

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf -Mila
Institut des Sciences et de Technologie
Département de Sciences et Technologie



N°Ref :.....

Projet de Fin d'Etude préparé En vue de l'obtention du diplôme
de MASTER
Spécialité : Électromécanique

Étude et commande d'onduleur

Réalisé par :

- GUEMRI Adel
- BOUDJATAT Chihab Eddine

Soutenu devant le jury :

Dr. S. HADEF
Pr. S. DIB
Dr. M. BENENIA

Présidente
Examinatrice
Promotrice

Année universitaire : 2021/2022

DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail à qui me sont les plus chers

♣ *A mes chers parents, pour leurs sacrifices, leurs patiences, leurs amours,
leurs soutiens et leurs encouragements.*

♣ *A mes chers frères.*

♣ *A mes chers sœurs, je leur souhaite tout le succès et de la réussite dans
leurs vies.*

♣ *A toute la famille et à tous mes amies, je vous souhaite le courage et le
succès dans votre vie.*

♣ *Ainsi qu'à toutes les personnes que je connais de près ou de loin.*

Adel Guemri

DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail à qui me sont les plus chers

♣ *À mes chers parents, pour leurs sacrifices, leurs patiences, leurs amours,
leurs soutiens et leurs encouragements.*

♣ *À mes chers frères.*

♣ *À mes chers sœurs, je leur souhaite tout le succès et de la réussite dans
leurs vies.*

♣ *À toute la famille et à tous mes amies, je vous souhaite le courage et le
succès dans votre vie.*

♣ *Ainsi qu'à toutes les personnes que je connais de près ou de loin.*

♣ *Sans oublier Da Hamid*

Chihab Eddine Boudjatat

Remerciement

Nous adressons nos plus sincères sentiments de reconnaissance et de remerciement envers le bon Dieu, le clément et le miséricordieux, lequel nous a accordé la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

*Nous voulons exprimer notre gratitude à notre encadreur, **Dr. MERIEM BENENIA** pour avoir proposé et diriger ce travail. Son soutien, sa disponibilité et ses précieux conseils tout au long de cette recherche.*

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail.

Nous remercions également tous enseignants du département d'électromécanique.

Enfin nos remerciements vont également à toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, apporté aide et encouragement

Sommaire

Remerciements

Dédicaces

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction générale..... 1

Chapitre I : Généralités sur les onduleurs

I.1. Introduction :..... 4

I.2. Définition d'un onduleur « convertisseur DC-AC»..... 4

I.3. Classification des onduleurs : 5

I.3.1. Onduleur de courant :..... 5

I.3.2. Onduleur de tension :..... 5

I.3.3. Onduleur autonome :..... 6

I.3.4. Onduleurs non autonomes : 6

I.3.5. Onduleur à résonance :..... 6

I.4. Principe de fonctionnement d'un onduleur..... 7

I.4.1. Les onduleurs monophasés en demi-pont :..... 7

I.4.2. Onduleur en pont (quatre interrupteurs) : 8

I.5. Onduleur de tension triphasé : 13

I.6. Les applications des onduleurs : 16

I.6.1. Contrôle de la vitesse de rotation des machines à courant alternatif :..... 16

I.6.2. Assurer la continuité des alimentations des secours :..... 16

I.6.3. Alimentation sans interruption :..... 17

I.6.4. La protection des équipements : 17

I.6.5. Les installations photovoltaïques :.....	18
I.7. Conclusion :	18

Chapitre II : Les différentes stratégies de commande des onduleurs

II.1. Introduction :	20
II.2. Commande symétrique (pleine onde) :.....	20
II.3. Commande décalée :.....	21
II.4. Commande Modulation de largeur d'impulsions ou (PWM):.....	22
II.5. Principe de base de MLI :.....	22
II.6. Les caractéristiques de MLI :	23
II.7. Les différents types de modulation :.....	23
II.7.1. Modulation naturelle :	24
II.7.2. Modulation régulière :	24
II.8. Technique de production d'onde MLI :.....	24
II.8.1. Technique analogique :.....	24
II.8.2. Technique digitale (numérique) :	25
II.8.3. Technique hybride :	25
II.9. Différentes techniques de modulation de largeur d'impulsions :.....	26
II.9.1. MLI simple	26
II.9.2. MLI multiple.....	27
II.9.3. MLI Sinus triangulaire (sinusoïdale triangulaire unipolaire (SPWM)).....	28
II.9.4. MLI Sinusoïdale modifié :.....	29
II.10. MLI de Vectorielle	30
II.10.1. Principe de base de SVPWM :	30
II.10.2. Transformation de Clarcke :	Erreur ! Signet non défini.
II.10.3. Les configurations possibles :.....	32
II.10.4. Les calculs de temps de commutation des interrupteurs :	34

II.11. Principaux avantages de la MLI :	36
II.12. Les inconvénients de la MLI :	36
II.13. Conclusion :	37

Chapitre III : Simulation et interprétation des résultats

III.1. Introduction	39
III.2. Simulation des différentes techniques de commande des onduleurs	39
III.2.1. Simulation de la Commande symétrique :	39
III.2.2. La commande décalée	40
III.2.3. Simulation de la Commande MLI (PWM).....	43
III.3. Commentaires et interprétations des résultats	45
III.4. Comparaison entre les différentes commandes :	47
III.5. CONCLUSION	47
Conclusion générale	49
Bibliographie.....	50

Liste des figures

CHAPITRE II

Figure I.1 : Les différents types de convertisseurs statiques	4
Figure I.2 : Schéma symbolique d'un onduleur.....	5
Figure I.3 : (a) Onduleur de courant et (b) Formes d'ondes.....	5
Figure I.4 : (a) Onduleur de tension et (b) Formes d'ondes	6
Figure I.5 : Schéma d'un système photovoltaïque non raccordé au réseau	Erreur ! Signet non défini.
Figure I.6 : Système photovoltaïque connecté au réseau par un onduleur.....	18
Figure I.7 : Schéma de principe d'un onduleur monophasé en demi-pont	7
Figure I.8 : L'allure de la tension aux bornes de la charge.	8
Figure I.9 : Schéma de principe d'un onduleur monophasé de tension en pont	8
Figure I.10 : L'allure de la tension aux bornes de la charge.....	10
Figure I.11 : La tension aux bornes de la charge.	11
Figure I.12 : Courant d'une charge résistive.....	11
Figure I.13 : Les cas possibles de commutation de l'onduleur	12
Figure I.14 : L'allure de la tension et le courant aux bornes de la charge	13
Figure I.15 : Circuit de puissance d'un onduleur triphasé.....	14
Figure I.16 : Chronogrammes des tensions V_{ao}, V_{bo}, V_{co}	15
Figure I.17 : Chronogrammes des tensions simples	16
Figure I.18 : variation de la vitesse d'une machine synchrone	16
Figure I.19 : Alimentation sans interruption	17

CHAPITRE II

Figure II.1 : Stratégies de commande des onduleurs	20
Figure II.2 : Onduleur monophasé.....	20
Figure II.3 : Signaux de tension de sortie pour une commande symétrique.....	21

Figure II.4 : Signaux de tension de sortie pour une commande décalée.	22
Figure II.5 : Réalisation du signal MLI.	23
Figure II.6 : Technique analogique.....	25
Figure II.7 : Technique Numérique.	25
Figure II.8 : Technique hybride	26
Figure II.9 : MLI d'une simple impulsion	27
Figure II.10 : MLI multiple	28
Figure II.11 : Principe de la MLI triangulo-sinusoidale.	29
Figure II.12 : MLI sinusoidale modifié	30
Figure II.13 : Circuit de puissance d'un onduleur triphasé.	31
Figure II.14 : Les huit configurations possibles	32
Figure II.15 : les combinaisons possibles des interrupteurs	33
Figure II.16 : La formation de la tension de référence	35
Figure II.17 : Les périodes de commutation des interrupteurs	36

CHAPITRE III

Figure III.1 : Les variations de la tension V_{ab} et du courants I_{ab} aux bornes de la charge inductive (RL).	39
Figure III.2 : Les harmoniques de tension générées par la commande symétrique.	40
Figure III.3 : Les harmoniques de courant générées par la commande symétrique.	40
Figure III.4 : Les variations de la tension V_{ab} et du courants I_{ab} aux bornes de la charge inductive (RL).	41
Figure III.5 : Les harmoniques de tension générées par la commande décalée	42
Figure III.6 : Les harmoniques de courant générées par la commande décalée.....	42
Figure III.7 : Forme d'onde de la tension simple (V_{an}), et de la tension. Composée (U_{ba}) .	44
Figure III.8 : Forme d'onde du courant (I)	45

Liste des tableaux

CHAPITRE I

Tableau I.1 : les configurations possibles..... 9

CHAPITRE II

Tableau II.1 : Les combinaisons de vecteurs de tension d'un onduleur triphasé..... 34

CHAPITRE III

Tableau III.1 : Comparaison des différentes commandes 47

Liste des abréviations

DC Direct Current

AC Alternatif Current

IGBT Insulated Gate Bipolar Transistor

GTO Gate Turn-Off Thyristor

PWM Pulse Width Modulation

MLI Modulation de Largeur Impulsions

SPWM Sinusoidal Pulse Width Modulation

SVPWM Space Vector Pulse Width Modulation

THD Total Harmonic Distortion.

Liste des symboles

$K ; K'$: Interrupteurs de l'onduleur

V_E : Source de tension continue de l'onduleur.

$V_{réf}$: *Tension* de référence (sinusoïdal).

V_{ab} : Tension composée

V_p : Porteuse triangulaire.

A_r : Amplitude de la référence

A_p : Amplitude de la porteuse triangulaire.

ω : Pulsation électrique.

δ_m = Largeur du $m^{\text{ème}}$ impulsion

p = le nombre des impulsions par alternance

f_r : Fréquence de la tension de référence.

f_p : Fréquence de la porteuse triangulaire.

m : *Indice* de modulation.

r : Coefficient de réglage en tension

Introduction générale

Introduction générale

L'électronique de puissance est la branche de l'électrotechnique qui traite la conversion et le contrôle de l'énergie électrique avec des appareils électroniques à mode de commutation à haut rendement pour une large gamme d'applications. L'objectif de Cette branche est d'envisager des convertisseurs statiques permettant d'assurer un transfert d'énergie électrique adapté aux sources et aux récepteurs qui lui sont associés. Elle permet aussi l'étude de la conversion de l'énergie électrique qui est réalisée au moyen de convertisseurs utilisant des dispositifs statiques (semi-conducteur) qui sont des dispositifs le plus souvent pilotables (les transferts d'énergie entre la source et le récepteur sont alors maîtrisés). Ils transforment et adaptent les formes des signaux électriques disponibles à la source d'entrée en une forme appropriée au récepteur (charge), à alimenter.[1]

Les onduleurs constituent une fonction incontournable de l'électronique de puissance. Ils sont présents dans des domaines d'application les plus variés, dont le plus connu est sans doute celui de la variation de vitesse des machines à courant alternatif. La forte évolution de cette fonction s'est appuyée, d'une part, sur le développement de composants à semi-conducteurs entièrement commandables, puissants, robustes et rapides, et d'autre part, sur l'utilisation quasi-généralisée des techniques dites de modulation de largeurs d'impulsions (MLI).[2] [3]

Dans plusieurs applications industrielles, on est souvent préoccupé d'avoir une alimentation stable et réglable. Cette tension peut être obtenue au moyen des onduleurs qui éliminent les fluctuations de la tension continue d'entrée, en maintenant la relation tension fréquence constante tout en réglant l'amplitude de la tension requise par la charge. Plusieurs méthodes sont utilisées pour obtenir cette tension et la modulation de largeur d'impulsion MLI est l'une des plus efficaces. En plus de régler l'amplitude, cette méthode contrôle le contenu harmonique de la tension de sortie de l'onduleur en repoussant les harmoniques d'ordre inférieur vers les fréquences les plus élevées, ce qui rend le filtrage plus facile et moins coûteux, car la taille des composants du filtre, est assez réduite. Cependant, on note que la technique de MLI a des limites par rapport à la fréquence d'opération des onduleurs.

En effet, plus cette fréquence n'est élevée, plus les pertes dues à la commutation des interrupteurs à semi-conducteurs sont diminuées. En plus, la fréquence d'opération des onduleurs MLI est également limitée par la vitesse de commutation propre des interrupteurs à semi-conducteurs. [4]

En forte puissance, les machines alternatives associées à des convertisseurs statiques trouvent de plus en plus d'applications

Ce manuscrit s'articule autour de trois chapitres et une conclusion générale. Qu'on décrive comme suit :

Dans le premier chapitre nous décrivons les généralités sur les onduleurs avec des rappels théoriques sur le principe du fonctionnement des onduleurs triphasés ainsi que leurs applications.

Dans le deuxième chapitre nous présentons les différentes techniques de commande des MLI, avec bien sur une étude bien détaillée des techniques les plus utilisées actuellement à savoir la modulation sinusoïdale triangulaire, ainsi que la modulation vectorielle. Cette étude est consacrée à la conception d'une stratégie de commande qui permet de donner une meilleure forme de la tension de sortie, donc une meilleure qualité spectrale

Le troisième chapitre est consacré à la présentation des différents résultats de simulation, ils sont obtenus par des schémas de simulation, réalisés sous Simulink de l'environnement Matlab.

A la fin de ce travail nous donnons une conclusion générale.

Chapitre I :

Généralités sur les onduleurs

I.1. Introduction :

Pour les applications nécessitant la génération d'une onde de tension sinusoïdale ayant des caractéristiques spécifiques d'amplitude et de fréquence, ainsi que la variation de vitesse de machines alternatives en traction électrique ou dans des applications industrielles où l'amplitude et fréquence doivent être variables : Un onduleur est donc une source de tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace à partir d'une tension continue donnée; L'onduleur fait partie des ensembles des convertisseurs statiques. C'est la mise au point des semi-conducteurs de puissance (diodes, thyristors et transistors) qui a permis le développement et l'apparition des groupes de convertisseurs. La figure (I.1) illustre les différents types de convertisseurs statiques.

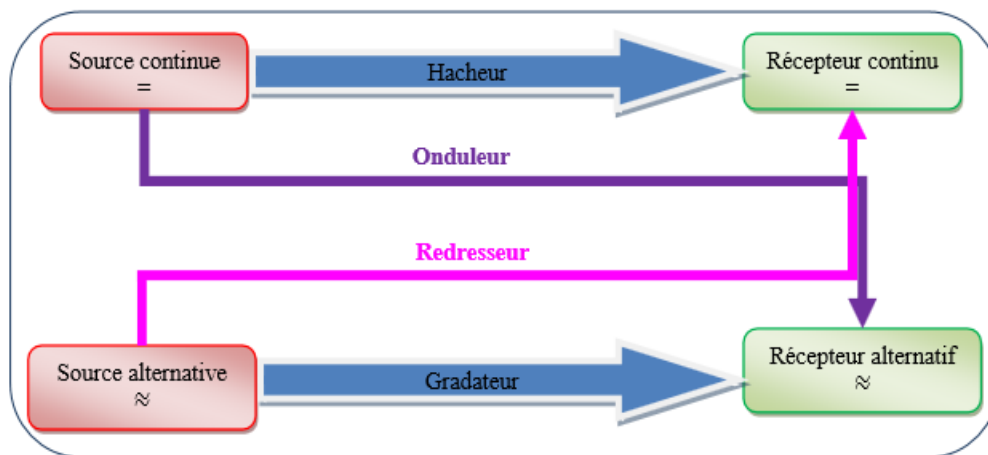


Figure I.1 : Les différents types de convertisseurs statiques [3]

En premier lieu nous définissons tout d'abord le convertisseur statique continue-alternative, ainsi que les différents types d'onduleurs selon leurs natures d'alimentation. En second lieu, nous présentons le Principe de fonctionnement d'un onduleur monophasé, et triphasé

I.2. Définition d'un onduleur « convertisseur DC-AC »

Un onduleur est un convertisseur statique DC-AC assurant la conversion continue alternatif. Alimenté par une source continue, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie pour obtenir à la sortie une tension et un courant alternatif, ou un système polyphasé [3] ; de telles grandeurs symbolique d'un onduleur est donnée par la figure (I.2). [1]

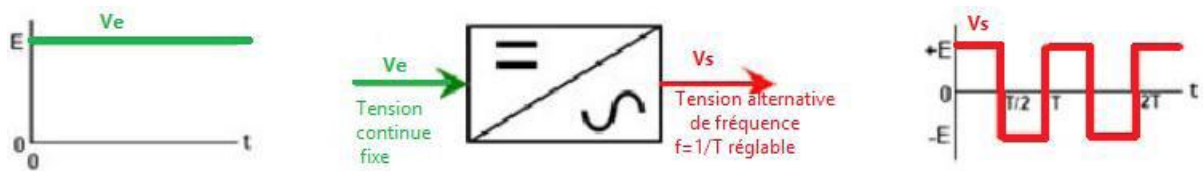


Figure I.2 : Schéma symbolique d'un onduleur [1]

I.3. Classification des onduleurs :

Selon la nature de l'alimentation de l'onduleur il existe deux types :

I.3.1. Onduleur de courant :

Les convertisseurs continu-alternatif associés sont définis comme des onduleurs de courant à condition que l'étage continu est considéré comme étant une source de courant. A cet effet, ce type de système est connecté à une source de tension alternative [4] figure (I.3).

