{bo}, V_{co} [9]

I.4.1 Les applications des onduleurs

Parmi les nombreux domaines d'emploi des onduleurs, 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 [10], [11]. 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.

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

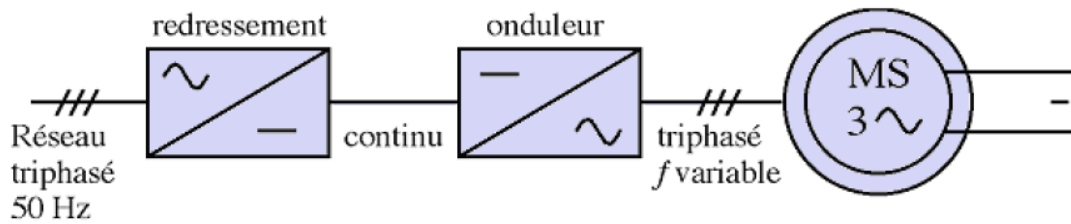


Figure I. 22 Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone

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.

I.4.1.2 Alimentation de secours

Lors d'une panne d'électricité, un onduleur assure la continuité de l'alimentation des machines à partir de batteries. En informatique professionnelle, un onduleur est indispensable pour éviter la perte d'informations en cas de panne du secteur [12].

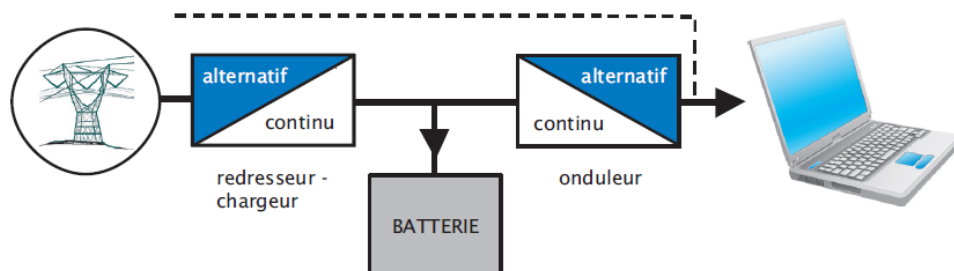


Figure I. 23 Alimentation de secours

I.4.1.3 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.

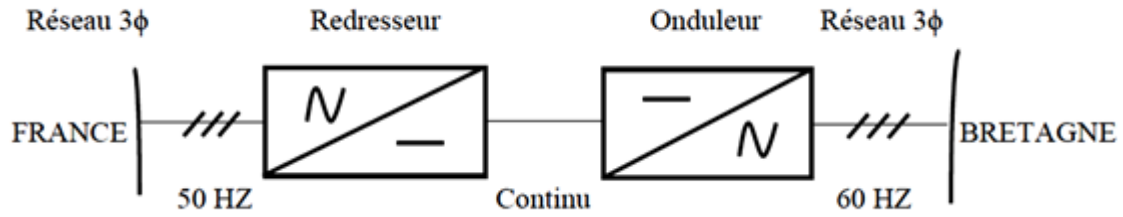


Figure I. 24 transfère d'énergie entre deux réseau

I.4.1.4 Les onduleurs dans le transport :

- **Transport ferroviaire** : les motrices actuellement développées sont mues par des machines alternatives asynchrones. Pour contrôler la vitesse de rotation de ces dernières, on doit pouvoir faire varier la fréquence de leur l'alimentation. Cela est réalisé par un onduleur. [10] exemple TGV, trains, Tramway.
- **Transport Aériens et maritimes** : Tout avion produit lui-même l'énergie électrique dont il a besoin pour le fonctionnement de ces équipements de bord [10].

I.4.2 Commande d'un onduleur triphasé :

I.4.2.1 Commande Plein onde (180°) :

Dans la commande 180° chaque interrupteur est commandé pour une durée de demi-période. D'après le tableau (I.1) la fermeture d'un interrupteur coïncide avec l'ouverture de l'autre interrupteur située dans le même bras [7]. La commande des interrupteurs de deux bras différents est décalée de 120°.

Tableau 1. 1 Commande de 180°

| | | | | | |
|------|-------|-------|------|-------|-------|
| $K1$ | | $K1'$ | | $K1$ | |
| $K2$ | $K2'$ | | $K2$ | $K2'$ | |
| $K3$ | $K3'$ | | $K3$ | | $K3'$ |

I.4.2.2 Modulation de largeur d'impulsions ou (PWM):

Cette technique est applicable pour l'onduleur monophasé et triphasé. Elle est déduite de la comparaison entre le signal variable S_{var} (sinusoïdal d'amplitude variable et de fréquence f qui détermine la fréquence de la tension de sortie) et de porteuse S_p (triangulaire d'amplitude fixe et de fréquence très élevée). L'utilisation de cette commande permet d'éliminer les premiers rangs d'harmoniques de courant afin d'améliorer le facteur de puissance. Cette technique ne résout pas totalement le problème des harmoniques de courant. Le résultat est un chronogramme de commande dans la figure (I.26)

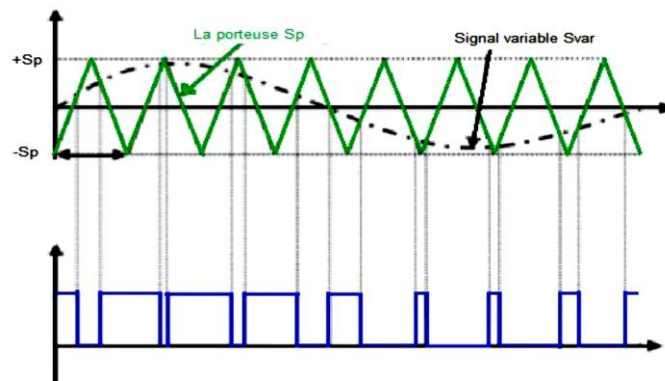


Figure I. 25 commade MLI

Le réglage en amplitude et en fréquence de la tension de sortie de l'onduleur est défini par le coefficient de réglage en tension (représentant le rapport de l'amplitude de la tension de référence à la valeur crête de la porteuse), et l'indice de modulation qui est donné par le rapport des fréquences de la porteuse et de la référence [12].

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté une généralité sur les convertisseurs statiques de type DC-DC et DC-AC.

Nous avons commencé par une présentation de l'élément de base utilisé dans le fonctionnement des convertisseurs statiques qui est l'interrupteur semi-conducteur. Ensuite, nous avons donné les différentes structures de chaque convertisseur ainsi que leurs fonctionnements. Enfin, nous avons cité quelques applications de ces convertisseurs dans des nombreux domaines.

CHAPITRE II

Modulation de largeur
d'impulsion (MLI)

Introduction :

La technique de modulation de largeur d'impulsion est utilisée pour commander les convertisseurs afin de produire une tension de sortie alternative ou continue réglable, en ajustant le rapport cyclique. Il donne des meilleurs résultats par rapport à toute autre technique de contrôle [13], en termes de qualité de la forme d'onde de sortie, perte du système et d'efficacité [14].

Un certain nombre de techniques de modulation de largeur d'impulsion (PWM) sont utilisés pour obtenir la variation de l'amplitude et de la fréquence de tension sortie.

La SPWM, THIPWM et SVPWM sont les techniques PWM de contrôle les plus connues dans la conversion de l'énergie [15]-[16].

La SPWM est la technique la plus simple à implémenter pour les onduleurs [14], mais il a un seul inconvénient qui consiste un faible rendement puisqu'il exploite presque que 74% de la tension de bus continu [14], [17].

Pour soulever ce problème la THIPWM a été introduite où on peut exploiter le bus continu jusqu'à 91 % mais avec un THD relativement élevé, et il y a aussi un autre type de modulation est appelé (Space Vector Pulse Width Modulation SVPWM), il n'est applicable que sur les onduleurs de tension triphasé [18]. Avec cette technique, on obtient presque le même résultat que le THIPWM, en terme d'utilisation de bus continu, mais les commutations des interrupteurs sont plus régulières et par la suite les pertes de commutation sont réduites.

II.1 THÉORIE GÉNÉRALE DES DIFFÉRENTES TECHNIQUES DE MLI

II.1.1 Principe de la modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale

La technique MLI sinusoïdale est une technique très utilisée en industrie et est largement passée en revues dans la littérature. Le principe de cette technique consiste à comparer un signal de référence (modulante) à une porteuse.

Le signal de référence représente l'image de la sinusoïde qu'on désire à la sortie de l'onduleur. Ce signal est modulable en amplitude et en fréquence. Quant à la porteuse, elle définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques de l'onduleur, c'est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence.

II.1.2 La modulation de largeur d'impulsion par THIPWM

II.1.2.1 Objective de THIPWM

L'injection de l'harmonique 3 dans la tension de référence permet d'améliorer la forme de la tension de sortie et d'augmenter l'amplitude maximale du fondamental dans la référence et par conséquent dans la tension de sortie.

