

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

FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE  
N° :



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE  
FILIERE : ELECTROTECHNIQUE  
OPTION : COMMANDE ELECTRIQUE

**Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique**

**Par: OUADOUD Haroune**

**Intitulé :**

**MODELISATION ET COMMANDE D'UN  
ONDULEUR MULTINIVEAUX  
TYPE "PUC"**

**Soutenu devant le jury composé de:**

Mr. BOUZIDI Riad	Université Mohammed Boudiaf – M'sila	Président
Mr. GADBANE Ismail	Université Mohammed Boudiaf – M'sila	Rapporteur
Mr. DJERIOU Salim	Université Mohammed Boudiaf – M'sila	Examineur

**Année universitaire : 2019 /2020**

# Remerciements

## Remerciements

*Premièrement, nous remercions dieu, le tout puissant, de nous avoir donné la santé et la volonté pour faire ce modeste travail.*

*Je voudrais remercier mon encadreur **Mr. GHADBANE Ismail** d'avoir accepté de m'encadrer et de me suivre durant toute cette période.*

*Je remercie aussi monsieur le **président du jury** et les **membres du jury** examinateurs qui nous ont fait l'honneur de participer au jury de ce travail.*

*Et enfin je remercie l'ensemble, **enseignants** et **collègues** de mon promotion, qui m'ont aidé à réaliser ce modeste travail.*

# DEDICACE

## DEDICACE

*JE* dédie ce mémoire à mes très chers parents pour  
Leurs soutient morale pour leurs encouragements et les  
Sacrifices qu'ils ont endurés dans les moments les plus  
Ardus.

*A* mes frères

*A* mes sœurs

*A* mes chers amis

*A* tous les amis (es) d'études surtout ceux  
d'électrotechnique promotion 2019/2020.

*Tous ceux, qui ont contribué à nos formations, de prés  
et de loin.*

Haroune  
**Haroune**



# SOMMAIRE

Remerciements .....	i
Dédicace .....	ii
Sommaire.....	iii
Liste de figure .....	v
Notations et symboles.....	vi
Introduction générale.....	1

## **Chapitre I**

### **Onduleurs multi niveaux**

I.1.Introduction:.....	3
I.2. Définition de l'onduleur :.....	3
I.3. Principe générale de fonctionnement :.....	4
I.4. Classification des onduleurs :.....	5
I.4.1. Onduleur autonome :.....	5
I.4.2. Onduleur non autonome (assisté) :.....	5
I.5. Onduleur triphasé :.....	5
I.6. Modélisation de l'onduleur triphasé :.....	6
I.7. Choix des semi-conducteurs :.....	8
I.8. Les applications des onduleurs :.....	8
I.8.1. Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone :.....	9
I.8.2. Alimentation de secours :.....	9
I.8.3. Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes :.....	9
I.9. Les onduleurs multi-niveaux :.....	10
I.10. Principe de fonctionnement de l'onduleur multi-niveaux :.....	10
I.11. Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux :.....	11
I.11.1: La topologie à diode de bouclage (structure NPC):.....	12
I.11.2: La topologie au condensateur flotteur:.....	15
1.11.3: La topologie en cascade:.....	16
I.12. Propriétés des principales structures :.....	19
I.12.1. Classification des topologies selon leur alimentation:.....	19
I.12.2. Nombres de composants nécessaires:.....	19
I.13. Conclusion :.....	19

## **Chapitre II**

### **Modélisation d'onduleur multi niveau type "PUC"**

II.1. Introduction :	20
II.2. Modélisation d'onduleur PUC :	21
II.3. Onduleur PUC monophasé 5 et 7 niveaux :	22
II.3.1. Onduleur PUC monophasé 5 niveaux :	22
II.3.1.1. Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur PUC 5 niveaux:	23
II.3.1.2. Commande d'un onduleur par modulation de largeur d'impulsion:	24
II.3.1.2.1. Principe de base de Modulation de largeur d'impulsion:	24
II.3.1.2.2. Caractéristiques de la modulation:	25
II.3.1.3. La commande utilisée :	26
II.3.1.4. Résultats de la simulation :	26
II.3.2. Onduleur PUC monophasé 7 niveaux:	28
II.3.2.1. Séquences de fonctionnement d'un onduleur PUC sept niveaux :	29
II.3.2.2 La commande utilisée:	29
II.3.2.3. Résultats de la simulation:	30
II.4. Onduleur PUC triphasé 5 et 7 niveaux:	31
II.4.1. Présentation de la topologie:	31
II.4.2. Onduleur PUC triphasé 5 niveaux:	32
II.4.2.1. Commande utilisée:	32
II.4.2.2. Résultats de la simulation :	33
II.4.3. Onduleur PUC triphasé 7 niveaux:	34
II.4.3.1 Commande utilisée:	34
II.4.3.2 Résultats de la simulation :	35
II.5. Onduleur 'PUC' modifié (MPUC):	36
II.6. Comparaison entre les trois topologies des onduleurs avec l'onduleur type PUC:	38
II.7. Conclusion:	40

## **Chapitre III**

### **Commande d'onduleur multi niveau type "PUC"**

III.1. Introduction :	41
III.2. Asservissement :	41

III.3. Qualité d'un asservissement et performances d'un système :.....	42
III.3.1. Stabilité:.....	42
III.3.2. Rapidité:.....	42
III.3.3. Précision:.....	42
III.4. Le régulateur PID :.....	42
III.4.1. Définition :.....	42
III.4.2. Types de régulateur :.....	44
III.4.2.1. Régulateur proportionnel :.....	44
III.4.2.2. Régulateur proportionnel intégral :.....	44
III.4.2.3. Régulateur Proportionnel Intégrateur Dérivé :.....	45
III.5. Les harmoniques :.....	45
III.6. Taux de distorsion Harmonique:.....	47
III.7. Commande d'onduleur multi niveaux type PUC :.....	48
III.7.1. Régulation de $V_{AUX}$ :.....	48
III.7.2. Régulation de $V_{ch}$ :.....	51
III.8. Onduleur PUC monophasé 7 niveaux :.....	52
III.8.1. Commande d'onduleur PUC monophasé 7 niveaux :.....	52
III.8.2. Résultats de la simulation:.....	52
III.9. Onduleur PUC triphasé 7 niveaux :.....	55
III.9.1. Commande d'onduleur PUC triphasé 7 niveaux:.....	56
III.9.2. Résultats de la simulation:.....	57
III.10. Conclusion:.....	59
Conclusion générale:.....	60
Bibliographies:.....	61
Résumé:.....	64

## Liste des figures

### Chapitre I : Onduleurs multi-niveaux

Figure (I.1): Schéma bloc de la conversion continue-alternative.....	3
Figure (I.2): Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC).....	4
Figure (I.3): Fonctionnement de l'onduleur dans le 1er demi-cycle.....	4
Figure (I.4): Fonctionnement de l'onduleur dans le 2ème demis -cycle.....	4
Figure (I.5): Signal complet de l'onduleur.....	5
Figure (I.6): Onduleur de tension triphasé.....	6
Figure (I.7) : Classification des composants de puissance en fonction de la fréquence de découpage des composants.....	8
Figure (I.8): Principe de réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone.....	10
Figure (I.9): Alimentation de secours.....	10
Figure (I.10): Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes.....	10
Figure (I.11) : Onduleur à niveaux multiples à deux (a), à trois (b) et à m niveaux (c).....	11
Figure (I.12) : Différentes topologies des convertisseurs multi-niveaux.....	11
Figure (I.13) : Topologies d'onduleurs NPC.....	12
Figure (I.14) : Tensions produites par le convertisseur NPC 3 niveaux.....	14
Figure (I.15) : Tension de sortie d'un convertisseur 3 niveau.....	14
Figure (I.16) : Convertisseur NPC triphasé 3 niveau.....	14
Figure (I.17) : Onduleur à condensateurs flotteurs.....	15
Figure (I.18) : Formes des signaux obtenus avec un convertisseur à capacités flottantes 5 niveaux.....	16
Figure (I.19) : Convertisseur triphasé 3 niveaux à capacités flottantes.....	16
Figure (I.20) : Convertisseur en H 3 niveaux.....	17
Figure (I.21) : Formes des signaux obtenus avec un convertisseur pont H 3 niveaux.....	17
Figure (I.22) : Séquences de fonctionnement du convertisseur en H.....	18
Figure (I.23) : Onduleur en pont H en cascade 5 niveaux.....	18

### Chapitre II : Modélisation d'onduleurs multi-niveaux type PUC

Figure (II.1) : Cellule d'un convertisseur PUC.....	20
Figure (II. 2) : convertisseur multi-niveaux type PUC .....	20
Figure (II.3) : Schéma d'onduleur PUC 5 niveaux.....	22
Figure (II.4) : Séquences de fonctionnement d'un bras du convertisseur PUC 5 niveaux.....	23

Figure (II.5) Schéma synoptique de la M.L.I.....	25
Figure (II.6) : Commande MLI onduleur monophasé 5 niveaux.....	26
Figure (II.7) : comparaison entre Le signal de référence et les quatre porteuses.....	26
Figure (II.8) : Formes de la tension aux bornes de la charge.....	27
Figure (II.9) : Formes du courant aux bornes de la charge.....	27
Figure (II.10): Taux de distorsion harmonique de la tension de charge.....	27
Figure (II.11): Taux de distorsion harmonique du courant de charge.....	27
Figure (II.12) : Schéma d'onduleur PUC 7 niveaux.....	28
Figure (II.13) : Séquences de fonctionnement d'un bras du convertisseur PUC.....	29
Figure (II.14) : Commande MLI onduleur monophasé 7 niveaux.....	29
Figure (II.15) : comparaison entre Le signal de référence et les six porteuses.....	30
Figure (II.16) : Formes de la tension aux bornes de la charge.....	30
Figure (II.17) : Formes du courant aux bornes de la charge.....	31
Figure (II.18): Taux de distorsion harmonique de la tension de charge.....	31
Figure (II.19): Taux de distorsion harmonique de la tension de charge.....	31
Figure (II.20) : Onduleur PUC triphasé.....	32
Figure (II.21): Commande MLI d'onduleur triphasé cinq niveaux.....	33
Figure (II.22) : Tensions de la charge.....	33
Figure (II.23) : Les courants de la charge.....	34
Figure (II.24): Taux de distorsion harmonique de la tension de charge.....	34
Figure (II.25) : Taux de distorsion harmonique du courant de charge.....	34
Figure (II.26) : Tensions de la charge.....	35
Figure (II.27) : Les courants de la charge.....	35
Figure (II.28): Taux de distorsion harmonique de la tension de charge.....	35
Figure (II.29) : Taux de distorsion harmonique du courant de charge.....	36
Figure (II.30) : Schéma d'onduleur PUC modifié.....	36
Figure (II.31) : Tension de charge d'onduleur PUC modifié.....	37
Figure (II.32) : Courant de charge d'onduleur MPUC.....	38
Figure (II.33): Taux de distorsion harmonique de la tension de charge.....	38
Figure (II.34): Taux de distorsion harmonique du courant de charge.....	38

**Chapitre III: Commande d'onduleur multi niveau type "PUC"**

Figure (III.1): Système asservi en boucle fermée.....41

Figure (III.2): Asservissement par un régulateur PID.....43

Figure (III.3): Exemple d'un courant contenant des harmoniques et décomposition en rangs harmoniques de rang 1 (fondamental), 3, 5, 7 et 9.....47

Figure (III.4): Structure d'onduleur PUC monophasé.....48

Figure (III.5): Effet du décalage sur la MLI de sortie.....50

Figure (III.6): Régulation de  $V_{aux}$  en fonction de  $V_{bus}$  par décalage.....50

Figure (III.7): Consigne de courant en fonction de la tension de sortie.....51

Figure (III.8): Schéma bloqué de la commande.....51

Figure (III.9) : Commande MLI en boucle fermé.....52

Figure (III.10) : Tension aux bornes de la charge.....53

Figure (III.11) : Courant aux bornes de la charge.....53

Figure (III.12) : Tension aux bornes du condensateur.....54

Figure (III.13) : Courant du condensateur.....54

Figure (III.14): Taux de distorsion harmonique de la tension de charge.....54

Figure (III.15) : Taux de distorsion harmonique du courant de charge.....55

Figure (III.16) : Structure d'onduleur PUC en triphasé.....56

Figure (III.17) : Commande MLI de l'onduleur PUC triphasé.....57

Figure (III.18) : Forme de la tension de la charge.....58

Figure (III.19) : Forme du courant de la charge.....58

Figure (III.20): Tension phase-phase.....58

Figure (III.21): Taux de distorsion harmonique de la tension de charge.....59

Figure (III.22) : Taux de distorsion harmonique du courant de charge.....59

## **NOTATIONS ET SYMBOLES**

AC	Alternative Current
DC	Direct Current
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
MOSFET	Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect Transistor.
GTO	Gate Turn-Off Thyristor
JFET	Junction Field Effect Transistor
MLI	Modulation à Largeur d’impulsion
NPC	Neutral Point Clamped
MPC	Multiple Point Clamped
FC	Flying Capacitor
PUC	Packed U Cells
MPUC	Packed U Cells Modified
PWM	Pulse Width Modulation
THD	Total Harmonic Distorsion
P	Proportionnel
PI	Proportionnel Intégral
PID	Régulateur proportionnel intégral dérivé.
DC/DC	Continu-continu.
Vab	La tension de sortie de l’onduleur
Vaux	Tension aux bornes du condensateur
Vbus	Tension aux bornes de source continue
Fp	La fréquence de la porteuse.
Fm	La fréquence de la modulent.
Vm	Amplitude de la modulent.
Vp	Amplitude de la porteuse.

Les autres symboles utilisés sont définis dans le texte.



**INTRODUCTION GÉNÉRALE**

## INTRODUCTION GENERALE

L'utilisation des convertisseurs statiques dans l'industrie est devenue un champ extrêmement vaste, car les équipements industriels utilisent de plus en plus d'entraînement à vitesse variable. Les convertisseurs de puissance sont des dispositifs électroniques comprenant des éléments semi-conducteurs tels que des interrupteurs et des diodes, ainsi que les éléments passifs d'électroniques comme les résistances, les capacités et les inductances. Ces convertisseurs sont des structures qui permettent de convertir le courant électrique d'une forme à une autre. Deux formes du courant sont utilisées dans les applications électroniques actuelles : le courant sous sa forme continue et le courant sous sa forme alternative, ce qui nous donne quatre types de conversion,[1] soit :

DC/AC ou onduleur qui a pour but de transformer le courant continu en alternative.

AC/DC ou redresseur qui a pour but de redresser le courant alternatif et de le rendre continu.

DC/DC dont le but est de changer l'amplitude d'un courant continu, le hacheur est l'application la plus répandue.

AC/AC dont le but est de changer la fréquence et l'amplitude du courant alternatif, elle est souvent réalisée par deux transformations AC/DC et DC/AC consécutives.

Les onduleurs sont très utilisés dans l'industrie touchant divers applications, le plus connu est sans doute celui de la variation de vitesse des machines électriques, l'inconvénient majeur de l'onduleur est l'obtention d'une tension non sinusoïdale à sa sortie, ce qui provoque une dégradation du régime de fonctionnement de certaines charges surtout les machines électriques. Ces tensions de sortie sont très riches en harmoniques, d'où la nécessité de les réduire. Outre cela les onduleurs conventionnels (à deux niveaux) sont limités aux applications de faibles et de moyennes puissances seulement.[2]

Plusieurs solutions ont été adoptées pour résoudre ce problème. Les ingénieurs et les chercheurs ont conçu des filtres passifs, actifs, ou encore hybrides pour éliminer les harmoniques ou les compenser. Une autre solution consiste à utiliser des convertisseurs multi niveaux qui ont l'avantage d'effectuer la conversion en évitant un taux de distorsion harmonique élevé.

Un onduleur à structure multi niveaux a été présenté comme alternative dans des situations à moyen tension et à haute puissance. Il réalise non seulement des conversions de haute énergie, mais permet également l'utilisation des énergies renouvelables. Des sources d'énergie renouvelable telles que le photovoltaïque, peuvent être facilement reliées à un système à convertisseurs multi niveaux pour une application de haute énergie [3].

Dans ce projet, nous nous intéressons sur les onduleurs multi niveaux à structure PUC (Packed U Cells), sujet de ce mémoire, est une topologie de conversion multi niveaux. Elle a été mise au point en 2010 par Ounejjar et Al-Haddad. Elle a l'avantage de fournir un nombre de niveaux élevés pour un nombre de composants réduits, ce qui a le privilège par rapport à ses concurrentes comme la topologie à point neutre calé (NPC), la topologie à capacités flottantes [1].

Le présent mémoire se spécifie à la modélisation et commande d'un onduleur multi niveaux type PUC, à son étude théorique et à sa simulation. Le travail présenté dans ce mémoire est réparti comme suit :

Dans le premier chapitre, nous présentons le principe général de fonctionnement d'onduleur et les différentes topologies d'un onduleur multi niveaux, ainsi que leur simulation dans MATLAB Simulink.

Deuxième chapitre sera une étude sur les onduleurs multi niveaux à structure PUC cinq et sept niveaux monophasés et triphasés, Dans la deuxième partie, nous avons vu une nouvelle structure de PUC capable de produire des valeurs de tension plus élevées que la tension d'entrée Vdc. En plus de leur modélisation ainsi que leur simulation dans MATLAB/Simulink.

Troisième chapitre sera consacré a l'étude de la régulation, les différents régulateurs et leurs effets sur l'asservissement du système, Puis nous travaillons sur la techniques de commande MLI d'onduleur PUC monophasé et triphasé en boucle fermé avec la régulation, ainsi que leurs résultats de simulation à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink.

En fin, on terminera par une conclusion générale discutant les résultats obtenus et les perspectives à entreprendre dans les futurs travaux.

# *CHAPITRE 1 :*

*Onduleurs Multi niveaux*

## I.1. Introduction :

La technologie de conversion de l'énergie continu-alternatif, en utilisant les convertisseurs statiques tel que les onduleurs de tension constituent une fonction incontournable de l'électronique de puissance en pleine croissance. 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 courants alternatif, alimentation de sécurité...etc. [4]

Dans ce chapitre nous avons présenté la structure de l'onduleur, le principe générale de fonctionnement et les différents types, Nous verrons également quelques domaines d'applications des onduleurs.

Puis nous nous avons consacré à l'étude générale d'onduleurs de tension multi-niveaux. Par ce qu'ils sont beaucoup utilisés dans les domaines d'application de moyenne tension et grande puissance, en raison de leurs divers avantages tels que: la bonne qualité de l'alimentation, une bonne compatibilité électromagnétique, les pertes de commutation faibles et leur capacité en haute tension, ainsi que, la diminution de contenu harmonique dans la tension et courant de sortie. [4] Dans la dernière partie de ce chapitre nous aborderons le principe de fonctionnement, les différentes topologies et on terminera le chapitre par une comparaison de ces trois structures.

## I.2. Définition de l'onduleur :

La conversion continue-alternative permet, à partir d'un signal de tension continue, d'obtenir un signal de tension alternative, d'amplitude et de fréquence désirée. Cette conversion est assurée par un convertisseur appelé onduleur figure (I.1). Ce dernier est utilisé:

- Soit pour fournir des tensions ou courants de fréquences et d'amplitudes variables.

Exemple : C'est le cas des onduleurs servant à alimenter des moteurs à courant alternatif devant tourner à vitesse variable.

-Soit fournir une ou des tensions alternatives de fréquence et d'amplitude fixes.

Exemple : alimenter un système alternatif à partir d'une source continue (batterie).

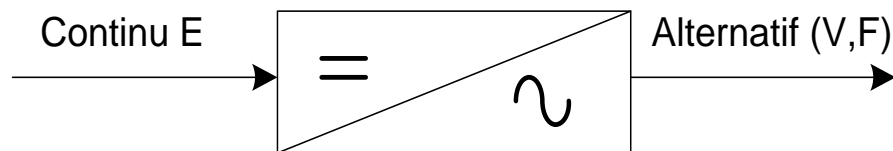


Figure (I.1): Schéma bloc de la conversion continue-alternative.

Il existe plusieurs topologies d'onduleurs, dont chacun correspond à un type d'application déterminée ou permettant des performances recherchées, on distingue les onduleurs de tension et les onduleurs de courant. La technologie des onduleurs de tension est la plus maîtrisée et est présente dans la plupart des systèmes industriels, dans toutes les gammes de puissance (quelques Watts à plusieurs MW). [5].

**I.3. Principe générale de fonctionnement :**

Le principe de fonctionnement d'un onduleur est basé sur l'électronique de commutation, ce qui génère une onde de tension alternative à partir d'une tension continue comme le montre la Figure (I.2). [6]

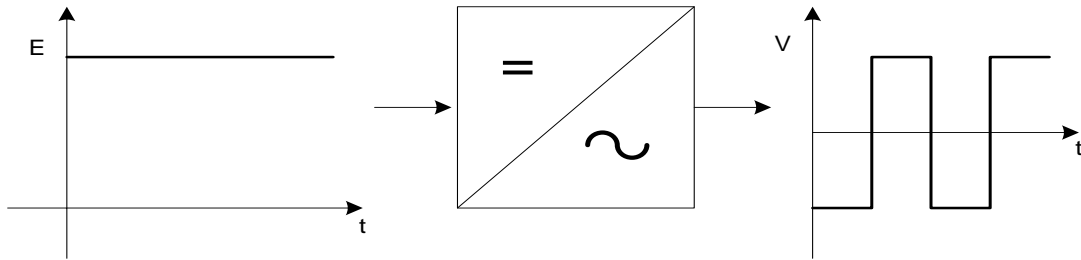


Figure (I.2): Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC).

L'utilisation directe d'une paire d'interrupteurs de base qui consiste à régler la fréquence et la durée des interconnexions de la source avec la sortie. Il est donc plutôt temporel et débouche sur les techniques de modulation de largeur d'impulsion. Contrôler l'amplitude soit de façon continue en créant une source réglable (ce qui suppose l'existence d'un autre étage de conversion), soit de façon discrète en disposant d'un nombre suffisant de sources. [7]

Quand  $S_1 - S_4$  sont fermés (On) et  $S_2-S_3$  sont ouverts (Off) pour  $0 < t < T/2$  on obtient une alternance positif  $U(t)=V_{DC}$  comme la montre la Figure (I.3).

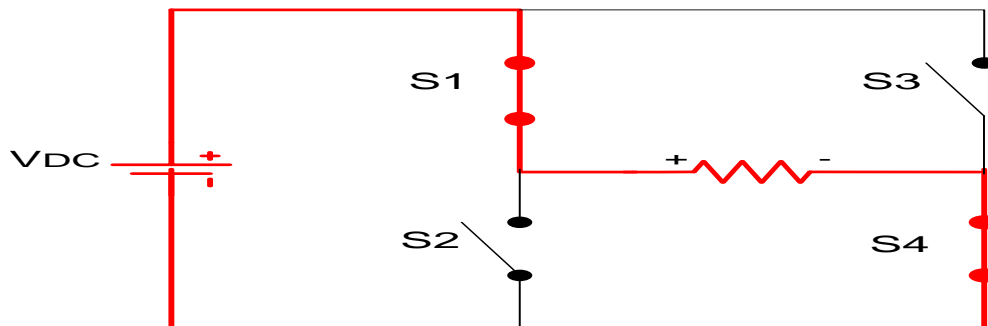


Figure (I.3): Fonctionnement de l'onduleur dans le 1er demi-cycle

Quand  $S_1 - S_4$  sont ouvert (Off) et  $S_2-S_3$  sont fermés (On) pour  $T/2 < t < T$  on obtient une alternance négative  $U(t) = -V_{DC}$  comme la montre la Figure(I.4).

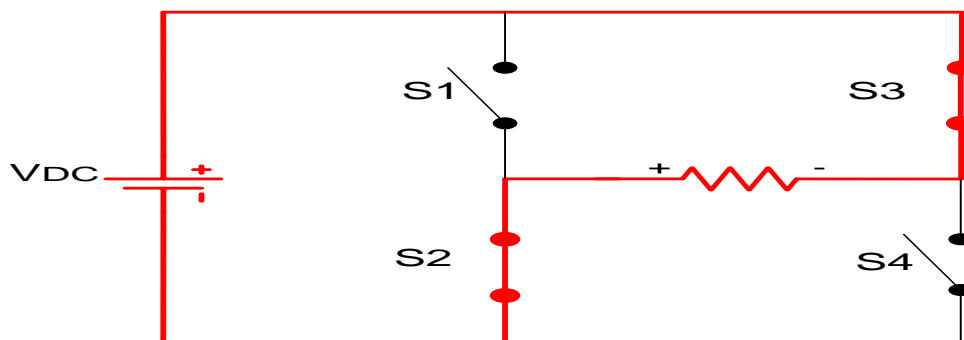


Figure (I.4): Fonctionnement de l'onduleur dans le 2ème demis cycle

Le signal résultant sur la période complète est présenté sur la Figure (I.5).

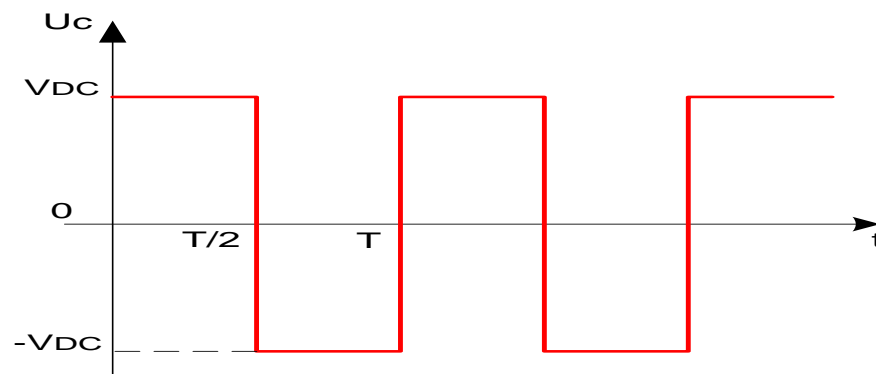


Figure (I.5): Signal complet de l'onduleur

#### I.4. Classification des onduleurs :

Il existe plusieurs schémas d'onduleurs, chacun correspondant à un type d'application déterminé ou permettant des performances recherchées. Les onduleurs sont en général classés selon les modes de commutation de leurs interrupteurs.

##### I.4.1. Onduleur autonome :

Qui délivre une tension avec une fréquence soit fixe, soit ajustable par l'utilisateur. Il n'a pas besoin de réseau électrique pour fonctionner. ; Par exemple un convertisseur de voyage que l'on branche sur la prise allume-cigare d'une voiture utilise le 12 V continu du véhicule pour générer du 120 ou 230 V, alternatif en 50 ou 60 Hz. Ces onduleurs sont notamment employés pour la réception de la TV en mode nomade (récepteur satellite dans un camping-car par exemple) dépourvu d'entrée alimentation électrique basse tension ( $\sim 12$  V). [8]

##### I.4.2. Onduleur non autonome (assisté) :

Dans ce cas, les composants utilisés peuvent être de simples thyristors commandés uniquement à la fermeture et la commutation est dite «naturelle » contrairement à l'onduleur autonome, c'est un redresseur fonctionnant en mode onduleur.

L'application principale de ce type d'onduleur se trouve dans les variateurs pour moteurs synchrones de très forte puissance où les thyristors sont souvent les seuls composants utilisables [9], [10].

#### I.5. Onduleur triphasé :

On peut réaliser un onduleur triphasé en regroupant, en parallèle, trois onduleurs monophasés et commander les interrupteurs de chacun pour obtenir à la sortie trois phases décalées de  $120^\circ$ . En fait, en regroupant trois demi ponts monophasés, on obtient un onduleur en pont triphasé à six interrupteurs représenté par la figure (I.6) dont les interrupteurs du même bras de l'onduleur doivent être complémentaires [11], c'est-à-dire dans chaque instant l'un fermé et l'autre ouvert afin d'éviter tout court-circuit au niveau de la source de tension.

La fermeture/ouverture des interrupteurs est réalisée par les signaux de commande (commutation) S1, S2, et S3.