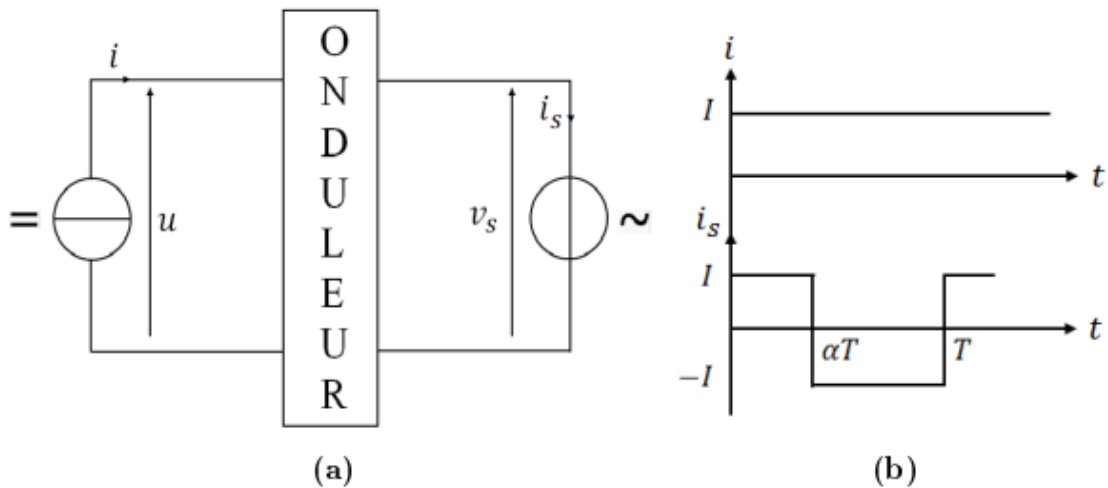


Figure I.3 : (a) Onduleur de courant et (b) Formes d'ondes.[1]

I.3.2. Onduleur de tension :

Un onduleur de tension est un onduleur qui est alimenté par une source de tension continue (source d'impédance interne négligeable), la tension «u» n'est pas affectée par les variations du courant «i» qui la traverse [5] la figure(I.4)

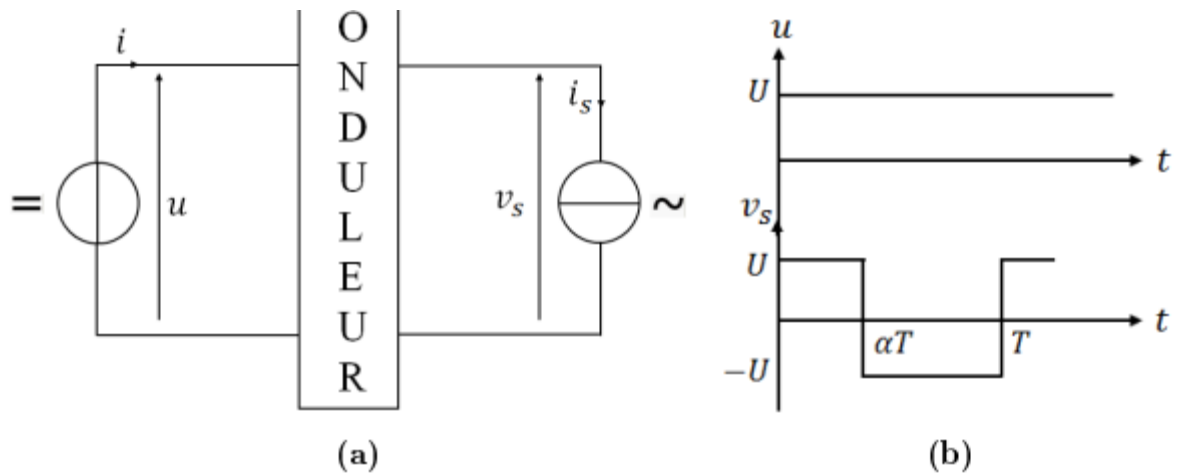


Figure I.4 : (a) Onduleur de tension et (b) Formes d'ondes [1].

Selon la fréquence et la forme d'onde de sortie, il existe deux types d'onduleurs, à savoir : autonome et non autonome.

I.3.3. Onduleur autonome :

Un onduleur est dit autonome, s'il impose sa fréquence propre à lui-même sa tension de sortie. Autrement dit, on a accès au réglage de la fréquence par des signaux de commande issus d'une source auxiliaire. On distingue deux types d'onduleurs autonomes selon la grandeur du signal de commande : les onduleurs de tension et les onduleurs de courant [5] [6].

I.3.4. Onduleurs non autonomes :

Un onduleur est dit non autonome si l'énergie nécessaire pour la commutation des thyristors est fournie par le réseau alternatif qui est donc un réseau actif. C'est le cas du fonctionnement en onduleur des redresseurs. La fréquence et la forme d'onde de la tension sont imposées par le réseau alternatif [5] [6].

Il y a un autre type d'onduleur dit à résonance :

I.3.5. Onduleur à résonance :

Ces onduleurs permettent d'imposer le courant ou la tension et la fréquence. Alors, pour le cas particulier où la charge est constituée d'un circuit oscillant peu amorti, on peut commander les interrupteurs à une fréquence très proche de la fréquence de résonance de la charge. Si la charge varie, la fréquence de commande varie. Ce qui signifie que la fréquence de l'onduleur dépend de la charge, il n'est plus autonome. On distingue deux modèles à résonance [6] [9]

I.3.5.1. Onduleur à résonance série :

Celui-ci débite sur un circuit **RLC** résonant série peu amorti. Dans ce cas, on dispose d'une inductance placée en série dans la charge, pour s'opposer aux discontinuités du courant, donc l'onduleur doit être alimenté par une source de tension. [9]

I.3.5.2. Onduleur à résonance parallèle

Ce dernier débite sur un circuit **RLC** résonnant parallèle peu amorti. Pour cela, indispose d'une capacité branchée entre les bornes de la sortie, pour s'opposer à la brusque variation de la tension, donc l'onduleur doit être alimenté par une source de courant continu. [10]

Il existe un autre type il est Les onduleurs multi niveaux

I.4. Principe de fonctionnement d'un onduleur

I.4.1. Les onduleurs monophasés en demi-pont :

Ce type d'onduleur est utilisé généralement pour les alimentations de secours. Il délivre dans la sortie une tension alternative monophasée. A cet effet, on distingue deux classes d'onduleurs monophasés suivant leurs topologies :

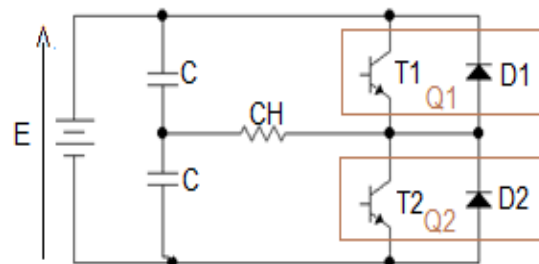


Figure I.5 : Schéma de principe d'un onduleur monophasé en demi-pont [11]

➤ Principe de fonctionnement :

Le montage d'un onduleur en demi-point utilise deux "interrupteurs" notés \$Q1\$ et \$Q2\$ à commande complémentaire bidirectionnels en courant unidirectionnel en tension. Le plus souvent on utilise une seule source de tension continue et un diviseur capacitif [11].

- Pour \$0 < t < T/2\$: L'interrupteur \$Q1\$ est fermé et \$Q2\$ est ouvert.

$$U_{ch} = R \times i(t) = +\frac{E}{2} \quad (I.1)$$

- Pour \$0 < t < T/2\$: L'interrupteur \$Q2\$ est fermé et \$Q1\$ est ouvert

$$U_{ch} = R \times i(t) = -\frac{E}{2} \quad (I.2)$$

Figure I.1 : Les configurations possibles

$0 < t < T/2$	$T/2 < t < T$	$T < t < 3T/2$	
Q ₁	Q ₂	Q ₁	Interrupteurs fermés
Q ₂	Q ₁	Q ₂	Interrupteurs ouverts

Dans le tableau I.11, nous avons montrés les interrupteurs ouverts et les interrupteurs fermés pour chaque intervalle du temps

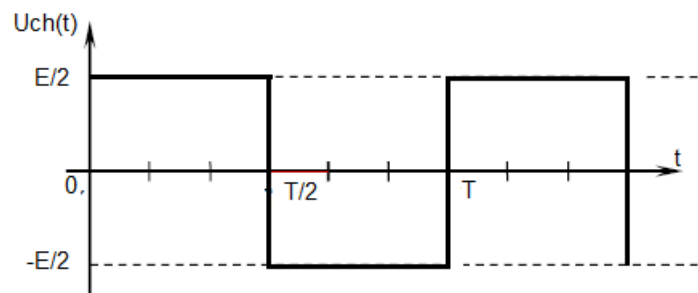


Figure I.6 : L'allure de la tension aux bornes de la charge [12]

Les interrupteurs Q1 et Q2 sont formés par la mise en parallèle d'un semi-conducteur Ti commandé à l'ouverture et à la fermeture et d'une diode Di. Cette dernière assure la conduction d'un courant négatif en cas de déphasage de ce dernier par rapport à la tension aux bornes de la charge [1].

I.4.2. Onduleur en pont (quatre interrupteurs) :

➤ **Principe :**

La structure de base de l'onduleur de tension en pont se présente à la figure (I.9)

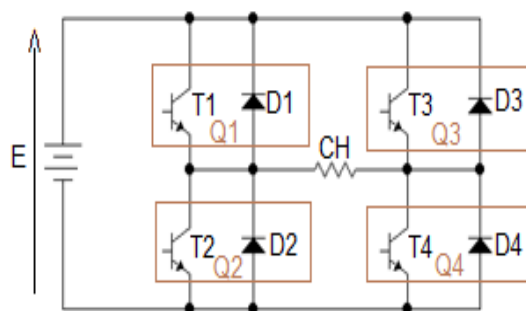


Figure I.7 : Schéma de principe d'un onduleur monophasé de tension en pont [11]

➤ **Principe de fonctionnement :**

Le montage d'un onduleur en pont complet se compose de quatre interrupteurs semi-conducteurs avec des diodes en antiparallèle. La charge est branchée entre les deux bras de l'onduleur. Le principe de fonctionnement de cet onduleur est montré dans le tableau (I.2)

Tableau I.2 : les configurations possibles.

	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Tension U _c
Cas 1	Passent	Bloqué	Passent	Bloqué	U _c =0
Cas 2	Passent	Bloqué	Bloqué	Passent	U _c =E
Cas 3	Bloqué	Passent	Passent	Bloqué	U _c =-E
Cas 4	Bloqué	Passent	Bloqué	Passent	U _c =0

- Pour $0 < t < T/2$: Les interrupteurs Q₁, Q₄ sont fermés et Q₂, Q₃ sont ouverts.

$$U_{ch} = R \times i(t) = +E \tag{I.3}$$

- Pour $T/2 < t < T$: Les interrupteurs Q₂, Q₃ sont fermés et Q₁, Q₄ sont ouverts.

$$U_{ch} = R \times i(t) = -E \tag{I.4}$$

La figure (I.10) montre les intervalles de conductions des interrupteurs dans un onduleur à pont.

Tableau I.3 : les configurations possibles.

$0 < t < T/2$	$T/2 < t < T$	$T < t < 3T/2$	
Q ₁ et Q ₄	Q ₂ et Q ₃	Q ₁ et Q ₄	Interrupteurs fermés
Q ₂ et Q ₃	Q ₁ et Q ₄	Q ₂ et Q ₃	Interrupteurs ouverts

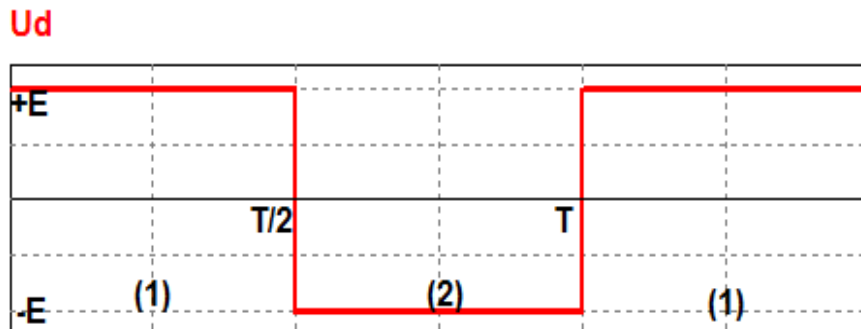


Figure I.8 : L'allure de la tension aux bornes de la charge [12]

Le tableau I.2, montres les interrupteurs ouverts et les interrupteurs fermés pour chaque intervalle du temps de la figure I.10

• *Charge résistive :*

Ci-dessous les deux figures représentent la tension et le courant aux bornes d'une charge résistive.

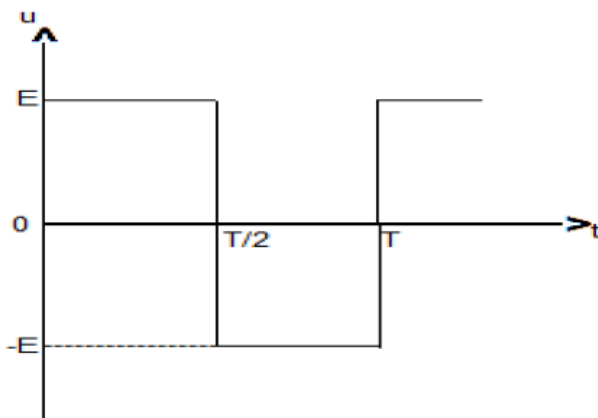


Figure I.9 : La tension aux bornes de la charge.

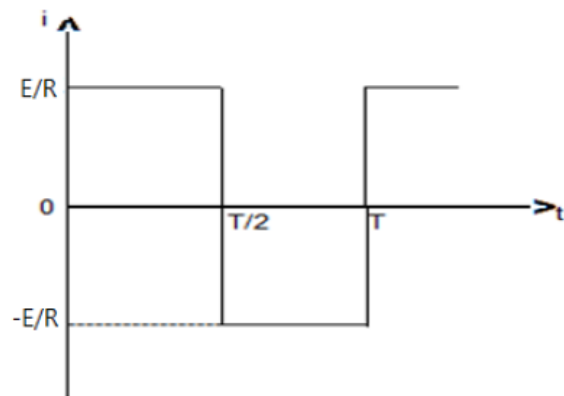


Figure I.10 : Courant d'une charge résistive.

- Pour $0 < t < T/2$: Les interrupteurs Q1, Q4 sont fermés et Q2, Q3 sont ouverts.

$$i(t) = \frac{U_c}{R} = \frac{+E}{R} \tag{I.5}$$

- Pour $T/2 < t < T$: Les interrupteurs Q2, Q3 sont fermés et Q1, Q4 sont ouverts.

$$i(t) = \frac{U_c}{R} = \frac{-E}{R} \tag{I.6}$$

On constate que l'allure du courant suit l'allure de la tension car ils sont liés par la loi d'Ohm. Il faut noter que le courant dans les interrupteurs est toujours positif.

• **Charge inductive :**

La charge inductive simule un moteur alternatif et contrairement à la charge résistive l'allure de courant change.

- Pour $0 < t < T$: T1 et T4 sont commandés à la fermeture tandis que T2 et T3 sont ouverts donc :

$$Uc = \frac{Ldi}{dt} + Ri = +E \quad (I.7)$$

D'après (I.7) on trouve que le courant dans cet intervalle est négatif. Ce sont les diodes D1 et D4 qui conduisent.

$$i(t) = \frac{E}{R} (1 - e^{-t/\tau}) - I_M e^{-t/\tau} \quad (I.8)$$

Dans cet intervalle la charge fournit l'énergie vers la source «phase de restitution alternance».

- pour $T < t < \frac{T}{2}$: A l'instant t_1 le courant devient positif, ce qui impose la conduction des transistors T1 et T4 or les diodes D1 et D4 sont bloquées. Les équations de $Uc(t)$ et $i(t)$ restent les mêmes que (I.7) et (I.8) car on est toujours dans la même maille. A cet effet, on est dans la «phase d'accumulation alternance» ou la charge reçoit l'énergie.