II.1.2.2 Principe de la modulation de largeur d'impulsion par injection de troisième harmonique

la technique de modulation de largeur d'impulsion d'injection de troisième harmonique (THIPWM) a été développée pour augmenter le rendement de l'onduleur qui s'écrit,

$$y = \sin \theta + A \sin 3\theta \quad (\text{II.2})$$

il contient la composante fondamentale en plus d'un terme de fréquence triple, ou $\theta = \omega t$ et A est un paramètre à optimiser pour garder le maximum d'amplitude de $y(t)$ inférieur à l'unité. La valeur maximale de $y(t)$ correspond à une dérivée nulle [19].

$$\frac{dy}{d\theta} = 0$$

Après calcul [14], on trouve $A = \frac{1}{6} = 0.166$

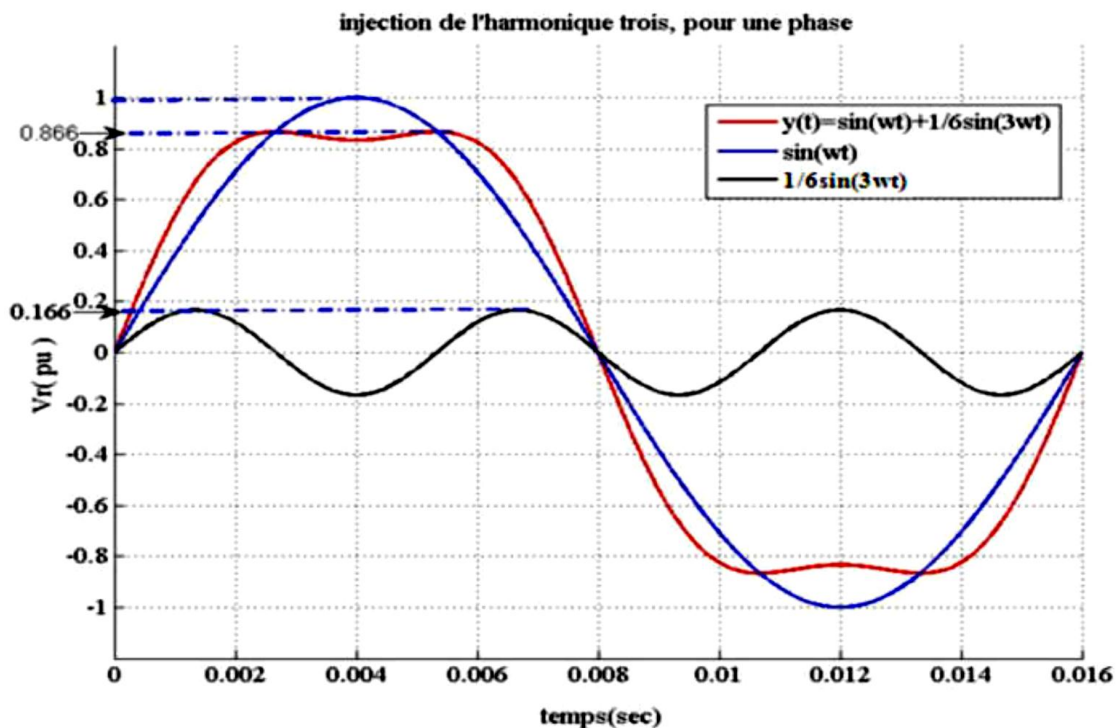


Figure II. 2Injection de l'harmonique trois, pour une phase[19]

Le signal de référence résultant a une amplitude de $\frac{\sqrt{3}}{2} = 0.866$, (figure II.1), ce qui va réduire la tension de sortie, sans changer l'amplitude du fondamental. On doit corriger le signal de référence par un facteur K tel que :

$$y = K (\sin \theta + A \sin 3\theta) \quad (\text{II.3})$$

Ce facteur doit vérifier la condition :

$$\frac{K\sqrt{3}}{2} = 1, \text{ ce qui donne } K = \frac{2}{\sqrt{3}}$$

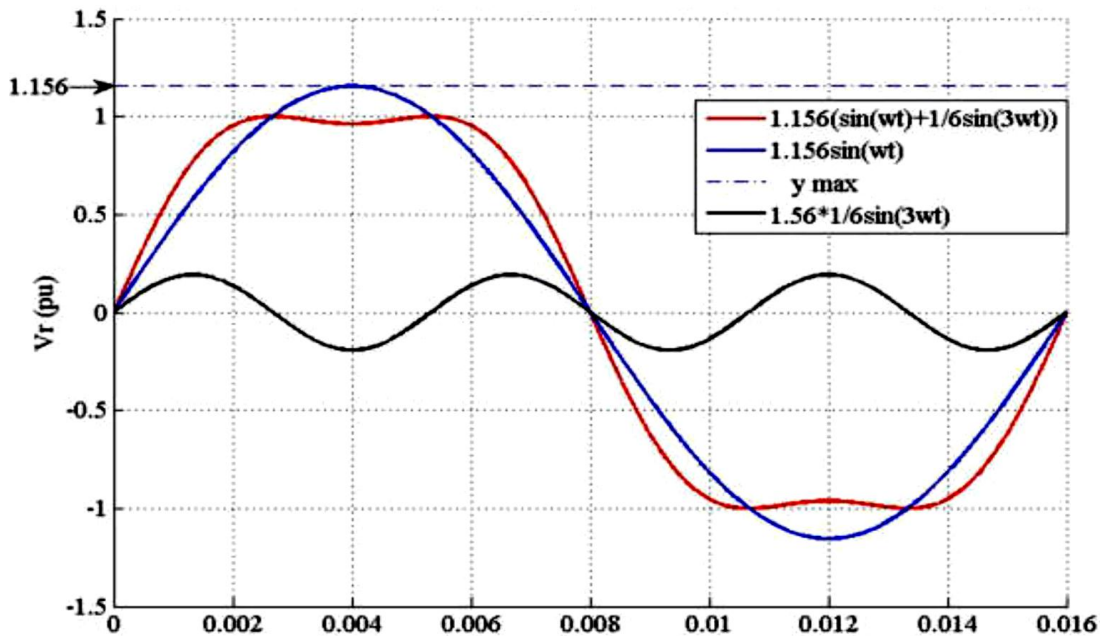


Figure II. 4 Injection de l'harmonique trois, avec facteur de correction, pour une phase[19]

Cette technique permet donc d'augmenter le fondamental de la tension de sortie avec 11.56% plus que la MLI sinus-triangle, soit 90 % de celle obtenue avec une commande pleine onde, ce qui correspond à un fondamental maximum de $U/\sqrt{3}$.

Pour implémenter la THIPWM on procédé de la même manière que la MLI sinus triangle ; on compare avec une porteuse triangulaire les trois signaux de référence obtenus par l'algorithme de la modulation THIPWM :

$$\begin{cases} V_{ra} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\sin \omega t + \frac{1}{6} \sin 3\omega t \right) \\ V_{rb} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + \frac{1}{6} \sin(3\omega t - \frac{2\pi}{3}) \right) \\ V_{rc} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) + \frac{1}{6} \sin(3\omega t + \frac{2\pi}{3}) \right) \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

II.1.3 MLI de Vectorielle

La modulation vectorielle est un algorithme de contrôle de la modulation de largeur d'impulsion pour un onduleur triphasé. Cette technique est utilisée principalement dans les machines électriques et surtout pour l'entraînement des machines asynchrones.

II.1.3.1 Principe de base de SVPWM :

La MLI vectorielle, ne s'appuie pas sur des calculs séparés des modulations pour chacun des bras de l'onduleur. L'objectif de cette technique consiste est d'approcher le vecteur de tension de référence V_{ref} en utilisant les huit vecteurs de tension correspondant aux huit états possibles de l'onduleur [24]. La figure ci-dessous représente un onduleur triphasé avec trois bras de commutation $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q'_3$. La SVPWM fonctionne sur le principe que lorsque l'interrupteur supérieur est ouvert l'interrupteur inférieur doit être obligatoirement fermé dans le même bras.