Ces interrupteurs peuvent être réalisés, suivant la puissance à contrôler, avec des transistors MOSFET ou bipolaires, des IGBT ou des GTO associés à une diode en antiparallèle pour obtenir la réversibilité en courant [10]. Les onduleurs monophasés sont utilisés pour des applications de faible puissance, alors que les onduleurs triphasés couvrent la gamme des moyennes et des fortes puissances. L'objectif de cette topologie est de fournir une source de tension triphasée, dont l'amplitude, la phase et la fréquence sont contrôlables. [12]

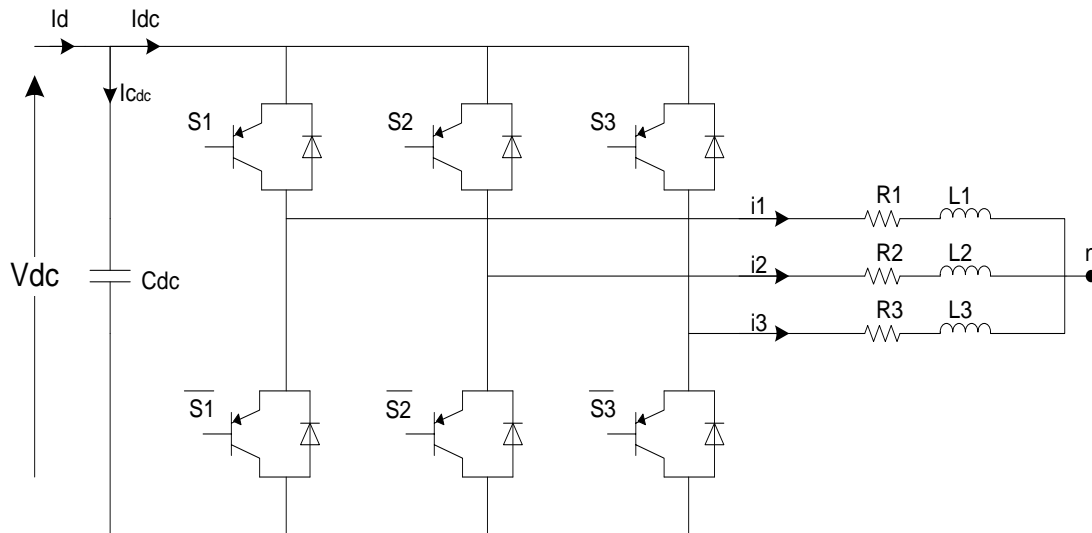
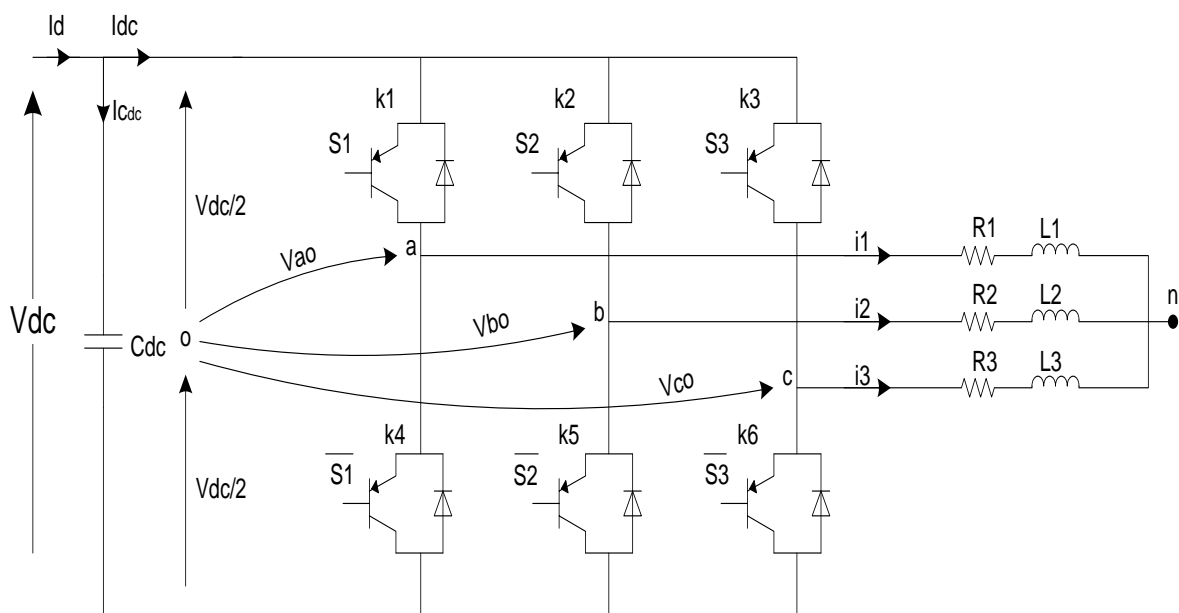


Figure (I.6): Onduleur de tension triphasé

**I.6. Modélisation de l'onduleur triphasé :**

Pour simplifier l'étude du convertisseur on utilise le fonctionnement de convertisseur comme onduleur et on utilise un point fictif (o) pour réaliser le diviseur de tension de la source continu comme la montre la figure suivant:



Les grandeurs de sortie Van, Vbn et Vcn sont des tensions simples.

Si S1=1 alors k1 fermé (k1 ON) :

$$V_{ao} = \frac{V_{dc}}{2} S1 \quad (I.1)$$

$\bar{S}1=1$  alors k4 fermé (k1 OFF):

$$V_{ao} = -\frac{V_{dc}}{2} \bar{S}1 \quad (I.2)$$

$$V_{ao} = V_{ao,OFF} + V_{ao,ON} = \frac{V_{dc}}{2} S1 + \left(-\frac{V_{dc}}{2} \bar{S}1\right) \quad (I.3)$$

On a  $\bar{S}1 = (1-S1)$  donc :

$$\begin{cases} V_{ao} = \frac{V_{dc}}{2} (2S1 - 1) \\ V_{bo} = \frac{V_{dc}}{2} (2S2 - 1) \\ V_{co} = \frac{V_{dc}}{2} (2S3 - 1) \end{cases} \quad (I.4)$$

Lorsque le système triphasé généré par l'onduleur est un système équilibré Van+Vbn+Vcn=0,

Les tensions composées sont données par :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{an} - V_{bn} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bn} - V_{cn} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{cn} - V_{an} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad (I.5)$$

Les tensions simples seront exprimées en fonction des tensions Vao, Vbo et Vco par:

$$\begin{pmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{pmatrix} \quad (I.6)$$

En remplaçant l'équation (I.4) dans l'équation (I.6), nous trouvons les tensions simples seront exprimées en fonction des états des interrupteurs par :

$$\begin{pmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{pmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S1 \\ S2 \\ S3 \end{pmatrix} \quad (I.7)$$

Le courant à l'entrée de l'onduleur Idc est donné par :

$$I_{dc} = [S1 \quad S2 \quad S3] \begin{bmatrix} i1 \\ i2 \\ i3 \end{bmatrix} \quad (I.8)$$

### I.7. Choix des semi-conducteurs :

Les semi-conducteurs sont des matériaux solides utilisés pour la fabrication des composants électroniques. Le matériau semi-conducteur le plus utilisé est le silicium (Si). Autres matériaux semi-conducteurs: germanium (Ge), arséniure de gallium (AsGa), phosphure d'indium (InP)... Ils sont caractérisés par leur résistivité qui peut varier de  $10^{-4} \text{ m}\Omega$  à  $10^2 \text{ m}\Omega$  en fonction de la température ( $\rho$  diminue lorsque T augmente): ils se situent donc entre les conducteurs et les isolants, [13].

Les semi-conducteurs ont été découverts au XIXème siècle mais leurs applications pratiques ont commencé en 1947 avec la découverte du transistor qui a remplacé les tubes à vide, encombrants, peu fiables et grands consommateurs d'énergie, [13].

Composant à semi-conducteurs : diodes à jonction, transistors bipolaires, transistors à effet de champ (JFET et MOSFET), composants de puissance (thyristors, GTO, triacs, IGBT...), circuits intégrés.

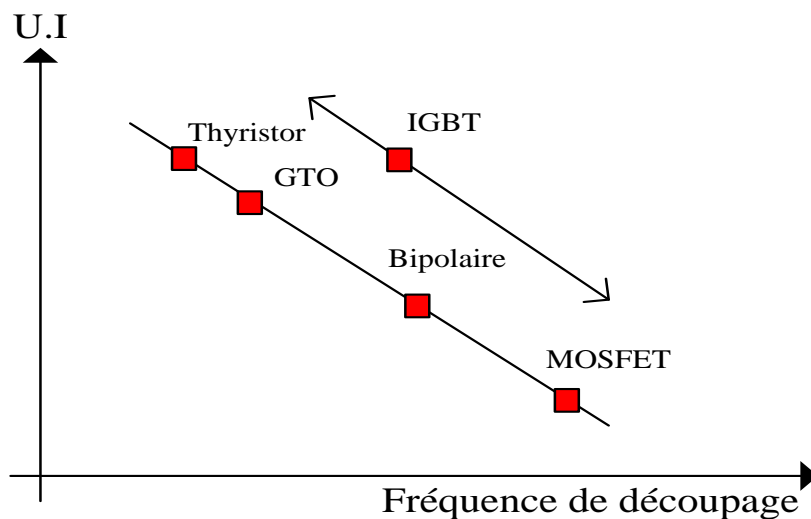


Figure (I.7) : Classification des composants de puissance en fonction de la fréquence de découpage des composants.

### I.8. Les applications des onduleurs :

Parmi les nombreux domaines d'emploi des onduleurs autonomes, on trouve principalement les onduleurs à fréquence fixe à commutation forcée : Alimentés le plus souvent par une batterie d'accumulateur, ils jouent d'ordinaire le rôle d'alimentation de sécurité [9], [10].

Les onduleurs à fréquence variable à commutation forcés : 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.8.1. Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone :**

La vitesse d'un moteur synchrone est fixée par la pulsation des courants statiques. Pour changer de vitesse il faut donc changer la fréquence des tensions d'alimentation. Il faut donc redresser la tension du réseau puis l'onduleur à la fréquence désirée.[14]

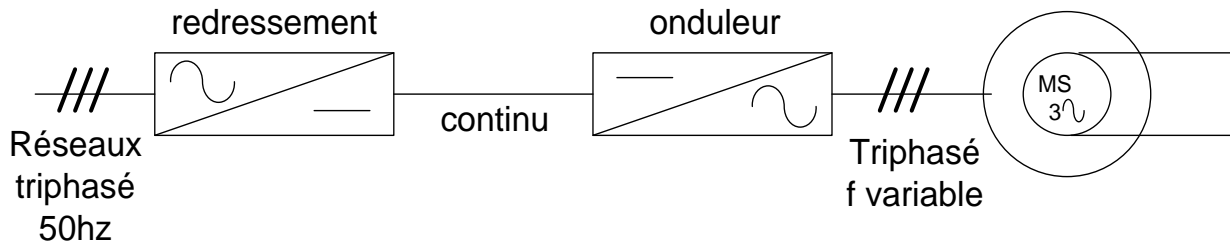


Figure (I.8): Principe de réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone.

**I.8.2. 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 [15].

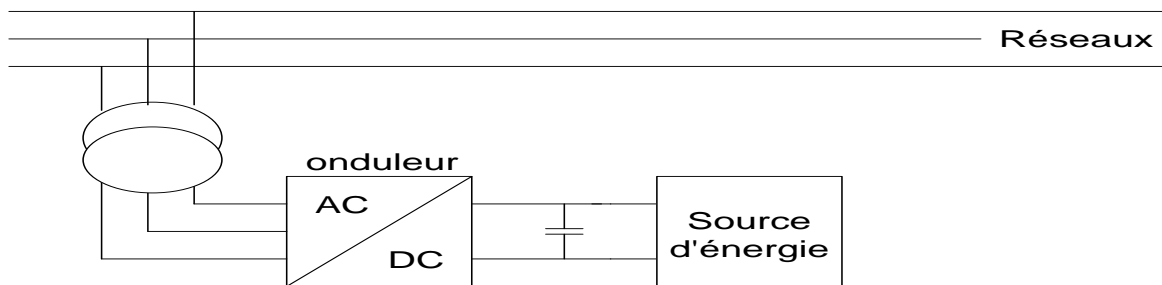


Figure (I.9): Alimentation de secours.

**I.8.3. Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes :**

Le transfert de puissance électrique entre différents pays est rendu possible grâce à l'utilisation de redresseurs et d'onduleurs. En effet plusieurs connexions entre réseaux existent à travers le monde, par exemple, 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.[14]

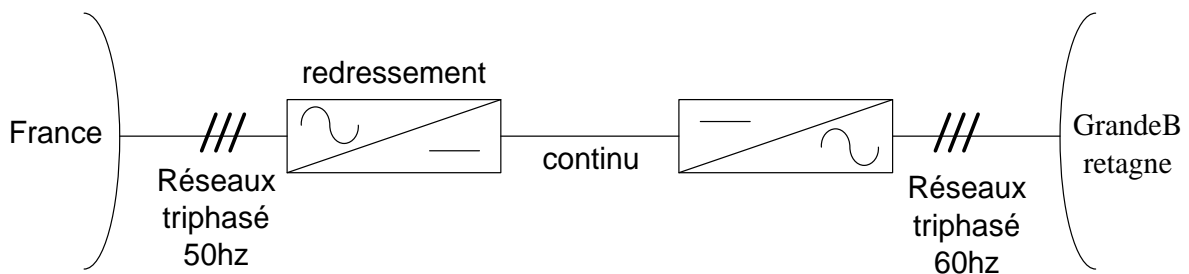


Figure (I.10): Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes.

**I.9. Les onduleurs multi-niveaux :**

Un convertisseur statique est dit « multi niveaux » lorsqu'il génère une tension découpée de sortie composée d'au moins trois niveaux. Les onduleurs à trois niveaux sont réversibles. Ils peuvent fonctionner en onduleur pour transférer l'énergie de la source de tension continue DC à la source de courant alternatif AC ou bien fonctionner en redresseur et assurer alors le transfert énergétique dans le sens inverse.[4]

Plus le nombre de niveaux de la tension générée par le convertisseur est grand, plus faible sera son taux de distorsion harmonique THD. Dans toutes les topologies de convertisseurs multi niveaux existant, plus ce nombre de niveaux est élevé, plus compliquée devient la structure du convertisseur. [16]

Ce type de convertisseur présente plusieurs avantages : permet de limiter les contraintes en tension subies par les interrupteurs de puissance, Il peut générer des tensions très proche de la sinusoïde avec une fréquence de commutation égale à celle de la fondamentale, Il est bien adapté aux moteurs de moyennes et de grandes puissances, la bonne qualité de l'alimentation,

Les pertes de commutation faibles et leurs capacités en haute tension, ainsi que la diminution de contenu harmonique dans la tension et courant de sortie.

Toutefois, ces convertisseurs présentent des inconvénients. Entre autres, on peut citer : le nombre élevé de composants électriques, la complexité de la commande et la nécessité d'équilibrer les tensions aux bornes des condensateurs du bus barre continu.

**I.10. Principe de fonctionnement de l'onduleur multi-niveaux :**

Ce paragraphe a pour but d'introduire le principe général du comportement multi-niveaux. La figure (I.11) aide à comprendre comment travaillent les convertisseurs multi-niveaux. Un convertisseur à deux niveaux est représenté à la figure (I.11.a), dans laquelle les commutateurs semi-conducteurs ont été remplacés par un interrupteur idéal. [17]

La tension de sortie ne peut prendre que deux valeurs: 0 ou  $V_{dc1}$ . Sur la figure (I.11.b), la tension de sortie de trois niveaux peut prendre trois valeurs: 0,  $V_{dc1}$  ou  $V_{dc1} + V_{dc2}$ .

Dans la figure (I.11.c) le cas général de (m) niveaux est présenté.

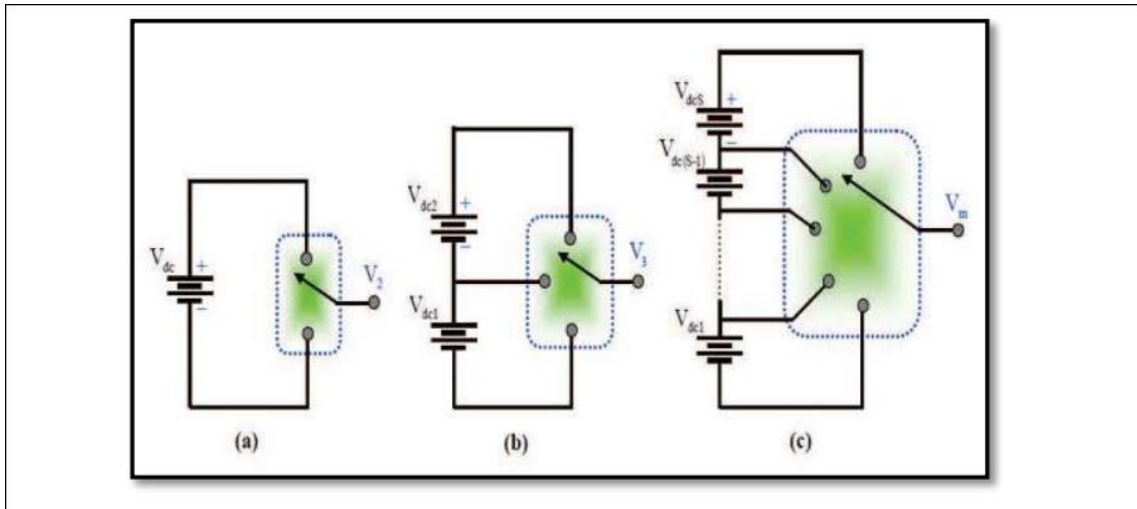


Figure (I.11) : Onduleur à niveaux multiples à deux (a), à trois (b) et à m niveaux (c)

### I.11. Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux :

Deux catégories d'onduleurs multi niveaux sont actuellement répertoriées. La première catégorie regroupe les onduleurs principaux en trois groupes :

- 1) les onduleurs à diodes de bouclage (en anglais clamping diodes appelé diode clamp) Neutral Point Clamped (NPC) et Multiple Point Clamped (MPC)
- 2) l'onduleur à condensateur flotteur [ou Flying Capacitor (FC)]
- 3) l'onduleur à pont en cascade H-bridge.

La deuxième catégorie des onduleurs multi niveaux comporte les assemblages hybrides des onduleurs de la première catégorie. Ainsi, on peut citer entre autres [18]:

- 1) NPC en cascade (CDC),
- 2) H-bridge en cascades (CMH),
- 3) NPC et H-bridge en cascade (CDCH)

Dans cette étude, nous nous intéresserons uniquement au premier groupe.

La figure (I.12) représente les topologies des onduleurs multi-niveaux les plus récentes

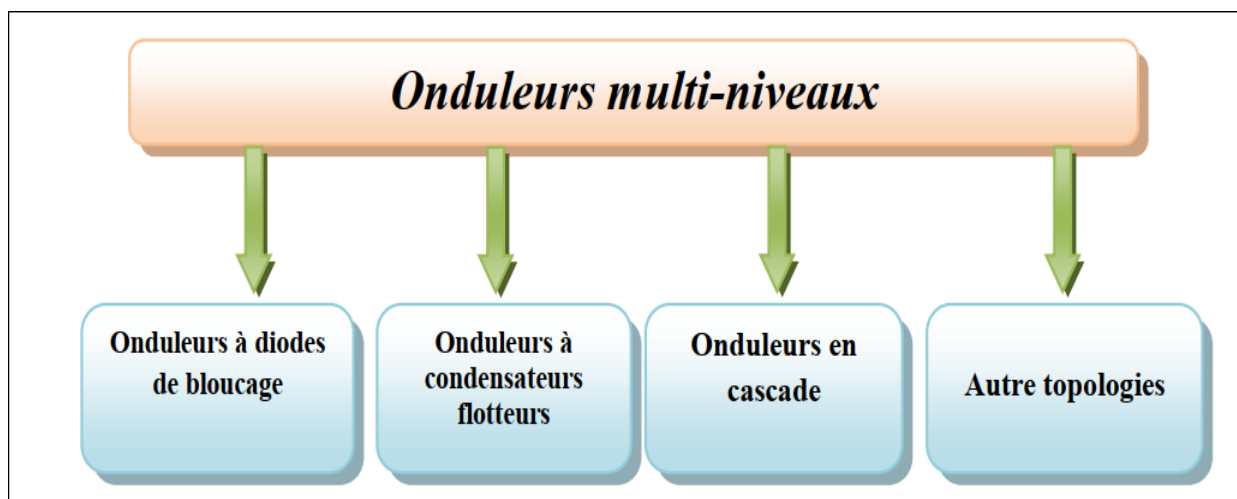


Figure (I.12) : Différentes topologies des convertisseurs multi-niveaux

**I.11.1. La topologie a diode de bouclage (structure NPC) :**

Cette topologie a été présentée la première fois par Nabae et Akagi (1981). Elle avait pour but d'ajouter un niveau de tension intermédiaire à la tension de sortie d'un onduleur afin de réduire les harmoniques. Figure (I.13) montre un convertisseur NPC trois niveaux ainsi que un convertisseur cinq niveaux. [19]

Nous commençons sur l'onduleur de tension de type NPC, on peut étendre l'étude à des niveaux supérieurs. Selon le nombre de niveaux, on distingue deux cas:

- Si le nombre de niveaux est impair, le point neutre existe au milieu des condensateurs. Alors, la topologie NPC s'applique encore.
- Si le nombre de niveaux est paire, le point neutre n'existe plus vu le nombre impaire des condensateurs.

La topologie qui s'applique dans ce cas, est celle à diodes de bouclage.

Pour un onduleur à  $N$  niveaux, le nombre d'éléments constituant sa topologie, notamment le nombre de sources secondaires de tension continue  $S$ , les interrupteurs  $K$  et les diodes de bouclage  $D$  sont régis par les relations suivantes:

$$S = N - 1$$

$$K = 2(N - 1)$$

$$D = 2(N - 2)$$

La tendance vers l'augmentation du nombre de niveaux est dictée par le besoin de tensions plus élevées pour les applications de forte puissance. Dans cette étude on se limite à l'analyse des onduleurs multi-niveaux de type NPC. Donc seul le nombre de niveaux impair est considéré. [4]

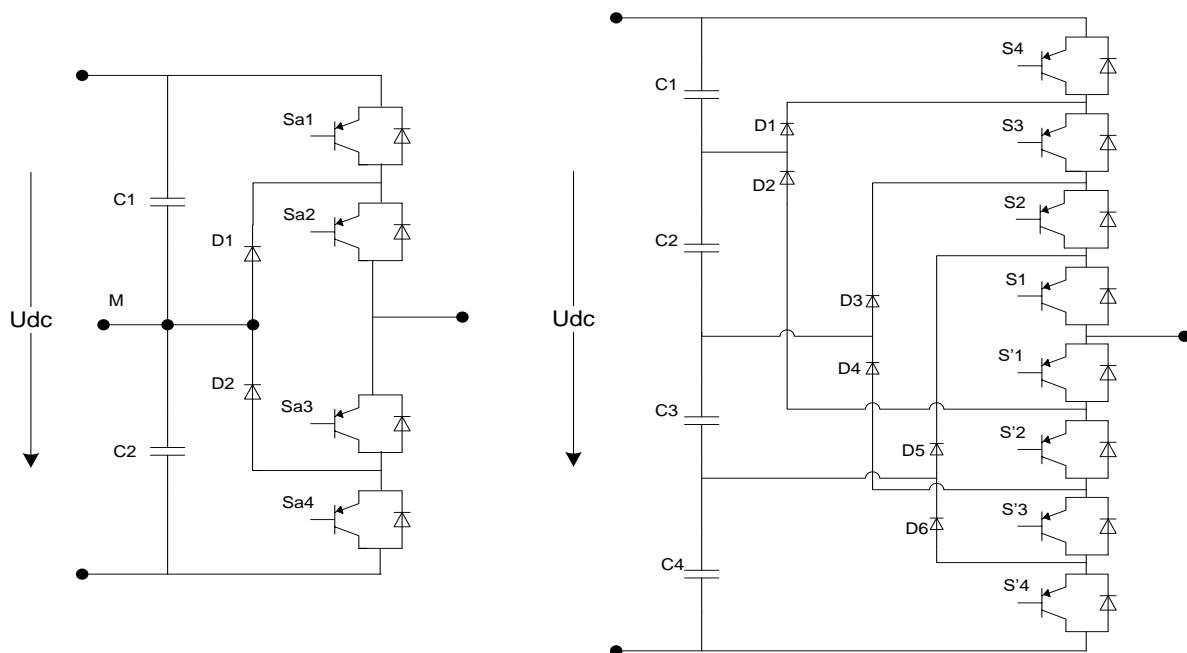


Figure (I.13) : Topologies d'onduleurs NPC

Cette topologie présente plusieurs avantages dans quelques un sont énumérés ci-dessous [20]:

- Les composants de puissance à semi conducteur bloquent une tension inverse égale seulement à la moitié de la tension de la source.
- La forme de l'onde de trois niveaux résultants à une meilleure qualité spectrale par rapport à celle d'un onduleur triphasé classique, ce qui rend les filtres passifs peu volumineux.
- Elle est configurable de façon à obtenir un nombre élevé de niveaux, permettant de réduire la tension bloquée par chaque interrupteur ; celle-ci est donnée par  $E/(N-1)$ .
- Cette topologie exige des diodes de bouclage à vitesse de commutation élevée doivent être capable de supporter le courant de la pleine charge.

Cependant, en utilisant cette topologie, l'expérience pratique a révélé plusieurs limitations, parmi lesquelles [20].

- Lorsque le nombre de niveaux est supérieure a trois, l'équilibrage des tensions aux bornes des condensateurs dévient très complexe, care il est intimement lié au facteur de puissance de la charge.
- Pour plus de trois niveaux, les diodes de blocage (clamping diodes) sont soumises à des tensions directes élevées, donc, une mise en série des diodes est nécessaire ; ce qui complique la conception et pose des problèmes de fiabilité et le coût du montage.
- L'inégalité de commutations entre interrupteurs situés à l'extérieure de la structure par rapport aux autres.