- Pour $\frac{T}{2} < t < \frac{T}{2} + t_1$: T2 et T3 sont commandés à la fermeture donc :

$$Uc = \frac{Ldi}{dt} + Ri = -E \quad (I.9)$$

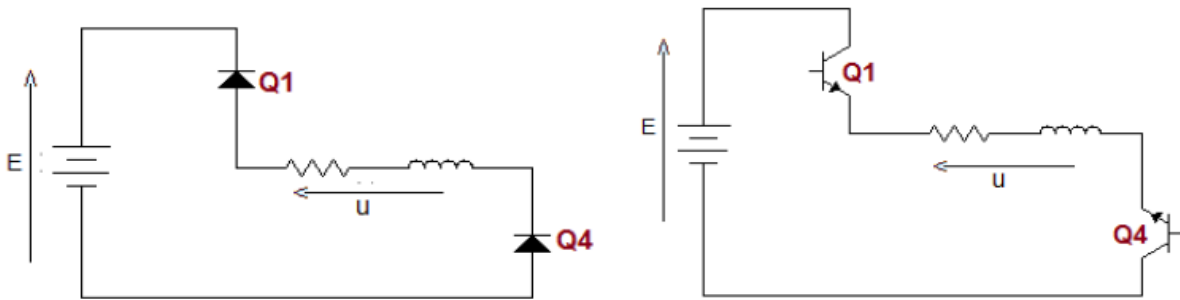
D'après (I.9) on trouve cette expression de courant :

$$i(t) = \frac{E}{R} (-1 + e^{\frac{-t - \frac{T}{2}}{\tau}}) + I_M e^{\frac{-t - \frac{T}{2}}{\tau}} \quad (I.10)$$

Le courant est positif donc les diodes D2 et D3 conduisent le courant. Dans cet intervalle de temps la charge fournit l'énergie vers la source.

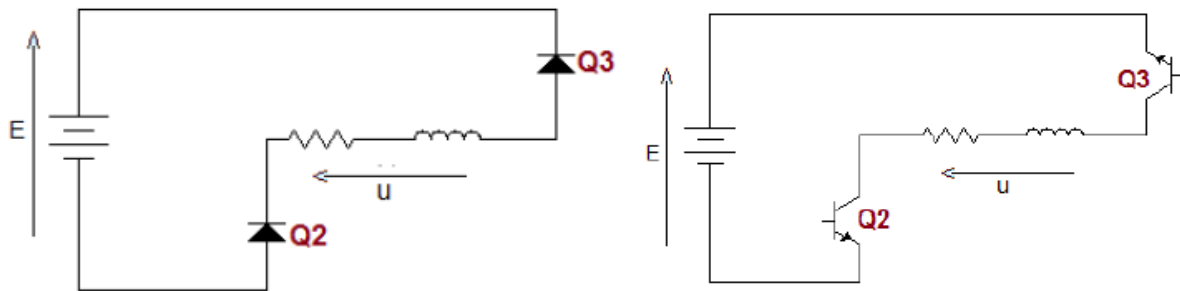
▪ Pour $\frac{T}{2} + t_1 < t < T$: A l'instant $\frac{T}{2} + t_1$ le courant devient négatif ce qui impose la conduction des transistors T2 et T3 or les diodes D2 et D3 sont bloquées. Dans ce cas la charge reçoit l'énergie. Les équations de $U_c(t)$ et $i(t)$ restent les mêmes que (I.9) et (I.10) c'est la même maille.

A cet effet, il y'a enchaînement de quatre mailles de conduction :



Cas n°1: Restitution alternance positive

Cas n°2: Accumulation alternance positive



Cas n°3: Restitution alternance négative

Cas n°4 : Accumulation alternance positive

Figure I.11 : Les cas possibles de commutation de l'onduleur [11]

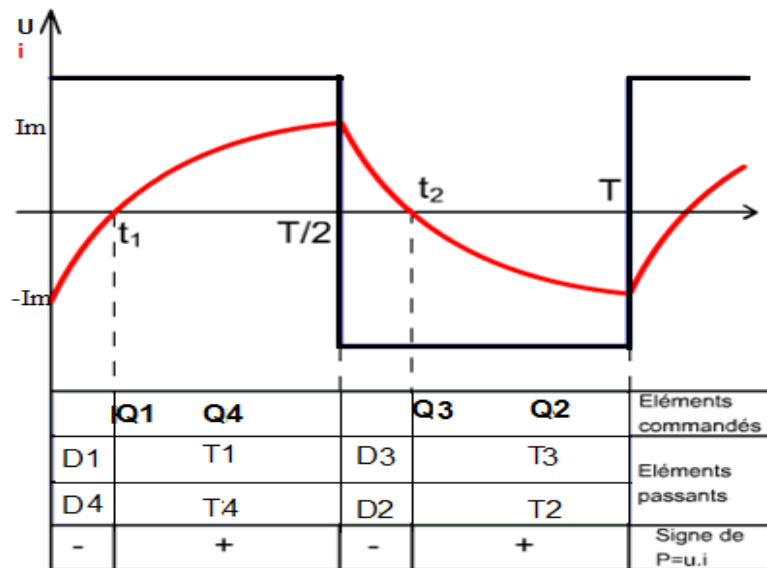


Figure I.12 : L'allure de la tension et le courant aux bornes de la charge [11]

I.5. Onduleur de tension triphasé :

Pour obtenir un onduleur triphasé, il suffit de regrouper, en parallèle, trois onduleurs monophasés et commander les interrupteurs de façon à avoir à la sortie trois phases décalées de 120° . En fait, ce regroupement donne un onduleur triphasé à six interrupteurs, deux pour chaque bras représenté dans la figure 1.11. Pour s'assurer que la source de tension U_{dc} ne soit jamais court-circuitée et les circuits de courant i_a , i_b et i_c ne soient jamais ouverts, les interrupteurs présentent dans le même bras ne doivent jamais commuter simultanément, ce qu'il leur impose des signaux de commande complémentaires.

Ces interrupteurs doivent être bidirectionnels en courant, afin de pouvoir imposer les tensions de sortie quel que soit le courant de la charge. Ces interrupteurs sont formés d'une diode montée en antiparallèle à un semi-conducteur commandé à l'ouverture et à la fermeture.

Selon la puissance mise en jeu, ces interrupteurs peuvent être réalisés avec des MOS ou bipolaires, des IGBT ou des GTO associés à une diode pour assurer la réversibilité en courant.[12]

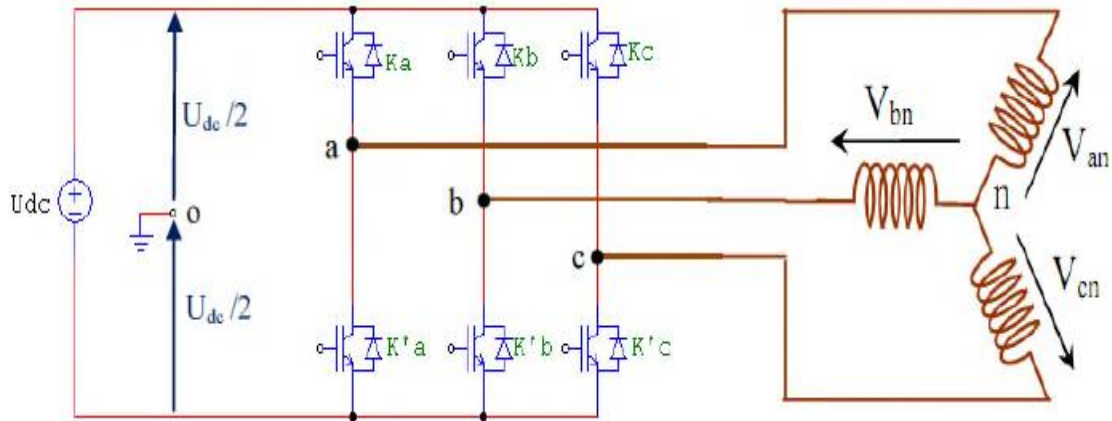


Figure I.13 : Circuit de puissance d'un onduleur triphasé [13] .

➤ **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 :

$$V_{ao} = V_a - V_o = \begin{cases} \frac{+U}{2} & \text{si } K_a \text{ fermé} \\ \frac{-U}{2} & \text{si } K'_a \text{ fermé} \end{cases} \quad (\text{I.11})$$

$$V_{bo} = V_b - V_o = \begin{cases} \frac{+U}{2} & \text{si } K_b \text{ fermé} \\ \frac{-U}{2} & \text{si } K'_b \text{ fermé} \end{cases} \quad (\text{I.12})$$

$$V_{co} = V_c - V_o = \begin{cases} \frac{+U}{2} & \text{si } K_c \text{ fermé} \\ \frac{-U}{2} & \text{si } K'_c \text{ fermé} \end{cases} \quad (\text{I.13})$$

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

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{I.14})$$

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

$$\begin{aligned} V_{ab} &= V_{an} - V_{bn} \\ V_{bc} &= V_{bn} - V_{cn} \\ V_{ca} &= V_{cn} - V_{an} \end{aligned} \quad (\text{I.15})$$

Ainsi :

$$\begin{aligned}
 V_{ab}-V_{ca}&=V_{an}-V_{bn}- (V_{cn}-V_{an}) =3V_{an} \\
 V_{bc}-V_{ab}&=V_{bn}-V_{cn}- (V_{an}-V_{bn}) =3V_{bn} \\
 V_{ca}-V_{bc}&=V_{an}-V_{cn}- (V_{bn}-V_{cn}) =3V_{cn}
 \end{aligned}
 \tag{I.16}$$

En effectuant la différence entre les membres, on obtient:

$$\begin{aligned}
 V_{ab}-V_{ca}&=V_{ao}-V_{bo}- (V_{co}-V_{ao}) =2V_{ao}-V_{bo}-V_{co} \\
 V_{bc}-V_{ab}&=V_{bo}-V_{co}- (V_{ao}-V_{bo}) =2V_{bo}-V_{ao}-V_{co} \\
 V_{ca}-V_{bc}&=V_{co}-V_{ao}- (V_{bo}-V_{co}) =2V_{co}-V_{ao}-V_{bo}
 \end{aligned}
 \tag{I.17}$$

D'après ces équations on tire les tensions :

$$\begin{aligned}
 V_{an}&= \frac{1}{3} (2V_{ao}-V_{bo}-V_{co}) \\
 V_{bn}&= \frac{1}{3} (2V_{bo}-V_{ao}-V_{co}) \\
 V_{cn}&= \frac{1}{3} (2V_{co}-V_{ao}-V_{bo})
 \end{aligned}
 \tag{I.18}$$

La figure (I.16) montre les chronogrammes des tensions V_{ao}, V_{bo}, V_{co} .

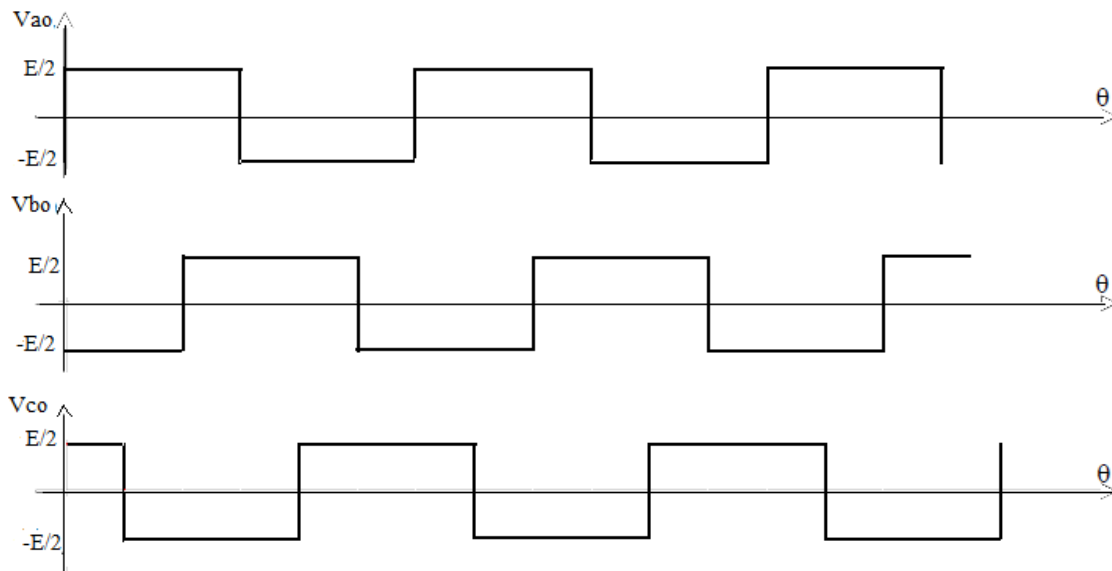


Figure I.14 : Chronogrammes des tensions $V_{ao,bo,Vco}$ [11]

La figure (I-16) montre les chronogrammes des tensions simples $V_{an,bn,Vcn}$.

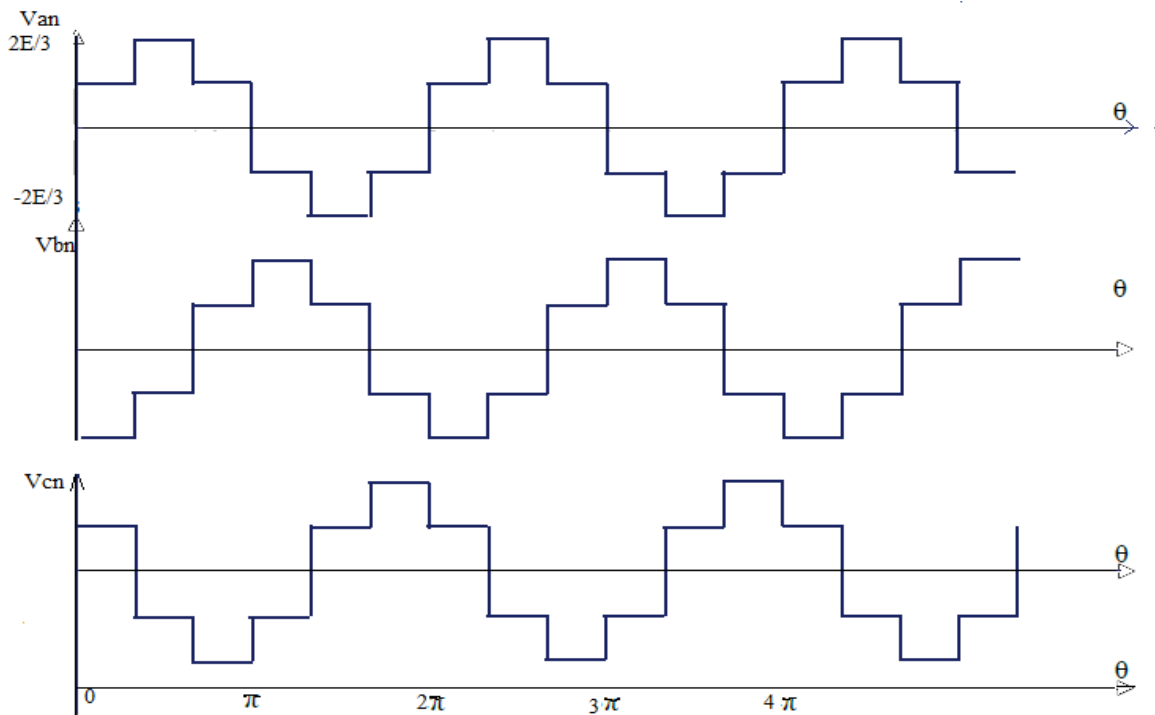


Figure I.15 : Chronogrammes des tensions simples [11]

I.6. Les applications des onduleurs :

I.6.1. Contrôle de la vitesse de rotation des machines à courant alternatif :

La vitesse d'un moteur synchrone est fixée par la pulsation des courants statiques. Pour changer la vitesse il faut donc changer la fréquence des tensions d'alimentation. A cet effet il faut donc redresser la tension du réseau puis l'onduler à la fréquence désirée. [12]

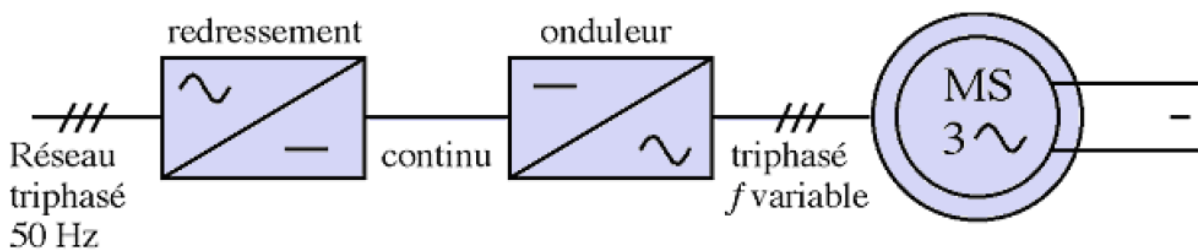


Figure I.16 : variation de la vitesse d'une machine synchrone [13]

I.6.2. Assurer la continuité des alimentations des secours :

En cas de coupure du réseau, la tension continue stockée dans les batteries sera convertit en tension alternative à travers l'onduleur pour continuer l'alimentation des machines,[13]

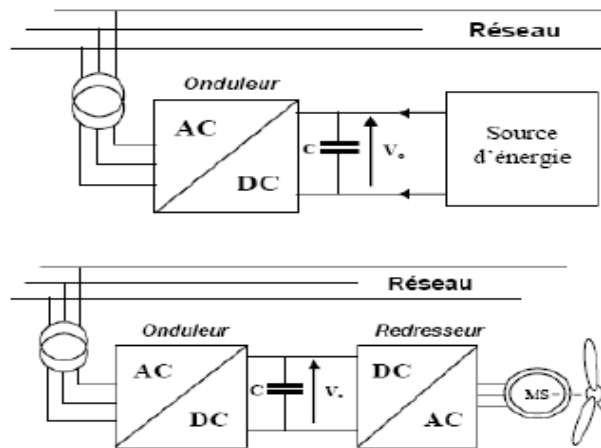


Figure 1.19: Alimentation de secours. [12]

I.6.3. Alimentation sans interruption :

Les onduleurs peuvent assurer une alimentation électrique 24h sur 24 h en cas de rupture dans le réseau.