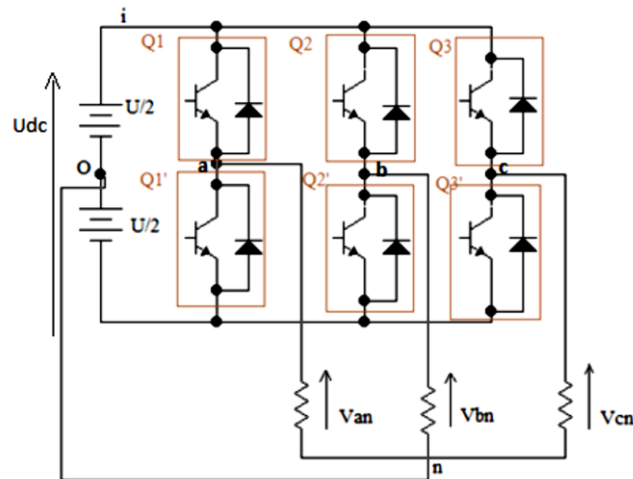


Figure II. 6 Circuit de puissance d'un onduleur triphasé

Les vecteurs de tensions composés sont donnés en fonction des points a, b, c dans la matrice ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

Dans ce modèle, si la tension triphasée idéale Nous avons :

$$V_{an} = V_m \sin(2\pi f m t) \quad (\text{II.6})$$

$$V_{bn} = V_m \sin(2\pi f_m t - 2\pi/3)$$

$$V_{cn} = V_m \sin(2\pi f_m t + 2\pi/3)$$

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

Transformation de Clarcke :

Afin de simplifier les calculs on remplace le système triphasé de trois tensions V_{an} , V_{bn} , V_{cn} par un système diphasé.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

Les configurations possibles :

Les composantes V_d et V_q sont considérés comme la projection du vecteur V_{ref} Avec :

$$V_{ref} = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} \quad \text{Et} \quad \alpha = \tan^{-1}\left(\frac{V_q}{V_d}\right) \quad (\text{II.9})$$

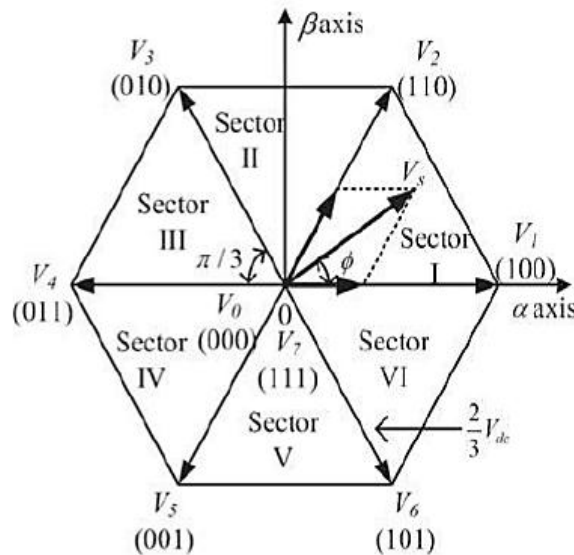


Figure II. 8 Les huit configurations possibles.

Il existe 8 combinaisons possibles 2^3 pour les bras de l'onduleur avec six non nuls indiqués par $\vec{V}_1 \vec{V}_2 \vec{V}_3 \vec{V}_4 \vec{V}_5 \vec{V}_6$ et deux vecteurs nuls $\vec{V}_0 \vec{V}_7$. On indique par (1) l'état fermé de l'interrupteur et (0) l'état Ouvert de l'interrupteur.

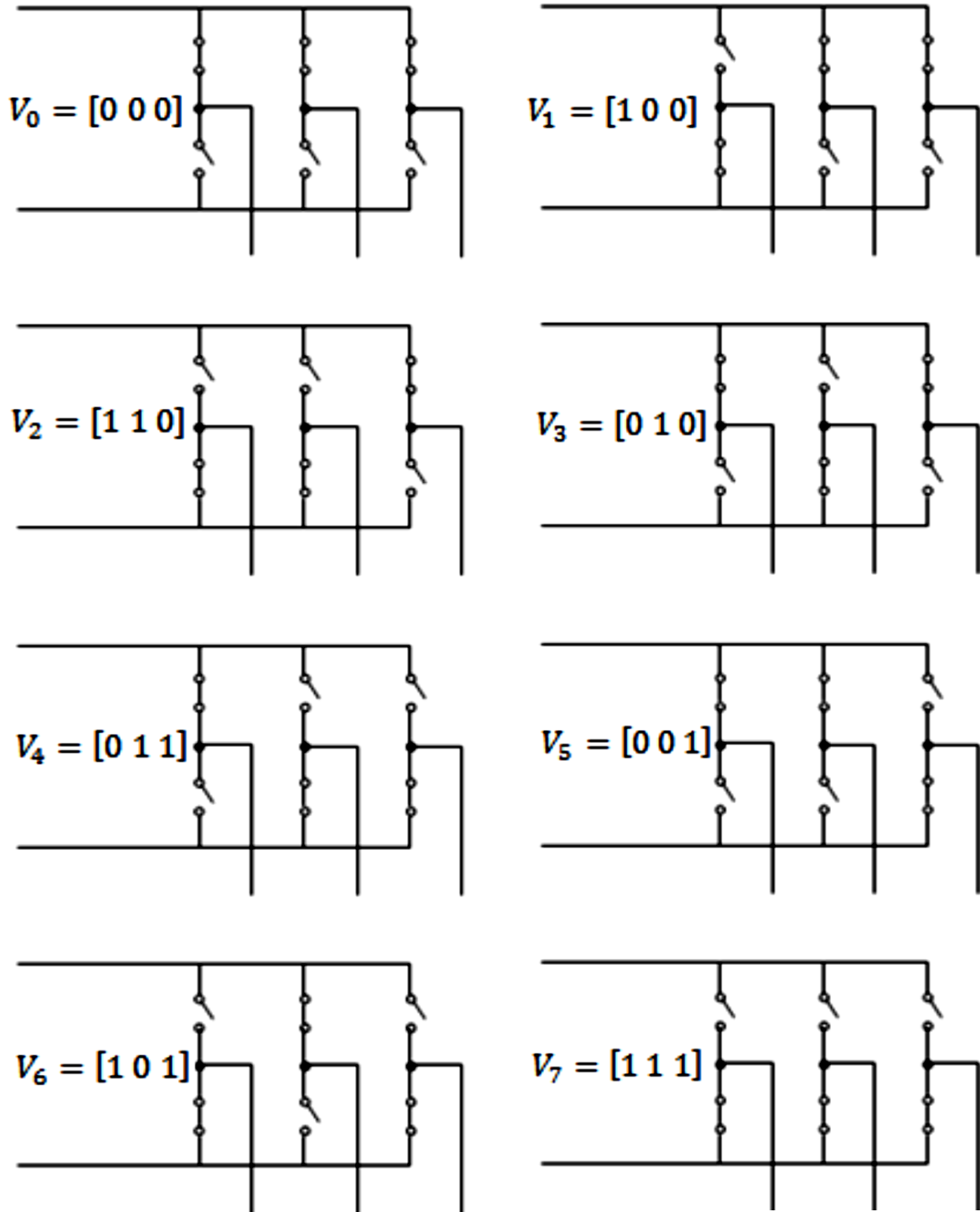


Figure II. 11 les combinaisons possibles des interrupteurs [23]

Le tableau ci-dessous représente les configurations possibles de vecteurs de tensions .

Tableau II 1 Les combinaisons de vecteurs de tension d'un onduleur triphasé [24]

| $K1$ | $K2$ | $K3$ | V_{an} | V_{bn} | V_{cn} | V_{ab} | V_{bc} | V_{ca} | vecteur |
|------|------|------|-------------------|-------------------|-------------------|----------|----------|----------|------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | $\overline{V_0}$ |
| 1 | 0 | 0 | $\frac{2U_c}{3}$ | $-\frac{U_c}{3}$ | $-\frac{U_c}{3}$ | U_c | 0 | $-U_c$ | $\overline{V_1}$ |
| 1 | 1 | 0 | $\frac{U_c}{3}$ | $\frac{U_c}{3}$ | $-\frac{2U_c}{3}$ | 0 | U_c | $-U_c$ | $\overline{V_2}$ |
| 0 | 1 | 0 | $-\frac{U_c}{3}$ | $\frac{2U_c}{3}$ | $-\frac{U_c}{3}$ | $-U_c$ | U_c | 0 | $\overline{V_3}$ |
| 0 | 1 | 1 | $-\frac{2U_c}{3}$ | $\frac{U_c}{3}$ | $\frac{U_c}{3}$ | $-U_c$ | 0 | U_c | $\overline{V_4}$ |
| 0 | 0 | 1 | $-\frac{U_c}{3}$ | $-\frac{U_c}{3}$ | $\frac{2U_c}{3}$ | 0 | $-U_c$ | U_c | $\overline{V_5}$ |
| 1 | 0 | 1 | $\frac{U_c}{3}$ | $-\frac{2U_c}{3}$ | $\frac{U_c}{3}$ | U_c | $-U_c$ | U_c | $\overline{V_6}$ |
| 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | $\overline{V_7}$ |

II.1.4 Les calculs de temps de commutation des interrupteurs :

L'objectif de SVPWM est de faire l'approximation de la tension de référence V_{ref} par la combinaison des huit modèles de commutation, la tension de référence est construite entre deux états adjacents V_i et V_{i+60} de temps d'application T_i et T_{i+60} respectivement.