Sa1	Sa2	Sa3	Sa4	Vs
0	0	1	1	0
0	1	1	0	E/2
1	1	0	0	E

Tableau (I.1) : Table de commutation du convertisseur NPC 3 niveaux

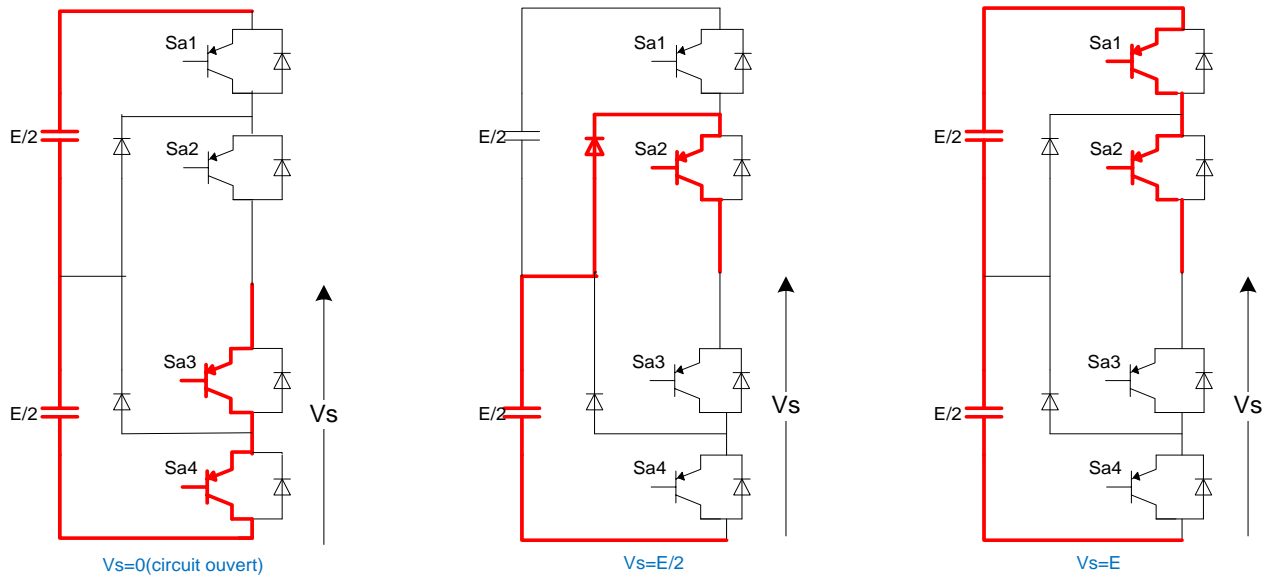


Figure (I.14) : Tensions produites par le convertisseur NPC 3 niveaux

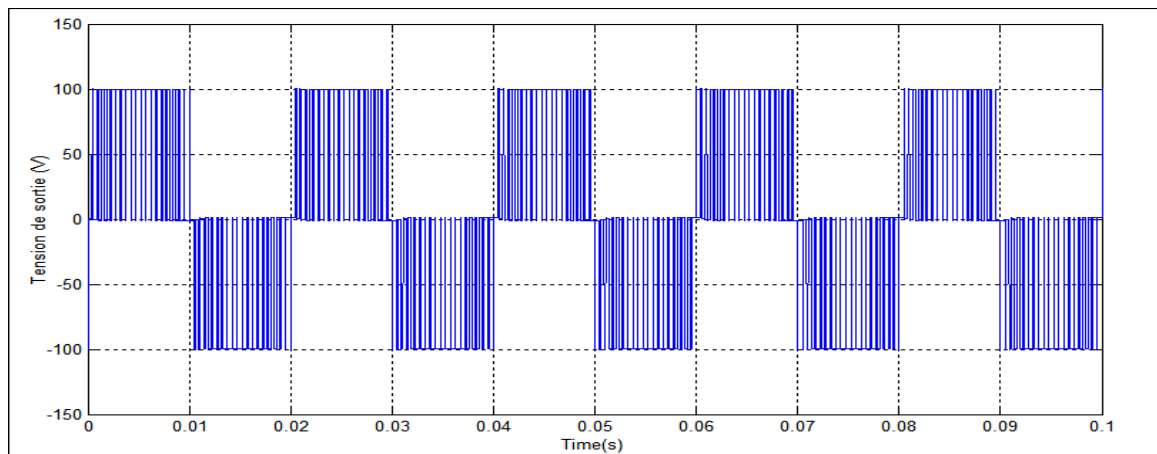


Figure (I.15) : Tension de sortie d'un convertisseur 3 niveau

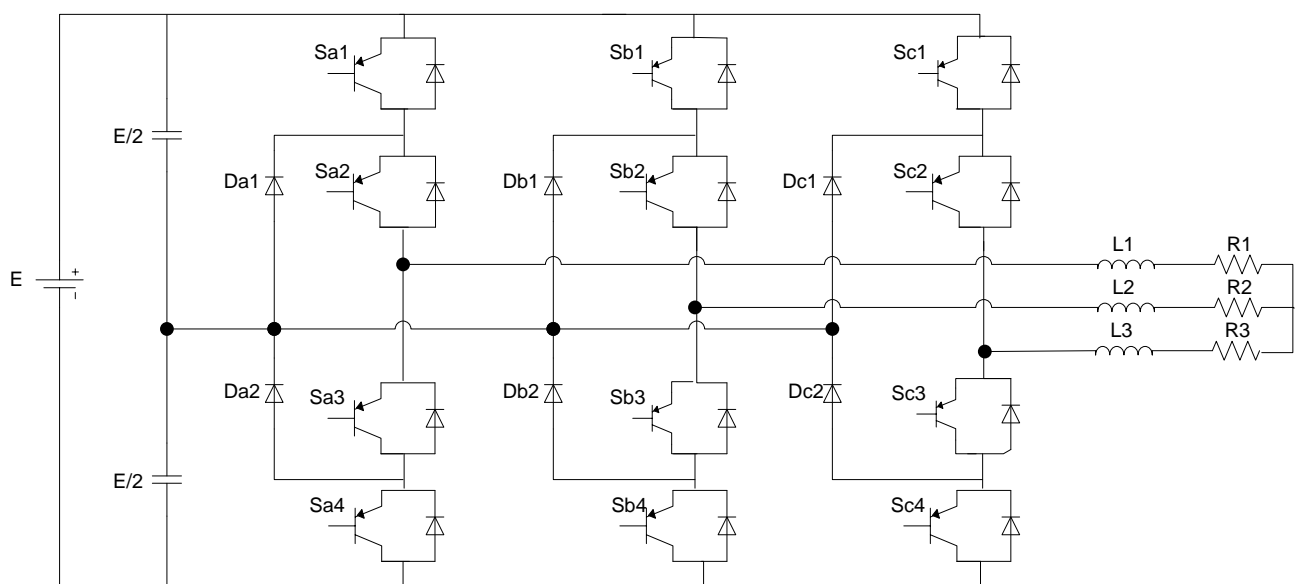


Figure (I.16) : Convertisseur NPC triphasé 3 niveau

### I.11.2. La topologie au condensateur flotteur :

Cette architecture a été introduite par Meynard et Foch (1992). Dans cette topologie les deux diodes de calage du convertisseur NPC ont été remplacées par une capacité, d'où le nom de convertisseur à capacités flottantes. Les combinaisons de fonctionnement sont les mêmes que pour la topologie NPC. [21]

Chaque bras d'un convertisseur monophasé 5 niveaux contient 4 interrupteurs, 4 diodes et une capacité. Pour un convertisseur à capacité flottantes de  $n$  niveaux, chaque bras doit contenir  $(2n-2)$  interrupteurs et  $(n-2)$  capacités. Cette topologie élimine quelques inconvénients de la NPC comme l'équilibre des tensions supportées par les interrupteurs.

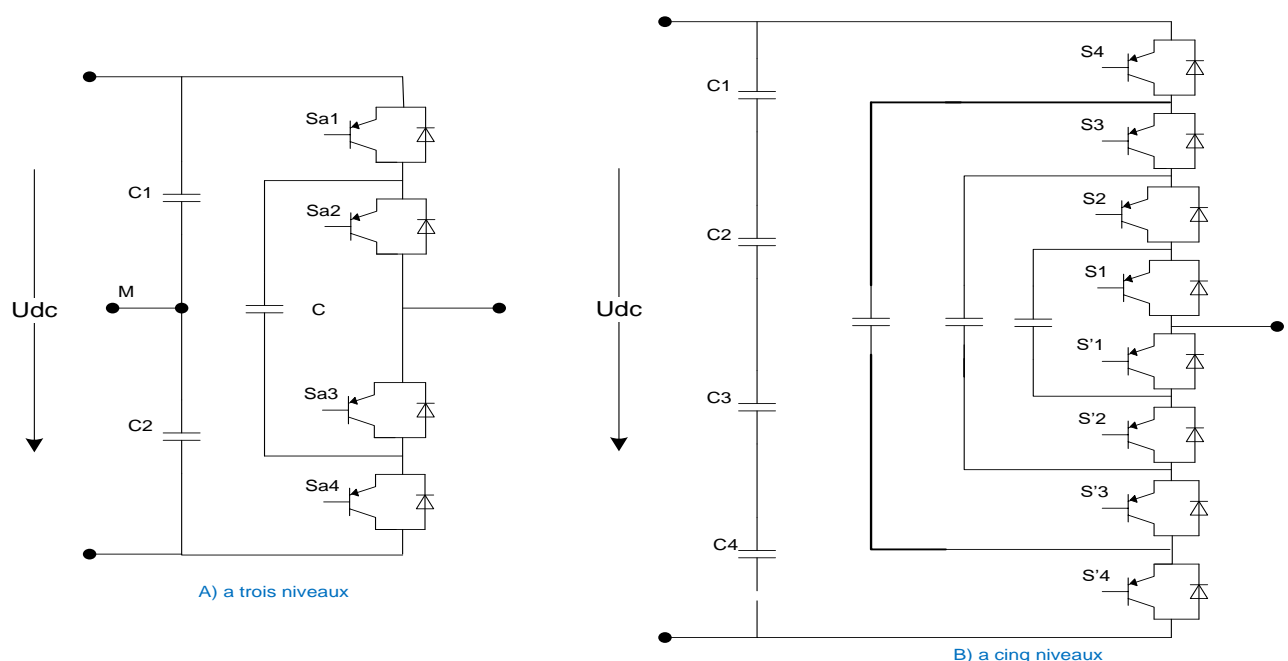
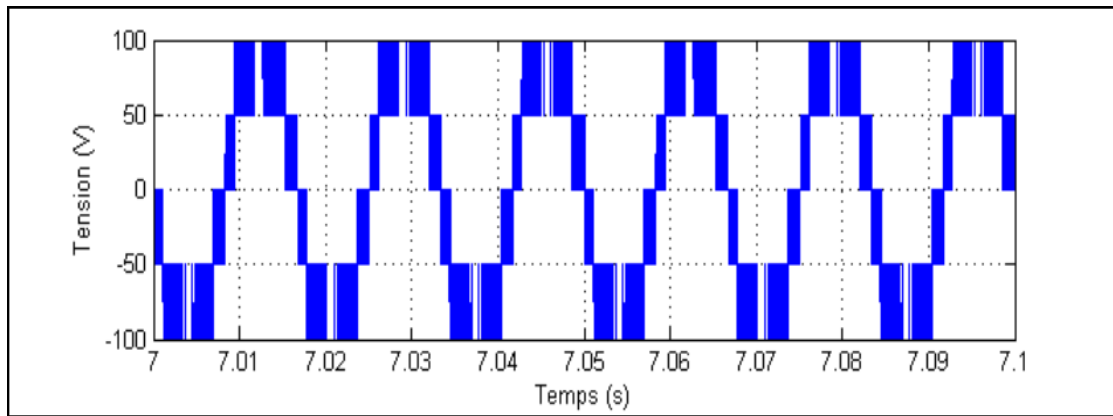


Figure (I.17) : Onduleur à condensateurs flotteurs

Elle est considérée comme l'alternative la plus sérieuse à la topologie NPC et qu'elle présente plusieurs avantages, notamment [22] :

- ✓ La tension de blocage des interrupteurs est partout la même.
- ✓ Cette topologie élimine le problème des diodes de bouclages présent dans les topologies des onduleurs NPC.
- ✓ Le concept peut être facilement appliqué à d'autres types de convertisseurs (continu-continu, continu-alternatif, alternatif-alternatif), aussi bien pour un transfert unidirectionnel de la puissance que bidirectionnelle.
- ✓ Sa modularité permet une extension et une adaptation aisée des stratégies de commande un nombre élevé de niveaux.
- ✓ Les condensateurs n'étant jamais mis en série entre deux niveaux différents, le problème du déséquilibre de leur tension n'existe plus.



Figure(I.18) : Formes des signaux obtenus avec un convertisseur à capacités flottantes 5 niveaux

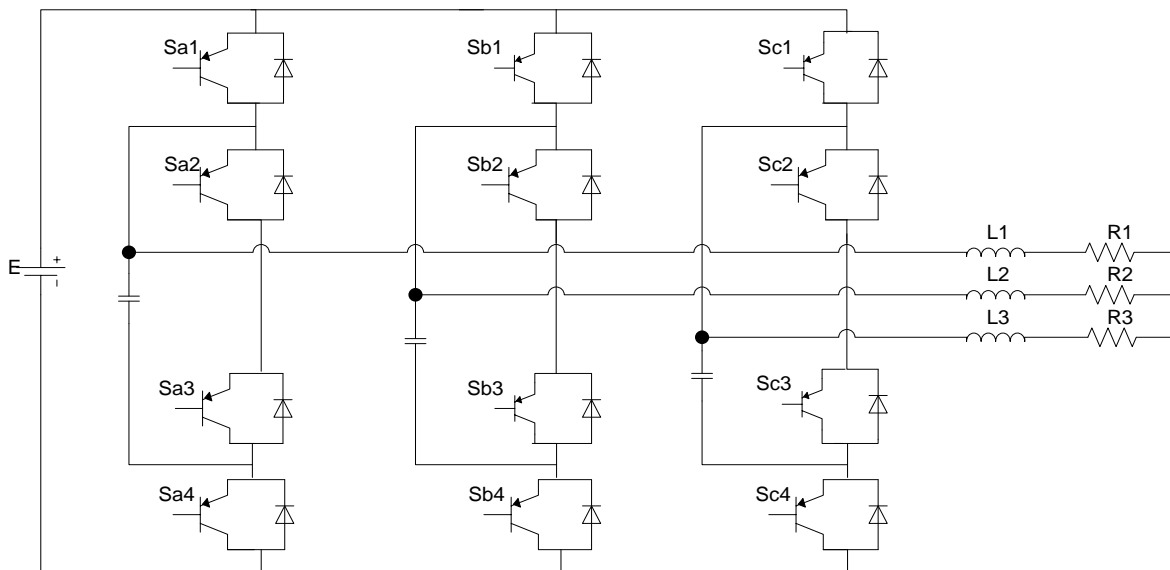


Figure (I.19) : Convertisseur triphasé 3 niveaux à capacités flottantes

Le principal désavantage de cette topologie réside dans le nombre requis de condensateurs, ce qui peut représenter un volume prohibitif et le contrôle de la charge du condensateur ajoute la complexité au contrôle du circuit entier [20].

### I.11.3. La topologie en cascade:

Cette topologie Consiste à mettre en cascade plusieurs onduleurs en pont H monophasés de trois niveaux. Chaque pont est alimenté par une source de tension continue distincte. Ce qui fait que pour n onduleurs en cascade, la tension de sortie peut être constituée de  $(2n+1)$  niveaux.

En comparaison avec les deux topologies précédentes, nous remarquons que nous pouvons obtenir le même nombre de niveaux avec le même nombre d'interrupteurs et sans diodes de calage ni de capacités flottantes. Néanmoins, pour chaque paire de niveaux additionnelle il faut une source de tension supplémentaire, ce qui représente un inconvénient majeur pour cette topologie. [23], [24]

Cette topologie présente plusieurs avantages, parmi lesquels [20].

- ✓ La modularité de sa structure permet facilement son extension à un nombre élevé de cellules sur chaque phase, sans complexité supplémentaire.
- ✓ L'équilibrage naturel des tensions est réalisé, si bien que la commande des interrupteurs en devient aisée.
- ✓ Les interrupteurs supportent la même tension de blocage.
- ✓ Il devient possible d'alimenter une charge en haute ou moyenne tension à partir d'une ou plusieurs alimentations basse tension (par exemple piles à combustible, batteries, cellules photovoltaïques, centrales éoliennes...)

Sa1	Sa2	Sa3	Sa4	Vs
0	1	1	0	-E
0	1	0	1	0
1	0	0	1	E

Tableau (I.2) : Tableau de commutations du convertisseur en pont H

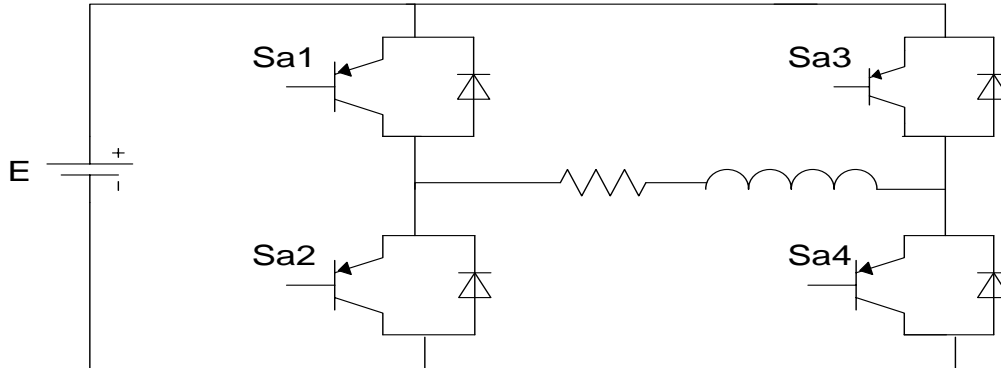


Figure (I.20) : Convertisseur en H 3 niveaux

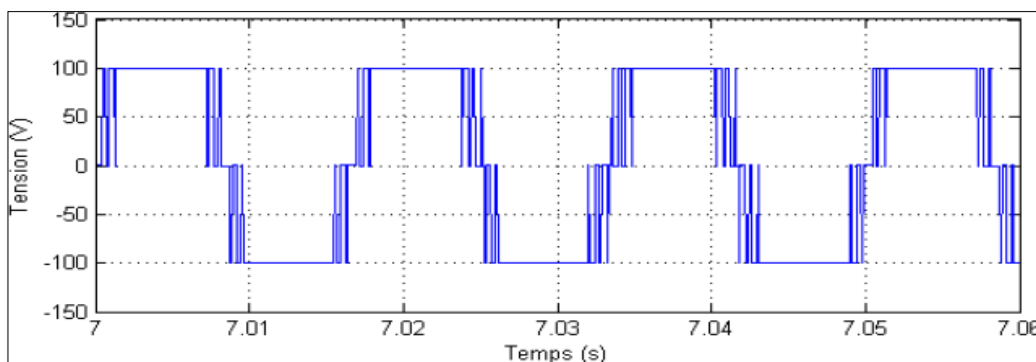


Figure (I.21) : Formes des signaux obtenus avec un convertisseur pont H 3 niveaux

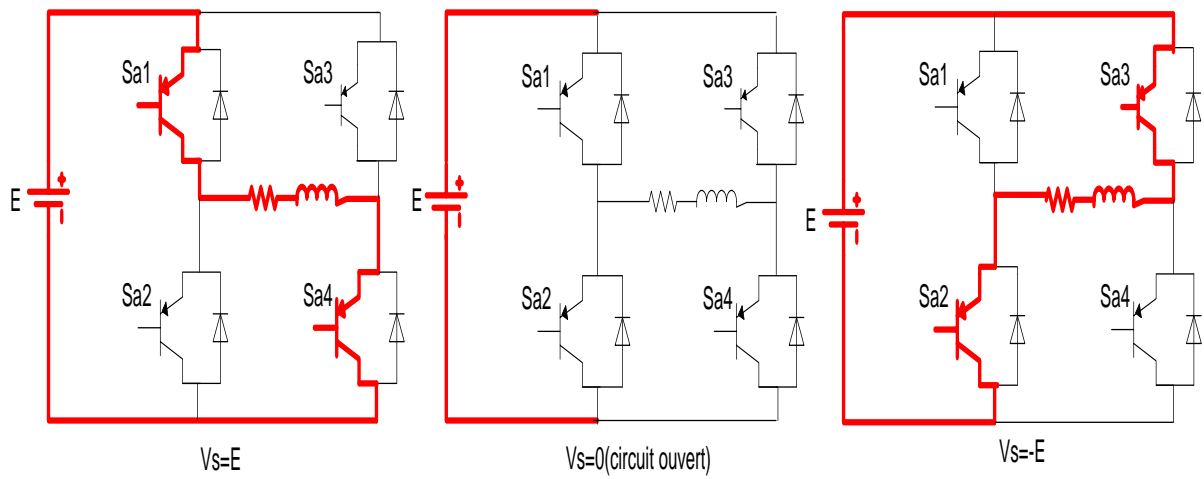


Figure (I.22) : Séquences de fonctionnement du convertisseur en H

Sa1	Sa2	Sa3	Sa4	Vs
0	1	0	1	-2E
0	1	0	0	-E
0	0	0	0	0
1	0	0	0	E
1	0	1	0	2E

Tableau(I.3) : Tableau de commutation du Convertisseur en pont H en cascade

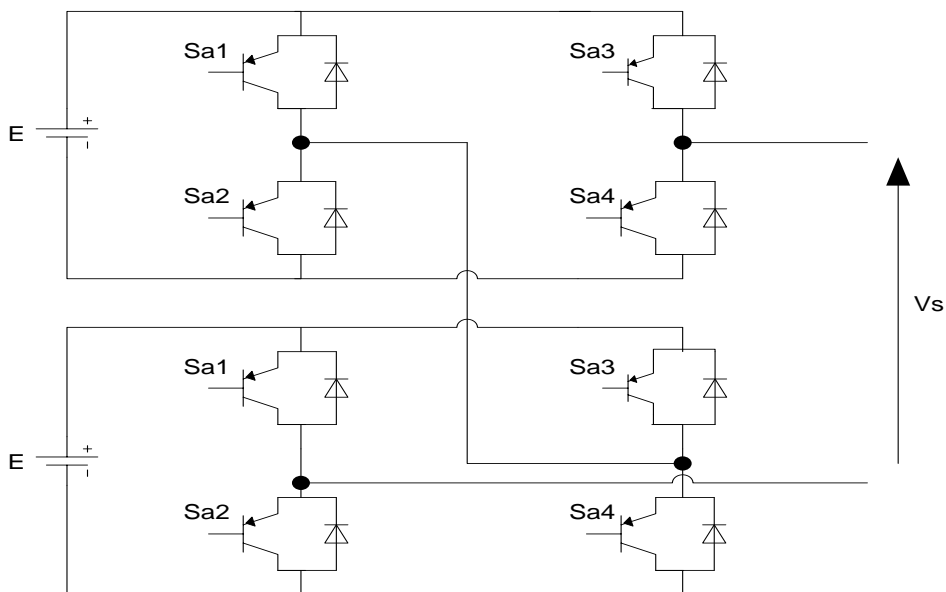


Figure (I.23) : Onduleur en pont H en cascade 5 niveaux

**I.12. Propriétés des principales structures :****I.12.1. Classification des topologies selon leur alimentation:**

Les topologies telles que les onduleurs NPC et les onduleurs à cellules imbriquées divisent leur tension d'alimentation, la tension de sortie est plus petite ou égale à la tension continue d'entrée. Elles sont capables de fonctionner à partir d'une alimentation continue unique.

Au contraire, les structures telles que les onduleurs en cascade élèvent leur tension d'alimentation, la tension maximale est plus grande que chacune des tensions d'alimentation ; elle est plus petite ou égale à la somme des tensions d'alimentation.

**I.12.2. Nombres de composants nécessaires:**

Du point de vue du nombre de composants, les onduleurs à cellules cascadiées paraissent être la solution multi niveaux la plus avantageuse, surtout lorsque le nombre de niveaux devient important. C'est effectivement le cas pour les applications monophasées telles que le filtrage actif ou la compensation statique, lorsque le convertisseur n'a pas besoin de fournir d'énergie au système. Pour les applications triphasées et pour un petit nombre de niveaux, les onduleurs NPC sont intéressants, car les condensateurs sont partagés par les différentes branches, ce qui permet un équilibrage de la puissance circulant entre les phases. Cet équilibrage permet une réduction notable de la taille des condensateurs intermédiaires, [25]

**I.13. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté la structure d'un onduleur, son principe de fonctionnement, Classification des onduleurs et les différents types d'onduleur de tension triphasée, également présenté dans cette étude les onduleurs multi niveaux qui présente notre intérêt dans cette étude. Les différentes structures de base de ce dernier.

Dans le prochain chapitre, nous abordons la modélisation et la commande de l'onduleur de tension multi niveaux type PUC cinq et sept niveaux par la Modulation de largeur d'impulsion.

## *CHAPITRE 2 :*

*Modélisation d'onduleurs Multi niveaux type  
"PUC"*

## II.1. Introduction :

Le convertisseur à cellules en U empilées PUC (Packed U Cells) est un convertisseur multi niveaux conçu en 2008 par Ounejjar et Al-Haddad (2008 et 2010) [26-27]. Il est constitué par des cellules dont chacune est composée de deux interrupteurs (avec leurs diodes en antiparallèle) ainsi que d'un condensateur (Figure II.1). En considérant  $n$  cellules, un convertisseur sera constitué de  $2n$  interrupteurs et de  $n-1$  condensateurs, ce convertisseur donnera  $2^n - 1$  niveaux (car les deux interrupteurs d'une même cellule doivent être complémentaires ce qui donnera  $2^n$  combinaisons et car le niveau 0 sera toujours répété 2 fois ce qui permettra d'avoir  $2^n - 1$  niveaux différents). Ainsi, un convertisseur de 5 ou 7 niveaux est constitué de 6 interrupteurs et de deux condensateurs (Figure II. 2). [1]

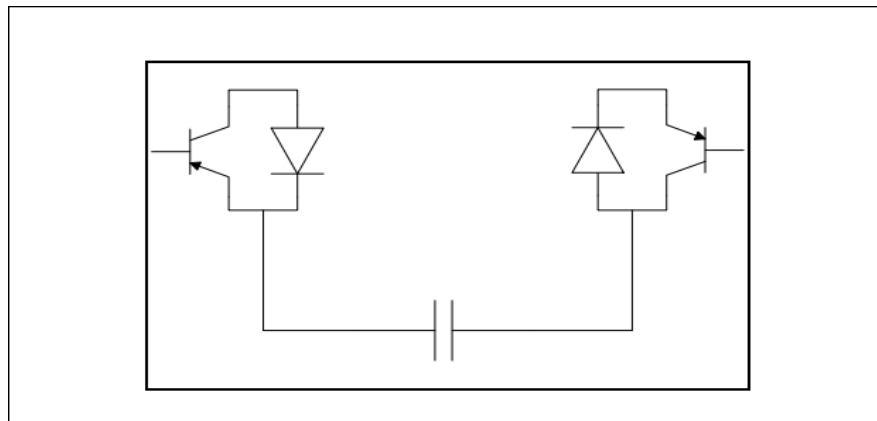


Figure (II.1) : Cellule d'un convertisseur PUC

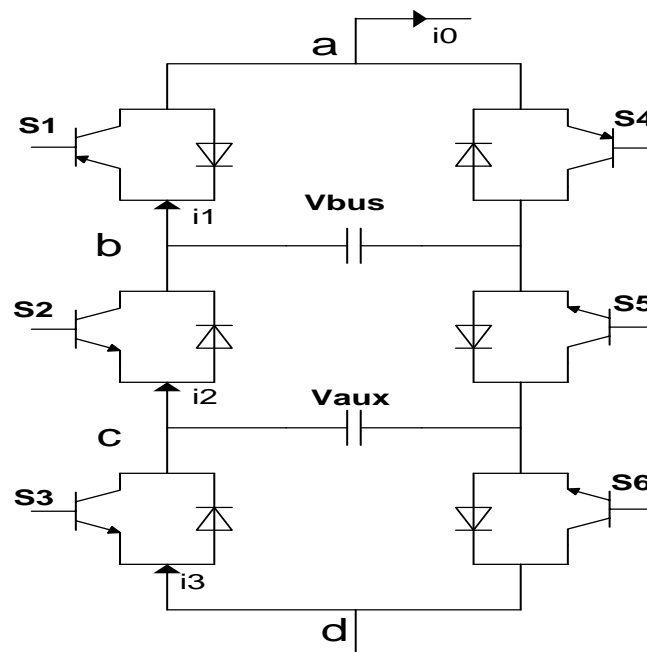


Figure (II. 2) : convertisseur multi-niveaux type PUC

Etat	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	V <sub>ad</sub>
1	0	0	0	0
2	0	0	1	-V <sub>aux</sub>
3	0	1	0	V <sub>aux</sub> -V <sub>bus</sub>
4	0	1	1	-V <sub>bus</sub>
5	1	0	0	V <sub>bus</sub>
6	1	0	1	V <sub>bus</sub> -V <sub>aux</sub>
7	1	1	0	V <sub>aux</sub>
8	1	1	1	0

Tableau (II.1) : Tableau de commutation d'onduleur PUC

## II.2. Modélisation d'onduleur PUC :

Les fonctions de commutation de l'onduleur PUC illustrées à la figure (II.2) sont définies comme suit:

$$S_i = \begin{cases} 0 & \text{si } S_i \text{ et fermé} \\ 1 & \text{si } S_i \text{ et ouvert} \end{cases} \quad i=1,2,3 \quad (\text{II.1})$$