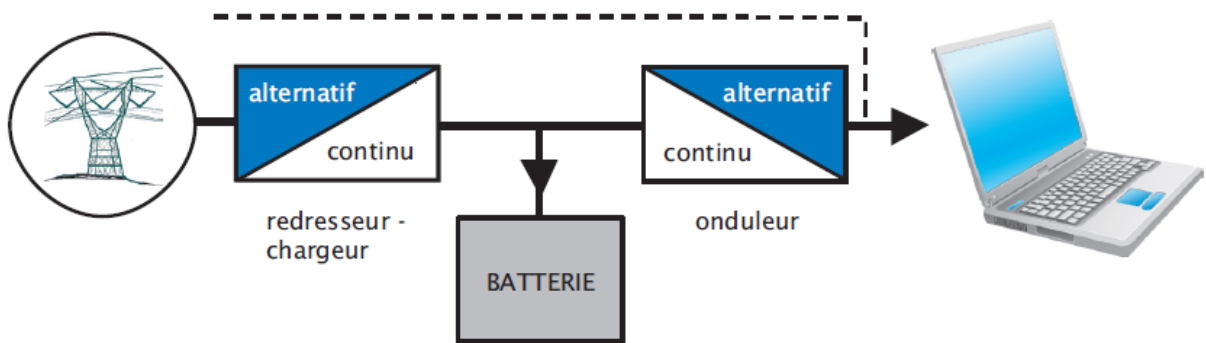


Figure I.20 : Alimentation sans interruption [14]

I.6.4. La protection des équipements :

Les onduleurs protègent des différents équipements dans différents domaines contre les perturbations. [14]

I.6.5. Les installations photovoltaïques :

Le raccordement entre les panneaux photovoltaïques et le réseau se fait à travers les onduleurs aussi ils permettent d'adapter l'énergie délivrée du panneau et l'énergie injectée au réseau. [15]

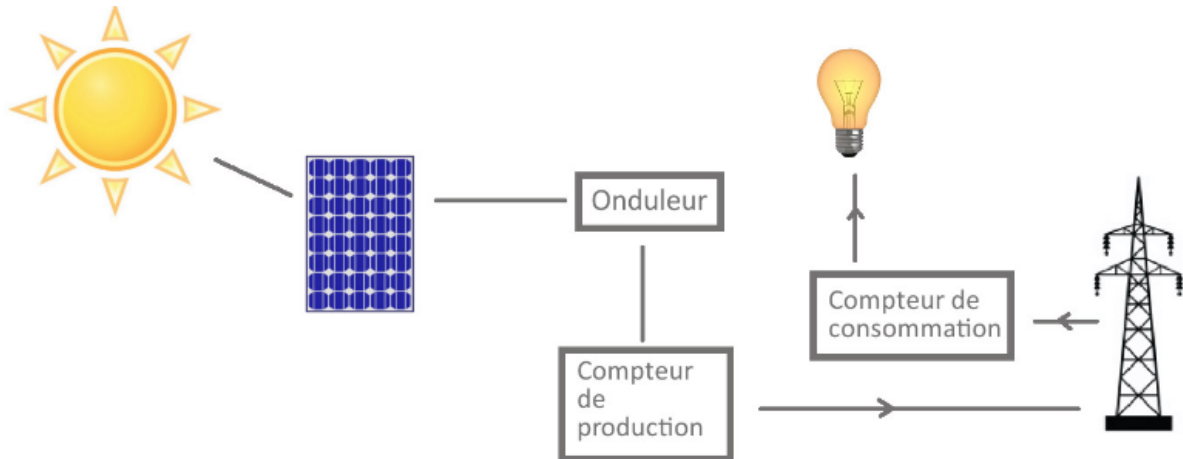


Figure I.17 : Système photovoltaïque connecté au réseau par un onduleur [8]

I.7. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présentés les onduleurs et ces différents types ainsi une analyse de fonctionnement des onduleurs triphasés. Le chapitre suivant est réservé à l'étude des différentes stratégies de commandes des onduleurs.

Chapitre II :
Les différentes stratégies de
commande des onduleurs

II.1. Introduction :

Dans plusieurs applications industrielles, il est important d'avoir une tension d'alimentation stable et réglable. Cette tension est obtenue par les onduleurs qui permettent d'éliminer la variation de la tension continue. Il existe plusieurs techniques afin d'obtenir la tension finale désirée. Plusieurs stratégies peuvent être considérées pour la commande d'un onduleur de tension alimentant une machine dans le cadre d'une application industrielle : les commandes en régime permanent et les commandes en régime transitoire. [14] [15]

Ces stratégies de commande peuvent être regroupées par le diagramme suivant :

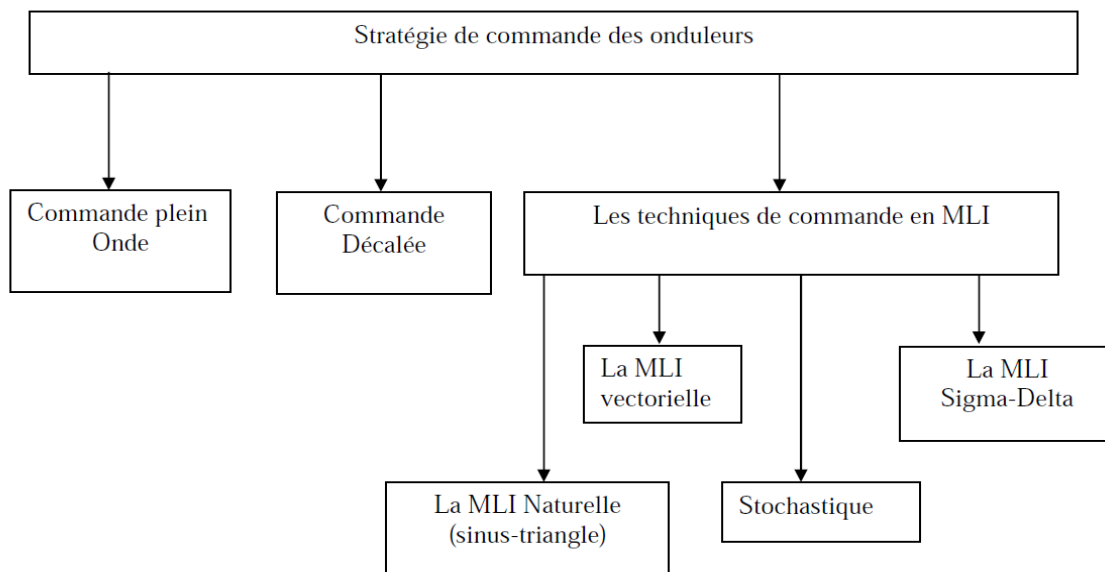


Figure II.1 : Stratégies de commande des onduleurs [16]

II.2. Commande symétrique (pleine onde) :

Cette commande à générer deux signaux carrés de rapport cyclique égale (0.5) pour la commande alternée des deux interrupteurs simultanément k_1 . K_4 et K_2 . K_3 figure II.3.

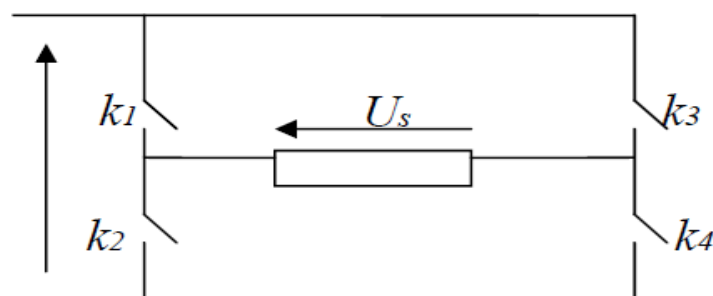


Figure II.2 : Onduleur monophasé.

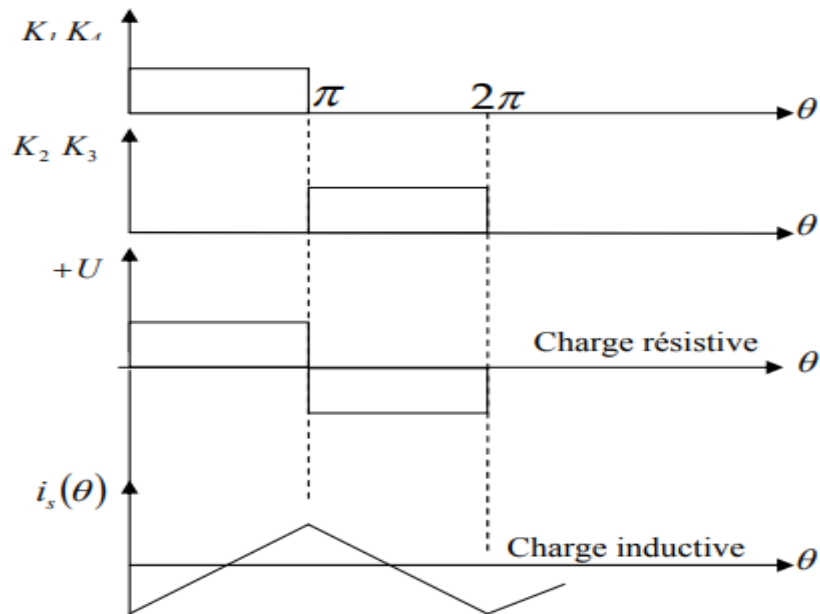


Figure II.3 : Signaux de tension de sortie pour une commande symétrique. [17]

La forme de la tension de sortie de cette technique pour les deux types de charge est donnée par Figure II.3. Pour une charge inductive, la tension de sortie est donnée par le système suivant :

$$U_s(\theta) \begin{cases} U & \text{Si } 0 \leq \theta \leq \pi \\ -U & \text{Si } \pi \leq \theta \leq 2\pi \end{cases}$$

Avec $\theta = \omega.t$

Cette technique ne permet pas d'agir sur la valeur efficace et l'amplitude de terme fondamental de la tension de sortie. La présence des harmoniques d'ordre inférieur influent sur la tension de sortie, (inconvenient majeur). [17]

II.3. Commande décalée :

Le but de cette commande est de fermer ou d'ouvrir les interrupteurs (k1, k4) et (k2, k3), simultanément mais avec un certain temps de décalage T_d . Donc elle permet d'agir sur la valeur efficace et sur l'amplitude fondamentale de la tension de sortie.

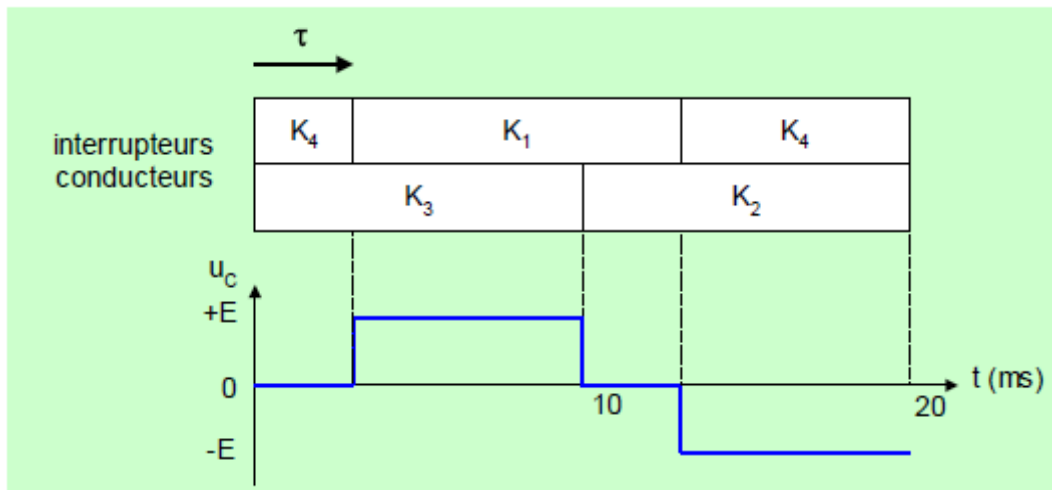


Figure II.4 : Signaux de tension de sortie pour une commande décalée. [17]

II.4. Commande Modulation de largeur d'impulsions ou (PWM):

La commande MLI consiste à découper la tension ou le courant de sortie en plusieurs créneaux de largeurs différentes par action sur les commutateurs de l'onduleur. Ces commutations sont déterminées par l'intersection entre deux signaux ; le premier est l'onde de référence ou modulante représentant la tension de sortie désirée de fréquence f et le deuxième qui est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence est l'onde de modulation (porteuse) qui définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques de l'onduleur. Plusieurs techniques de commande MLI ont été développées. [18] [11]

II.5. Principe de base de MLI :

Le principe de base de la modulation de largeur d'impulsion est sur le découpage d'une pleine onde rectangulaire. Ainsi la tension de sortie de l'onduleur est formée par une succession de créneaux d'amplitude égale à la tension d'alimentation (continue) et de largeur variable. La technique la plus répandue pour la reproduction d'un signal MLI est de comparer un signal triangulaire appelé porteuse de haute fréquence à un signal de référence appelé modulatrice et qui constitue l'énergie du signal recueilli à la sortie de l'onduleur, Figure II.5.

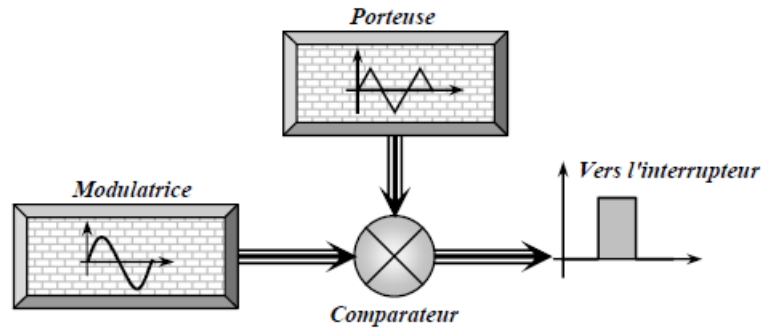


Figure II.5 : Réalisation du signal MLI [11]

II.6. Les caractéristiques de MLI :

Les paramètres importants dans la commande MLI sont : [18].

- **La fréquence de modulation f_p .**
- **L'indice de modulation m ,** égal au rapport des fréquences de la porteuse et de la référence ;

$$m = \frac{f_p}{f_r}$$

Il faut noter quand le coefficient de modulation est grand cela signifie que la neutralisation des harmoniques est efficace

- **Le coefficient de réglage en tension r ,** est défini comme étant le rapport de l'amplitude de la modulante par l'amplitude de la porteuse non modulée.

$$r = \frac{A_r}{A_p}$$

Le coefficient de réglage ne doit jamais être égal à « 1 », il faut toujours laisser une durée suffisante aux intervalles de conduction et de blocage des interrupteurs d'un même bras

II.7. Les différents types de modulation :

Le principe consiste à comparer deux ondes pour cela on distingue deux types de modulation :

- Modulation naturelle.
- Modulation régulière.

II.7.1. Modulation naturelle :

Cette modulation nous permet de comparer directement le signal porteur avec le signal modulant afin d'obtenir à la fin une onde modulée. A cet effet la largeur d'impulsion est proportionnelle à l'amplitude du signal modulé à l'instant où le basculement aura lieu, car ce basculement correspond à des intersections des deux ondes (porteuse et modulatrice) instantanées. Cet effet génère deux conséquences importantes :

- Les centres des impulsions dans le signal MLI résultant ne sont pas équidistants.
- Il n'est pas possible de définir les largeurs d'impulsions en utilisant des expressions analytiques [19].