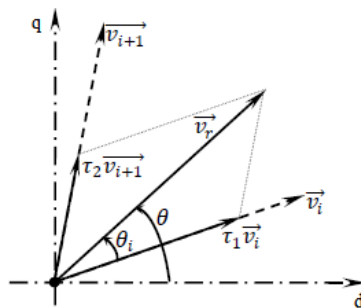


Figure II. 14 La formation de la tension de référence [24]

En cas ou la somme des instants d'applications des vecteurs V_i et V_{i+60} est inférieure à la période de commutation, on peut compléter en utilisant les vecteurs nuls.

$$\vec{V}_r = \tau_1 \vec{V}_i + \tau_2 \vec{V}_{i+1} + \tau_0 \vec{V}_0 + \tau_7 \vec{V}_7 \tag{II.10}$$

Avec $\tau_i = T_i / T_{com}$

Par la projection sur les deux axes d et q

$$V_r \cos(\theta) = \tau_1 V_i \cos\left(\frac{i\pi}{3}\right) + \tau_2 V_{i+1} \cos\left(\frac{(i+1)\pi}{3}\right) \tag{II.11}$$

$$V_r \sin(\theta) = \tau_1 V_i \sin\left(\frac{i\pi}{3}\right) + \tau_2 V_{i+1} \sin\left(\frac{(i+1)\pi}{3}\right) \tag{II.12}$$

$$V_r \cos(\theta_i) = \tau_1 V_i \cos(0) + \tau_2 V_{i+1} \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) \tag{II.13}$$

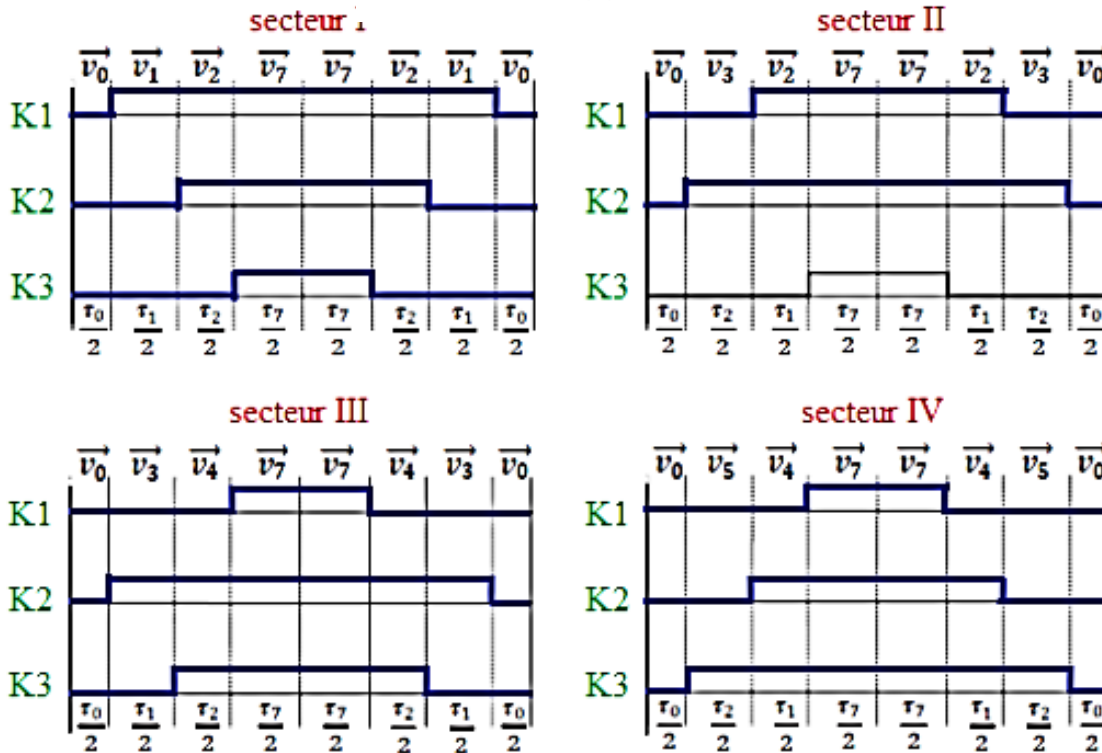
$$V_r \sin(\theta_i) = \tau_1 V_i \sin(0) + \tau_2 V_{i+1} \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \tag{II.14}$$

On pose que : $\theta = \theta_i - i\pi/3$ (II.15)

Après calcul et simplification on peut obtenir :

$$\tau_1 = \frac{V_r \cos(\theta_i) - \tau_2 V_{i+1} \frac{1}{2}}{V_i} \tag{II.16}$$

$$\tau_2 = \frac{V_r \sin(\theta_i)}{V_{i+1} \sin\left(\frac{\pi}{3}\right)}$$



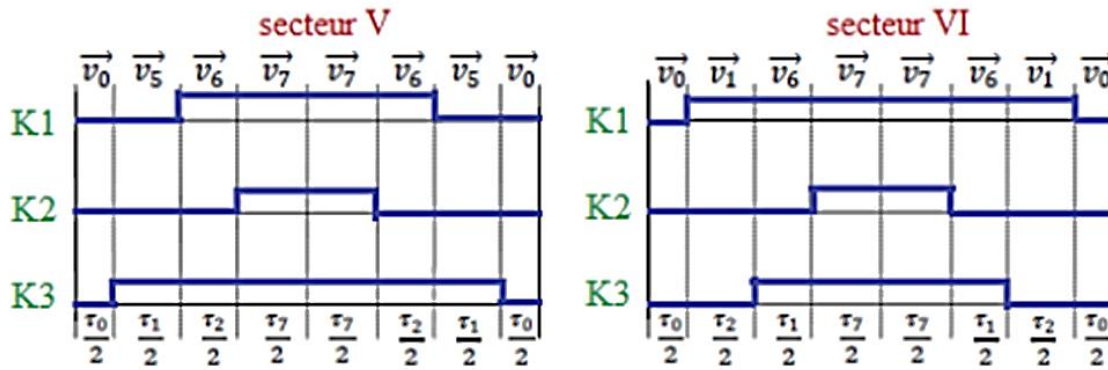


Figure II. 17 Les périodes de commutation des interrupteurs [25]

II.1.5 Principaux avantages de la M.L.I

- Une bonne élimination d'harmonique par rapport aux autres commandes[19].
- Avec une même source continue la MLI permet l'alimentation de plusieurs ensembles onduleurs, moteurs asynchrones.
- La variation de la valeur du fondamental de tension de sortie.
- La MLI permet d'écartier vers des fréquences élevées les harmoniques de la tension de sortie (le filtrage)[19].

II.1.6 Les inconvénients de la MLI :

- Le contenu harmonique généré par une onde M.L.I entraîne des pertes dans le réseau (pertes fer dans le transformateur, pertes Joule et pertes par courants de Foucault).
- Elle génère des bruits acoustiques et des résonances électromécaniques dans les machines tournantes des oscillations de couple.
- Elle déstabilise le système à cause de l'injection du bruit sur la commande. [19]

Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les principes des différentes techniques de la commande MLI SPWM, THIPWM et SVPWM On prendre un concept général sur chaque technique et à la fin on a montré les avantages et les inconvénient cette technique.

Chapitre III

Simulation et Interprétations des Résultats

III.1 INTRODUCTION

Les onduleurs de tension peuvent être pilotés suivant plusieurs stratégies. A fréquence élevée, ils sont pilotés en modulation de largeur d’impulsion. Cette stratégie permet de régler à la fois l’amplitude et la fréquence en gardant la source continue constante (pont à diode). Afin de produire une tension de sortie proche de la sinusoïde, différentes stratégies de commande ont été proposées par différents auteurs dans le chapitre précédent. Les plus utilisées sont les suivantes :

- Modulation MLI Sinusoïdale (SPWM)
- Modulation MLI injection de troisième harmonique
- Modulation MLI vectorielle (SVPWM)

MATLAB/Simulink est un logiciel destiné principalement au calcul scientifique, à la modélisation et à la simulation. Le noyau de calcul est associé à l’environnement SIMULINK, permettant une modélisation basée sur des schémas-blocs.

Des bibliothèques spécialisées sont disponibles “Toolboxes“ pour la plupart des domaines scientifiques nécessitant des moyens de calcul importants : automatique, traitement de signal, mathématiques appliquées, télécommunications, etc.

III.2 SIMULATIONS

Les signaux générés par le bloc MLI (modèle programmé sous MATLAB-Simulink) sont utilisés pour commander un onduleur de tension alimentant une charge résistive comme l’indique la figure (III.1).