La tension de sortie de l'onduleur peut être formulée comme suit:

$$V_{ad} = V_{ab} + V_{bc} + V_{cd} \quad (\text{II.2})$$

Lorsque les points a, b, c et d sont illustrés dans la figure ci-dessus et que chaque tension peut être calculé en fonction de la fonction de commutation:

$$\begin{aligned} V_{ab} &= (S_1 - 1)V_1 \\ V_{bc} &= (1 - S_2)(V_1 - V_2) \\ V_{cd} &= (1 - S_3)V_2 \end{aligned} \quad (\text{II.3})$$

En remplaçant (II.3) par (II.2):

$$\begin{aligned} V_{ad} &= (S_1 - 1)V_1 + (1 - S_2)(V_1 - V_2) + (1 - S_3)V_2 \\ &= (S_1 - S_2)V_1 + (S_2 - S_3)V_2 \end{aligned} \quad (\text{II.4})$$

Similaire aux relations de tension, puisqu'un des commutateurs dans chaque paire de S<sub>1</sub> et S<sub>4</sub>, S<sub>2</sub> et S<sub>5</sub> et S<sub>3</sub> et S<sub>6</sub> sont activés, les courants des commutateurs peuvent être affichés en fonction du courant de charge et fonction de commutation:

$$\begin{aligned} i_1 &= S_1 i_0 \\ i_2 &= S_2 i_0 \\ i_3 &= S_3 i_0 \end{aligned} \quad (\text{II.5})$$

Où:

$$i_3 = i_c + i_2 \tag{II.6}$$

$$i_c = (S_3 - S_2) i_0$$

$$\frac{dV_2}{dt} = \frac{(S_3 - S_2)}{C} i_0 \tag{II.8}$$

De même, pour la tension et le courant de charge, la loi de tension de Kirchoff est écrite comme suit:

$$V_0 = V_{ad} - r i_0 - L \frac{di_0}{dt} \tag{II.9}$$

En substituant équation (II.4) à (II.9), la relation suivante pour le courant de sortie serait:

$$\frac{di_0}{dt} = (S_1 - S_2) \frac{V_1}{L} + (S_2 - S_3) \frac{V_2}{L} - \frac{r}{L} i_0 \tag{II.10}$$

### II.3. Onduleur PUC monophasé 5 et 7 niveaux :

#### II.3.1. Onduleur PUC monophasé 5 niveaux :

Le convertisseur PUC comporte deux sources de tension continue  $V_{bus}$  et  $V_{aux}$ . La charge est connectée aux bornes des points a et d. pour avoir un onduleur de 5 niveaux il faut la tension aux bornes de la source  $V_{aux}$  doit être égale au demi de la tension  $V_{bus}$ . Si on suppose que la tension de la source  $V_{bus1}$  est égale à 300 V et que la tension aux bornes de la source  $V_{aux1}$  est égale à 150 V alors les différentes séquences de fonctionnement donneront les tensions suivantes aux bornes de la charge : [300V, 150V, 0, -150V, -300V] figure (II.3) [1]

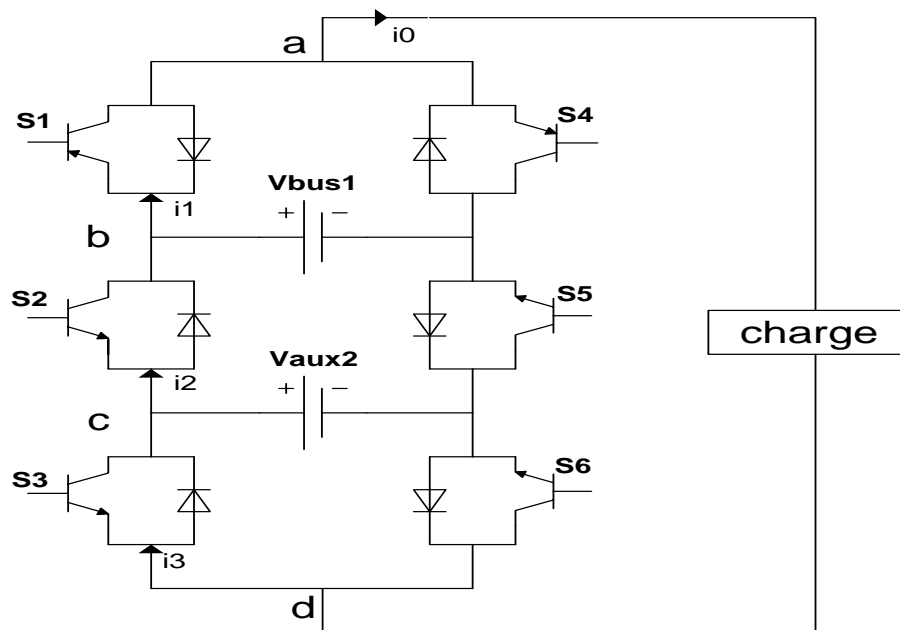


Figure (II.3) : Schéma d'onduleur PUC 5 niveaux

Etat	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	V <sub>ad</sub>	V <sub>ad</sub> (avec V <sub>aux1</sub> =1/2V <sub>bus1</sub> )
0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	-V <sub>aux</sub>	-1/2V <sub>bus</sub>
1	0	1	0	V <sub>aux</sub> -V <sub>bus</sub>	-1/2V <sub>bus</sub>
2	0	1	1	-V <sub>bus</sub>	-V <sub>bus</sub>
-2	1	0	0	V <sub>bus</sub>	V <sub>bus</sub>
-1	1	0	1	V <sub>bus</sub> -V <sub>aux</sub>	1/2V <sub>bus</sub>
-1	1	1	0	V <sub>aux</sub>	1/2V <sub>bus</sub>
0	1	1	1	0	0

Tableau (II.2) : Tableau de commutation du convertisseur PUC 5 niveaux

**II.3.1.1. Séquences de fonctionnement d'un bras du convertisseur PUC 5 niveaux:**

Pour utiliser les états de commutation dans la conception appropriée de la technique PWM requise pour l'onduleur PUC5, tous les états de commutation ont été étudiés en remarquant les effets sur la tension du condensateur. La figure (II.4) montre les trajets effectués par les états de commutation indiquée dans le tableau (II.2).

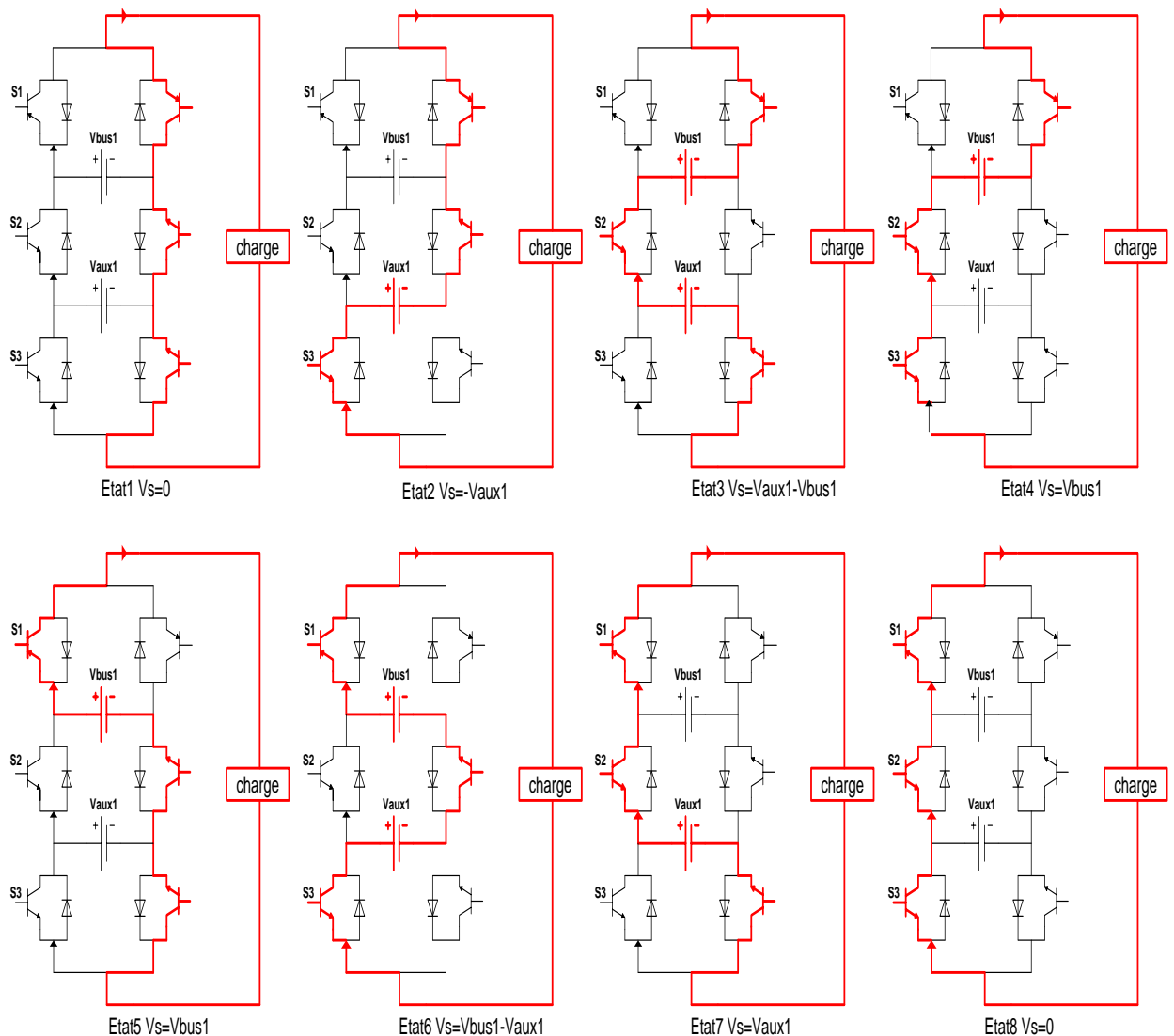


Figure (II.4) : Séquences de fonctionnement d'un bras du convertisseur PUC 5 niveaux

Sur la base de la figure (II.4), il est clair que dans les états où la source de courant continu et le condensateur sont connectés en série avec la charge, le condensateur est chargé (états 6 et 3). En revanche, sur certains chemins que le condensateur alimente la charge seule, il se décharge (états 2 & 7). Finalement, pour le reste des états, la tension du condensateur reste inchangée car il n'est connecté ni à la source de courant continu ni à la charge. Le tableau(II.3) indique les états de charge et de décharge du condensateur.

ETAT	Tension du condensateur
1	Aucun effet
2	décharge
3	chargé
4	Aucun effet
5	chargé
6	Aucun effet
7	décharge
8	Aucun effet

Tableau (II.3) : États de tension du condensateur PUC5

### II.3.1.2. Commande d'un onduleur par modulation de largeur d'impulsion:

La modulation désigne l'ensemble des techniques qui permettent de générer un signal quantifié, image du signal de référence continu. La modulation a pour objectif de générer la représentation la plus proche du signal de référence à partir d'un nombre de niveaux de tensions fixé. Elle ne nécessite pas la connaissance de la topologie du convertisseur qui va appliquer cette représentation à la charge, au contraire de la commande qui applique la représentation obtenue au convertisseur, et ce qui nécessite la connaissance précise de la topologie et de son fonctionnement. Le signal de référence est l'image du signal qu'il faudrait idéalement appliquer au convertisseur. Le signal modulé est l'image du signal le plus proche que le convertisseur est capable d'imposer grâce à sa structure. [28], [25]

#### II.3.1.2.1. Principe de base de Modulation de largeur d'impulsion:

La modulation de largeur d'impulsion consiste à comparer le signal de référence avec un ensemble de porteuses (signal triangulaire ou en dents de scie). Le nombre de porteuses est inférieur d'une unité par rapport au nombre de niveaux souhaités. La comparaison permet de produire un signal modulé qui servira à déterminer les signaux de gâchettes des interrupteurs. En effet chaque niveau du signal modulé correspond à un niveau de tension de sortie et sera obtenu avec un chemin de courant bien précis découlant de l'état des interrupteurs du convertisseur. [1]

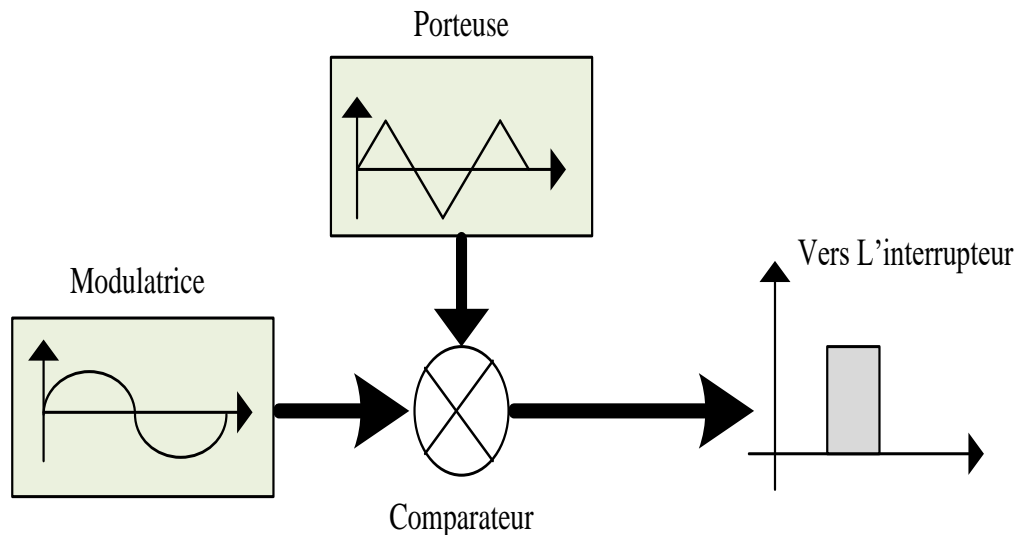


Figure (II.5) Schéma synoptique de la MLI

### II.3.1.2.2. Caractéristiques de la modulation:

La technique de la MLI se caractérise par deux grandeurs :

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

$$M_R = \frac{V_m}{V_p}$$

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

$$M_I = \frac{f_p}{f_m}$$

Avec:

$V_m$  : Amplitude de la modulant.

$V_p$  : Amplitude de la porteuse.

$f_p$  : La fréquence de la porteuse.

$f_m$  : La fréquence de la modulant.

La modulation montre que plus «  $M_I$  » est grand et plus la neutralisation des harmoniques est efficace, d'autre part on cherche à obtenir une valeur de  $M_R$  la plus élevée possible.

Pour le choix de «  $M_I$  », on doit tenir compte des pertes supplémentaires pendant les commutations d'un état à l'autre. Ces pertes croissent lorsque la fréquence de modulation augmente.

**II.3.1.3. La commande utilisée :**

L'onduleur est commandé en boucle ouverte. Les ordres de commande des composants de puissance sont donnés par une stratégie de modulation de largeur d'impulsion.

La commande consiste à comparer une signal de référence  $V_{ref}$  avec quatre signale de porteuse d'amplitude unitaire repartis entre -2 et 2, pour créer un décalage dans les signaux triangulaires de la MLI. La figure suivante (II.6) montre le fonctionnement de cette commande.

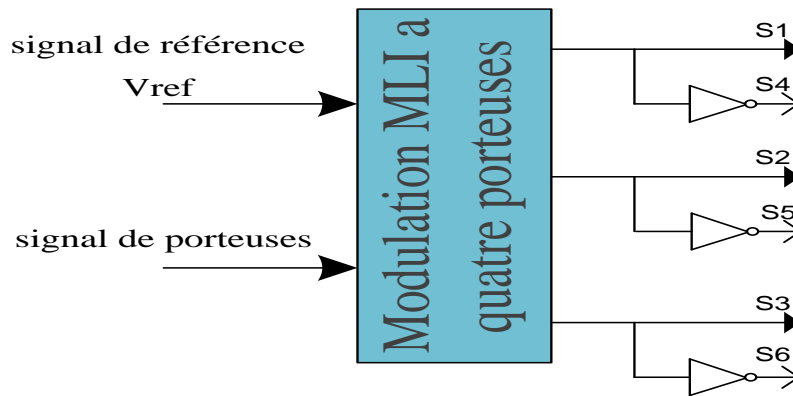


Figure (II.6) : Commande MLI onduleur monophasé 5 niveaux

**II.3.1.4. Résultats de la simulation :**

Le circuit de puissance est composé des éléments suivants : une source de tension continue  $V_{bus}$  de 300V, une source de tension continue  $V_{aux}$  de 150V (soit 1/2 de  $V_{bus}$ ), les 6 interrupteurs (IGBT avec des diodes en antiparallèle) et enfin une charge composée d'une résistance et d'une inductance ( $R = 40 \text{ Ohm}$ ,  $L = 20\text{mH}$ ).

La tension $V_{bus1}$	300V
La tension $V_{aux1}$	150V
Résistance de la charge	40ohm
Inductance de la charge	20mH
Fréquence de commutation	10Khz

Tableau (II.4) : Paramètres de simulation de l'onduleur monophasé PUC 5 niveaux

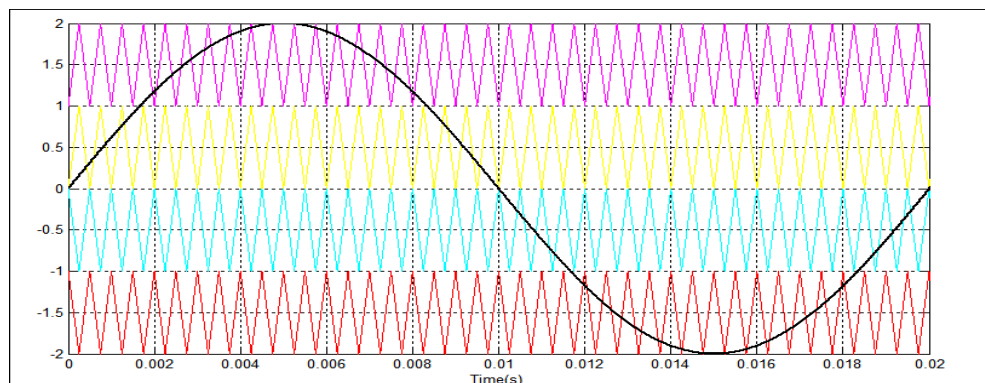


Figure (II.7) : comparaison entre Le signal de référence et les quatre porteuses

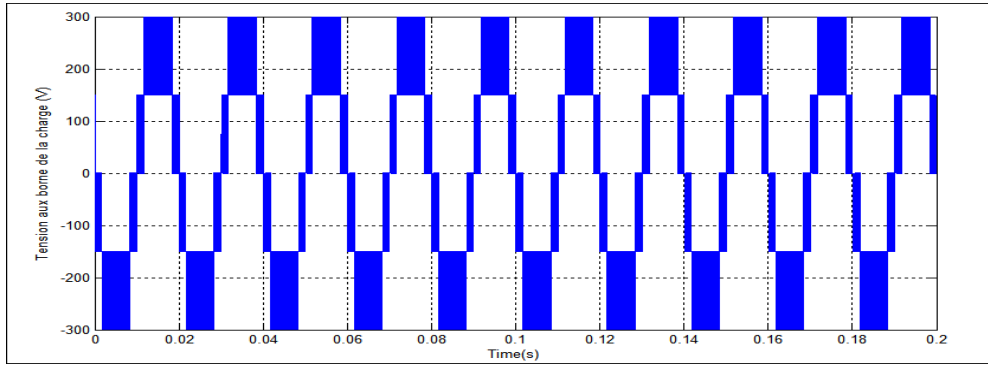


Figure (II.8) : Formes de la tension aux bornes de la charge

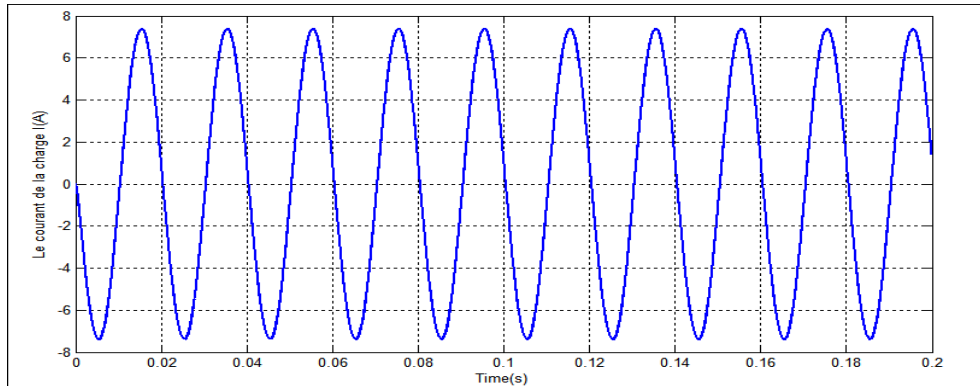


Figure (II.9) : Formes du courant aux bornes de la charge

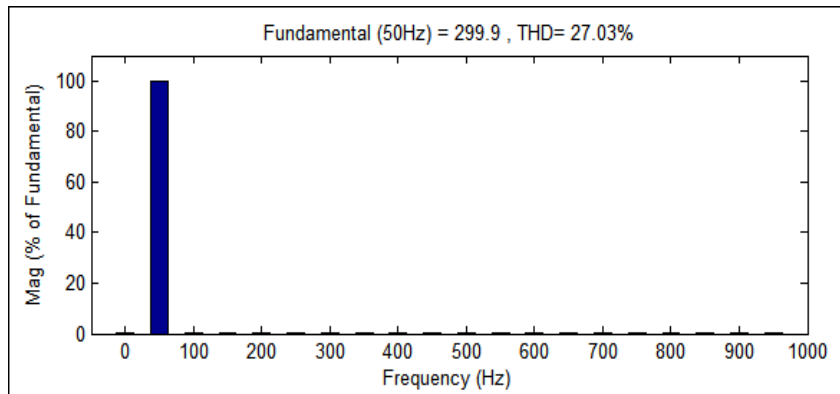


Figure (II.10): Taux de distorsion harmonique de la tension de charge

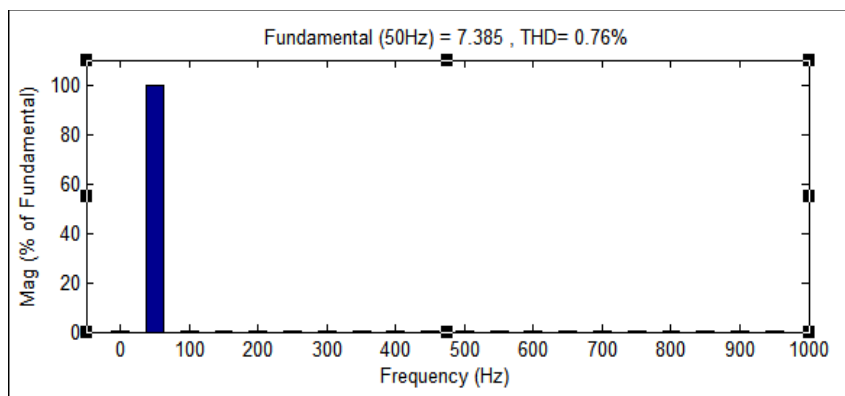


Figure (II.11): Taux de distorsion harmonique du courant de charge

**II.3.2. Onduleur PUC monophasé 7 niveaux:**

Tableau (II.5) présente les différentes combinaisons que peut donner ce convertisseur. Pour avoir 7 niveaux équidistants il faut la tension aux bornes de la source  $V_{aux}$  doit être égale au tiers de la tension aux bornes de la source  $V_{bus}$ .

Si on suppose que la tension d'alimentation  $V_{bus}$  est égale à 300 V et que la tension de la source  $V_{aux}$  est égale à 100 V alors les différentes séquences de fonctionnement donneront les tensions suivantes aux bornes de la charge : [300V, 200V, 100V, 0, -100V, -200V, -300V] figure (II.12).

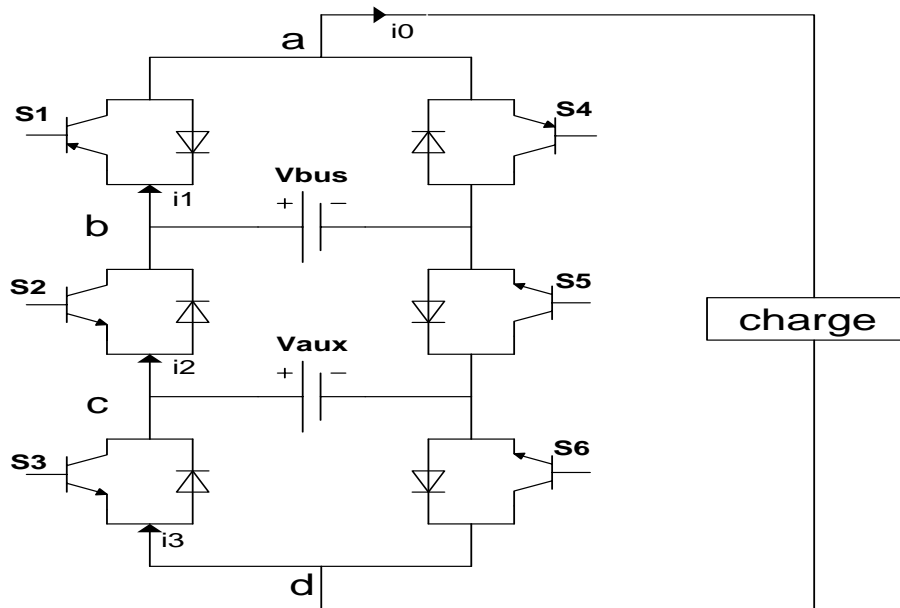


Figure (II.12) : Schéma d'onduleur PUC 7 niveaux

Etat	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	V <sub>ad</sub>	V <sub>ad</sub> (avec V <sub>aux</sub> =1/3V <sub>bus</sub> )
0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	-V <sub>aux</sub>	-1/3V <sub>bus</sub>
2	0	1	0	V <sub>aux</sub> -V <sub>bus</sub>	-2/3V <sub>bus</sub>
3	0	1	1	-V <sub>bus</sub>	-V <sub>bus</sub>
-3	1	0	0	V <sub>bus</sub>	V <sub>bus</sub>
-2	1	0	1	V <sub>bus</sub> -V <sub>aux</sub>	2/3V <sub>bus</sub>
-1	1	1	0	V <sub>aux</sub>	1/3V <sub>bus</sub>
0	1	1	1	0	0

Tableau (II.5) : Tableau de commutation du convertisseur PUC 7 niveaux

II.3.2.1. Séquences de fonctionnement d'un onduleur PUC sept niveaux :

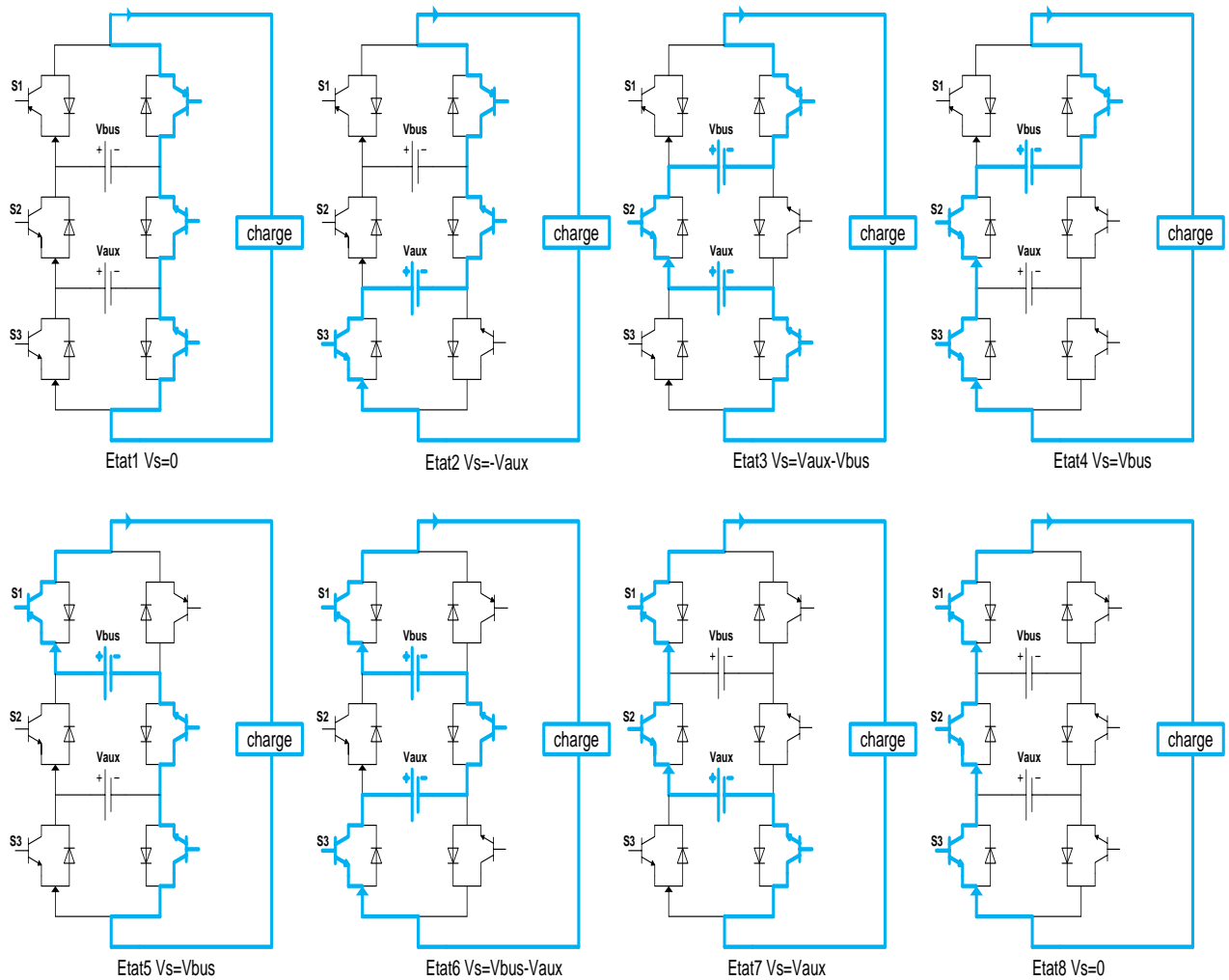


Figure (II.13) : Séquences de fonctionnement d'un bras du convertisseur PUC

II.3.2.2 La commande utilisée:

Nous utiliserons la même commande utilisée dans l'onduleur monophasé de cinq niveaux, mais on utilise six porteuses pour produire 7 niveaux de tension dans la sortie d'onduleur. La figure suivante montre la commande.