II.7.2. Modulation régulière :

Les techniques MLI à échantillonnage régulier proviennent de la technique triangulons sinusoïdale. Elles consistent à comparer une porteuse triangulaire à une version discrétisée de la référence [20]. A cet effet on distingue :

- Technique à échantillonnage régulier symétrique.
- Technique à échantillonnage régulier asymétrique.
- Technique à échantillonnage régulier modifié.

II.8. Technique de production d'onde MLI :

Afin de générer le signal de contrôle nécessaire à la commande ainsi au blocage des éléments semi-conducteurs il utilise plusieurs techniques d'obtention d'onde MLI. A cet effet pour obtenir des signaux MLI il existe trois techniques sont :

- Technique analogique.
- Technique digitale.
- Technique hybride.

II.8.1. Technique analogique :

La technique analogique est basée sur la comparaison entre un signal triangulaire "onde porteuse" et un signal sinusoïdal "onde modulatrice", la comparaison est réalisée grâce d'un amplificateur opérationnel. [11]

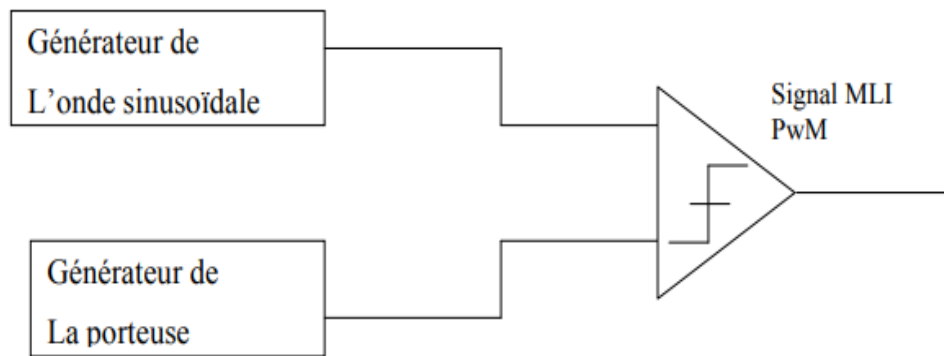


Figure II.6 : Technique analogique [17]

II.8.2. Technique digitale (numérique) :

Elle consiste à utiliser des microprocesseurs qui assurent la génération des impulsions en se servant d'un programme définissant les angles d'amplitudes calculés au préalable. Cette méthode nous permis d'avoir une grande amélioration significative en matière de simplicité et performance du circuit de commande [19]

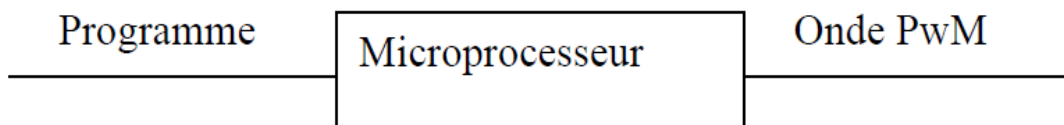


Figure II.7 : Technique Numérique.[21]

II.8.3. Technique hybride :

La technique hybride est une combinaison entre les circuits analogiques et digitaux, durant la période de transition de la technique analogique à la technique digitale. Cette méthode est basée sur la comparaison de deux signaux par un comparateur analogique dont l'un est triangulaire par exemple généré par un ordinateur, et l'autre sinusoïdale (cas d'un onduleur) généré par un circuit analogique. [11]

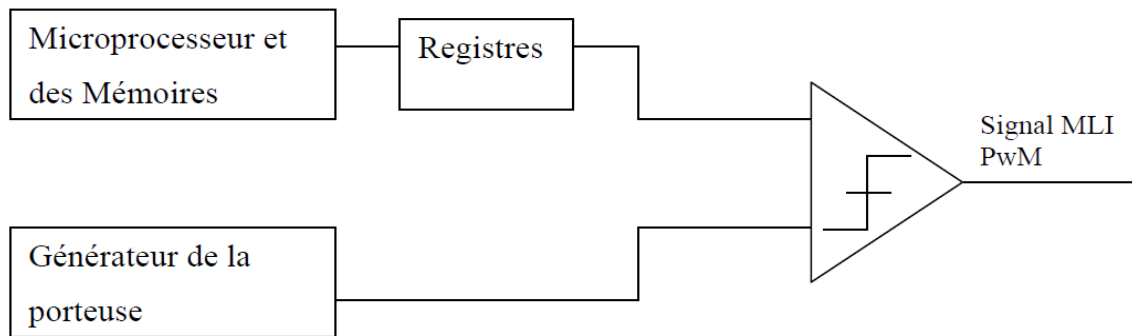


Figure II.8 : Technique hybride [21]

II.9. Différentes techniques de modulation de largeur d'impulsions :

Plusieurs techniques de contrôle à MLI ont été développées. Les plus utilisées sont les suivantes :

- 1 - Modulation MLI simple.
- 2 - Modulation MLI multiple.
- 3 - Modulation MLI Sinus triangulaire.
- 4 - Modulation MLI sinusoïdale modifiée.
- 5 - Commande MLI Vectorielle.

II.9.1. MLI simple

Dans la technique MLI simple on utilise seulement une seule impulsion par demi-cycle ou la largeur de cette impulsion fait varier l'amplitude de la tension à la sortie de l'onduleur. Dans cette méthode on compare un signal de référence d'amplitude A_r , avec un signal d'onde porteuse triangulaire d'amplitude A_p . La figure ci-dessous montre la génération des signaux de commande et de sortie d'un onduleur monophasé à pont complet utilisant la modulation MLI simple. La fréquence du signal de référence est celle de la fondamentale de la tension de sortie. En variant A_r , de 0 à A_p , la largeur d'impulsion δ peut varier de 0 à 180° [18]. La relation A_r/A_p est la variable de contrôle et s'appelle "index de modulation d'amplitude" de la tension de sortie [19].

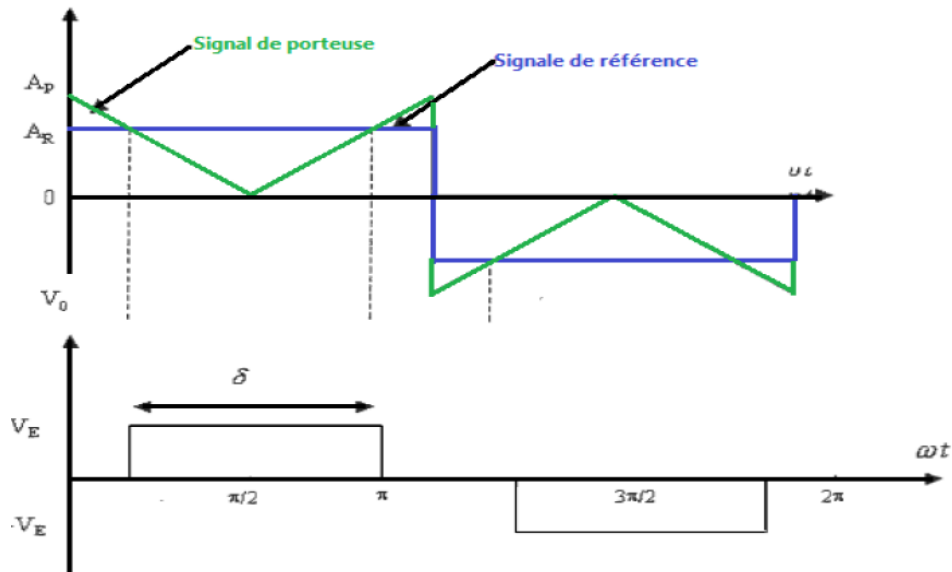


Figure II.9 : MLI d'une simple impulsion [20]

La tension de sortie efficace est déterminée comme suit :

$$V_0 = \left[\frac{2}{2\pi} \int_{(\pi-\delta)/2}^{(\pi+\delta)/2} V_E^2 d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} = V_E \sqrt{\frac{\delta}{\pi}} \quad (\text{II.1})$$

Ainsi, la tension de sortie V_0 dépend de la largeur d'impulsion δ . La série de Fourier de la tension de sortie produite est :

$$V_0 = \sum_n^{\infty} = \frac{4V_E}{1,35\pi} \sin(n\omega t) \quad (\text{II.2})$$

II.9.2. MLI multiple

La technique précédente module la largeur d'impulsion pour varier la valeur efficace de la tension de sortie V_0 . Lorsque, si l'on veut réduire le contenu harmonique de cette tension, il faut avoir plus d'une impulsion par demi-cycle, et pour en obtenir l'utilisation de la technique de modulation MLI de multiples impulsions est souvent requise. Les impulsions de commande des interrupteurs s'obtiennent d'une façon similaire à celle de la technique précédente, avec les intersections d'un signal de référence et d'un signal porteur [21]. La fréquence du signal de référence règle la fréquence de sortie f_r et la fréquence porteuse f_p du signal détermine le nombre d'impulsions durant la demi alternance [22], avec le nombre d'impulsion par demi cycle est donné par :

$$m = \frac{fp}{2fr}$$

Le signal de sortie obtenu est un signal de créneaux de largeurs égales.

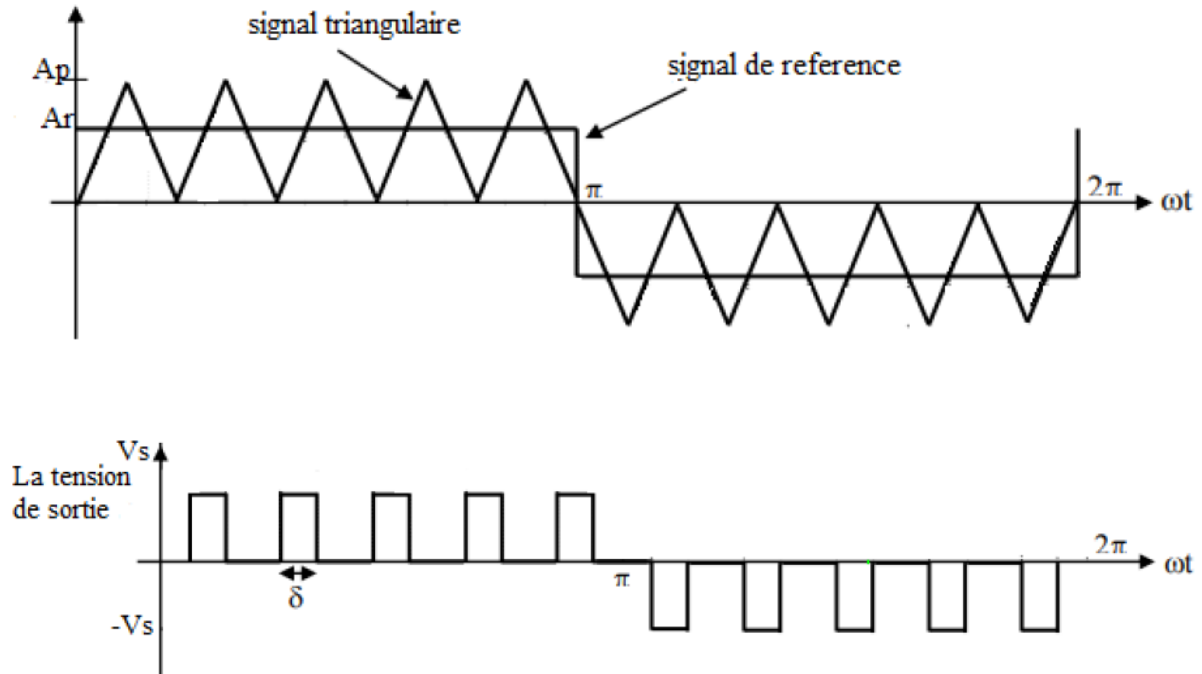


Figure II.10 : MLI multiple [20]

La tension efficace est donnée par la relation suivante :

$$V_0 = \left[\frac{2}{2\pi} \int_{(\pi-\delta)/2}^{(\pi+\delta)/2} V_E^2 d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} = V_E \sqrt{\frac{p\delta}{\pi}} \quad (\text{II.3})$$

II.9.3. MLI Sinus triangulaire (sinusoïdale triangulaire unipolaire (SPWM))

Dans cette technique est le signal de référence est un signal sinusoïdal. On obtient à la sortie de l'onduleur une onde formée d'un train d'impulsion de largeur variable. Les instants de commutations sont déterminés par des points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La fréquence du signal porteur détermine le nombre p des impulsions par demi-cycle. Ce type de MLI est la plus utilisée dans les applications industrielles, car elle est la plus efficace pour la neutralisation des harmoniques [21].

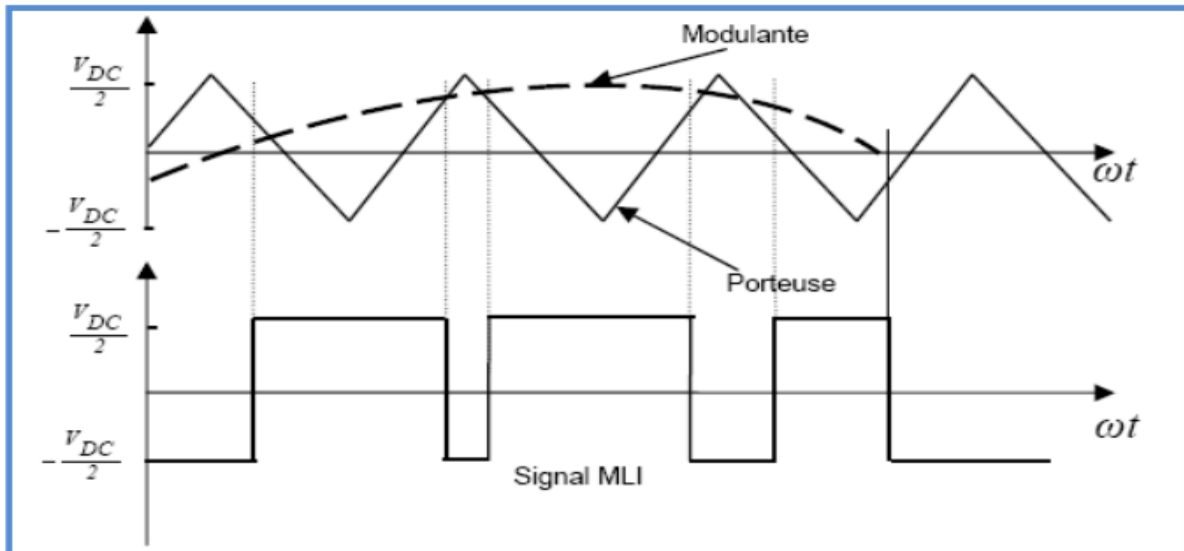


Figure II.11 : Principe de la MLI triangulo-sinusoidale [23]

La tension efficace V_0 de sortie est donnée par:

$$V_0 = V_E \left(\sum_{m=1}^p \frac{\delta_m}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II.4})$$

Où

δ_m = Largeur de la même impulsion et p = le nombre des impulsions par alternance. Contrairement à la modulation MLI de multiples impulsions la technique MLI sinusoïdale permet de réduire de façon significative le facteur de distorsion de la tension de sortie. Toutes les harmoniques d'ordre égal ou inférieur à $2p-1$ sont éliminées par cette technique. [19]

II.9.4. MLI Sinusoïdale modifié :

Dans cette technique le signal de référence est toujours une onde sinusoïdale mais diffère par rapport à la technique précédentes que la porteuse est appliquée durant le début et la fin d'un intervalle de 60° par demi cycle, c'est à dire 0 à 60° et de 120° à 180° .

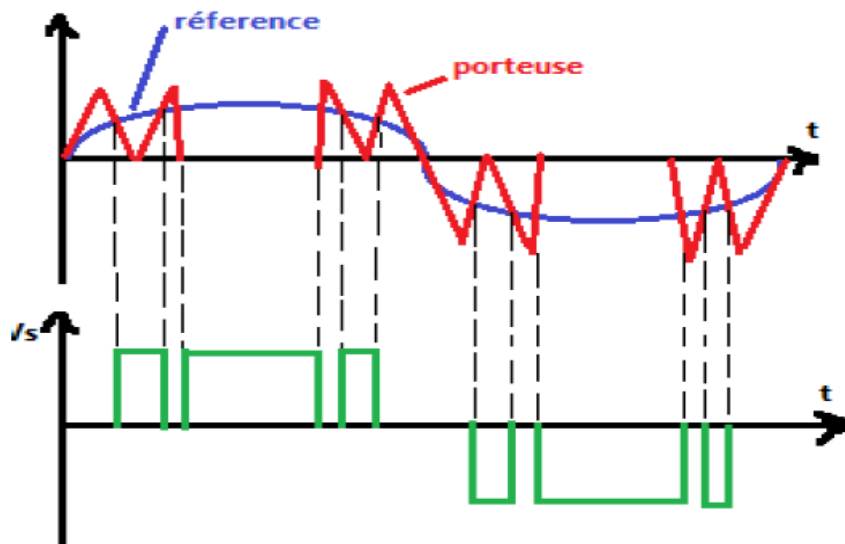


Figure II.12 : MLI sinusoïdale modifié [11]

II.10. MLI de Vectorielle

La modulation vectorielle est une technique 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 [11]

II.10.1. 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 [22].