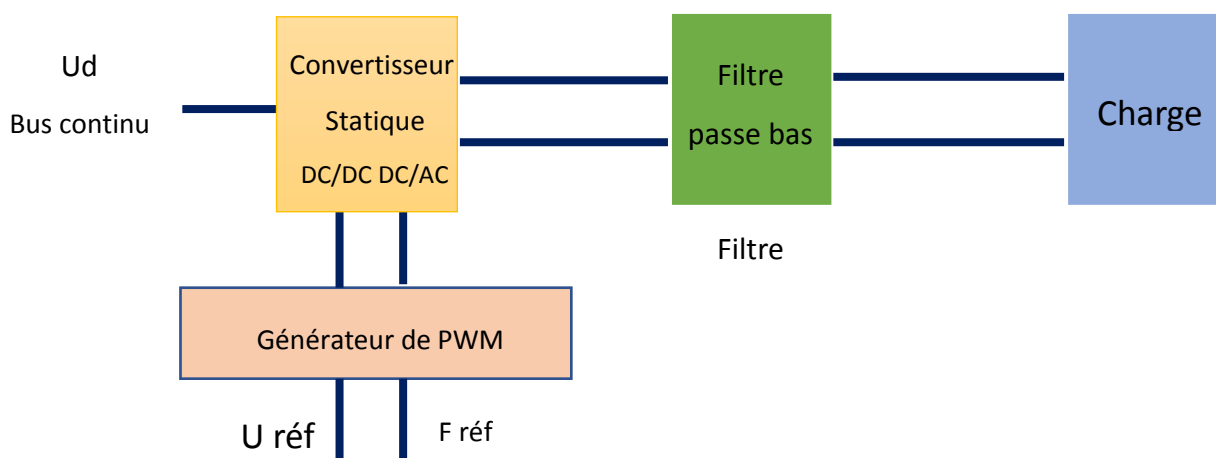


Figure III. 2 Schéma fonctionnel

Pour visualiser les fondamentaux des tensions de sortie de l'onduleur, un filtre passe bas LC ($L=33\text{mH}$, $C= 0.47 \mu\text{F}$), et une charge résistive ($R=120 \Omega$) sont utilisés.

Le block Powergui (Graphical user interface) est utilisé pour l'analyse spectrale.

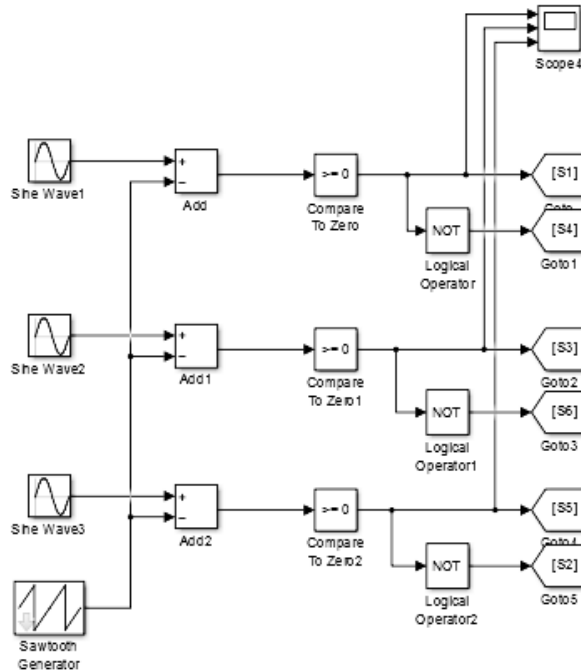


Figure III. 3 modèle la SPWM

III.2.1 Simulation de la commande par SPWM

Les impulsions de SPWM sont générées en comparant, trois signaux de référence à basse fréquence (en général une sinusoïde), décalés entre eux avec 120° , à une onde porteuse à haute fréquence (forme de dents de scie ou triangulaire), d'une amplitude V_c , et de fréquence f_c . Les de signaux de référence ont la forme :

$$\begin{cases} V_{a_ref}(t) = V_r \sin(2\pi f t) \\ V_{b_ref}(t) = V_r \sin(2\pi f t + 2\pi/3) \\ V_{c_ref}(t) = V_r \sin(2\pi f t - 2\pi/3), \quad m = V_r/V_c. \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

Avec

m : est l'indice de modulation ou la profondeur de modulation, qui sert à ajuster

L'amplitude de la tension de sortie, avec l'intervalle $0 < m < 1$

f : la fréquence de la fondamentale.

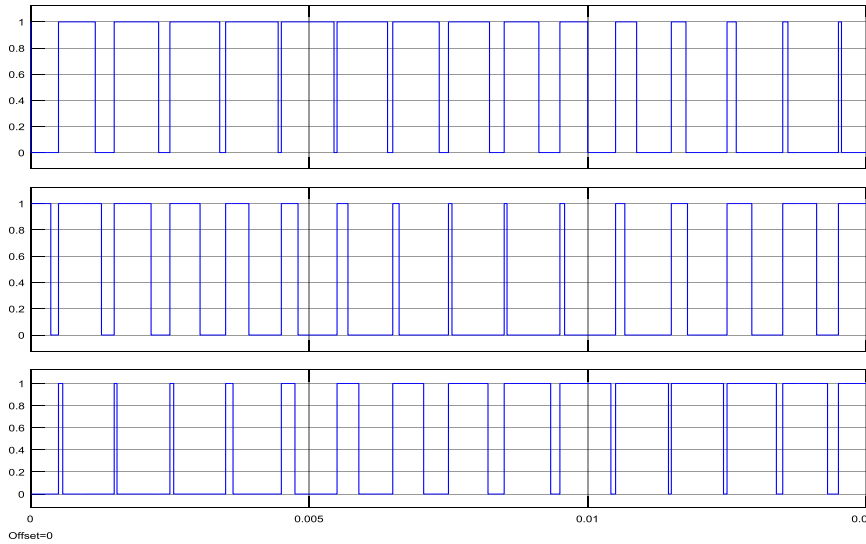


Figure III. 4 Les impulsions SPWM.

Figure III.3, présente les trois impulsions SPWM générées, pour commander les trois interrupteurs supérieurs (K1, K2, K3), leurs compléments sont utilisés pour commander les trois commutateurs inférieurs, avec $f = 50 \text{ Hz}$, et $m = 1$ $f_c = 1000$.

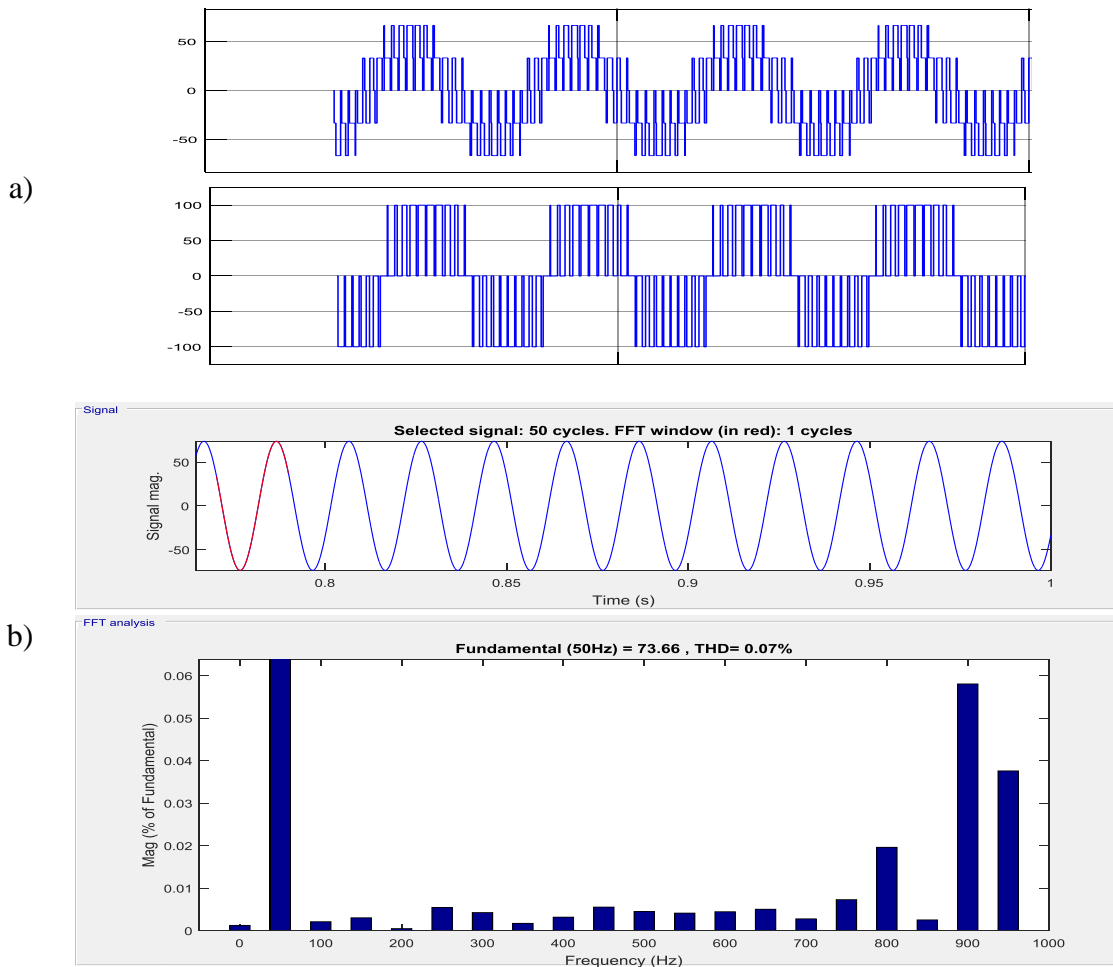


Figure III. 6 a) Tension de sortie de l'onduleur V_{ab} , V_{an} , b) Analyse spectral de la tension V_{ar} du sortie de filtre à $f_c = 1000$

A partir de l'analyse FFT de la tension de sortie de filtre (Figure III.4.b) l'amplitude de la composante fondamentale est 73.66 V.