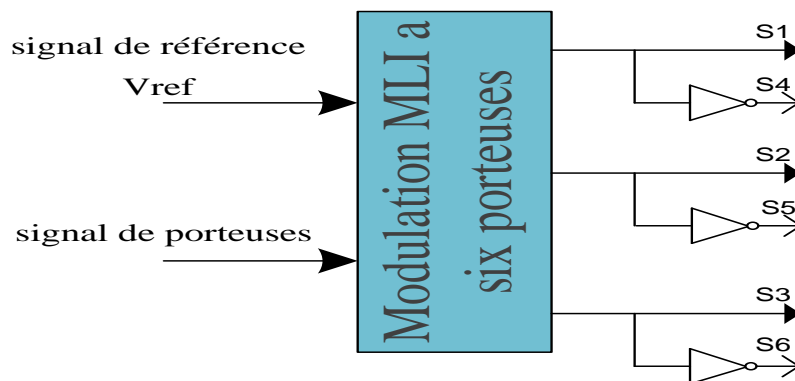


Figure (II.14) : Commande MLI onduleur monophasé 7 niveaux

**II.3.2.3. Résultats de la simulation:**

La tension  $V_{bus}$  égale 300V et la tension  $V_{aux}=100V$ , dans l'onduleur a sept niveaux nous avons utilisé la tension  $V_{aux}$  est un tiers de la tension  $V_{bus}$ , la forme de la tension du charge sont présentés a la figure (II.16) avec Taux de distorsion harmonique égale 16.36%, et le THD du courant égale 0.55%.

La charge composée d'une résistance et d'une inductance ( $R = 40 \text{ Ohm}$ ,  $L = 20\text{mH}$ ).

La tension $V_{bus}$	300V
La tension $V_{aux}$	100V
Résistance de la charge	40ohm
Inductance de la charge	20mH
Fréquence de commutation	10Khz

Tableau (II.6) : Paramètres de simulation de l'onduleur monophasé PUC 7 niveaux.

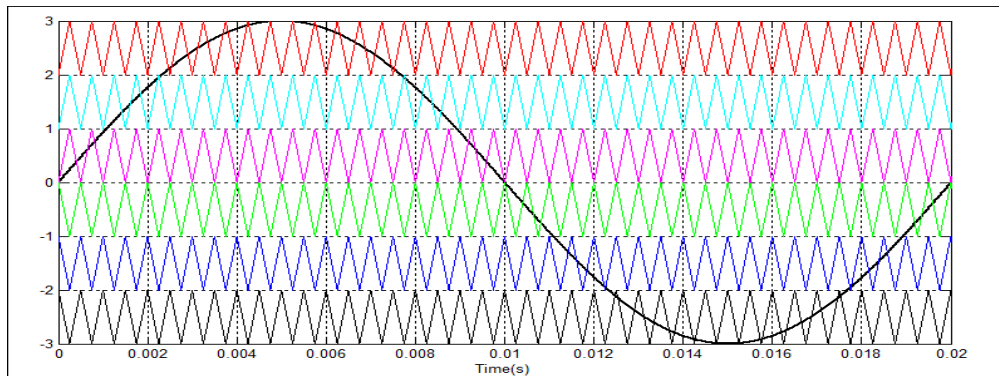


Figure (II.15) : comparaison entre Le signal de référence et les six porteuses

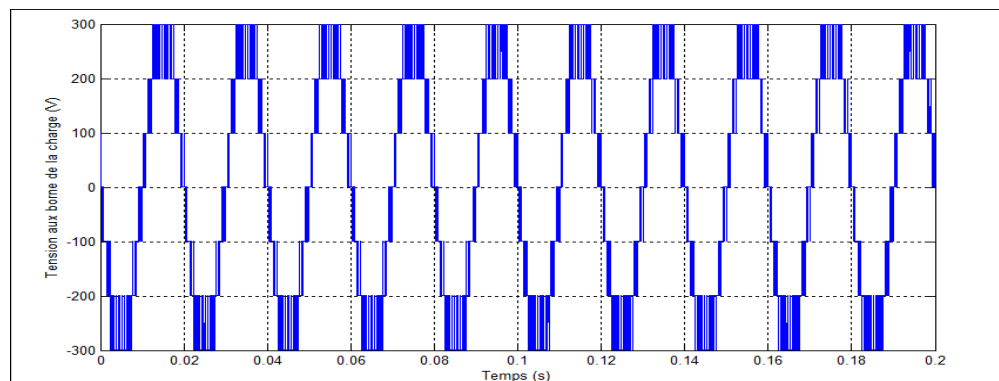


Figure (II.16) : Formes de la tension aux bornes de la charge

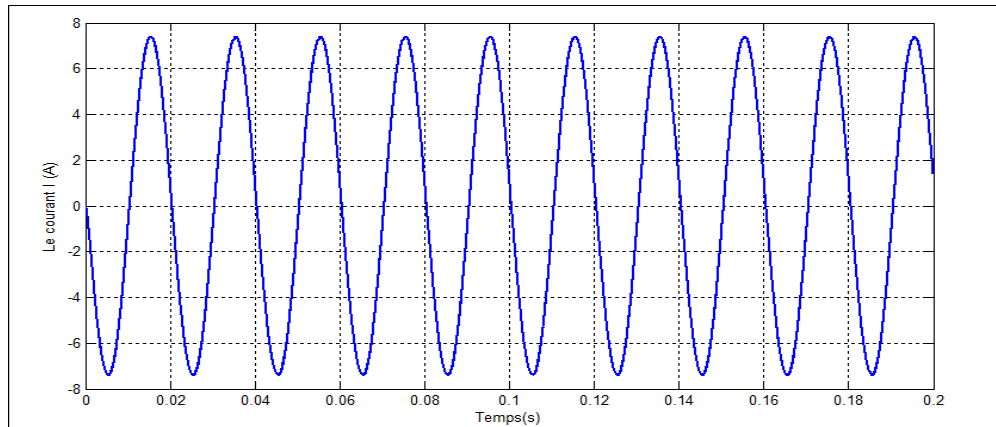


Figure (II.17) : Formes du courant aux bornes de la charge

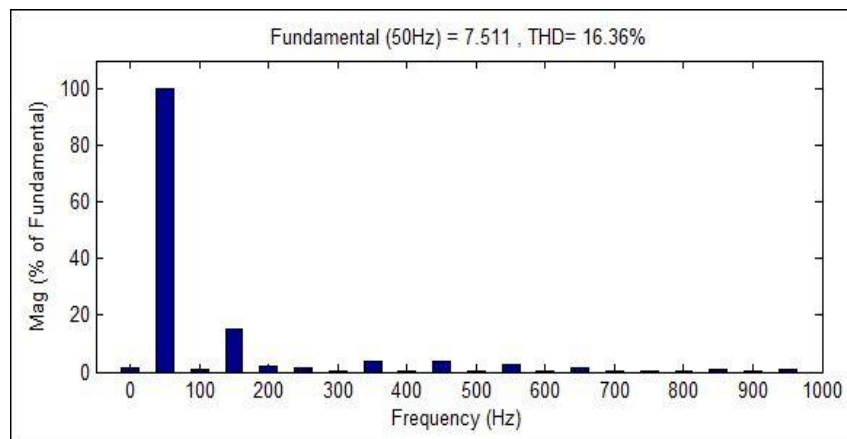


Figure (II.18): Taux de distorsion harmonique de la tension de charge

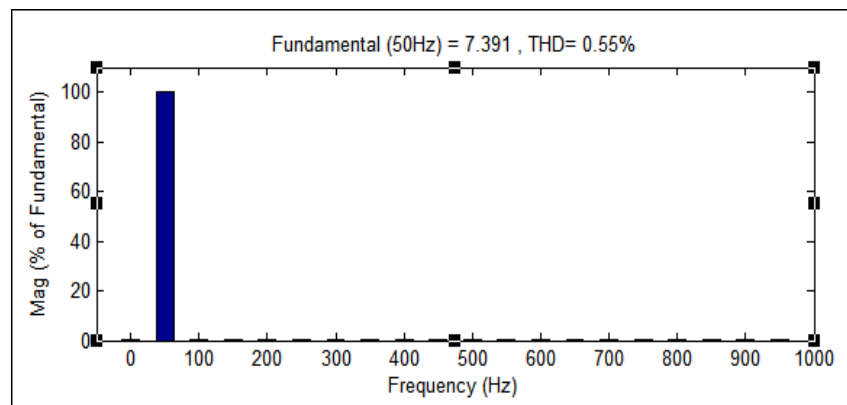


Figure (II.19): Taux de distorsion harmonique du courant de charge

## II.4. Convertisseur PUC triphasé 5 et 7 niveaux:

### II.4.1. Présentation de la topologie:

L'onduleur en triphasé est beaucoup plus intéressante que le système monophasé vu les applications industrielles qui demandent une quantité d'énergie importante. L'onduleur triphasé consiste à utiliser trois bras en parallèle, les sources de tension continue doivent être indépendantes.

Chaque bras est commandé par la commande MLI d'onduleur monophasé, la seule différence est le déphasage de  $2\pi/3$  entre les trois bras. [1] Les valeurs des résistances et des condensateurs de la charge triphasée et la fréquence de commutation utilisés dans cette simulation sont :  $R=150\Omega$ ,  $L=8\text{mH}$  et  $f=10\text{KHz}$ .

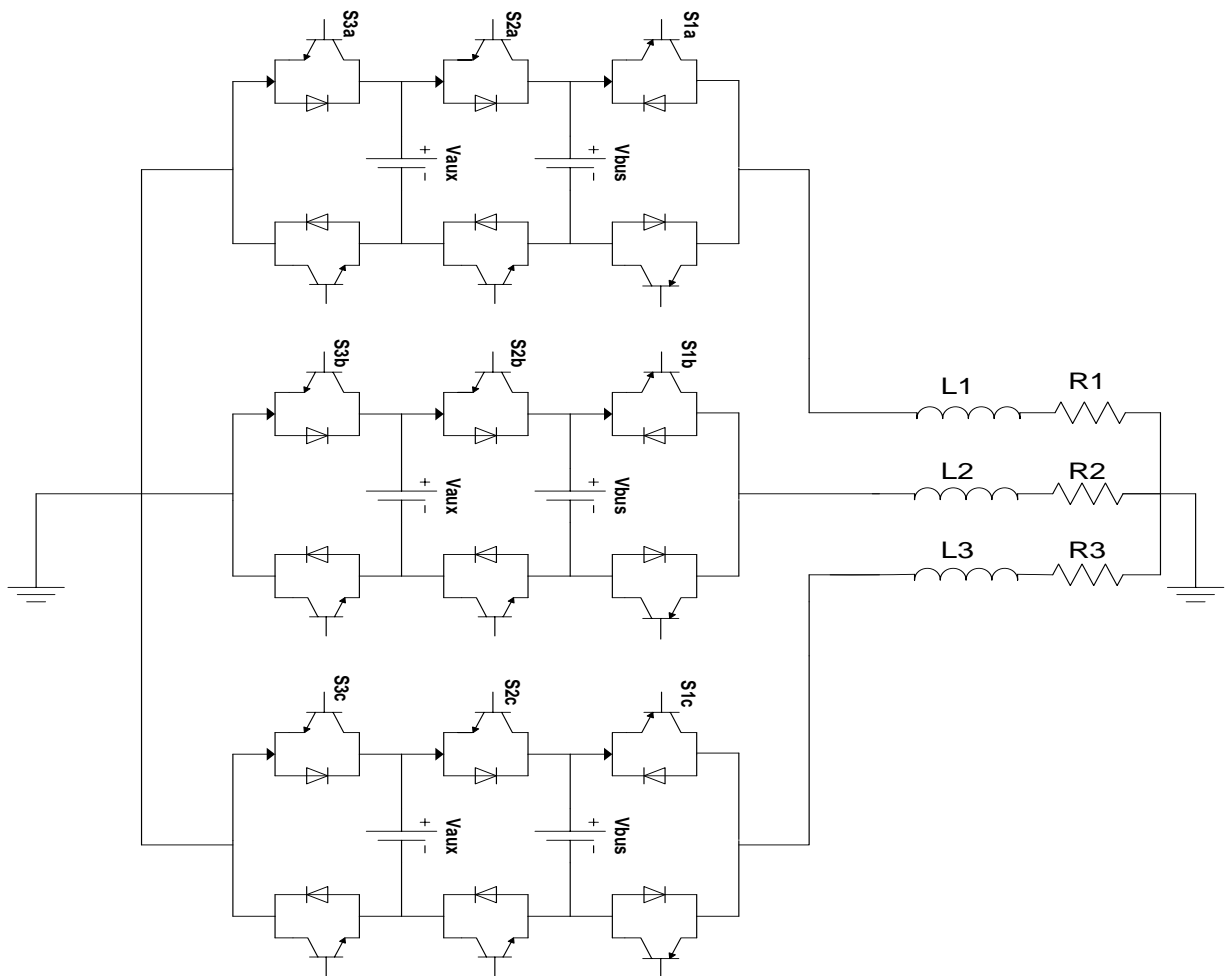


Figure (II.20) : Onduleur PUC triphasé

### II.4.2. Onduleur PUC triphasé 5 niveaux:

Un onduleur PUC 5 niveaux triphasé c'est un rassemblement du Trois bras d'un onduleur monophasé, Pour obtenir la tension de sortie de 5 niveaux triphasés, il faut mettre une source de tension continue  $V_{aux}$  égale à la moitié de  $V_{bus}$  dans chaque bras. L'utilisation du trois sources distinctes de tension continue il est considéré comme un inconvénient.

#### II.4.2.1. Commande utilisée:

La commande consiste à utiliser la commande MLI pour un bras monophasé. Cette technique est basée sur la comparaison d'un signal de référence appelé aussi modulatrice et de fréquence  $f$ , avec un signal appelé porteuse et de fréquence  $f_p$  très élevée. On utilise trois tensions de référence avec le déphasage de  $2\pi/3$  entre elles.

Il faut comparer quatre signaux triangulaires d'amplitude unitaire repartis entre -2 et 2. L'astuce consiste à créer un décalage dans les signaux triangulaires de la MLI (4 porteuses qui permettront de produire 5 niveaux de tension comme le montre la figure (II.7)).

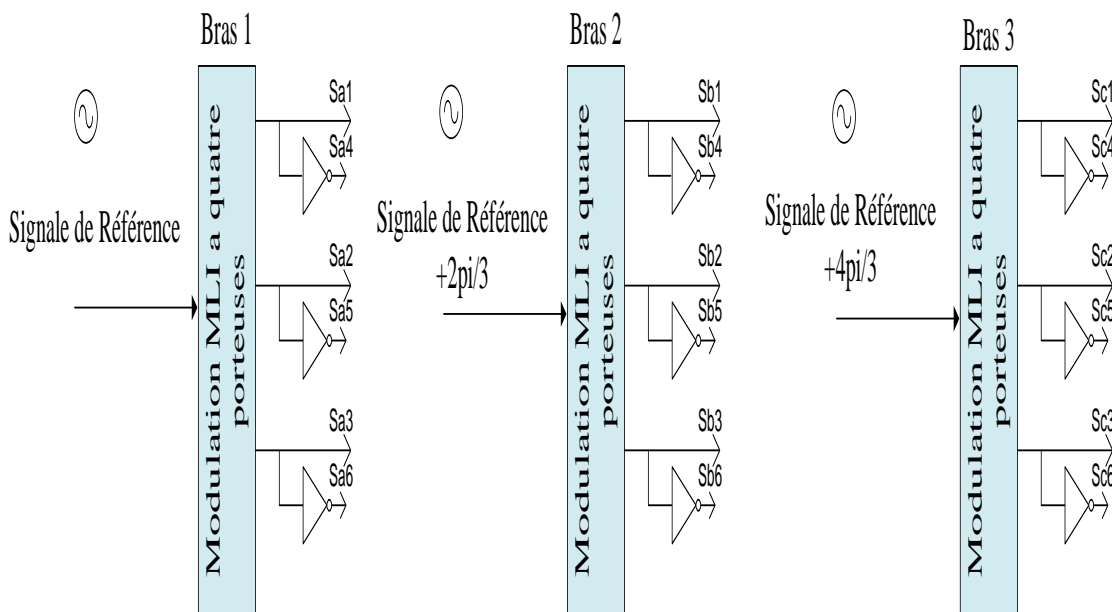


Figure (II.21): Commande MLI d'onduleur triphasé cinq niveaux

**II.4.2.2. Résultats de la simulation :**

Les résultats obtenus montrent qu'en régime permanent, les formes des courants et des tensions coté réseau sont sinusoïdaux, les taux de distorsion harmonique sont de 27.00% pour la tension et de 0.72% pour le courant.

La tension V <sub>bux</sub>	300V
La tension V <sub>aux</sub>	150V
Résistance de la charge	15ohm
Inductance de la charge	8mH
Fréquence de commutation	10Khz

Tableau (II.7): Paramètres de simulation de l'onduleur triphasé PUC cinq niveaux

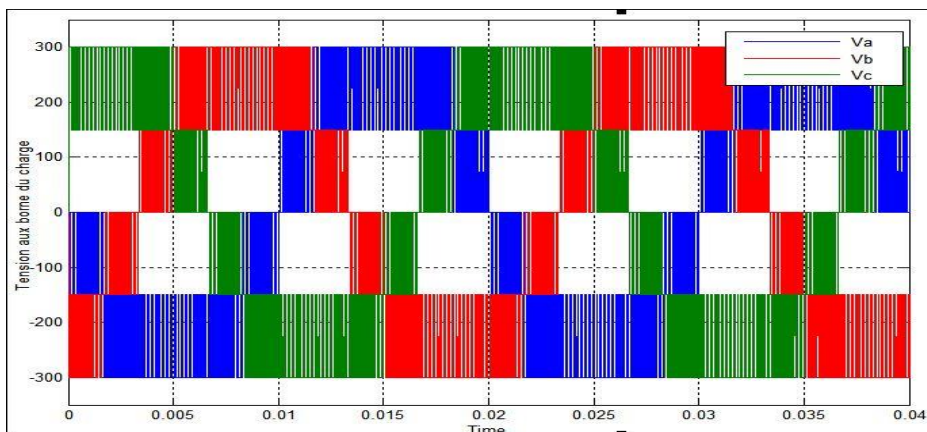


Figure (II.22) : Tensions de la charge

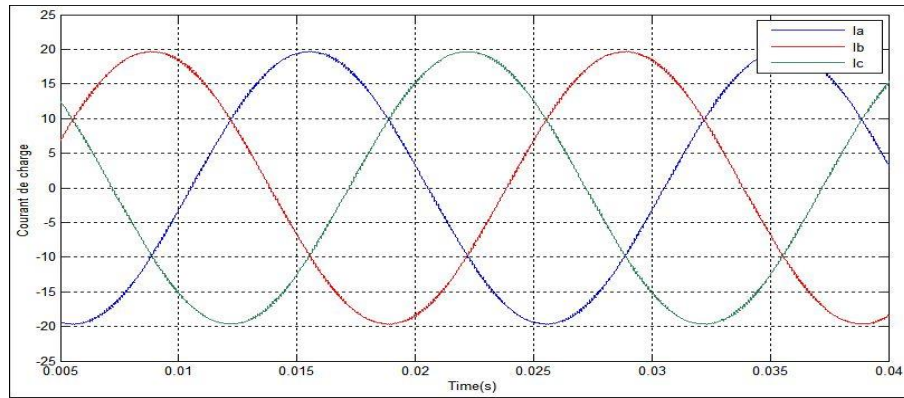


Figure (II.23) : Les courants de la charge

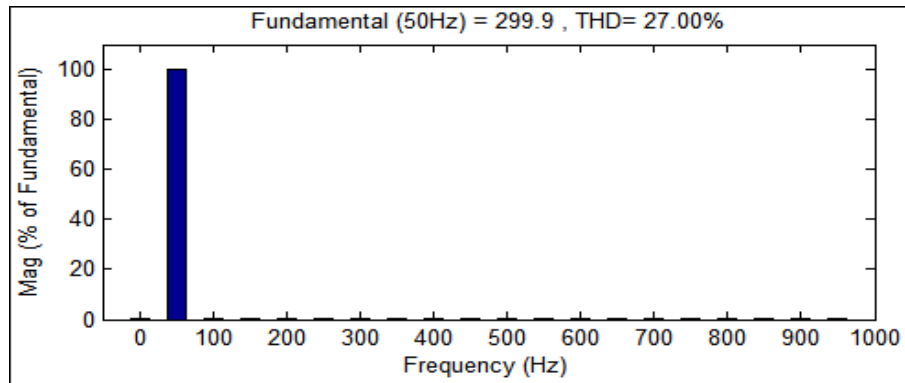


Figure (II.24): Taux de distorsion harmonique de la tension de charge

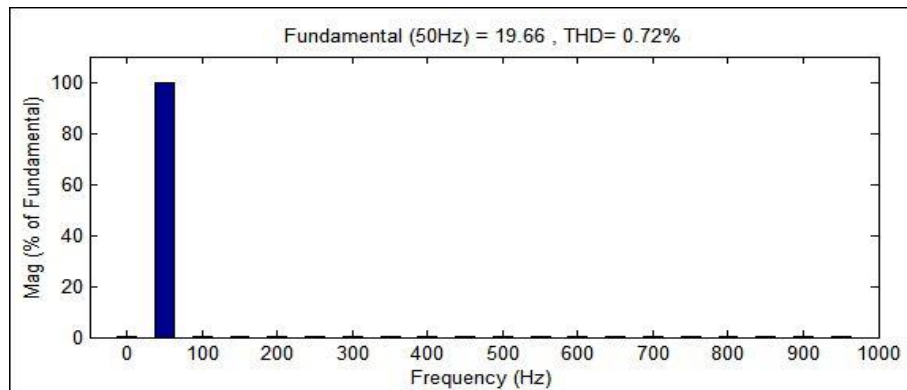


Figure (II.25) : Taux de distorsion harmonique du courant de charge

### II.4.3. Onduleur PUC triphasé 7 niveaux:

Le groupement de trois bras d'un onduleur monophasé PUC produit un onduleur PUC triphasé. Selon ce qui précède pour obtenir un onduleur triphasé sept niveaux, il faut mettre la source  $V_{aux}$  de manière à ce qu'elle soit égale au tiers de la tension aux bornes de la source  $V_{bus}$  dans chaque bras.

#### II.4.3.1 Commande utilisée:

Nous utilisons la même commande que nous avons utilisée dans l'onduleur PUC triphasé cinq niveaux, la seule différence ici c'est que dans l'onduleur sept niveaux il faut comparer six signaux triangulaires d'amplitude unitaire répartis entre -3 et 3, (6 porteuses qui permettront de produire 7 niveaux de tension comme le montre la figure (II.15)).