La figure ci-dessous représente un onduleur triphasé avec trois bras de commutation K_a , K_b , $K_c, \dots K'_c$. La SVPWM fonctionne sur le principe que lorsque l'interrupteur supérieur est ouvert l'interrupteur inférieur doit être obligatoirement fermé dans le même bras.

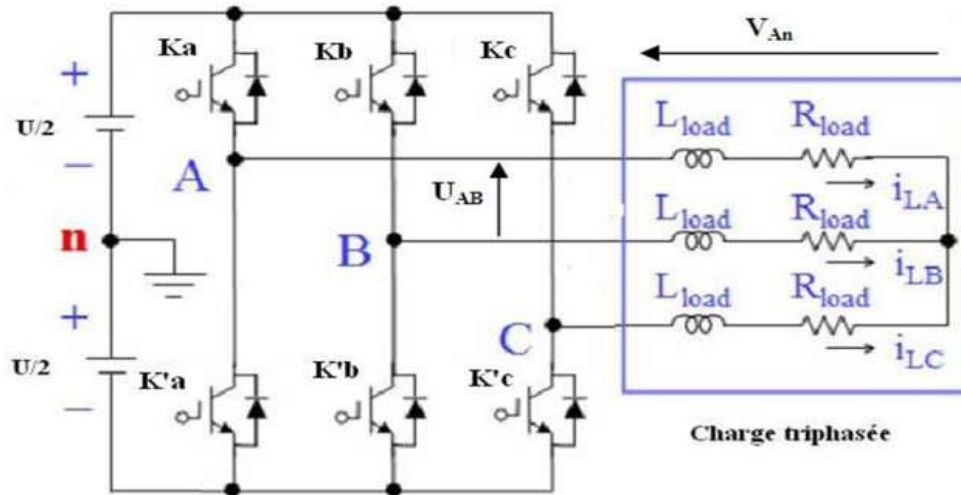


Figure II.13 : Circuit de puissance d'un onduleur triphasé. [23]

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

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{b0} \\ V_{c0} \end{bmatrix}$$

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

$$V_{an} = V_m \sin(2\pi f m t)$$

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

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

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{b0} \\ V_{c0} \end{bmatrix}$$

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

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix}$$

II.10.2. Les configurations possibles :

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

$$V_{ref} = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} \quad \text{Et} \quad \alpha = \tan^{-1}(V_q/V_d)$$

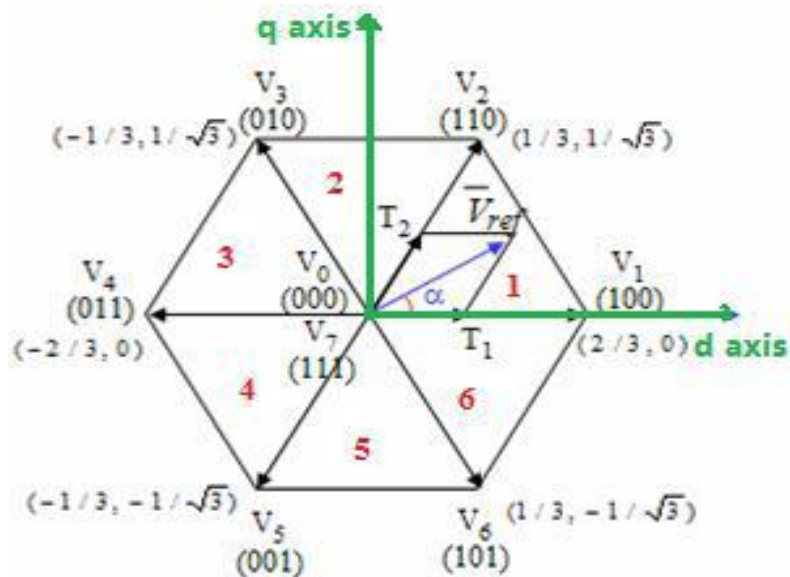


Figure II.14 : Les huit configurations possibles [24]

Il existe 8 combinaisons possibles 2^3 pour les bras de l'onduleur avec six non nuls indiqué 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

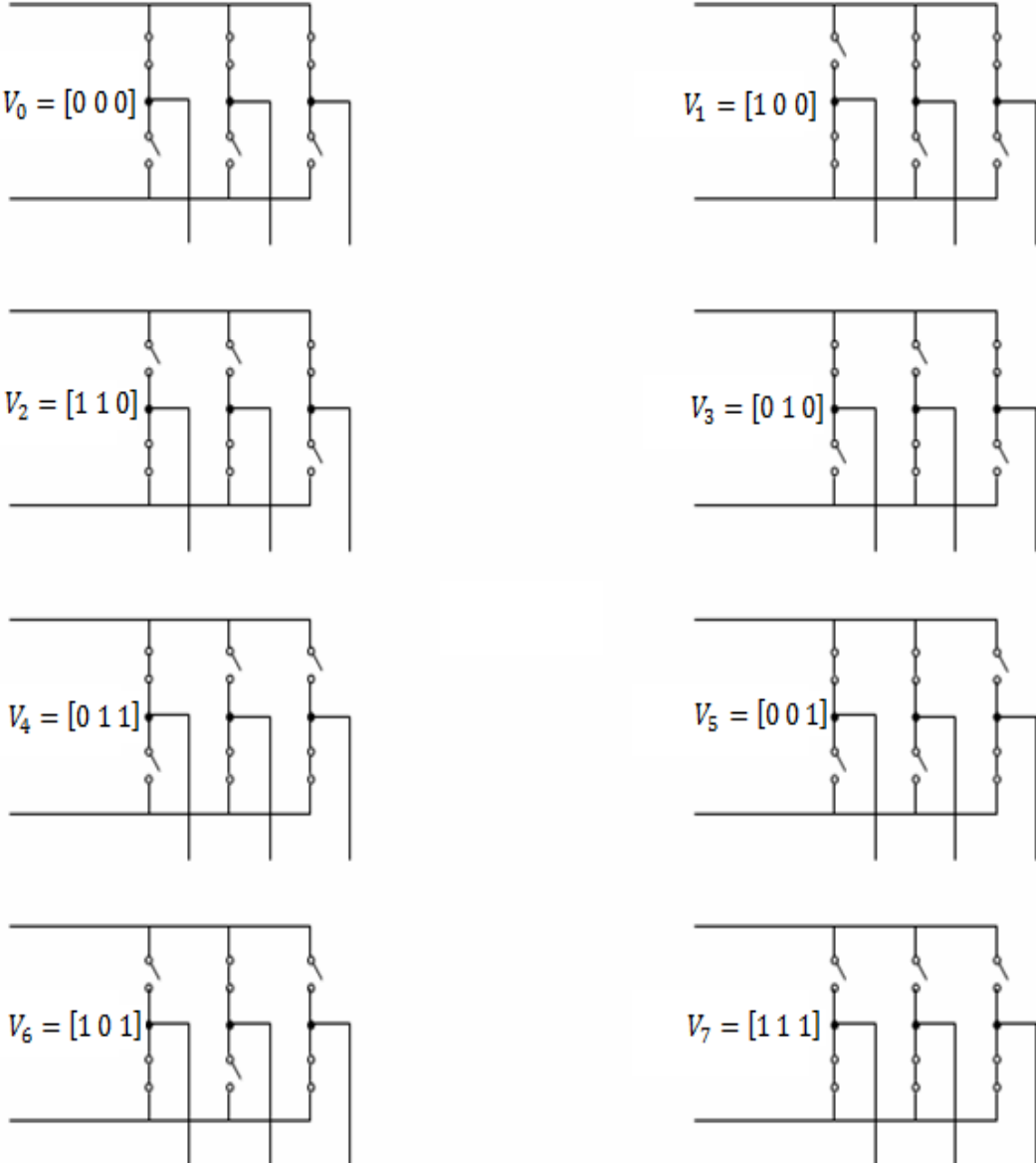


Figure II.15 : les combinaisons possibles des interrupteurs [24]

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 [23]

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	\vec{V}_0
1	0	0	$\frac{2U_c}{3}$	$-\frac{U_c}{3}$	$-\frac{U_c}{3}$	U_c	0	$-U_c$	\vec{V}_1
1	1	0	$\frac{U_c}{3}$	$\frac{U_c}{3}$	$-\frac{2U_c}{3}$	0	U_c	$-U_c$	\vec{V}_2
0	1	0	$-\frac{U_c}{3}$	$\frac{2U_c}{3}$	$-\frac{U_c}{3}$	$-U_c$	U_c	0	\vec{V}_3
0	1	1	$-\frac{2U_c}{3}$	$\frac{U_c}{3}$	$\frac{U_c}{3}$	$-U_c$	0	U_c	\vec{V}_4
0	0	1	$-\frac{U_c}{3}$	$-\frac{U_c}{3}$	$\frac{2U_c}{3}$	0	$-U_c$	U_c	\vec{V}_5
1	0	1	$\frac{U_c}{3}$	$-\frac{2U_c}{3}$	$\frac{U_c}{3}$	U_c	$-U_c$	U_c	\vec{V}_6
1	1	1	0	0	0	0	0	0	\vec{V}_7

II.10.3. 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.

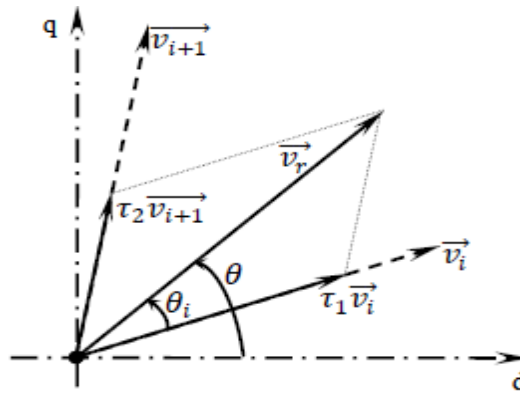


Figure II.16 : La formation de la tension de référence [23]

En cas où 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.

$$\vec{V}_r = \tau_1 \vec{V}_i + \tau_2 \vec{V}_{i+1} + \tau_0 \vec{V}_0 + \tau_7 \vec{V}_7 \quad (\text{II.5})$$

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

Par la projection sur les deux axes d et q

$$V_r \cos \theta = \tau_1 V_i \cos \left(\frac{i\pi}{3} \right) + \tau_2 V_{i+1} \cos \left(\frac{(i+1)\pi}{3} \right) \quad (\text{II.6})$$

$$V_r \sin \theta = \tau_1 V_i \sin \left(\frac{i\pi}{3} \right) + \tau_2 V_{i+1} \sin \left(\frac{(i+1)\pi}{3} \right) \quad (\text{II.7})$$

On pose que :

$$\theta = \theta_i - i\pi/3$$

$$V_r \cos (\theta) = \tau_1 V_i \cos (0) + \tau_2 V_{i+1} \cos \left(\frac{\pi}{3} \right) \quad (\text{II.8})$$

$$V_r \sin (\theta) = \tau_1 V_i \sin (0) + \tau_2 V_{i+1} \sin \left(\frac{\pi}{3} \right) \quad (\text{II.9})$$

Après calcul et simplification on peut obtenir :

$$\tau_1 = \frac{V_r \cos(\theta_i) - \tau_2 V_{i+1}}{V_i}$$

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

Ces équations nous permettent d’avoir les instants de commutation des interrupteurs :

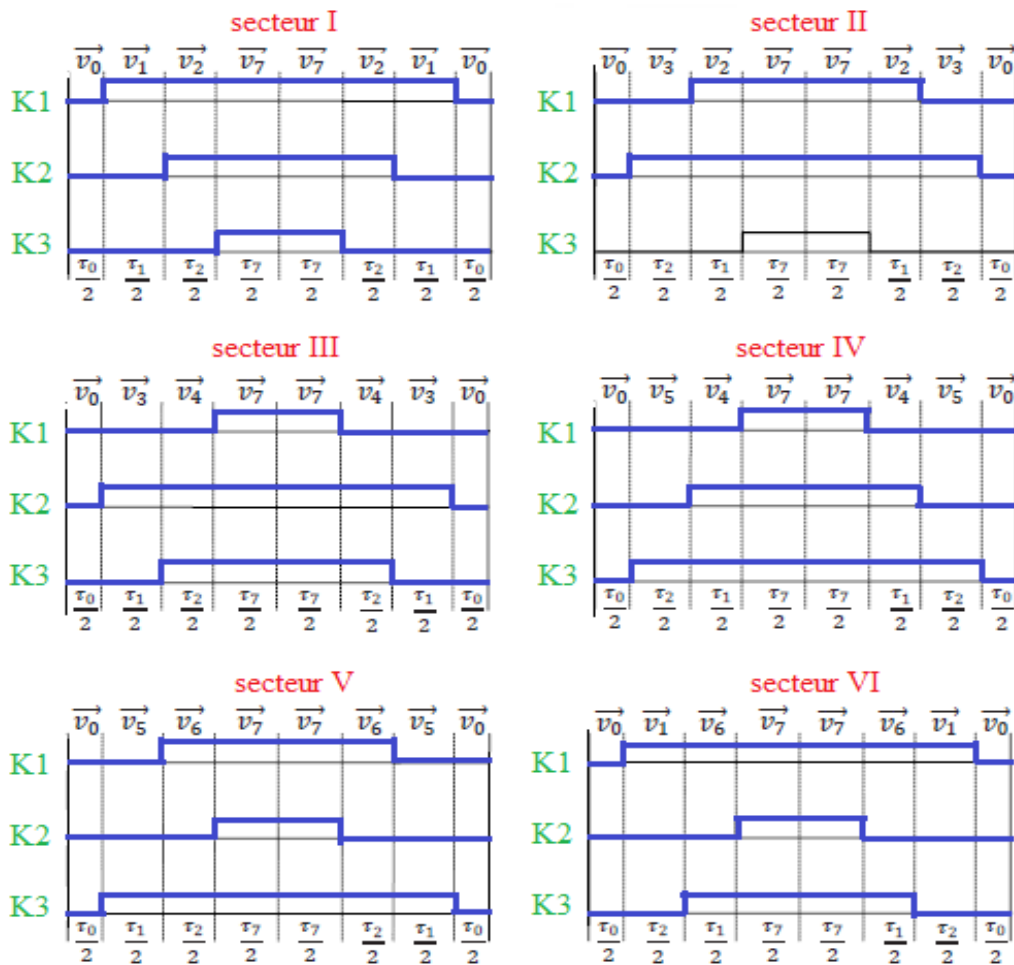


Figure II.17 : Les périodes de commutation des interrupteurs [24]

II.11. Principaux avantages de la MLI :

- Une bonne élimination d’harmonique par rapport aux autres commandes. [22]
- 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’écarter vers des fréquences élevées les harmoniques de la tension de sortie (le filtrage). [22]

II.12. 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. [21]

II.13. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté Les différentes stratégies de commande des onduleurs et le principe de base de MLI et leurs caractéristiques ainsi que les types de modulation. Les techniques de production d'onde MLI, et MLI vectorielle. Le prochain chapitre sera consacré à simulation et Interprétations des résultats.

Chapitre III :
Simulation et interprétation des
résultats

III.1. Introduction

La simulation est un outil utilisé pour étudier les résultats d'une action sur un élément sans réaliser l'expérience sur l'élément réel. En fait, elle permet au chercheur d'éviter des coûts, des dégâts, et elle réduit le délai de développement. Lorsqu'elle est réalisée à l'aide d'un ordinateur, on parle de simulation numérique.

III.2. Simulation des différentes techniques de commande des onduleurs

Plusieurs logiciels sont utilisés pour la simulation, à cet effet nous utilisons le logiciel (Simulink/Matlab) pour la simulation de différentes techniques de commandes des onduleurs.