Avec la stratégie SPWM, nous pouvons obtenir une tension de sortie presque sinusoïdale, avec moins de distorsion harmonique, mais l'amplitude maximum du fondamental de la tension de sortie, lorsque $m = 1$, est seulement 73,66%.

III.2.2 Simulation de la commande THIPWM

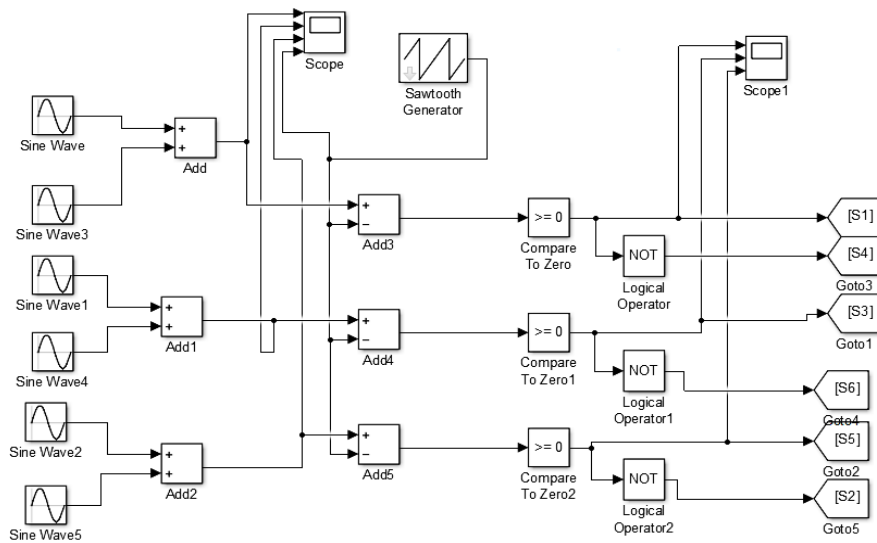
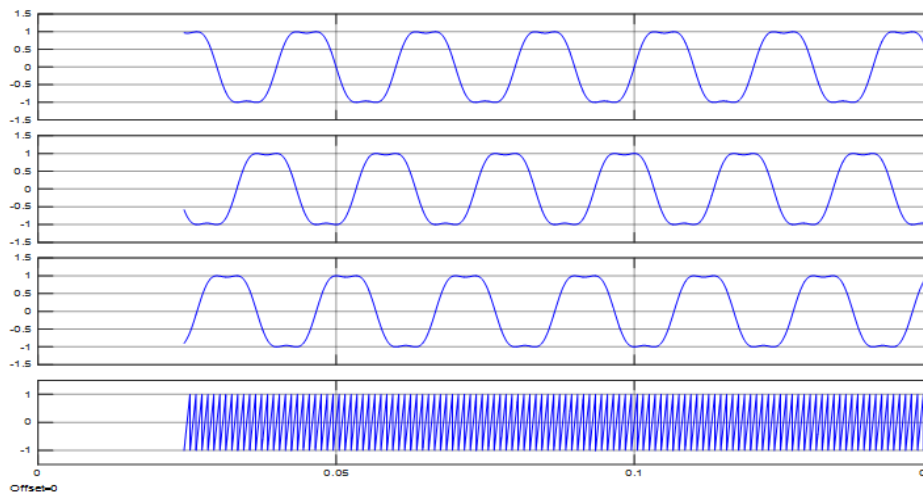


Figure III. 7 Modèle de la THIPWM

La THIPWM est mise en œuvre de la même manière que la SPWM. Les signaux de référence, sinus plus leur troisième harmonique, sont comparées avec une porteuse triangulaire.

En effet, l'amplitude des tensions composées ne dépassent pas la tension d'alimentation continue, mais ses composantes fondamentales sont supérieures à l'amplitude du fondamental de la tension de sortie obtenue avec la stratégie SPWM.



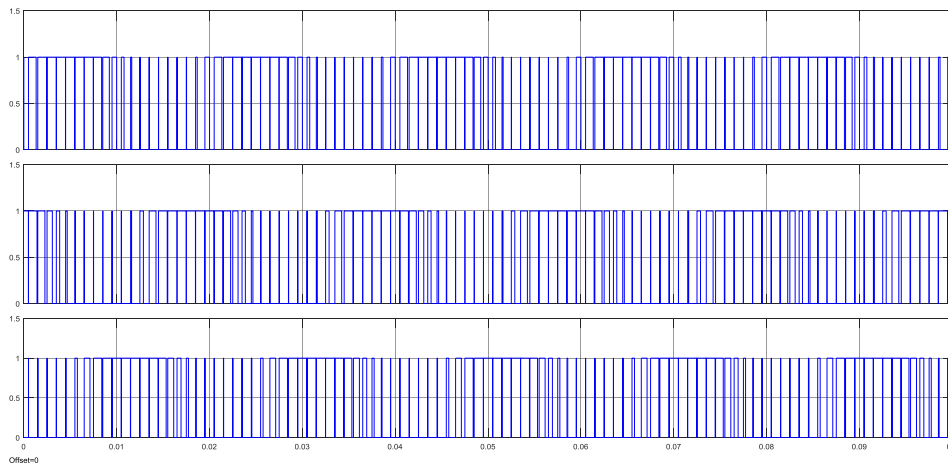


Figure III. 8 Génération des impulsions THIPWM.