II.4.3.2 Résultats de la simulation :

La forme de tension de courant et Taux de distorsion harmonique de la tension et du courant de sortie de l'onduleur de tension triphasée pour une charge RL est représentée par les figures suivantes :

La tension V <sub>bux</sub>	300V
La tension V <sub>aux</sub>	100V
Résistance de la charge	15ohm
Inductance de la charge	8mH
Fréquence de commutation	10Khz

Tableau (II.8): Paramètres de simulation de l'onduleur triphasé PUC sept niveaux

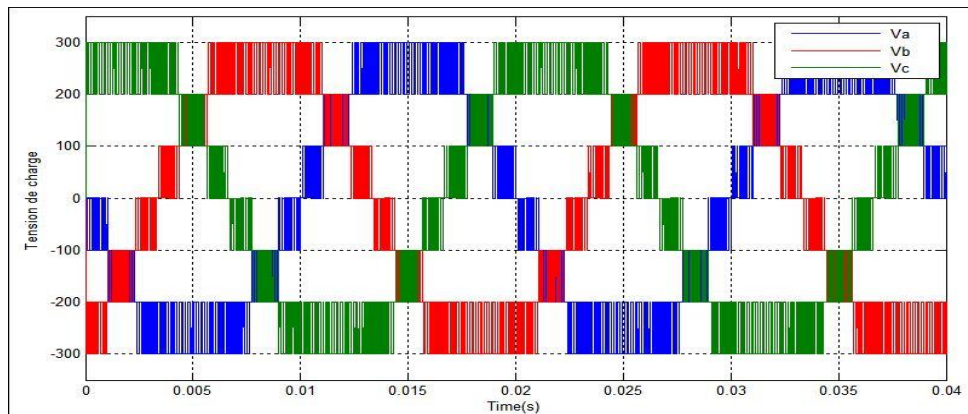


Figure (II.26) : Tensions de la charge

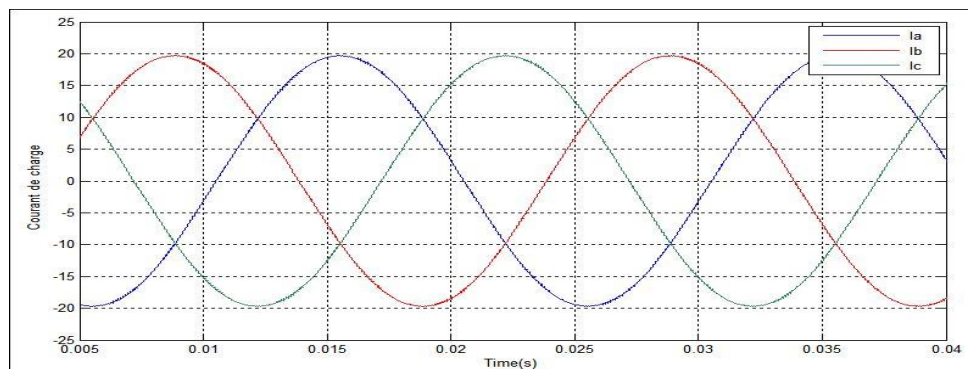


Figure (II.27) : Les courants de la charge

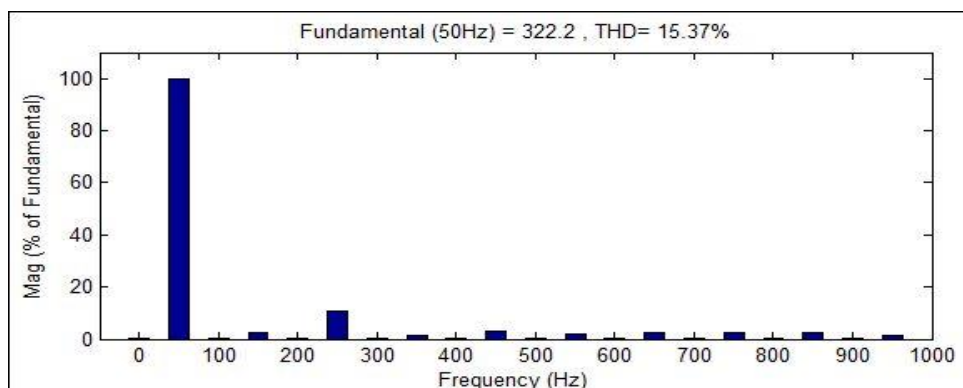


Figure (II.28): Taux de distorsion harmonique de la tension de charge

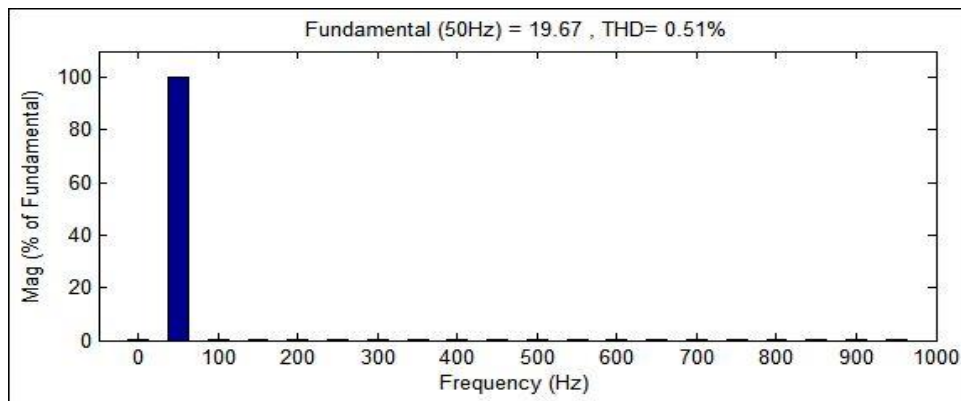


Figure (II.29) : Taux de distorsion harmonique du courant de charge

Les résultats montrent que la tension est répartie sur les 7 niveaux souhaités, son taux de distorsion harmonique est de 15.37%, Le courant est sous forme sinusoïdale avec un taux de distorsion harmonique de 0.51%, Nous remarquons que dans l'onduleur à sept niveaux de taux de distorsion harmonique a diminué, Parce que nous avons trouvé dans les onduleurs de cinq niveaux le THD du tension de sortie 27.00%, et taux de distorsion harmonique du courant 0.72%, Ce qui signifie que plus le niveau est élevé moins le THD . La diminution de contenu harmonique dans la tension et courant de sortie est considéré comme un avantage des avantages d'onduleurs multi niveaux.

### II.5. Onduleur 'PUC' modifié (MPUC):

L'onduleur PUC a été étudié dans ce chapitre et il a été démontré que l'amplitude de la tension de sortie ne dépasse pas la valeur de la source de courant continu DC. Comme solution, l'onduleur MPUC avec une configuration modifiée de PUC est proposé. La figure (II.30) montre la topologie MPUC, qui est capable de produire des valeurs de tension plus élevées que l'onduleur PUC.

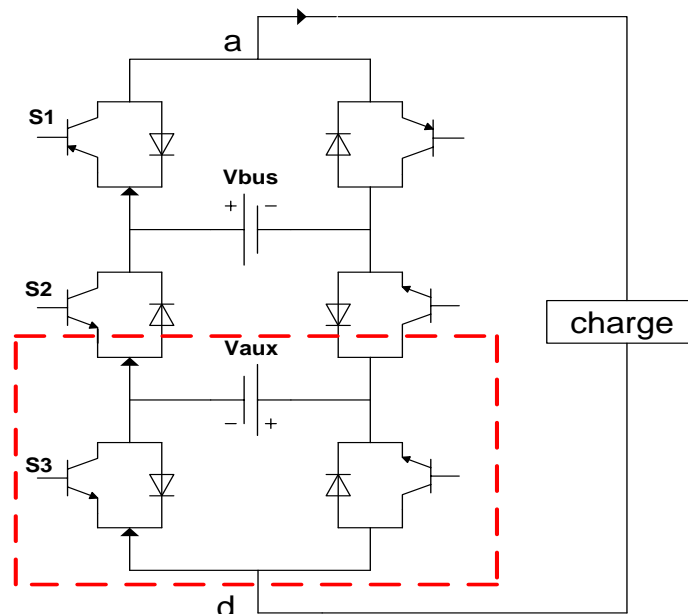


Figure (II.30) : Schéma d'onduleur PUC modifié

Comme illustre la figure (II.30), la deuxième source de courant continu ( $V_{aux}$ ) a été connectée en sens inverse par rapport à l'onduleur PUC illustré à la figure (II.12). Par conséquent, deux interrupteurs inférieurs ( $S_3$  et  $S_6$ ) ont été inversés pour bloquer le chemin normal à travers leurs diodes. Par conséquent, le flux de courant peut être bloqué ou conduit correctement à travers ces interrupteurs par les impulsions de la porte. Le tableau (II.9) contient les états de commutation et les valeurs de tension de sortie associés à l'onduleur MPUC à 7 niveaux.

Etat	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$V_{ad}$
1	0	0	0	0
2	0	0	1	$V_{aux}$
3	0	1	0	$-V_{aux}-V_{bus}$
4	0	1	1	$-V_{bus}$
5	1	0	0	$V_{bus}$
6	1	0	1	$V_{bus}+V_{aux}$
7	1	1	0	$-V_{aux}$
8	1	1	1	0

Tableau (II.9): Tableau de commutation d'onduleur PUC modifié

Le tableau (II.9) montre que le niveau de tension maximum sur la charge générée par l'onduleur MPUC est la somme de deux sources de courant continu comme  $V_{bus}+V_{aux}$ . Ainsi, une amplitude de tension plus élevée est produite par la topologie proposée. Il est clair que sept niveaux de tension identiques peuvent être générés par l'onduleur MPUC à la sortie si seule la première source de courant continu a une amplitude deux fois supérieure à la seconde. Cela signifie que si  $V_{bus}=2V_{aux}=2E$ , la forme d'onde de la tension de sortie comprend les niveaux suivants :  $0, \pm E, \pm 2E, \pm 3E$ . Là encore, on peut voir que la tension continue la plus élevée a une amplitude de  $2E$ , alors que la valeur maximale de la tension de sortie est de  $3E$ .

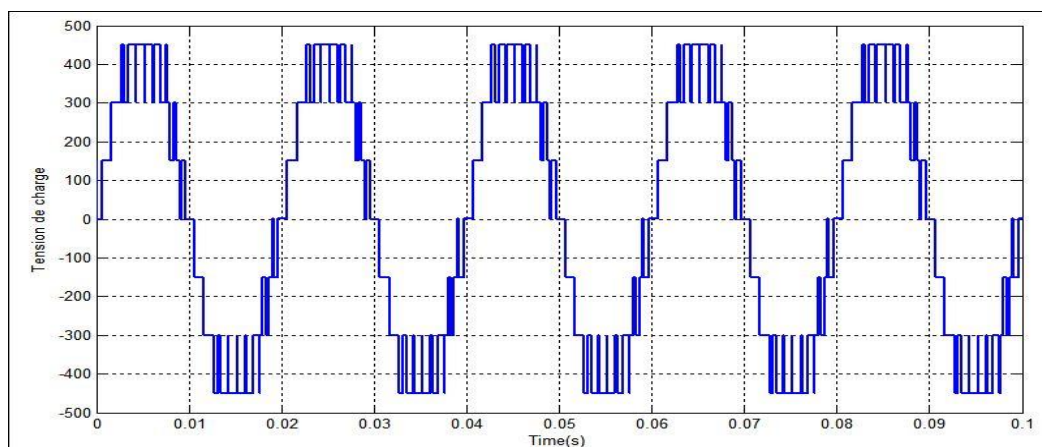


Figure (II.31) : Tension de charge d'onduleur PUC modifié

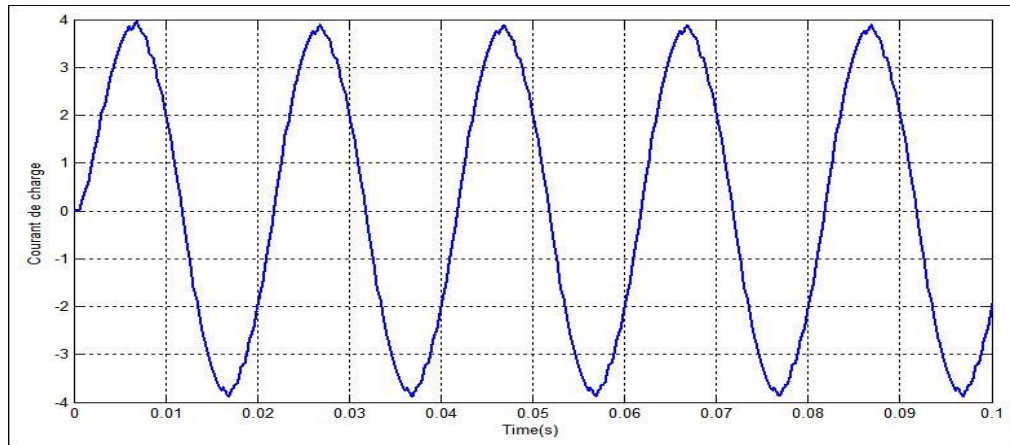


Figure (II.32) : Courant de charge d'onduleur MPUC

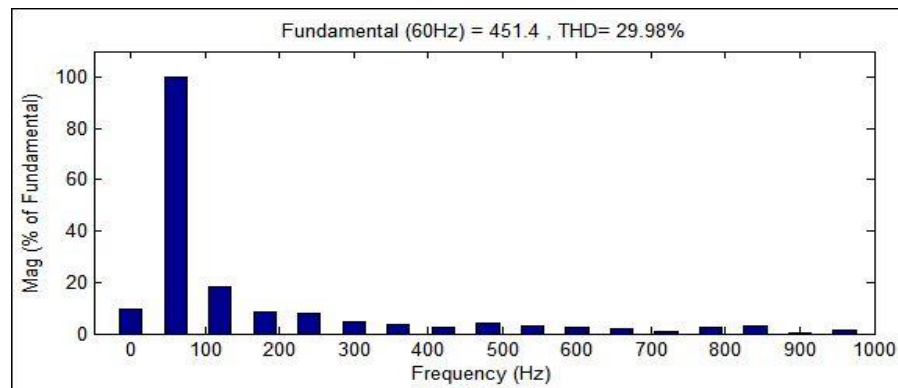


Figure (II.33): Taux de distorsion harmonique de la tension de charge

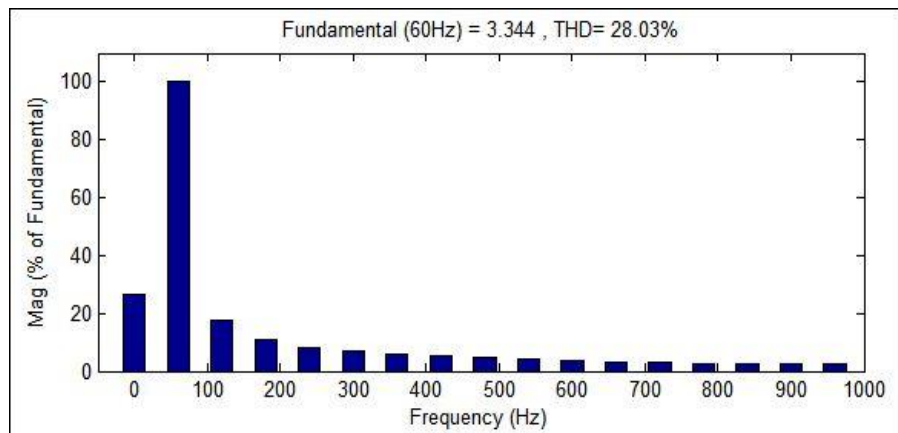


Figure (II.34): Taux de distorsion harmonique du courant de charge

## II.6. Comparaison entre les trois topologies des onduleurs avec l'onduleur type PUC:

Le tableau (II.10) montre de manière résumée les principales caractéristiques des trois topologies multi-niveaux avec le convertisseur multi-niveaux type PUC proposé en cas de production d'une forme d'onde de tension de sortie monophasée à 5 niveaux. Il est important que le convertisseur proposé contienne moins de composants et que sa complexité de contrôle soit très faible.

Configuration	NPC	condensateur flotteur	en cascade	PUC
Source DC	4	1	2	1
Diode antiparallèle	8	8	8	6
Diode de bouclage	6	0	0	0
Dispositif principaux de commutation	8	8	8	6
Condensateur	0	3	0	1
Nombre total de pièces	26	20	18	14

Tableau (II.10): Les composants pour les onduleurs monophasés à cinq niveaux

Configuration	NPC	condensateur flotteur	en cascade	PUC
Source DC	(m-1)	1	(m-1)/2	1
Diode antiparallèle	2(m-1)	2(m-1)	2(m-1)	6
Diode de bouclage	2(m-2)	0	0	0
Dispositif principaux de commutation	2(m-1)	2(m-1)	2(m-1)	6
Condensateur	0	(m-2)	0	1
Nombre total de pièces	7m-9	5(m-1)	(9/2)(m-1)	14

Tableau (II.11): Les composants pour les onduleurs monophasés multi-niveaux

À travers les deux tableaux précédents (II.10),(II.11) et à partir de ce qui précède, On remarque que les onduleurs type PUC contient quelques composants, contrairement aux les autres onduleurs. Elle a l'avantage de fournir un nombre de niveaux élevé pour un nombre de composants réduit, ce qui la privilégie par rapport à ses concurrentes comme la topologie de type NPC et au condensateur flottant et les onduleurs en cascade.

**II.7. Conclusion:**

Dans ce chapitre nous avons présenté les onduleurs multi niveaux type PUC 5 et 7 niveaux monophasé et triphasé, Nous avons utilisé la commande en boucle ouvert par MLI, Toutes les structures (testées les onduleurs type PUC 5 et 7 niveaux), Dans notre étude nous avons identifié une nouvelle structure modifiée d'onduleur appelée PUC modifié produire une tension de sortie plus élevée que la tension d'entrée  $V_{dc}$ , et nous avons comparé les trois topologies des onduleurs multi niveaux avec le convertisseur type PUC, nous concluons que le PUC fournir un nombre de niveaux élevé pour un nombre de composantes réduit.

L'utilisation des onduleurs en triphasé est beaucoup plus compliqué que son utilisation en monophasé. Ce qui fait que les commandes de contrôle pour ces topologies doivent être précis, robustes et complexes.

Dans le prochain chapitre, nous présenterons la commande MLI avec régulation d'onduleurs PUC.

*CHAPITRE III :*

*Commande d'onduleurs Multi niveaux type  
"PUC"*

### III.1. Introduction :

Dans le chapitre précédent, nous avons étudié l'onduleur multi niveaux type PUC avec la structure qui contient deux sources de tension continu  $V_{bus}$  et  $V_{aux}$ , Premièrement, l'utilisation de deux sources de tension continue est considérée comme un inconvénient. Deuxièmement, le principe de fonctionnement de cette structure montre un flux de courant dans la deuxième source  $V_{aux}$ , C'est pourquoi il est nécessaire l'utilisation d'une diode série comme dispositif de blocage de la tension inverse. La meilleure solution est d'utiliser un dispositif de stockage d'énergie comme deuxième bus DC et de réguler sa tension pour générer les niveaux de tension désirés en elle dans la sortie.

Ce chapitre comporte trois parties:

Dans la première partie, nous parlerons sur la régulation, les différents régulateurs et leurs effets sur l'asservissement du système.

La deuxième partie, consiste à étudier les onduleurs multi niveaux monophasé et triphasé type PUC commandé par la commande MLI en boucle fermée avec la régulation.

Nous traitons dans la dernière partie le contrôle des onduleurs triphasés type PUC par la modulation de largeur d'impulsion MLI en boucle fermé aussi avec régulation.

### III.2. Asservissement :

Lorsqu'un système reçoit une commande, il prend un certain temps à réagir. Ce retard s'appelle le temps de réponse. Dans certains cas, afin de diminuer le temps de réponse, la commande qui lui est appliquée peut être différente du résultat désiré. La valeur de l'effort de commande, valeur à la sortie du contrôleur, est calculée en fonction de l'erreur du système. L'erreur du système est la différence entre la consigne désirée et la valeur du système. Le régulateur interprète l'erreur du système afin de fournir l'effort de commande nécessaire. La Figure 1.8 est une représentation typique d'un système asservi. [29]

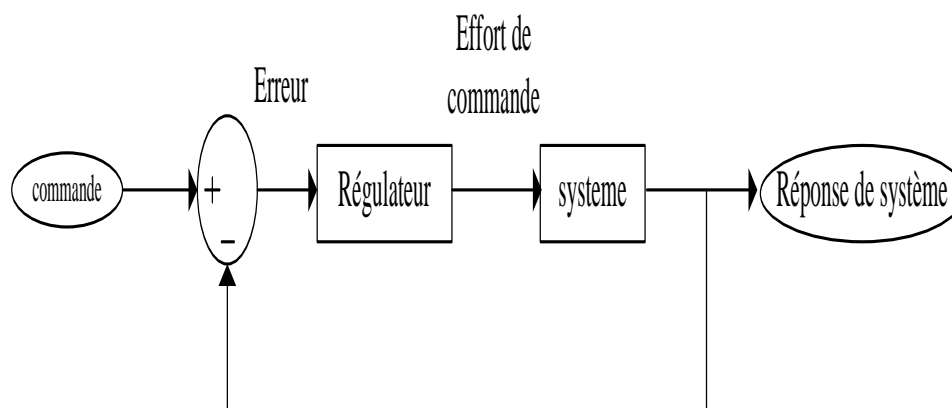


Figure (III.1): Système asservi en boucle fermée.

Les régulateurs permettent ainsi d'atteindre plus rapidement la réponse désirée, mais par la même occasion, ils peuvent introduire une erreur en régime permanent. L'erreur en régime permanent est la différence entre la valeur recherchée et celle obtenue. Différents régulateurs permettent cependant de corriger ces erreurs. Par la même occasion, ils peuvent appliquer une valeur supérieure à la consigne désirée. Dans le cas d'un système électrique, ce dépassement, valeur maximale de l'effort de commande, ne doit pas être supérieur aux valeurs limites des composantes.[29]

### III.3. Qualité d'un asservissement et performances d'un système :

Les principales qualités d'un asservissement sont au nombre de trois : stabilité, précision, et rapidité.

**III.3.1. Stabilité:** Un système est dit stable si et seulement si à une entrée bornée  $E(s)$  correspond une sortie bornée  $S(s)$ . Cette définition permet de qualifier la stabilité des systèmes forcés.

**III.3.2. Rapidité:** La sortie doit atteindre la valeur de consigne le plus rapidement possible. Le temps de réponse doit être le plus petit possible. Le temps de réponse à 5% d'un système est le temps mis pour que sa sortie atteigne et reste dans l'intervalle [95% ; 105%] de la valeur finale stabilisée

**III.3.3. Précision:** Il est naturel d'évaluer la précision d'un système régulé en comparant l'objectif atteint par rapport à celui exigé. La précision d'un système régulé se mesure donc à l'écart entre la consigne demandée et la mesure en régime permanent ; on parle alors de précision statique s'effectue en réalisant une variation rapide de consigne en amplitude et en mesurant la variation d'amplitude. [30]

D'une façon générale, la synthèse d'un asservissement résulte d'un compromis stabilité – précision – rapidité.

### III.4. Le régulateur PID :

#### III.4.1. Définition :

Le régulateur PID, appelé aussi correcteur PID (proportionnel, intégrateur, dérivateur) est un système de contrôle, il est constitué d'un comparateur pour observer l'écart (erreur) entre la mesure et la consigne, et d'un correcteur dont l'algorithme permet d'obtenir une loi d'évolution de la mesure du procédé conforme au cahier des charges. Il permettant d'effectuer un asservissement en boucle fermée d'un système industriel ou « procédé ». [31]

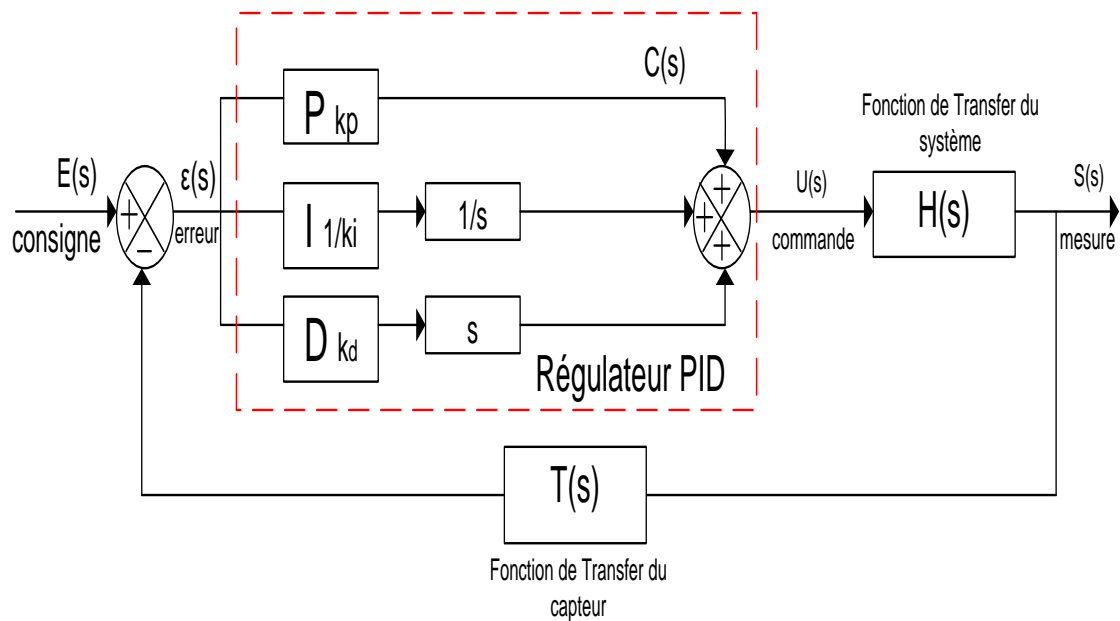


Figure (III.2): Asservissement par un régulateur PID

$S$  signal de mesure,  $E$  consigne (valeur entrée ou signal), et  $\varepsilon$  signal d'écart (ou d'erreur  $e(t)$ ) sont exprimés dans la même unité. Le signal  $U$  élaboré par le régulateur est le signal de commande.

**Rappelle :** l'erreur statique est la valeur définie entre la consigne d'entrée et la valeur mesurée.

Le rôle du régulateur pour le système en boucle fermée est d'assurer que la réponse présente des caractéristiques dynamiques et stationnaires convenables [32].

On peut juger le contrôleur selon les critères suivants :

- Le contrôleur doit être capable de maintenir la variable commandée à sa consigne.
- Le système en boucle fermée doit être stable asymptotiquement et présenter une performance satisfaisante dans une large gamme de fréquences.
- L'influence des perturbations doit être minimale.
- Les réponses à des variations de consigne doivent être rapides et douces.
- Une action de commande excessive doit être évitée (la variable de commande  $u(t)$  ne doit pas être trop sollicitée).
- Le système de commande doit être robuste : il doit être insensible aux variations du procédé et aux erreurs du modèle du procédé. Types de système de commande.

### III.4.2. Types de régulateur :

Les régulateurs standards les plus utilisés dans l'industrie sont les régulateurs de la famille PID (proportionnel, intégral, dérivé), car ils permettent de régler à l'aide de ces trois paramètres les performances (amortissement, temps de réponse, dépassement...) d'une régulation d'un processus modélisé du premier ordre et du deuxième ordre. La plupart des régulateurs comportent un algorithme identique à celui désigné par un "PID". [30]

✓ *P* : Action proportionnelle.

✓ *I* : Action intégrale.

✓ *D* : Action dérivée

L'adaptation d'un régulateur aux différents systèmes s'effectue par le réglage des coefficients (paramètres) de l'algorithme.

✓ Paramètre  $K_p$  pour le réglage de l'action proportionnelle.

✓ Paramètre  $K_i$  pour le réglage de l'action intégrale.

✓ Paramètre  $K_d$  pour le réglage de l'action dérivée.

#### III.4.2.1. Régulateur proportionnel :

Pour le régulateur proportionnel, il s'agit d'un simple gain constant, L'effort de commande est donc proportionnel à l'erreur. La valeur du gain proportionnel est déterminée pour stabiliser le système dans un délai raisonnable. Par contre, ce type de régulation introduit une erreur en régime permanent. [29]

$$U(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) \quad (\text{III.1})$$

Ce qui en Laplace donne :

$$U(p) = K_p \cdot \varepsilon(p) \quad (\text{III.2})$$

L'effet d'une augmentation du gain entraîne une diminution de l'erreur statique, et rend le système plus rapide mais engendre l'instabilité du système. [2]

#### III.4.2.2. Régulateur proportionnel intégral :

L'ajout de l'action intégrale au régulateur proportionnel, PI, permet d'annuler l'erreur en régime permanent et diminue le temps de réponse, elle introduit par contre un dépassement. Plus le temps de réponse sera petit, plus grand sera le dépassement. Ce qui est comparable à une inertie difficile à freiner. Pour la correction de l'erreur en régime permanent, elle s'explique par le fait que même si l'erreur est nulle, l'action intégrale permet de conserver un effort de commande. [29]

La loi de commande est de la forme :

$$U(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) + K_i \cdot \int_0^t \varepsilon(\tau) \cdot d\tau \quad (\text{III.3})$$

Soit d'après la transformée de Laplace :

$$U(p) = K_p \cdot \varepsilon(p) + K_i \cdot \frac{\varepsilon(p)}{p} \quad (\text{III.4})$$

#### III.4.2.3. Régulateur Proportionnel Intégrateur Dérivé :

Pour obtenir un contrôle en PID, il nous faut encore rajouter un terme. Celui-ci consiste à dériver l'erreur entre la consigne et la mesure par rapport au temps et à le multiplier lui aussi par une constante.

La loi de commande est de la forme :

$$U(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) + K_i \cdot \int_0^t \varepsilon(\tau) \cdot d\tau + K_d \cdot \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} \quad (\text{III.5})$$

Soit d'après la transformée de Laplace :

$$U(p) = K_p \cdot \varepsilon(p) + K_i \cdot \frac{\varepsilon(p)}{p} + K_d \cdot p \cdot \varepsilon(p) \quad (\text{III.6})$$

Sous forme simplifiée:

$$U(p) = \varepsilon(p) \cdot \left[ K_p + K_i \cdot \frac{1}{p} + K_d \cdot p \right] \quad (\text{III.7})$$

Nous avons besoin d'un terme dérivé car le contrôle PI peut amener à un dépassement de la consigne, ce qui n'est pas toujours très souhaitable. Le terme dérivé permet de limiter cela. Lorsque le système s'approche de la consigne, ce terme freine le système en appliquant une action dans le sens opposé et permet ainsi une stabilisation plus rapide.