III.2.1. Simulation de la Commande symétrique :

L'objectif de cette simulation est d'analyser les performances de la commande symétrique ainsi que l'évaluation du TDH du signal, nous avons appliqué la commande symétrique sur une charge RL avec les valeurs suivantes : $E=100\text{v}$

$R=10\ \Omega$; $L=10\text{mH}$

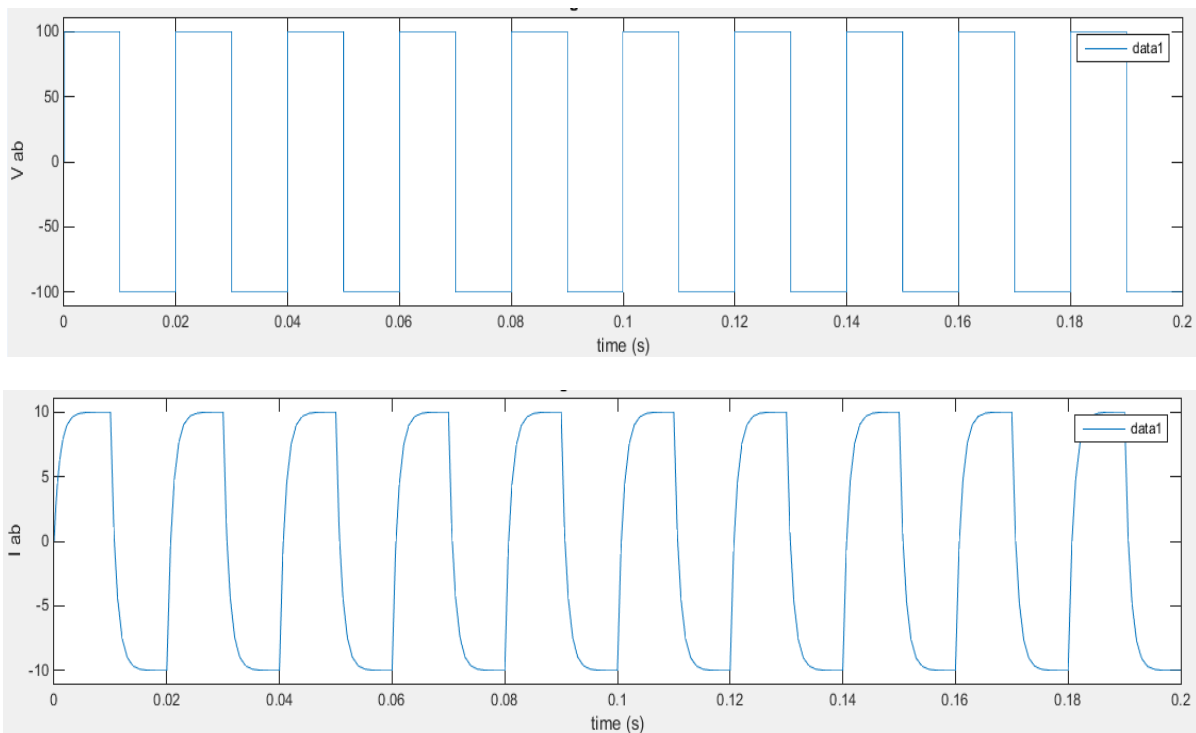


Figure III.1 : Les variations de la tension V_{ab} et du courants I_{ab} aux bornes de la charge inductive (RL).

Dans les figures suivantes, nous allons visualiser l'amplitude des harmoniques par rapport à la fondamentale afin de déduire le THD du signal. Après la simulation, nous avons trouvé les résultats suivants :

Figure III.2 : Les harmoniques de tension générées par la commande symétrique.

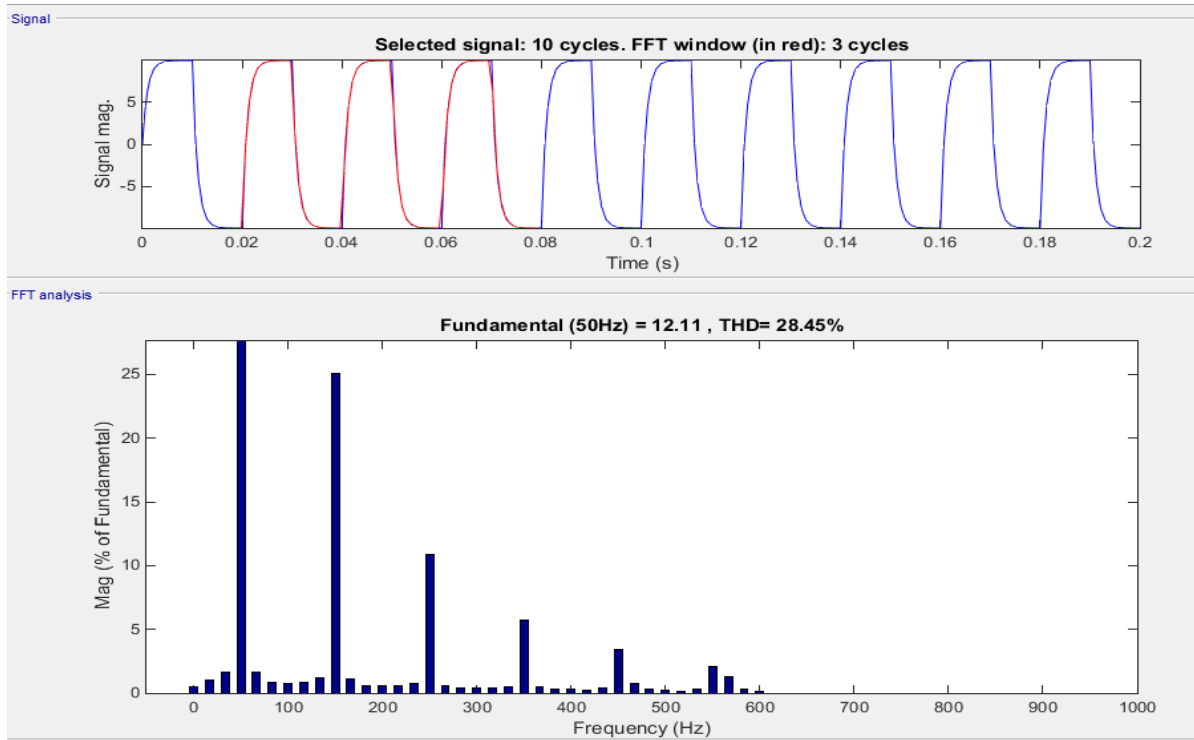


Figure III.3 : Les harmoniques de courant générées par la commande symétrique.

III.2.2. La commande décalée

L'objectif de cette simulation est d'analyser les performances de la commande décalée ainsi que l'évaluation du TDH du signal résultant. Nous avons appliqué la commande décalée sur une charge RL avec les valeurs suivantes : $E=100V$

$$R=10 \Omega ; L=10mH$$

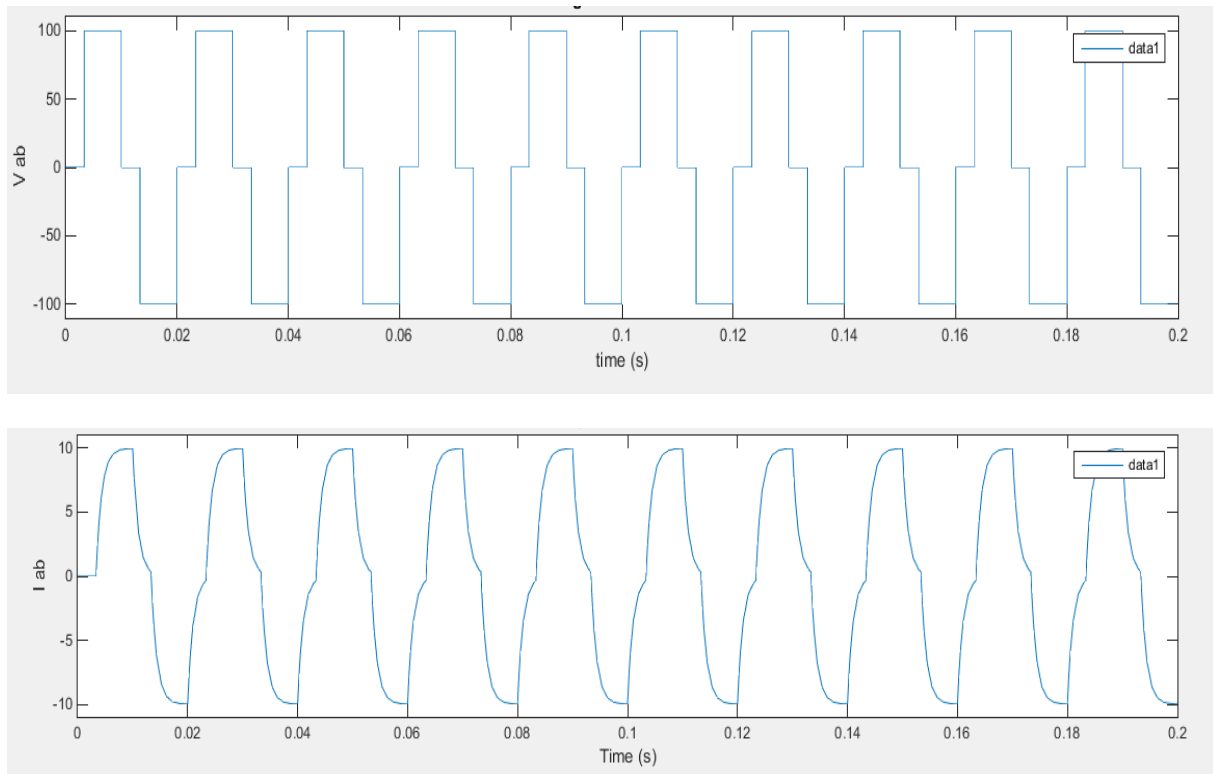


Figure III.4 : Les variations de la tension V_{ab} et du courants I_{ab} aux bornes de la charge inductive (RL).

Dans les figures suivantes, nous allons visualiser l'amplitude des harmoniques par rapport à la fondamentale afin de déduire le THD du signal. Après la simulation, nous avons trouvé les résultats suivants :

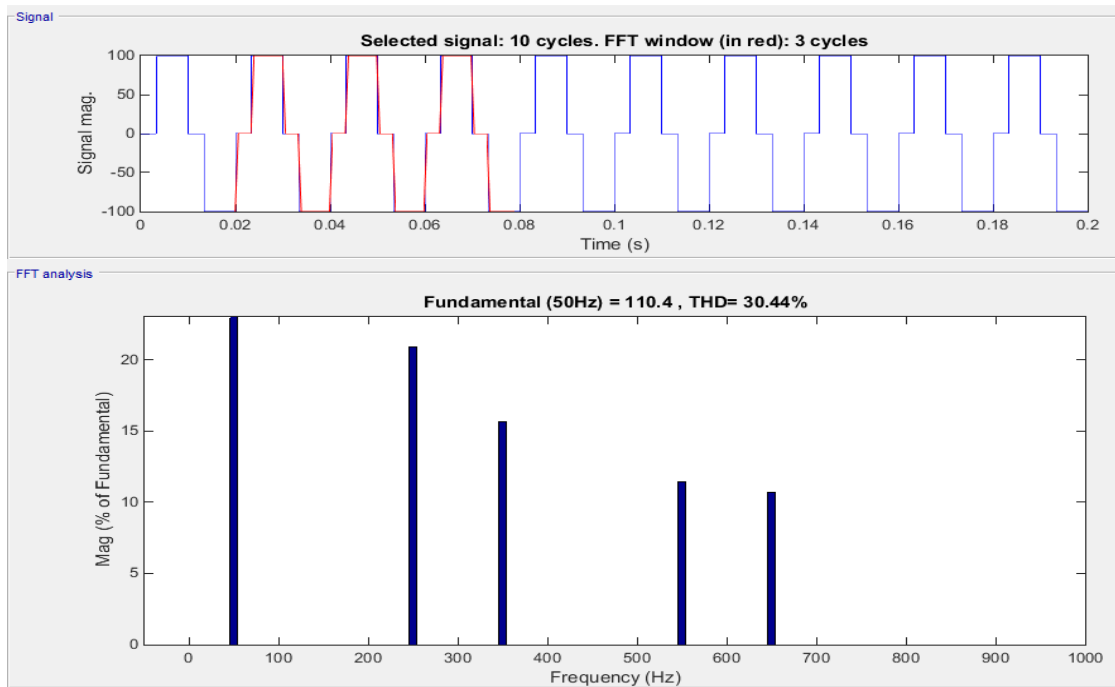


Figure III.5 : Les harmoniques de tension générées par la commande décalée

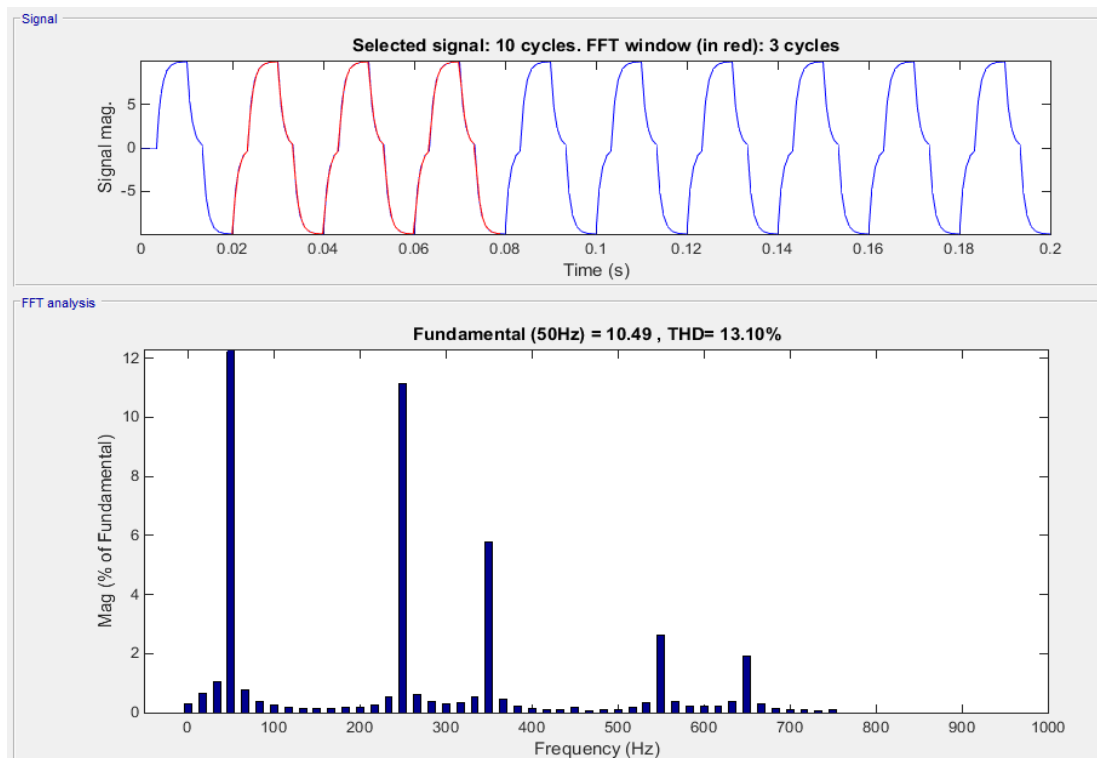


Figure III.6 : Les harmoniques de courant générées par la commande décalée

Dans la partie suivante nous allons entamer une analyse bien précise des résultats obtenus dans la partie simulation pour justifier la commande qui s'avère meilleure.

Premièrement nous avons commencé par comparer le TDH du courant et tension de chaque commande, les résultats sont visualisés dans le tableau.

Type de commande	$TDH_V\%$	$TDH_I\%$
Commande symétrique	48.06	28.45
Commande décalée	30.44	13.10

III.2.3. Simulation de la Commande MLI (PWM)

- **La commande MLI triangulo-sinusoidale (spwm)**

La figure III.7 présente les trois impulsions SPWM générées, pour commander les trois interrupteurs supérieurs (Ka, Kb, Kc), leurs compléments sont utilisés pour commander les trois commutateurs inférieurs, avec $f_c = 1000$ Hz, $f = 50$ Hz, et $m = 20$, tension d'entrée triphasée $V = 200$ V ; et une charge triphasé.