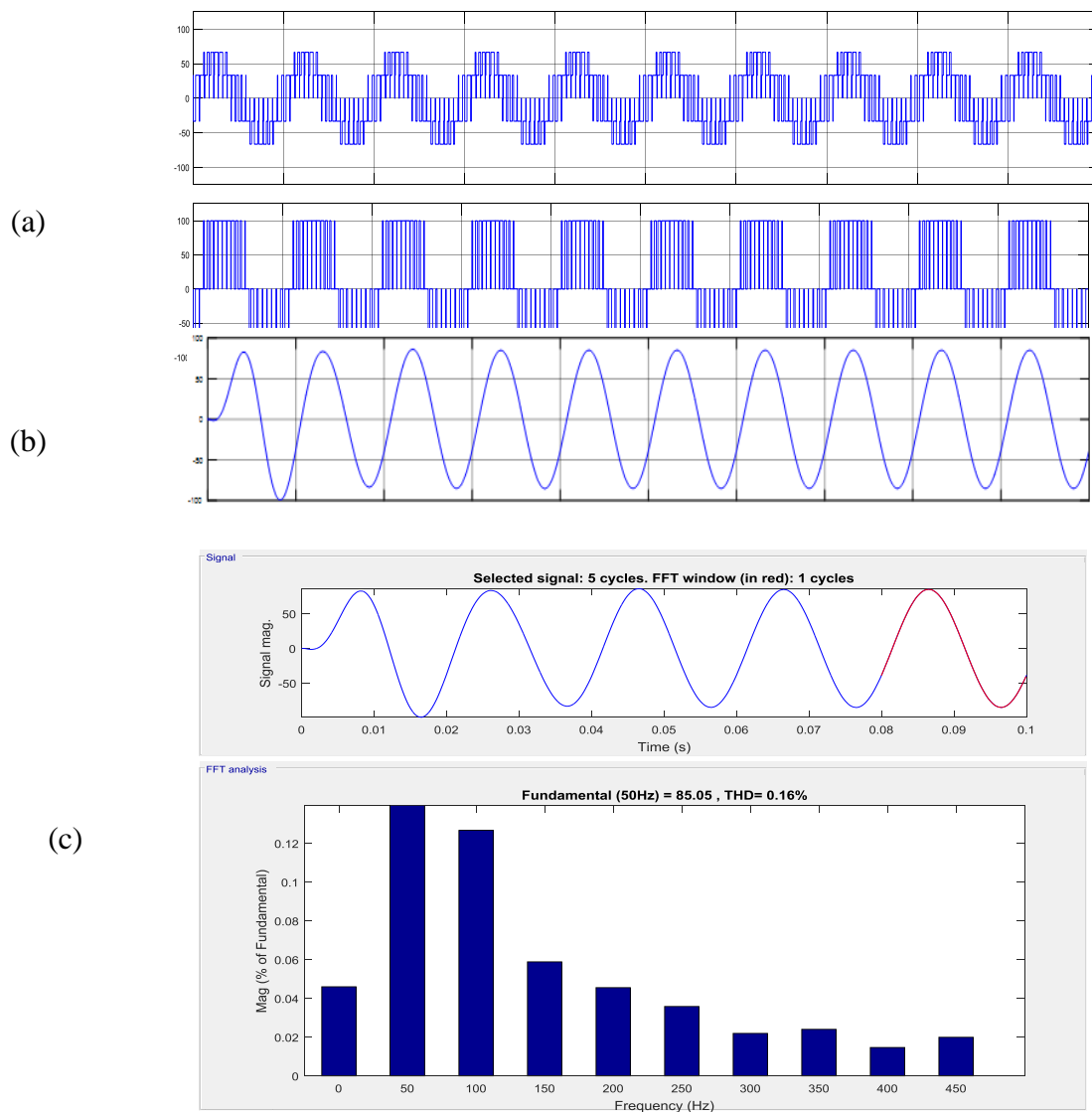


Figure III. 10 Résultats de simulation de THIPWM, a). Tension de sortie de l'onduleur composé et simple, b). Tension simple filtrée, c). Spectres de la tension filtrée.

On voit (Figure III.7), que l'amplitude du fondamental de la tension de sortie de filtre est de 85.5 V, avec un THD de 0.16%.

L'étude présentée confirme l'efficacité de la stratégie d'injection de la troisième harmonique, en termes d'utilisation du bus continu, de distorsion des harmoniques et de simplicité de mise en œuvre[19].

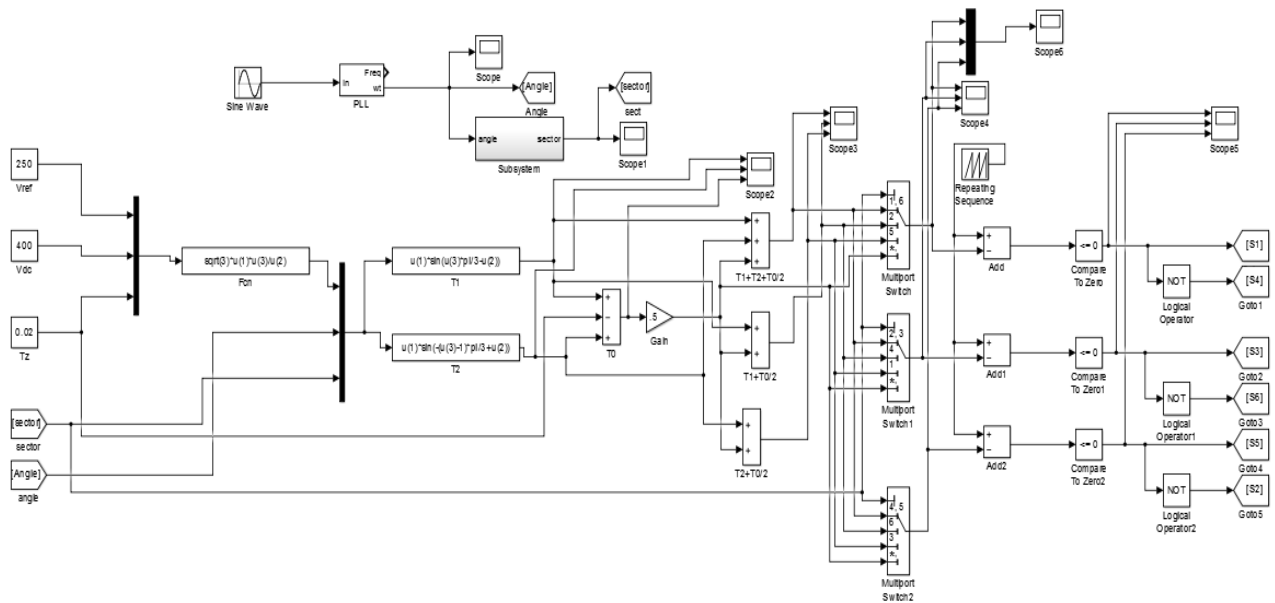


Figure III. 11 Modèle de SVPWM.

III.2.3 Simulation de la commande SVPWM

Puisque la technique SVPWM, est basée principalement sur le calcul dans l'espace vectoriel, de sorte que son algorithme de mise en œuvre nécessite des moyens de calcul importants, dans ce qui suit, nous allons essayer d'extraire, à travers l'étude théorique qui a été menée précédemment, les étapes nécessaires pour préparer l'algorithme de génération des signaux SVPWM, puis une simulation de cet algorithme, sera présentée, pour vérifier son efficacité pour la commande des onduleurs triphasés de tension.

La mise en œuvre de la stratégie SVPWM, à chaque période d'échantillonnage T_s , s'appuie sur les étapes suivantes :

- ✓ Calcul $V\alpha$, $V\beta$ à partir de $(V_{a_ref}, V_{b_ref}, V_{c_ref})$.
- ✓ Identification de secteur, dans lequel la tension de référence est localisée.

- ✓ Calcul de T_a , T_b , T_0
- ✓ Génération des signaux SVPWM en basant sur les temps de commutation des interrupteurs, pour chaque secteur.

Pour pouvoir vérifier que le block SVPWM génère correctement les signaux SVPWM,

Correspondant aux allures de la figure II.10, on prend la fréquence de porteuse, $f_c=15*f$ et $f=50$ HZ.

La figure III.10 présente les deux tensions de sortie composée V_{ab} et simple V_{an} de l'onduleur, et la tension filtrée V_{aR} et son spectre d'harmonique. Ces résultats de simulation sont obtenu pour $f_c=1$ KHz, $f=50$ Hz et $m=0.9$

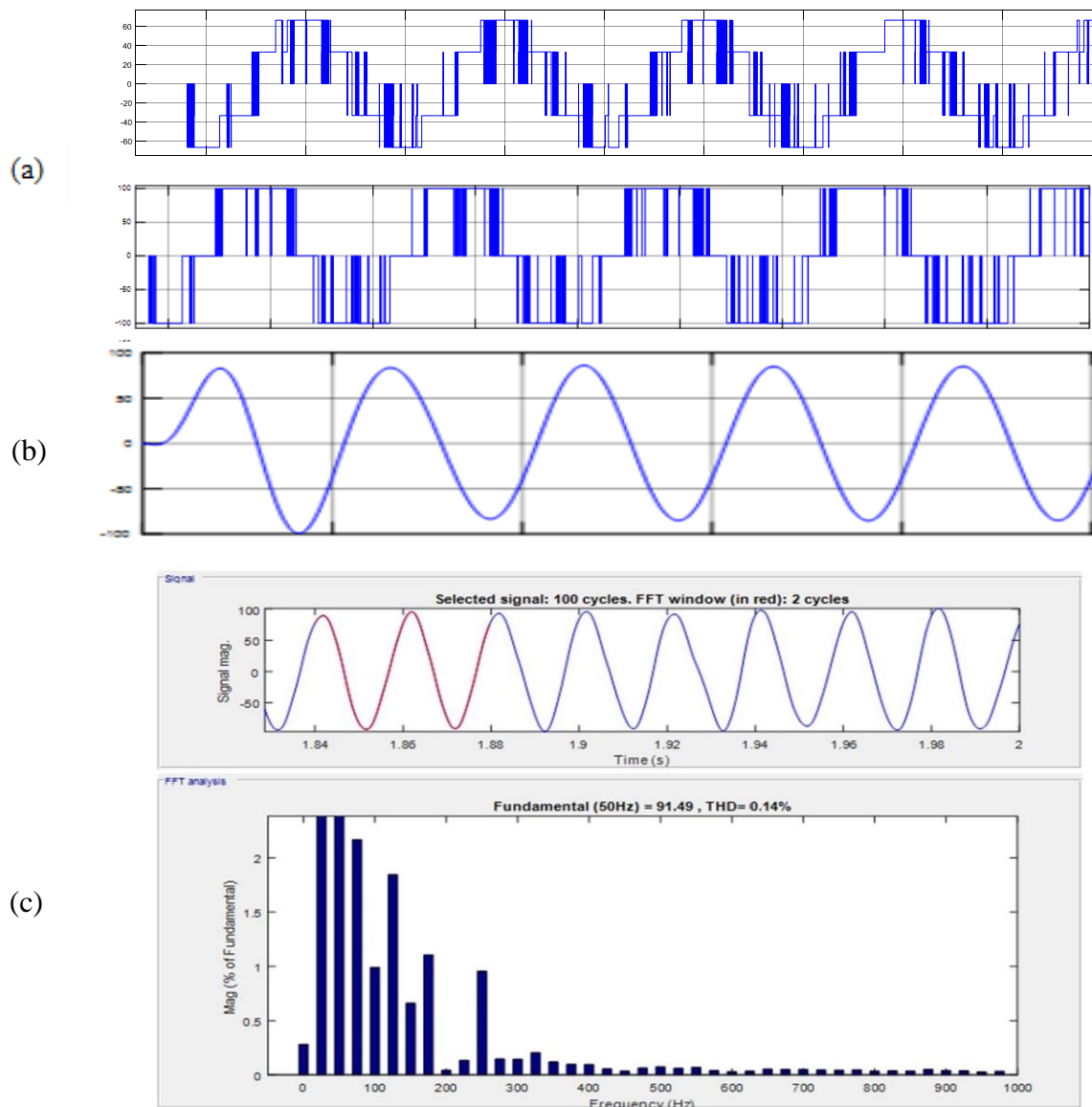


Figure III. 13 Résultats de simulation de SVPWM, a). Tension composée et simple de sortie de l'onduleur, b). Tension simple filtrée, c). Spectres des harmoniques de la tension filtrée.