#### III.5. Les harmoniques :

La présence d'harmoniques dans les systèmes électriques signifie que le courant et la tension sont déformés et s'écartent de formes d'ondes sinusoïdales.

Les courants harmoniques sont causés par des charges non linéaires connectées au système de distribution. Une charge est dite non linéaire lorsque le courant qu'elle absorbe n'a pas la même forme d'onde que la tension d'alimentation. La circulation de courants harmoniques dans les impédances du réseau crée ensuite des harmoniques de tension, qui déforment la tension d'alimentation.

Le théorème de Fourier indique que toutes les fonctions périodiques non sinusoïdales peuvent être représentées comme la somme des termes (i.e. une série) constituée de :

- un terme sinusoïdal à la fréquence fondamentale,
- des termes sinusoïdaux (harmoniques) dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale.

L'harmonique de rang  $h$  (communément appelé "harmonique  $h$ ") d'un signal est la composante sinusoïdale dont la fréquence est  $h$  fois la fréquence fondamentale.

L'équation de la décomposition harmonique d'une fonction périodique  $y(t)$  est présentée ci-dessous :

$$y(t) = y_0 + \sum_{h=1}^{h=\infty} y_h \sqrt{2} \sin(h\omega t - \varphi_h) \quad (\text{III.8})$$

Où:

- $Y_0$  : valeur de la composante continue généralement nulle et considérée comme telle ci-après,
- $Y_h$  : valeur efficace de l'harmonique de rang  $h$ ,
- $\omega$  : vitesse angulaire de la fréquence fondamentale,
- $\varphi_h$  : phase de la composante harmonique à  $t = 0$ .

La Figure(III.3) représente un exemple d'une onde de courant affectée par la distorsion harmonique sur un système de distribution électrique à 50 Hz. Le signal déformé est la somme de composantes harmoniques superposées :

- la valeur de la fréquence fondamentale (ou harmonique de rang 1) est de 50 Hz,
- l'harmonique de rang 3 a une fréquence de 150 Hz,
- l'harmonique de rang 5 a une fréquence de 250 Hz,
- etc.

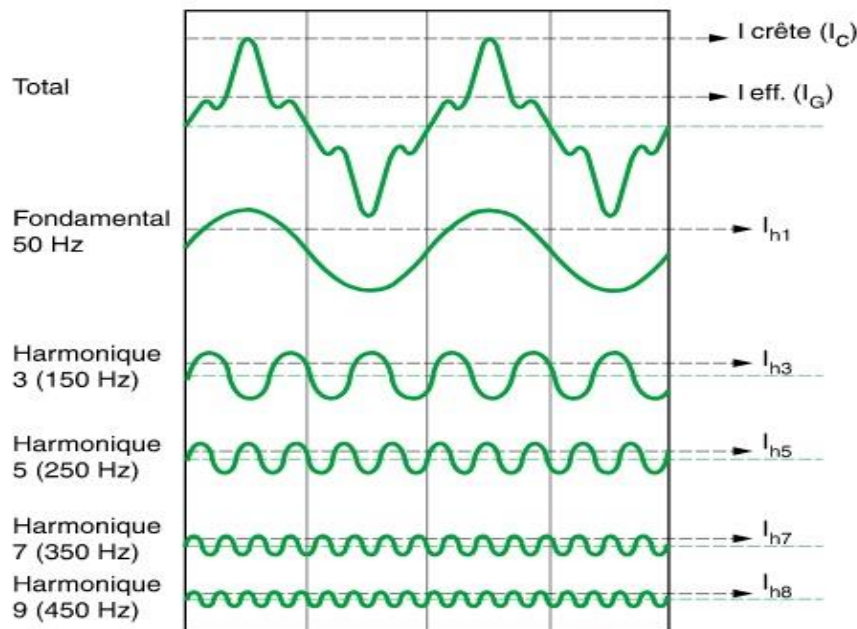


Figure (III.3) Exemple d'un courant contenant des harmoniques et décomposition en rangs harmoniques de rang 1 (fondamental), 3, 5, 7 et 9

### III.6. Taux de distorsion Harmonique:

La distorsion harmonique totale (THD) est un indicateur de la distorsion d'un signal. Il est largement utilisé en génie électrique et dans la gestion des harmoniques en particulier.

Pour un signal  $Y$ , le THD est défini comme suit :

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} y_h^2}}{y_1} \quad (\text{III.9})$$

THD est le rapport entre la valeur efficace de toutes les composantes harmoniques du signal  $Y$ , ramenée à la composante fondamentale  $Y_1$ ,  $H$  est généralement pris égal à 50. A noter que THD peut être supérieur à 1 et est généralement exprimé en pourcentage.

❖ Taux harmonique de courant :

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (\text{III.10})$$

$I_h$ : courant harmonique de rang  $h$ .

$I_1$ : fondamentale de courant.

❖ Taux harmonique de tension :

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad (\text{III.11})$$

$V_h$ : Tension harmonique de rang h.

$V_1$ : fondamentale de tension.

Un TDH élevé a plusieurs inconvénients sur le rendement d'une installation. Habituellement les harmoniques différentes de la fondamentale ne produiront pas de puissance active, donc une diminution du facteur de puissance. Elles peuvent aussi créer un échauffement dans les différents appareils d'une installation.

### III.7. Commande d'onduleur multi niveaux type PUC :

#### III.7.1. Régulation de $V_{AUX}$ :

Dans le deuxième chapitre, nous avons utilisé la tension  $V_{aux}$  comme fixe afin de faciliter la compréhension du fonctionnement du convertisseur. Dans ce cas la structure PUC contient une source de tension continue  $V_{bus}$ , et un condensateur  $V_{aux}$  a été placé dans la topologie PUC comme deuxième source de tension continue. La figure (III.4) suivante montre cette topologie.

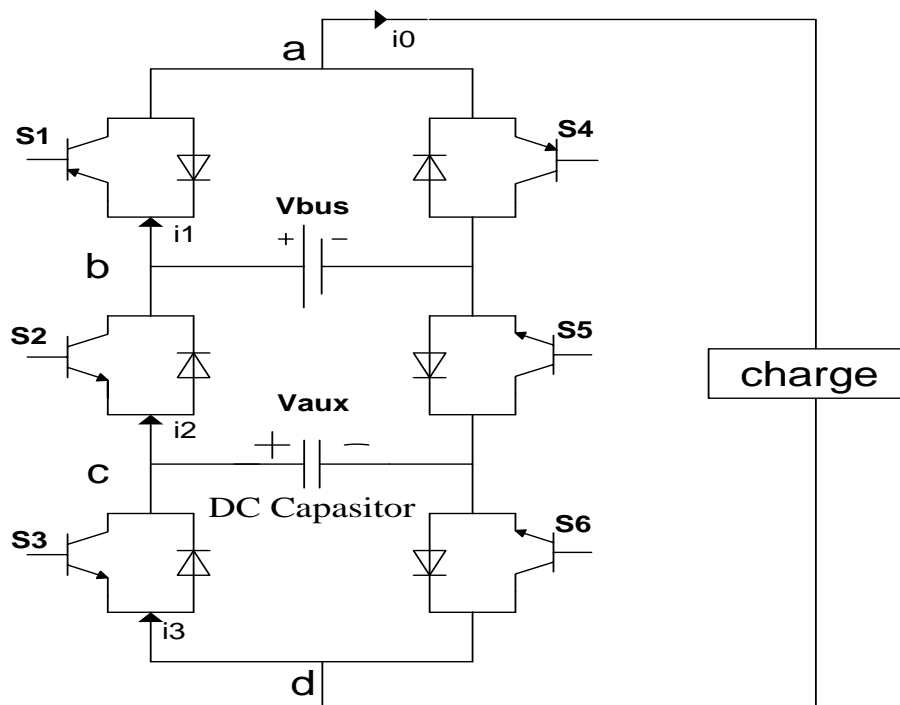


Figure (III.4): Structure d'onduleur PUC monophasé

Etat	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	V <sub>ad</sub>
0	0	0	0	0
1	0	0	1	-V <sub>aux</sub>
2	0	1	0	V <sub>aux</sub> -V <sub>bus</sub>
3	0	1	1	-V <sub>bus</sub>
-3	1	0	0	V <sub>bus</sub>
-2	1	0	1	V <sub>bus</sub> -V <sub>aux</sub>
-1	1	1	0	V <sub>aux</sub>
0	1	1	1	0

Tableau (III.1) Tous les niveaux de tension générés par PUC

Des analyses pratiques et de simulation ont montré que cette configuration des interrupteurs provoque un flux de courant dans le deuxième bus DC pendant le fonctionnement, ce qui rend inévitable l'utilisation d'une diode série comme dispositif de blocage de la tension inverse. La meilleure solution pour surmonter ce problème est d'utiliser un dispositif de stockage d'énergie comme deuxième bus DC et de contrôler sa tension de manière à ce que les niveaux de tension souhaités soient générés à la sortie. C'est pourquoi un condensateur a été placé dans la topologie PUC comme deuxième source dépendante et certains contrôleurs ont été conçus pour maintenir la tension (V<sub>2</sub>) constante.[33]

Maintenant, traitons le cas où la tension aux bornes du condensateur, VAUX, doit être régulée. Pour les états 1 et -1, la tension VAUX et -VAUX est appliquée, le condensateur se décharge dans la charge connectée au aux bornes de VCA. Dans les états 2 et -2 il se charge par le courant fourni à la charge par VBUS. L'astuce de la commande est donc d'augmenter la durée de l'état 1 et -1 et diminuer celle de 2 et -2 pour diminuer la tension VAUX et le contraire pour l'augmenter. Pour ce faire, nous décalons légèrement les porteuses entre chacun des niveaux. Si la porteuse entre 0 et 1 est décalée vers le haut et que celle entre 1 et 2 est décalée vers le bas, l'état durera plus longtemps et l'état 1 moins longtemps pour une période. Dans la Figure (III.5), nous pouvons voir l'effet sur la MLI pour trois décalages différents. La durée des états 2 et -2 augmente alors que celle de 1 et -1 diminue lorsque le décalage augmente, ce qui permet de charger VAUX. Une logique similaire est appliquée afin de diminuer la tension aux bornes de VAUX. La valeur du décalage peut théoriquement varier de -1 à 1, mais afin de ne pas éliminer complètement un état, sa valeur sera légèrement inférieure.[29]

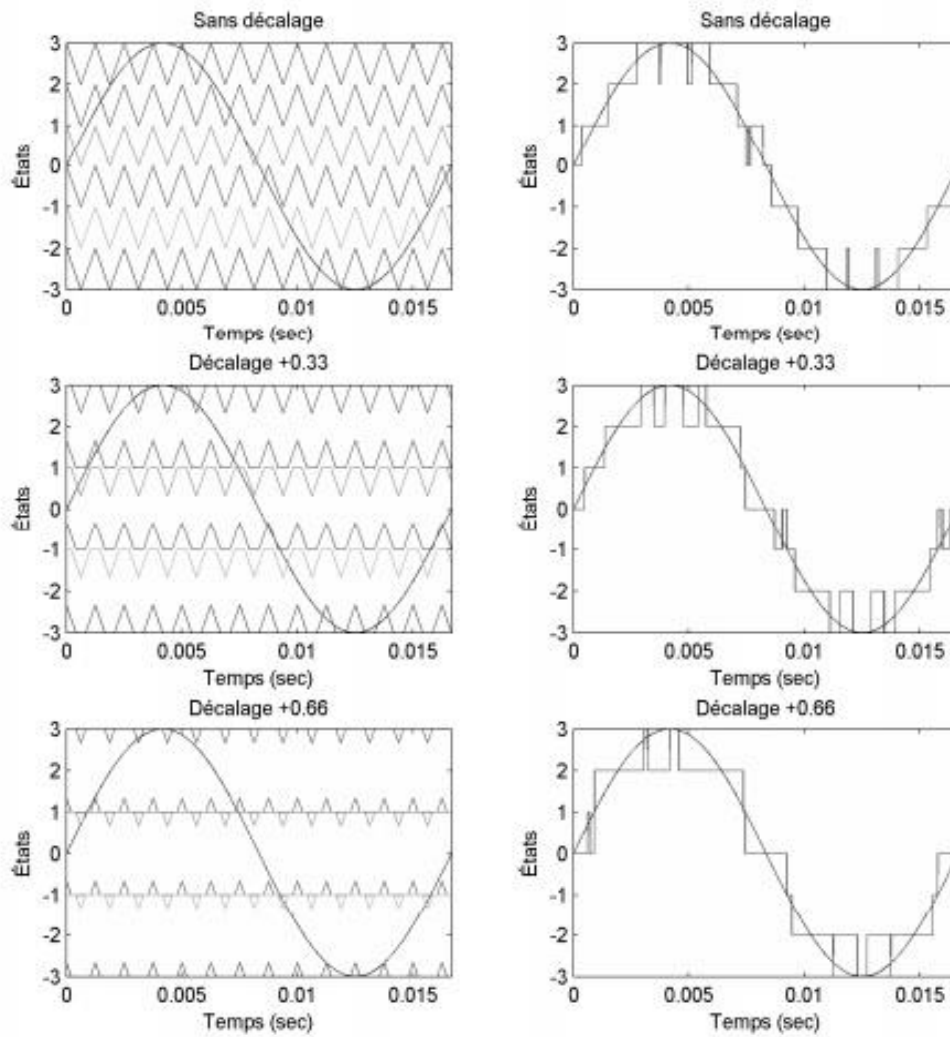


Figure (III.5): Effet du décalage sur la MLI de sortie

La régulation est obtenue en décalant les porteuses de la MLI La valeur de décalage est déterminée à l'aide d'un régulateur PI qui devrait assurer une erreur nulle dans un minimum de temps. La Figure(III.6) représente le schéma bloque de cette régulation. Pour avoir une tension de 7 niveaux a la sortie il faut le gain égale 1/3 et pour 5 niveaux il faut égale 1/2.

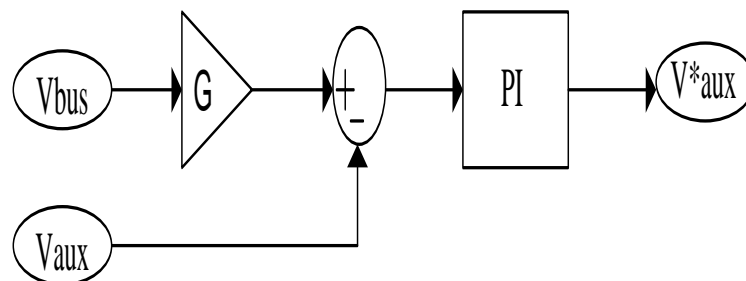


Figure (III.6): Régulation de  $V_{aux}$  en fonction de  $V_{bus}$  par décalage

III.7.2. Régulation de  $V_{ch}$  :

Nous désirons avoir une sortie constante peu importe la charge que nous alimentons. Pour ce faire, la valeur efficace de la sortie est asservie à une consigne en utilisant un régulateur PI. L'effort de commande de ce régulateur fixe une consigne de courant qui sera utilisée pour l'asservissement du courant.

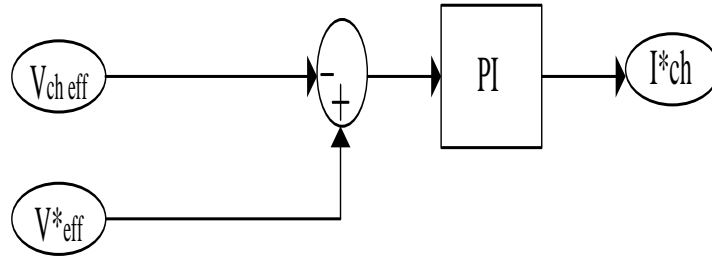


Figure (III.7): Consigne de courant en fonction de la tension de sortie.

La Figure (III.8) montre le schéma bloque de tous les éléments de la commande du convertisseur.

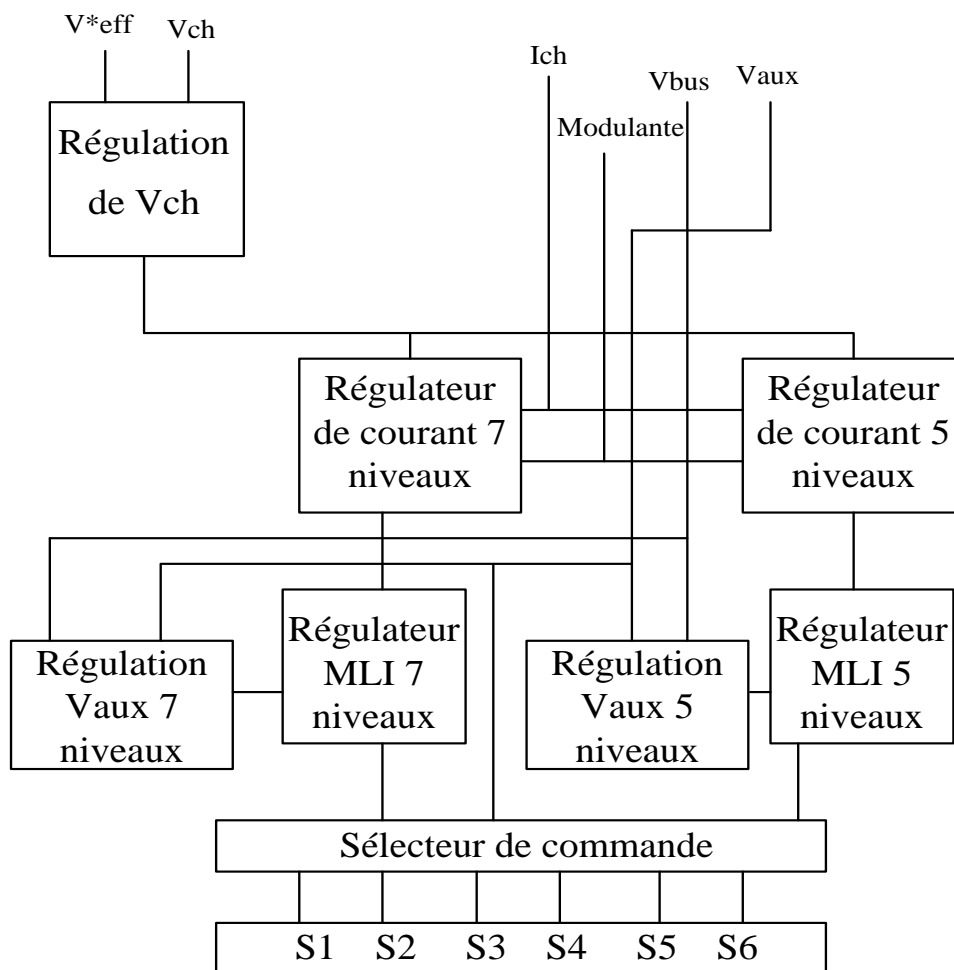


Figure (III.8): Schéma bloque de la commande.



Tension de source	300 V
Résistance de la charge	20 Ohm
Inductance de la charge	20 mH
Condensateur Bus	4000 uF
Fréquence de commutation	10 KHz

Tableau (III.2) : Paramètres de simulation de l'onduleur monophasé PUC

Les figures suivantes montrent les formes de signaux obtenus. La tension de charge est une tension répartie sur sept niveaux, le courant de charge est de forme sinusoïdale, La valeur de la tension aux bornes du condensateur est de 100V ce qui correspond à la bonne valeur. En vue des valeurs et des signaux obtenus, nous pouvons considérer que cet onduleur fonctionne selon les principes développés précédemment.

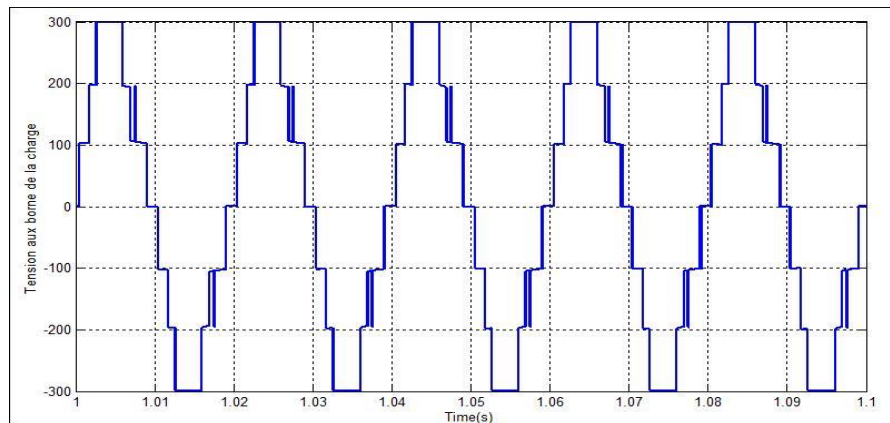


Figure (III.10) : Tension aux bornes de la charge

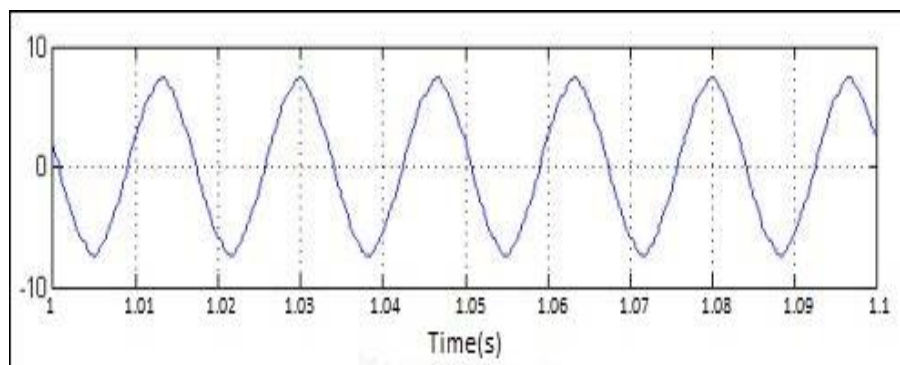


Figure (III.11) : Courant aux bornes de la charge

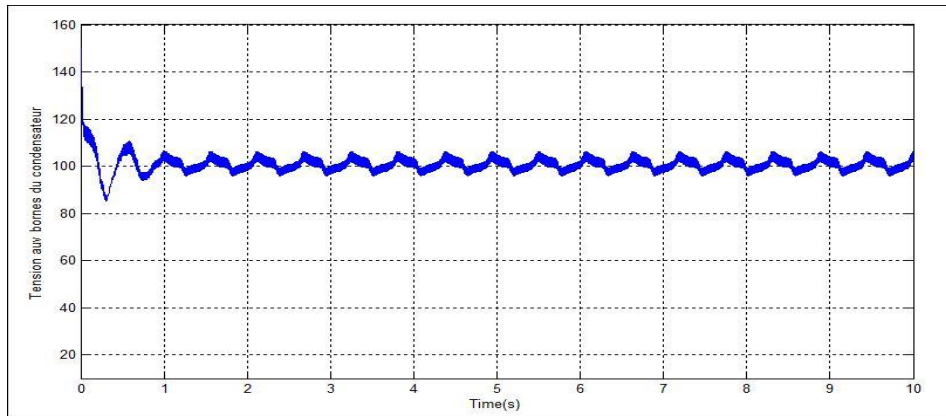


Figure (III.12) : Tension aux bornes du condensateur

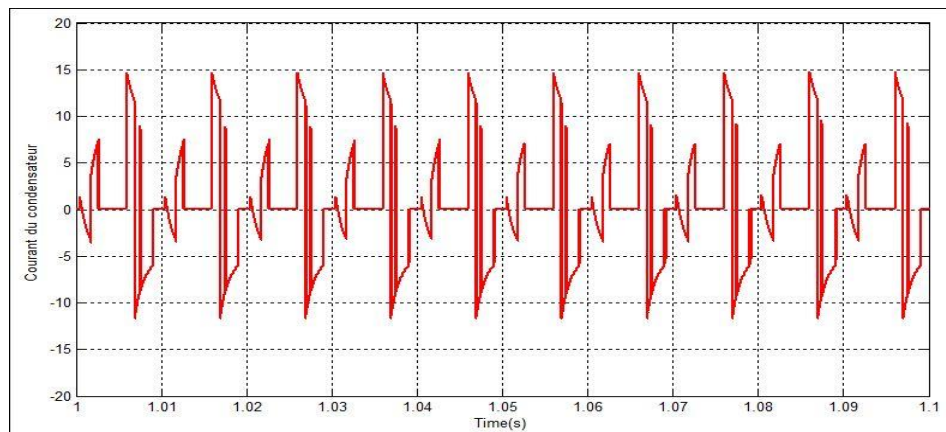


Figure (III.13) : Courant du condensateur

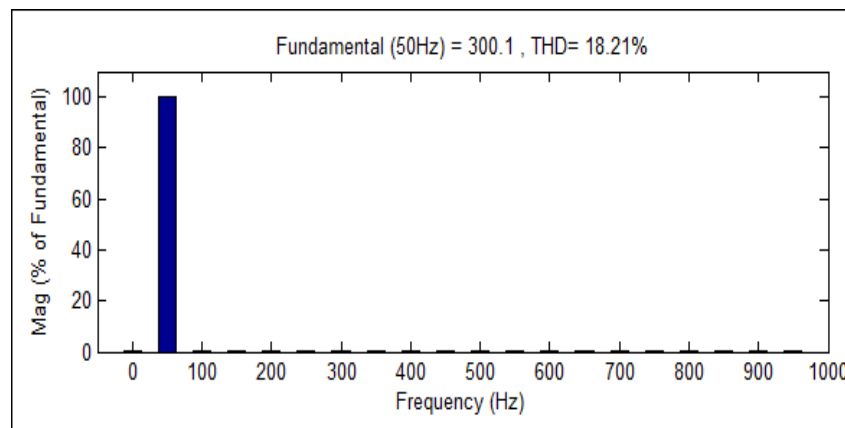


Figure (III.14): Taux de distorsion harmonique de la tension de charge

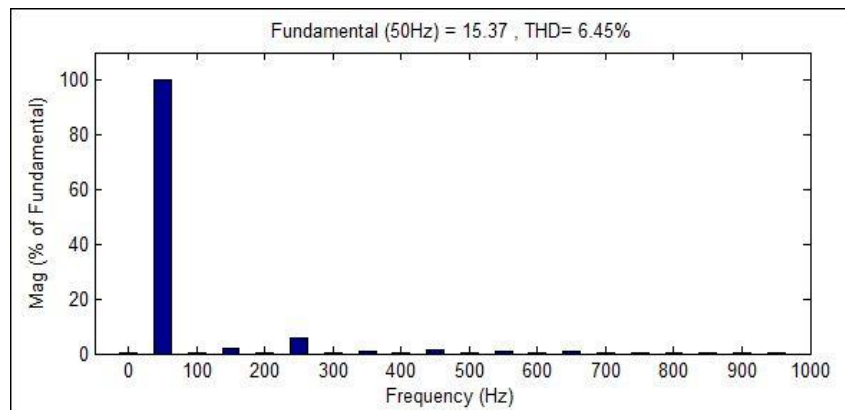


Figure (III.15) : Taux de distorsion harmonique du courant de charge

Les figures (III.14), (III.15) représentent respectivement le taux de distorsion harmonique de la tension de charge 18.21 % et le taux de distorsion harmonique du courant 6.45 % ce qui est aussi un bon taux. La tension aux bornes du condensateur sont régulée autour des valeurs souhaitées la figure (III.12).

Il est clair que le courant du condensateur contient des les parties négatives, ce qui signifie que l'énergie du condensateur peut être contrôlée par des temps et des trajets de charge et de décharge afin d'avoir une tension constante utilisée pour générer les niveaux de tension souhaités à la sortie.

### III.9. Onduleur PUC triphasé 7 niveaux :

L'onduleur en triphasé se compose de trois bras d'un onduleur monophasé, qui contient une source de tension continue et un dispositif du stockage (un condensateur) figure (III.16), Chaque bras est réglé indépendamment avec la régulation et la modulation de l'onduleur MLI monophasé.