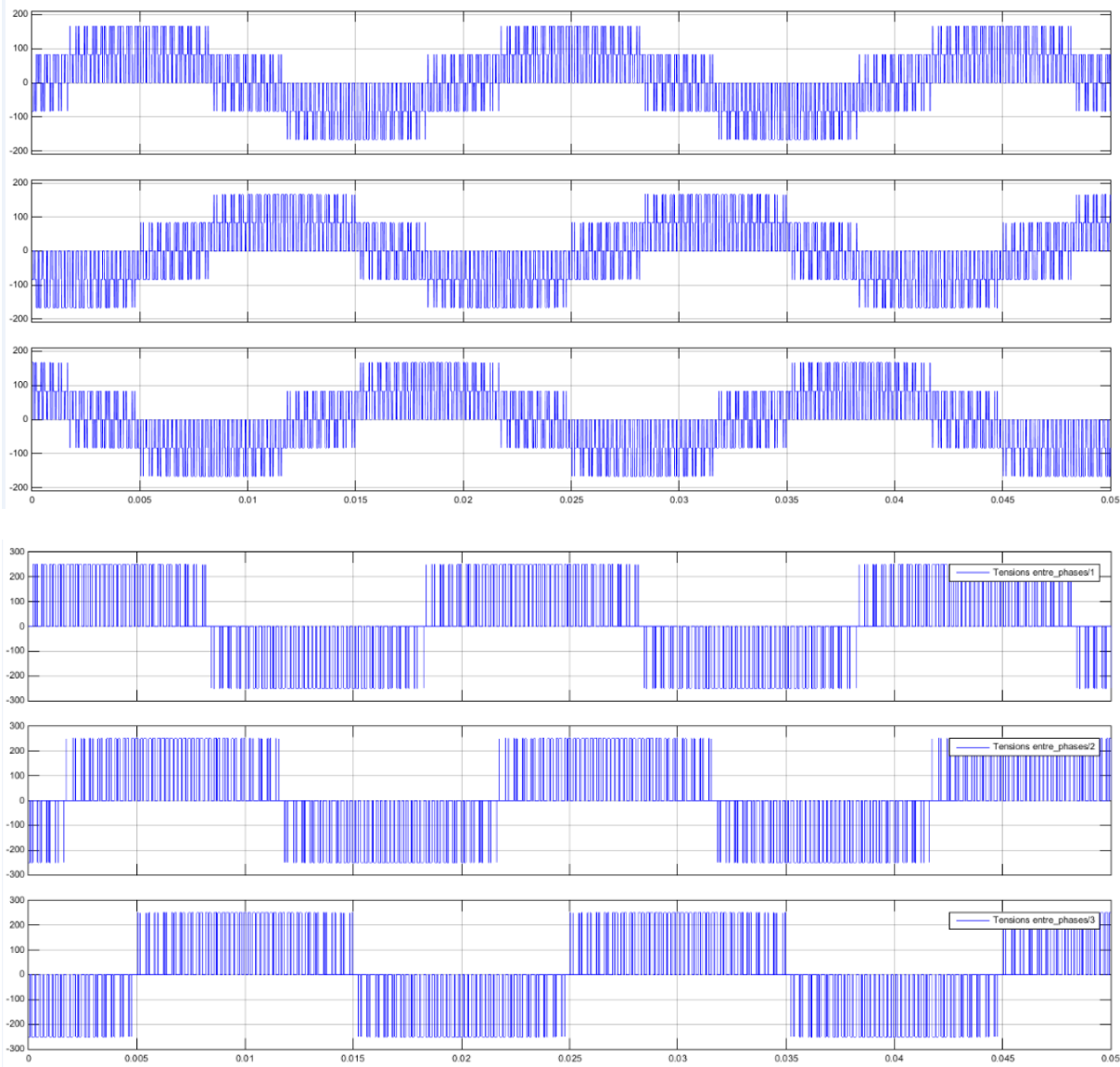


Figure III.7 : Forme d'onde de la tension simple (Van), et de la tension. Composée (Uba)

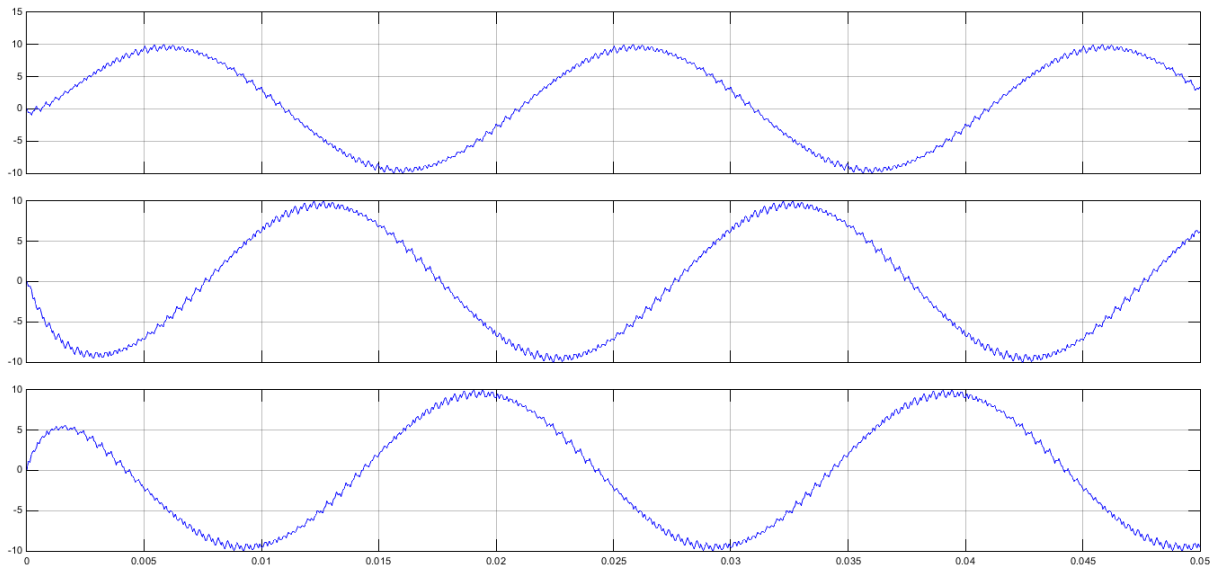


Figure III.8 : Forme d'onde du courant (I)

III.3. Commentaires et interprétations des résultats

On remarque que la forme d'onde obtenue par cette technique (MLI), que ce soit pour le courant ou la tension, est meilleure que celle obtenue à travers les techniques précédentes (symétriques et décalée).

Avec la stratégie SPWM, nous pouvons obtenir une tension de sortie presque sinusoïdale, avec moins de distorsion harmonique obtenue avec la commande symétrique et décalée.

Dans cette partie nous allons visualiser l'amplitude des harmoniques par rapport à la fondamentale afin de déduire le THD du signal. Après la simulation, nous avons trouvé les résultats suivants :

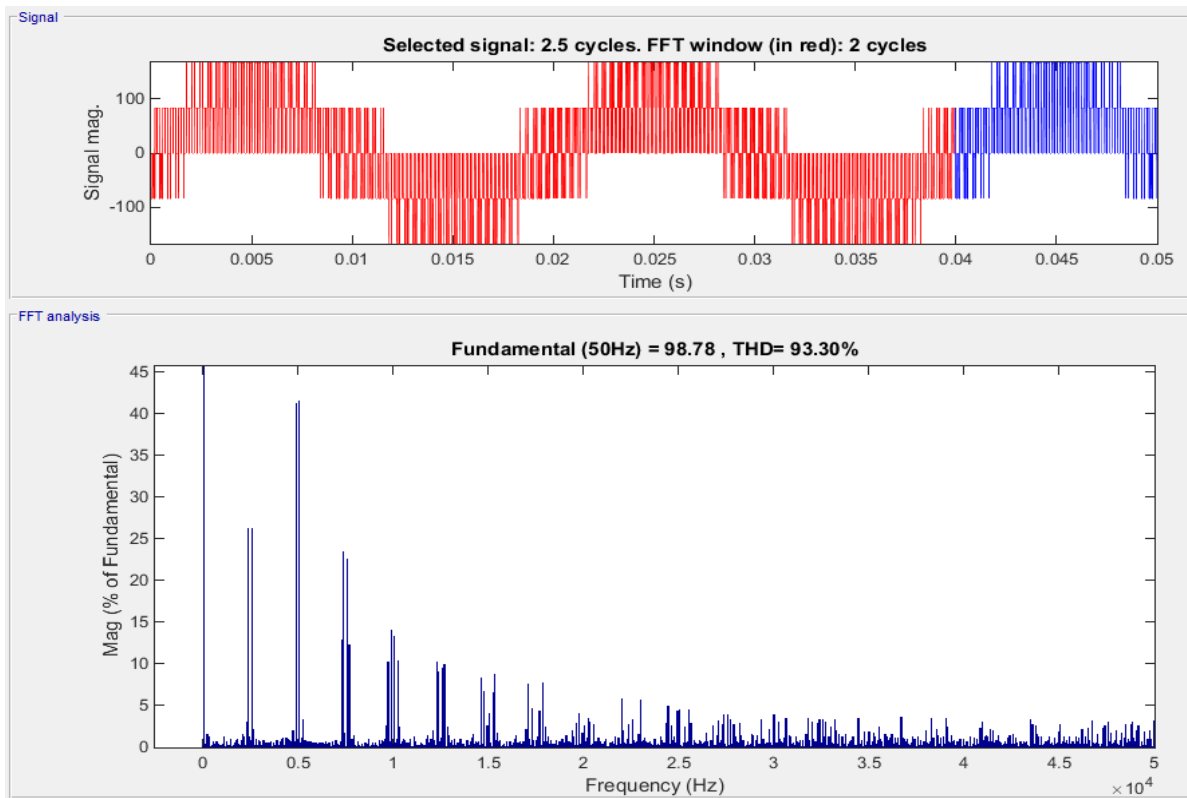


Figure III.9 : Les harmoniques de tension générées par la commande.

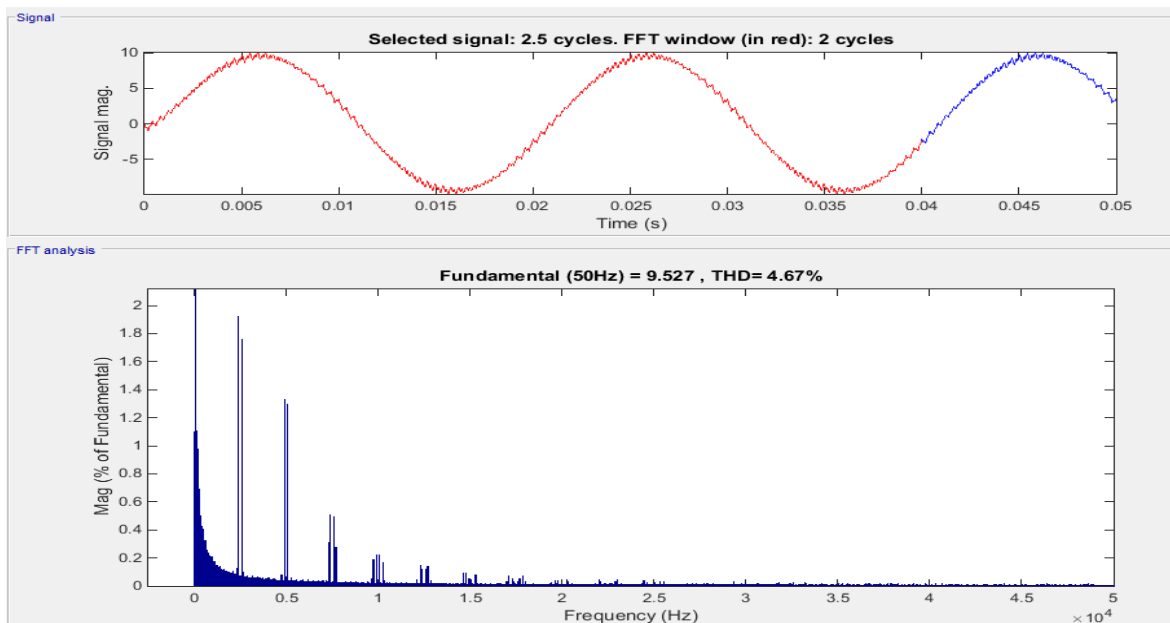


Figure III.10 : Les harmoniques de courant générées par la commande décalée.

III.4. Comparaison entre les différentes commandes :

Tableau III.1 : Comparaison des différentes commandes

Type de commande	$TDH_i\%$
Commande symétrique	28.45
Commande décalée	13.10
La commande MLI	4.67

Nous remarquons d'après ce tableau que la commande MLI (SPWM) représente un faible THD et donc des meilleures performances pour les moteurs. Par contre pour la commande symétrique qui présente THD le plus élevé ce qui pose des problèmes pour une utilisation avec des moteurs (pertes joules, couples pulsatives...).

III.5. CONCLUSION

Ce chapitre a été consacré à l'élaboration des modèles des différentes stratégies de commande symétrique, décalée et la commande MLI.

Les résultats de la simulation montrent que la technique MLI est capable de produire une onde sinusoïdale de bonne qualité, avec un THD faible.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire s'est porté sur l'étude des différentes stratégies de commande d'un onduleur, où l'objectif est de trouver la stratégie qui donne les meilleures performances.

D'abord, une étude bibliographique a permis de rappeler les théories sur le principe de fonctionnement des onduleurs monophasés et triphasé et leurs commandes et ainsi que leurs domaines d'application.

Ensuite, nous avons étudié les différentes techniques de commande des onduleurs symétrique, décalée et de modulation de largeur d'impulsion pour un onduleur triphasé, quelques avantages et inconvénients de la commande MLI.

Enfin, nous avons consacré le dernier chapitre à la simulation des différentes commandes symétrique, décalée et la commande MLI (PWM) avec le logiciel MATLAB (Simulink).

Les résultats de simulation obtenus sont satisfaisants et permettent de classer la commande qui donne les meilleures performances pour les convertisseurs statiques DC-AC en fonction du type de commande appliqué, et nous avons remarqué clairement que la commande MLI qui donne les meilleurs résultats pour avoir un signal le plus proche au sinusoïdal et avec moins de perturbations, et par conséquent avoir le meilleur rendement.

Bibliographie

- [1] K. Berkoune « Approche mathématique pour la modulation de largeur d’impulsion pour la conversion statique de l’énergie électrique : Application aux onduleurs multi-niveaux », Thèse de doctorat, Université Toulouse, France, 2016.
- [2] Abdelkrim, T., Berkouk, E. M., Aliouane, K., Benamrane, K., & Benslimane, T. (2011). Etude et réalisation d’un onduleur à trois niveaux commandé par MLI vectorielle. *Journal of Renewable Energies*, 14(2), 211-217.
- [3] Guy Séguier, Francis Labrique, Philippe Delarue « Electronique de puissance, structures, commandes, applications », 10eme Edition, DUNOD, Paris, 2004, 2011, 2015.
- [4] Mr. Belkacemi Belkacem et Mim Zakaria et Ouada Laiche Modélisation et simulation de l’association onduleur multi niveaux-machine asynchrone Mémoire de master. Université Echahid Hamma Lakhdar d’El-Oued. 2021
- [5] G. Séguier, R. Bausière, F. Labrique « Les convertisseurs de l’électronique de puissance la conversion alternative », Volume 4, Edition tec&doc, 1995
- [6] : T. Wildi « *Electrotechnique* », 3ème édition de Boeck université, 1999.
- [7] BOUCHERITTE Wafa. Convertisseurs multiniveaux dans les systèmes PV Connectés au réseau. Mémoire de magister. Université de Biskra.
- [8] <https://mypower.engie.fr/energie-solaire/conseils/schema-panneau-photovoltaïque.html> consultés le 04 avril 2021
- [9] « Onduleur de tension: mise en oeuvre et Structures-principes-applications », Techniques d’ingénieur, Traité de génie électrique D.3176-3177.
- [10] J. N. Fiorina « Onduleurs et harmoniques », Cahiers techniques N°159, Schneider électrique, 1992.
- [11] GHORZI Zoulikha Mimouni Amina <<Stratégies de commande des onduleurs>> Mémoire Master école supérieure en sciences appliquée Tlemcen.2019

- [12] M. Ben Ahmed Bouzid M. Chelbi Farid << Implémentation sur DSP F28335 des Stratégies de Commande d'un Convertisseur DC/AC>> Mémoire Master Université A. MIRA-BEJAIA 2018
- [13] LAKEHAL B. Modélisation et commande d'un onduleur triphasé multi niveaux. Mémoire de master. Université de Bejaia . 2015
- [14] Guide pratique. L'onduleur, Pourquoi ? Comment ? Explications
- [15] SAKLY, Jaouhar. Influence du filtre d'entrée sur la tension de sortie des onduleurs de tension monophasés. 1991. PhD Thesis. Lille 1.
- [16] .Mr CHIBAH AREZKI .CONCEPTION D'UN CONTROLEUR D'ETAGE DE PUISSANCE PAR FPGA . Memoire Magister en Electrotechnique. UNIVERSITE DE TIZI OUZOU.
- [17] Nadia, Adjimi, and Belaidi Wahiba. "Modélisation et commande d'un onduleur MLI." Universitaire Larbi Ben M'hidi Oum El-Bouaghi (2009).
- [18] MERABET Kamel. Commande mu d'un onduleur triphasé basée sur la dispersion de la tension triphasée. Université du québec. 2011
- [19] BENMIRA Hassan. Implantation de la commande vectorielle spatiale dans un circuit dédié. Université du québec. 2003
- [20] MERHOUM Amina. Optimisation Des Techniques De MLI Pour Les Equipements FACTS A Base D'onduleur. Memoire de magister. Université d'Oran.2013
- [21] BERREZZEK Farid. Etude des Différentes Techniques de Commande des Onduleurs à MLI Associés à une Machine Asynchrone. Mémoire de magister. Université d'Annaba.2006
- [22] 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
- [23] Mansouri Fatima Zohra. Commande de la Génératrice Asynchrone Double Alimentation pour La Production de L'énergie Eolienne. Doctora Thèse. Université d'Oran 2021
- [24] BOUDRIES Zoubir. Cour de commande des machines électriques. Université de Bejaia.