Les résultats obtenus montrent que la SVPWM donne une performance proche à la THIPWM, en termes d'utilisation de bus continu, mais avec THD réduit (0.14%) et ceci dû à la commutation bien ordonnée (changement d'état d'un seul interrupteur par séquence), ce qui par la suite minimisera les pertes de commutation au niveau de l'onduleur.

Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre les procédés nécessaires pour avoir une tension à fréquence et amplitude variable, Après avoir présenté les différentes topologies des onduleurs de tension, notamment, L'onduleur de tension triphasée, une étude détaillée de différentes stratégies de commande des onduleurs a été faite à savoir :

- ✓ La commande par SPWM
- ✓ La commande par THIPWM
- ✓ La commande par SVPWM

Et ceci dans le but d'évaluer les performances de chaque stratégie.

Ensuite, une simulation de chaque méthode a été réalisée pour valider notre étude théorique, le tableau ci-après regroupe les performances, obtenues par simulation, pour chaque méthode.

Tableau III. 1 les performances de chaque méthode.

| Stratégie de commande | Amplitude de la tension filtrée | THD de tension filtrée | Algorithmes de mise en oeuvre | Ordonnance des Commutations |
|-----------------------|---------------------------------|------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| SPWM | $V_{SPWM} = 73.66$ | 0.07% | Simple | Non |
| THIPWM | $V_{THIPWM} = 85.05$ | 0.16% | Simple | Non |
| SVPWM | $V_{SVPWM} = 91.49$ | 0.14% | Une énorme Puissance de calcul | Oui (minimum de perte) |

D'après ces résultats la technique de modulation SVPWM est offre des performances très acceptables par rapport aux autres techniques, mais sa mise en oeuvre est plus complexe.

Conclusion générale

Dans ce travail, nous sommes intéressés à la technique de modulation en MLI. Cette technique est utilisée pour commander les convertisseurs statiques.

Nous avons vu En premier lieu les caractérisations des sources de tension et de courant.

La fonction d'un onduleur est de convertir une tension continue d'entrée en une tension de sortie alternative symétrique d'amplitude et de fréquence désirée. La forme d'onde de la tension de sortie doit être sinusoïdale.

Cependant, cette forme d'onde n'est pas sinusoïdale en pratique et contient quelques harmoniques.

Ce qui veut dire qu'il existe des harmoniques de tension. Le but serait donc d'obtenir à la sortie un signal avec un taux de distorsion harmonique le plus faible possible.

Ensuite, nous montrons les différentes technologies de contrôle PWM (Pulse Width Modulation) SPWM, THIPWM et SVPWM ainsi que leur principe de fonctionnement et aussi les avantages et les inconvénients de la MLI.

Enfin, Nous avons présenté une étude comparative par simulation des techniques PWM envisagées à savoir : ce qui a abouti à des bonnes performances de la modulation vectorielle SVPWM concernant l'utilisation de bus continu et minimisation des pertes de commutation grâce à l'ordre adéquat des commutations des interrupteurs constituant l'onduleur imposé par cette technique. Un défi de conception soulevé face à la complexité de cette technique en termes de mise en œuvre.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] J. Y. Lee, and Y. Y. Sun. “ A new SPWM Inverter with Minimum Filtre Requirement ” . le journal internationale de l'électronique, 1988, Vol. 64.
- [2] C. bernard, C. sebrao, O. bernard laval, C.vaudouer «Gestion énergétique des panneaux photovoltaïques» université de sfax école nationale d'ingénieurs de sfax, 2008-2009.
- [3] H. Bühler. Convertisseurs Statiques Presses Polytechniques et Universitaires Romandes,
- [4] A. Rufer, P. Barrade, « Cours d'électronique de puissance Conversion DC/DC », octobre 2001, EPFL, 90 pages. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [5] H. LEQUEU – [DIV435] – Fichier : IUT-EDP-9, 2004/2005.
- [6] BENSACI Wafa, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », mémoire de master, Université de Ouargla, 2016.
- [7] KHALEM Sofiane, « Technique MLI aléatoire en vue de la réduction des perturbations conduites dans les convertisseurs » mémoire de master, UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES, 2012.continus-continus et continus-alternatifs.
- [8] Guy Segulier, Electronique de puissance « Les formation de base et leurs principales application » 7eme édition Dunod, paris, 1999.
- [9] S.Mariéthoz, « Mesure et amélioration des performances des modulateurs multiniveaux » Conférence *JCGE'03*, Juin 2003.
- [10] S. Guy, B. Robert, Labrique Francis, Les convertisseurs de l'électronique de puissance la Conversion alternaif (volume 4). Edition tec&doc, 1995.
- [11] T. Wildi : Electrotechnique, 3eme édition, éditions de Boock université (1999).
- [12] CHETTIH Khair-Eddine. Réalisation d'un onduleur monophasé avec un bras redondant. Mémoire d'ingénieur. Université de Constantine. Juin 2015
- [13] Rohit Sethi, Pankaj, Simulation et comparaison se spwm et svpwm control de tri phasée R-L charge. Revue internationale de recherche en ingénierie et sciences appliquées 2012; 2(2).
- [14] Chunyan, Zang, Zhenjiang, Pei, Junjia, He, Ting, Guo, Jing, Zhu, Wei, Sun. Recherche sur l'application de la technologie de CPSSPWM en onduleur multiniveau. Conférence internationale sur les machines et systèmes électriques. 2009: 1-4.
- [15] Bowes SR, Holliday D. Optimal Regular-Sampled PWM Techniques de contrôle de l'onduleur. IEEE Transactions sur l'électronique industrielle. 2007; 54(3): 1547-1559.

- [16] Mudlapur A, Raju A, Rao U. Évaluation de différentes techniques PWM pour les onduleurs à deux niveaux dans les WECS connectés au réseau. Conférence internationale sur les progrès de l'informatique, des communications et de l'informatique.2013; 1753-1758.
- [17] Prachi S Dharmadhikari, Gaurav N Goyal. Analyse et mise en œuvre matérielle d'un onduleur à source de tension triphasée. Journal international de la recherche et de la technologie en ingénierie. 2013; 2(5): 2209-2218.
- [18] M Trzynadlowski, S Legowski. Stratégie PWM à vecteur de perte minimale pour les onduleurs triphasés. IEEE Trans. Électron de puissance. 1994; 9: 26–34.
- [19] A Belkhiri . Variateur De Vitesse Industriel À Base, Thèse de doctorat de Sciences en Électronique Option : Microélectronique Université de Batna 2 . 2018
- [20] Saravanan M, Nandakumar R, Veerabalaji G. Techniques SVPWM efficaces et mise en œuvre d'un entraînement de moteur à induction basé sur FPGA. Journal international des systèmes reconfigurables et embarqués. 2012; 1(1): 11~18.
- [21] Tunyasrirut S, Srilad S, Suksri T. Comparison power quality of the voltage source inverter type SVPWM and SPWM technique for induction motor drive. SICE Annual Conference. 2008; 241-246.
- [22] ToleSutikno, NikRumziNikIdris, AuzaniJidin, MohdHattaJopri. Algorithme SVPWM discontinu optimisé basé sur FPGA pour VSI triphasé dans les variateurs AC. Journal international de l'électronique de puissance et du système d'entraînement. 2013;3(2): 228~240.
- [23] BOUDRIES Zoubir. Cour de commande des machines électriques. Université de Bejaia
- [24] KERBOUA Abdelfettah. Régulation des puissances d'une éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau électrique. These de doctorat. Université de Sidi bel abbes.

I.1