La seule différence est le déphasage de  $2\pi/3$  entre les trois bras. La tension de source continue  $V_{bus}$  (par phase) et la valeur du condensateur utilisé dans cette simulation respectivement sont : 300V et 4000 uF.

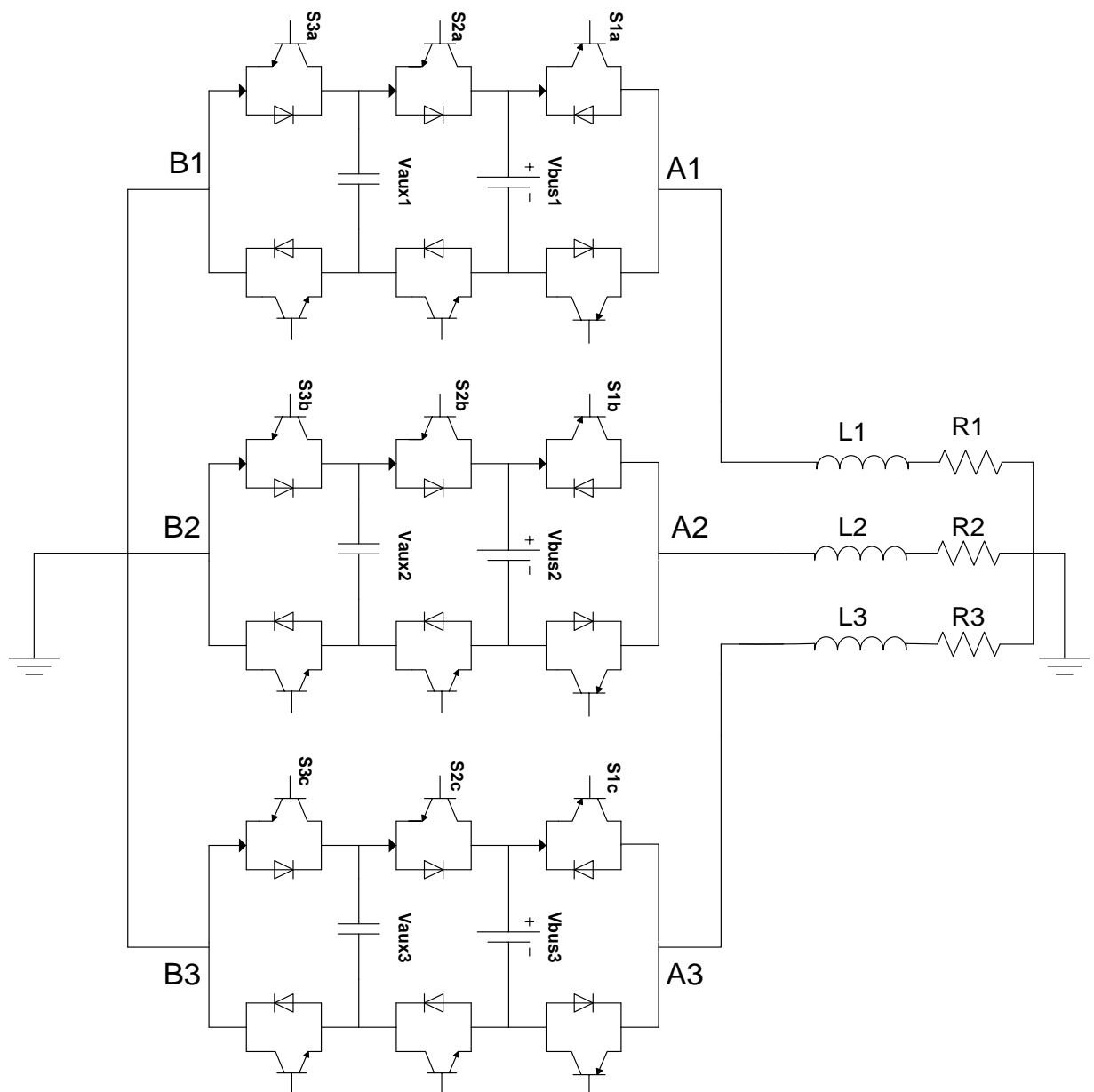


Figure (III.16) : Structure d'onduleur PUC en triphasé

### III.9.1. Commande d'onduleur PUC triphasé 7 niveaux :

La commande consiste à utiliser la commande MLI pour un bras monophasé. Cette méthode de commande permet de contrôler séparément les trois bras de l'onduleur. L'inconvénient majeur est la nécessité de l'utilisation de trois sources de tension distinctes.

Un autre inconvénient important est que cette commande ne permet pas de corriger parfaitement le déséquilibre de la charge. Néanmoins, les résultats montrent que la topologie donne des résultats stables dans les limites imposées par la régulation utilisée. Cette commande est présentée dans la figure suivante:

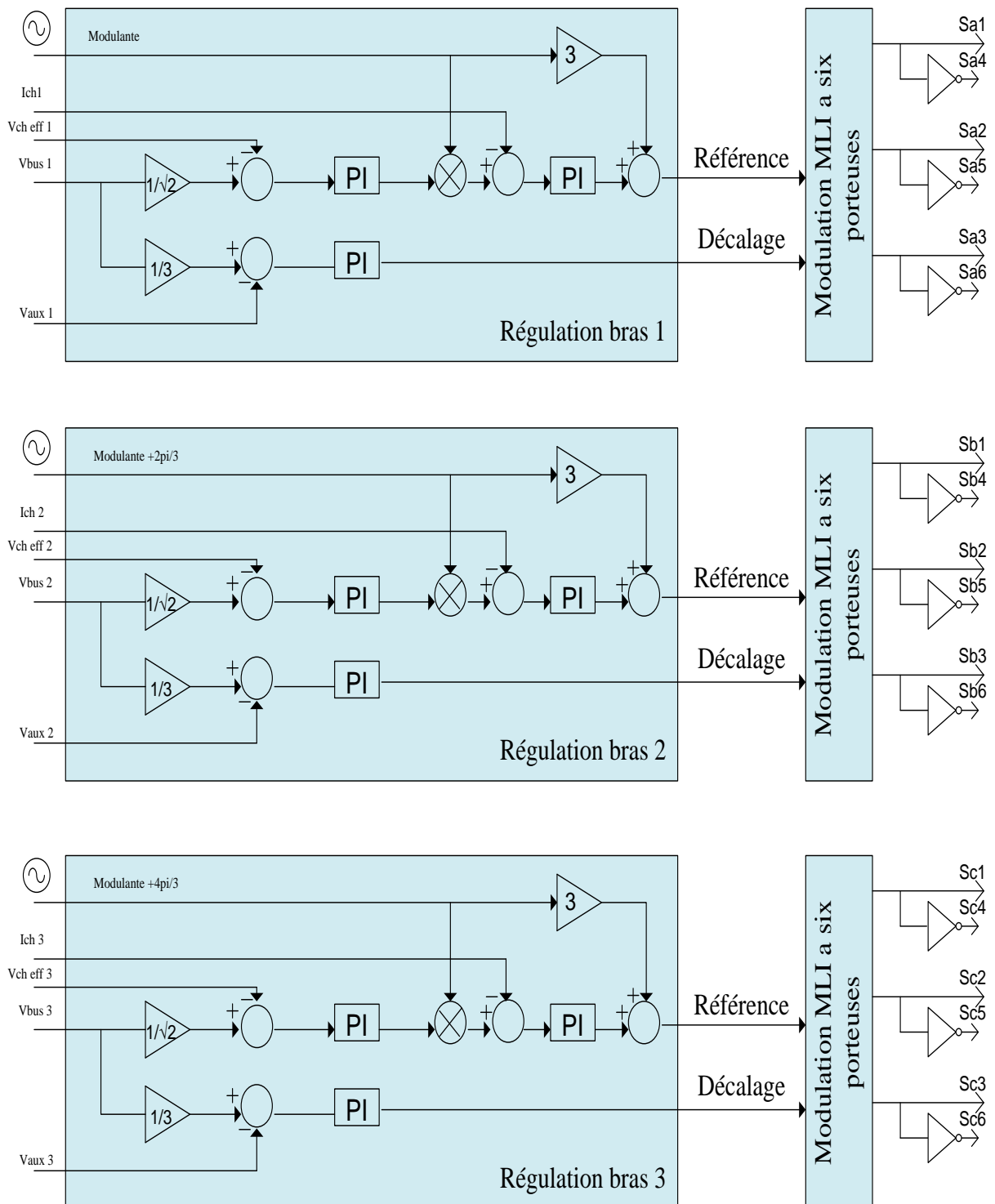


Figure (III.17) : Commande MLI de l'onduleur PUC triphasé

### III.9.2. Résultats de la simulation:

Les paramètres retenus dans la simulation sont identiques à ceux du tableau (III.2). Les figures (III.18), (III.19), (III.20) représentent respectivement les tensions, les courants de la charge et la tension phase-phase les taux de distorsion harmonique sont de 18.24 % pour la tension et de 7.30 % pour le courant.

Tension de source (par phase)	300V
Résistance de la charge	15 Ohm
Inductance de la charge	8 mH
Condensateur Bus	4000 uF
Fréquence de commutation	10 kHz

Tableau (III.3): Paramètres de simulation de l'onduleur PUC triphasé

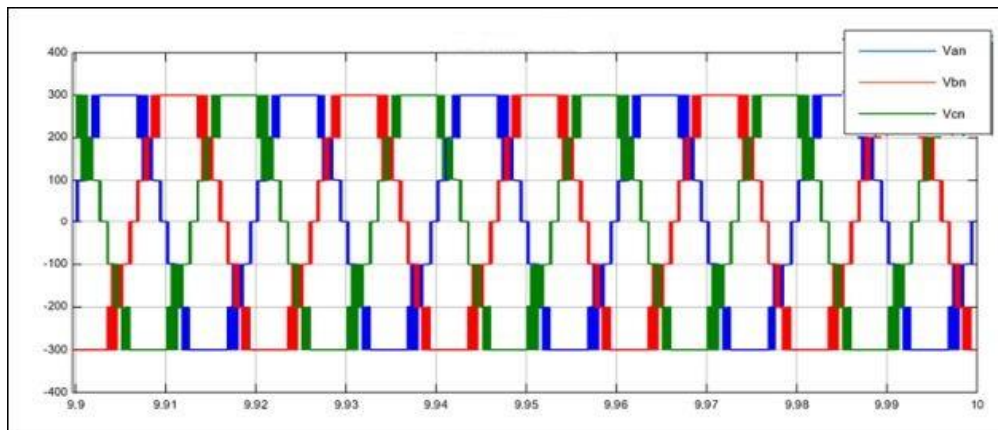


Figure (III.18) : Forme de la tension de la charge

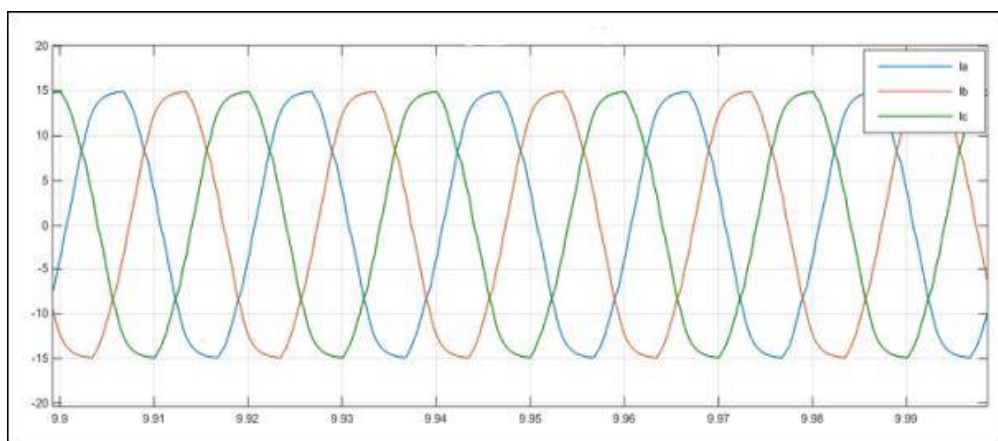


Figure (III.19) : Forme du courant de la charge

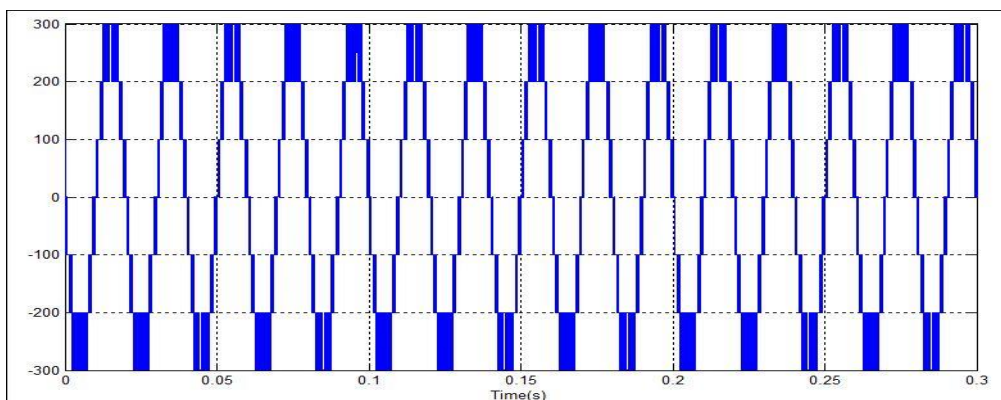


Figure (III.20): Tension phase-phase

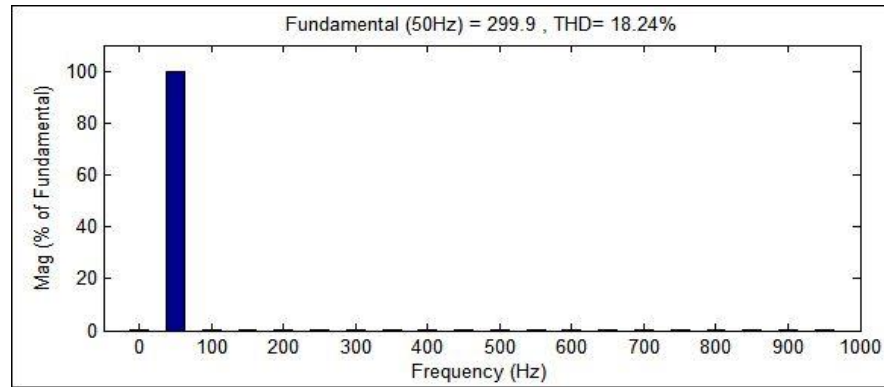


Figure (III.21): Taux de distorsion harmonique de la tension de charge

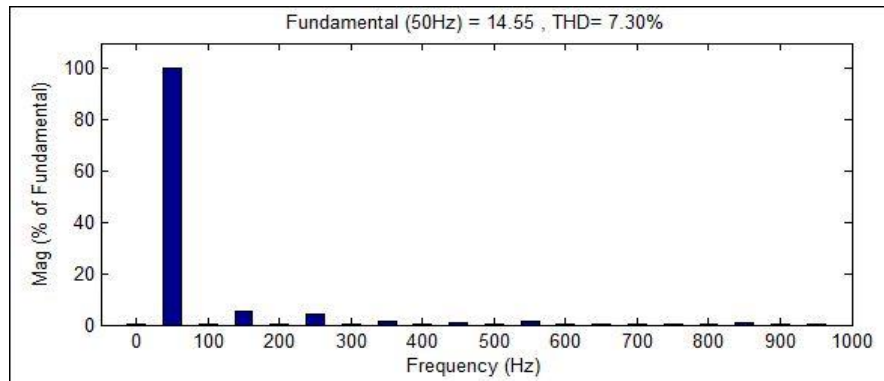


Figure (III.22) : Taux de distorsion harmonique du courant de charge

La commande MLI en boucle fermée a donné un résultat très satisfaisant, Les tensions obtenues sont réparties sur sept niveaux, Taux de distorsion harmonique de la tension de charge 18.24 %, Taux de distorsion harmonique du courant de charge 7.30 %.

### III.10. Conclusion:

Dans ce chapitre et dans la première partie nous avons donné une idée générale sur les systèmes asservis et les différents types des régulateurs, Dans cette étude, nous avons montré le régulateur proportionnel, proportionnel – intégrale et proportionnel – intégrale – dérivée.

Dans la deuxième partie on a consacré sur la commande MLI avec régulation en boucle fermée des onduleurs PUC 7 niveaux en monophasé et triphasé, Dans la structure de cet onduleur, nous utilisons dans la deuxième source de tension continue un dispositif de stockage d'énergie Nous avons ajusté la tension entre ses deux côtés égale à un tiers de la tension dans la première source, pour obtenir la tension de sortie de sept niveaux.



***CONCLUSION GÉNÉRALE***

## Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne la modélisation et la commande d'un onduleur multi niveau de type PUC (Packed U Cells). Il présente un potentiel d'efficacité énergétique très important vu qu'il permet d'obtenir cinq et sept niveaux de tensions avec seulement six interrupteurs et une source de tension continu et un condensateur. Nous avons consacré notre étude sur les onduleurs PUC de cinq et sept niveaux en monophasé et triphasé.

Dans le premier chapitre nous avons représenté la structure de l'onduleur, le principe générale de fonctionnement, les différents types et certains domaines d'applications des onduleurs, nous avons aussi vu les onduleurs de tension multi-niveaux de topologie NPC, topologie au condensateur flotteur et en cascade. Dans ces topologies nous avons trouvé plus les niveaux sont élevés, plus les composants, ce qu'il est considéré comme inconvenient.

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté la structure d'onduleur PUC cinq et sept niveaux en monophasé et triphasé qui contient deux sources de tension continu, on utilise la commande MLI en boucle ouvert en plus de leur modélisation ainsi que leur simulation dans MATLAB/Simulink. Le problème le plus important dans l'utilisation de la topologie PUC comme onduleur à plusieurs niveaux est la sortie basse tension. Il est évident, d'après la forme d'onde de la tension de sortie ( $V_{ab}$ ) de l'onduleur PUC, que l'amplitude maximale de la tension alternative est égale à l'amplitude de la source continue. En d'autres termes, l'onduleur PUC ne peut pas générer une amplitude de tension supérieure à la valeur de la source de courant continu en tant que somme entre deux liens de courant continu, ce qui ne serait donc pas un choix approprié dans les applications de moyenne ou de haute puissance. Comme solution, l'onduleur MPUC avec une configuration modifiée de PUC est proposé. La topologie MPUC, qui est capable de produire des valeurs de tension plus élevées que l'onduleur PUC.

Enfin dans le troisième et dernier chapitre a permis de rappeler les généralités sur les systèmes asservis et les différents types du régulateurs P, PI, et PID, leur principes de fonctionnement. Dans la deuxième partie nous avons traité les onduleur PUC monophasé et triphasé par l'utilisation de la commande MLI en boucle fermé avec la régulation de la tension du condensateur au tiers de la tension  $V_{bus}$  pour obtenir la tension de sortie de sept niveaux.



***BIBLIOGRAPHIES***

- [1] Mohamed Talel CHEBBAH « étude et simulation d'un convertisseur multi niveaux type puc » maîtrise en génie, concentration énergies renouvelables et efficacité énergétique. Montréal, avril 2014.
- [2] BRIGHEN Haroun, HALAIMIA Safouane, « Etude et analyse de la commande des onduleurs Multi-niveaux par MLI sinusoïdale » Mémoire Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master, Génie minier, Option : électromécanique minières, Université LARBI TEBSSI-TEBESSA, 2016.
- [3] BOUKANDOUL Abdelhalim, « Etude et Réalisation d'un Onduleur Multi niveaux à Topologie Cascadée », MEMOIRE DE MAGISTER, Université A.MIRA-BEJAIA, 2013.
- [4] TIAIBA Abd elbassit, « Utilisation d'un onduleur multi niveau pour la compensation de l'énergie électrique», Mémoire de Master de l'Université de M'sila, 2016.
- [5] Violaine Didier, « Les onduleurs des systèmes photovoltaïques», Fonctionnement, Etat de l'Art et Etude des Performances- Août 2007
- [6] M. Pinard, « convertisseurs et électronique de puissance et puissance de commande, description », mise en œuvre Dunode, Paris, ISBN 978-10-049674-7, p116.
- [7] Kamel Merabet, « Commande d'un onduleurs triphasés basée sur la dispersion de la tension Triphasée », mémoire présente à l'université du Québec a Trois-Rivières Comme Exigence Partielle de la maîtrise en génie électrique Maitrise. Université du Québec, 2011.
- [8] S. Deramond, Onduleurs, alimentations DC/AC [archive], Lycée des métiers de l'industrie Jen Dupuy, 2010.
- [9] S. Guy, B. Robert, L. Francis, Les convertisseurs de l'électronique de puissance la Conversion alternatif (volume 4). Edition tec-doc, 1995.
- [10] T. Wildi : Electrotechnique, 3eme édition, éditions de Boeck université (1999).
- [11] BOUKAROURA Abdelkader, « Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé par l'Approche Bond-Graph », Magister en Electrotechnique. Université Ferhat Abbas de Sétif, 2009.
- [12] MESBAHI Nadhir, « Contribution à l'Etude des Performances des Onduleurs Multi-niveaux sur les Réseaux de Distribution », Thèse de Doctorat, Option Réseaux Electriques. Université Badji Mokhtar Annaba, 2014.
- [13] Dr J. Y. HaGGEGE, « Technologie Générale » Support de cours, Institut Supérieur des Etudes Technologique de Radés. Département De Génie Electrique, Technologue à l'ISSET de Radés, 2003.
- [14] LAKEHAL Bilel, «Modélisation et commande d'un onduleur triphasé à structure multi-niveaux », Mémoire de fin d'étude Master en électrotechnique Université A/Mira - Bejaia
- [15] Onduleurs et harmoniques, Cahiers techniques Merlin Gerin N°159.
- [16] J. Song Manguelle, M. Veenstra, S. Mariethoz, A. Rufer, «Convertisseurs multi niveaux asymétriques pour des applications de Forte et moyenne puissance», Actes du Colloque d'Electronique de Puissance du Futur, EPF-2000, pp. 295-300, Lille, France.
- [17] OUAKAF Ahmed, « Etude comparative des onduleurs multi niveaux Cascade et NPC », Mémoire de Master en Electrotechnique, Spécialité de Commande des Systèmes Electriques. Université de M'sila, 2014.

- [18] Kambiz ARAB TEHRANI, « Conception, Synthèse et Application d'une Nouvelle Commande Robuste par PID Fractionnaire pour Les Onduleurs Multi niveaux », Pour obtenir le grade de Docteur de l'INPL, Génie Electrique, l'Institut Nationale Polytechnique de Lorraine, 2010.
- [19] Nabae, Akira, Isao Takahashi et Hirofumi Akagi, « A new Neutral-Point-Clamped PWM Inverter ». IEEE Transactions on Industry Application, vol. IA-17, n°5, (September/October), p. 518-523. 1981.
- [20] MADI Yazid, « Etude des onduleurs multi niveaux dans les chaines de production d'énergie éolienne », Mémoire de Magister en électrotechnique, Université Abderrahmane Mira-Bejaia, 2009.
- [21] Meynard, T.A. et Henry Foch, « Multi-Level Conversion High Voltage Choppers and Voltage-Source Inverters ». In Power Electronics Specialists Conference, PESC '92 Record, 23rd Annual IEEE, vol. 1, (Toledo, Jun 29-03 1992), p. 397-403. 1992
- [22] BEN ZEMAMOUCHE Houria, «Application de la MLI Vectorielle aux Onduleurs Multi niveaux à base de GTO et d'IGBT», Mémoire de Magister en électromécanique, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2010.
- [23] Lai, Jih-Sheng et Fang Zheng Peng, « Multilevel Converter: A New Breed of Power Converters». IEEE Transactions on Industry Application, vol. 32, n°3, (May/June), p.509-517. 1996.
- [24] Peng, Fang Zheng, Jih-Sheng Lai, John W. McKeever et James VanCoevering, « A Multilevel Voltage-Source Inverter with Separate DC Sources for Static Var Generation». IEEE Transactions on Industry Application, vol. 32, n°5, (September/October), p. 1130- 1138. 1996.
- [25] Jean- Sébastien MARIETHOZ, « Etude Formelle pour la Synthèse de convertisseurs Multi niveaux Asymétriques: Topologies, Modulation et Commande». Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, 2005.
- [26] Ounejjar, Youssef et Kamal Al-Haddad. 2008. « A Novel High Energetic Efficiency Multilevel Topology with Reduced Impact on Supply Network». In Industrial Electronics IECON 2008, 34th Annual Conference of IEEE, (Orlando, FL, USA, Nov 10-13 2008), p. 489-494.
- [27] Ounejjar, Youssef, Kamal Al-Haddad et Luc André Grégoire. 2010. « Packed U Cells Multilevel Converter Topology: Theoretical Study and Experimental Validation». IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, n°4, (Avril), p.1294-1306.
- [28] Kanaan, Hadi et Kamal Al-Haddad. 2005. « Évaluation Comparative des Techniques de Commande par MLI et par Hystérésis : Application au Redresseur Triphasé à Injection de Courant». Can. J. Elect. Comput. Eng., Vol. 30, N°4, (Automne), p. 215-223.
- [29] Luc-André GRÉGOIRE, «Convertisseur à Cellule Empilée faible à Taux de Distorsion Harmoniques : Conception et mise en œuvre». Mémoire Présenté à l'école de Technologie Supérieure, Université du QUÉBEC. LE 13 JUILLET 2010.
- [30] BOUTANA Walid, YEKHLFOUNE Najemddine, «Etude comparative en simulation entre un régulateur PID et un régulateur flou». Mémoire de Master en Electronique, option électronique des systèmes embarques, Université Mohammed Seddik Benyahia-Jijel Juillet 2019.

[31] BEN KHERIF Oussama, «Etude Comparative en Simulation entre un Régulateur PID Classique et un Régulateur PID Intelligent». Mémoire de Master en Electronique, Spécialité Contrôle Industriel. Université de M'sila, 2016.

[32] Jean pierre Corriou, « commande des procédé », edition Lavoisier, Paris 1996.

[33] Hani Vahedi, Mohammad Sharifzadeh, Kamal Al-Haddad, «Modified Seven-Level Pack U-Cell Inverter for Photovoltaic Applications». IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. DOI 10.1109/JESTPE.2018.

[34] Grégoire, Luc-André, Kamal Al-Haddad et Youssef Ounejjar, « A New Method of Control for Multilevel Converter Implemented on FPGA». In IEEE Electrical Power and Energy Conference. (Montreal, Qc, Canada, Oct 22-23 2009). p.1-6.

MEMOIRE DE MASTER  
DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE  
FILIERE : GENIE ELECTRIQUE  
OPTION : COMMANDE ELECTRIQUE

Proposé et dirigé par :

Mr: GHADBANE Ismail

Présenté par:

OUADOUD Haroune

**Thème : Modélisation et commande d'un onduleur  
multi niveaux type "PUC"**

**Résumé :**

*Ce mémoire entre dans le cadre des onduleurs multi niveaux, nous présentons les différents types d'onduleurs multi niveaux de puissance, L'objectif de ce travail est d'étudier la Modélisations et Commande d'un onduleur multi niveaux de type PUC (Packed U Cells), Elle a l'avantage de fournir un nombre de niveaux élevé pour un nombre de composantes réduit, Nous avons étudié ce type à cinq et sept niveaux en monophasé et triphasé, Puis nous avons vu une nouvelle structure de PUC appelée puc modifié capable de produire des valeurs de tension plus élevées que la tension d'entrée. L'onduleur PUC est piloté par la technique MLI (modulation d'largeur d'impulsion) en boucle ouverte et boucle fermé qui permet d'obtenir une tension acceptable a leur sortie. Les modèles de simulations sont développés en utilisant le logiciel MATLAB-Simulink. Les résultats de la simulation sont suffisants et soutiennent notre projet.*

**Mots clés :** Onduleur multi-niveaux PUC, Matlab/Simulink, Commande par MLI, harmonique.