REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Electrotechnique.
Spécialité : Commandes électrique.

Amélioration de la qualité des tensions d'un réseau électrique a base d'un convertisseur à cellules en u (PUC).

Présenté par :

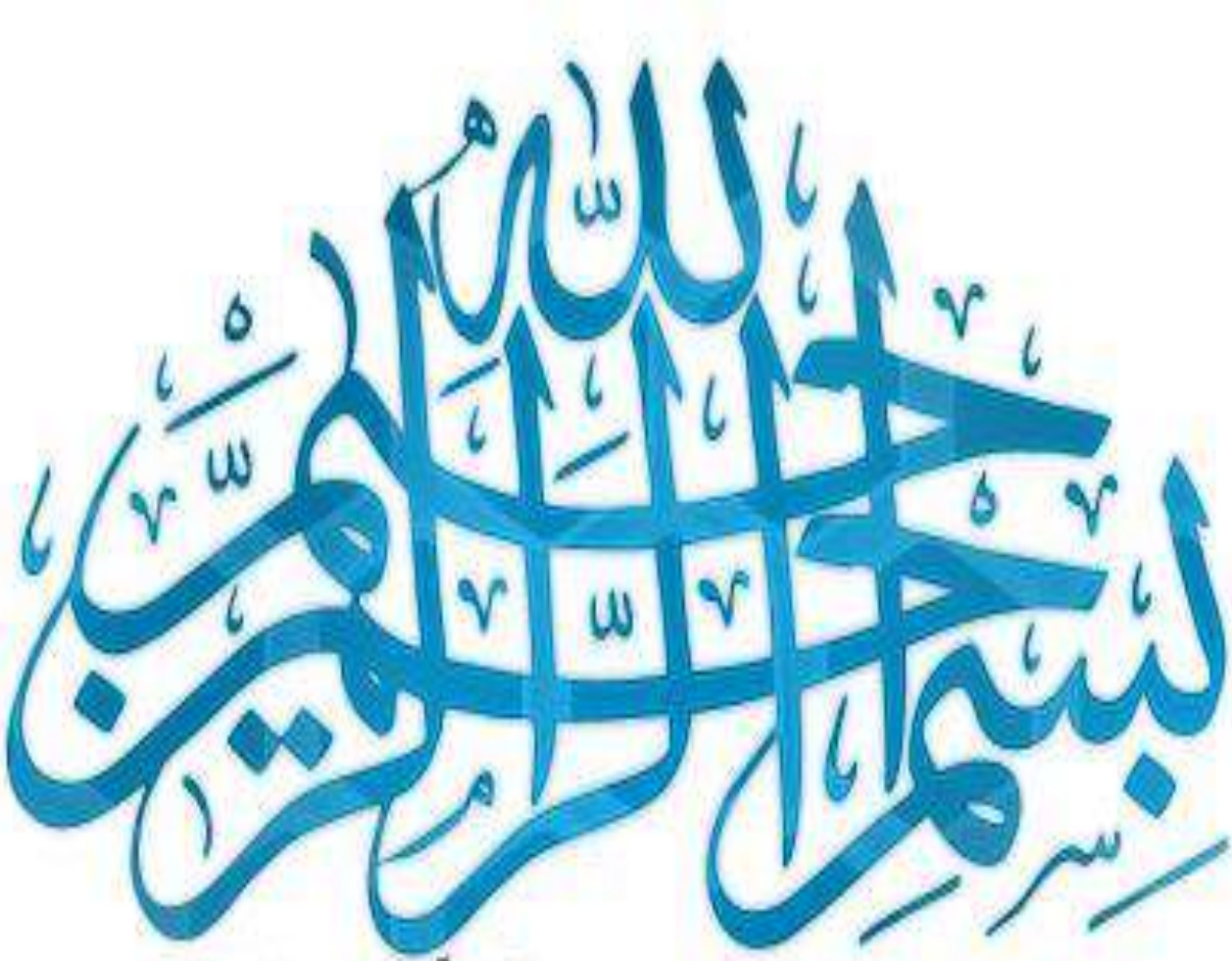
Larab Abderrahim.

Proposé et Dirigé par :

Dr.Skender Med-Redha.

Prof.Tlemcani Abdelhalim.

Promotion 2020


بسم الله الرحمن الرحيم
السلام عليكم ورحمة الله وبركاته

/

Dédicaces

Nous dédions ce mémoire à nos très chers parents pour leurs soutient morale et les sacrifices qu'ils ont endurés dans , la tendresse, l'amoure, la patience, le soutien, et l'encouragement, de ma réussite. sans eux je ne serai pas ce que je suis aujourd'hui.

Qu'allah les protège.

A nos frères A nos sœurs chacun à son nom.

A toute la famille Larab.

A nos chers amis ,

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

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

Aux habitants de Médéa .

LARAB

Remerciemment

Nous voudrions exprimer notre profonde gratitude et notre gratitude avant tout à Dieu Tout-Puissant pour la foi, la volonté, la santé, le courage et la patience qu'il nous a donnés tout au long de ces longues années.

Nous tenons à remercier notre encadreurs Mr. SKENDER Mohamed Redha et M.r Tlemcani Abdelhalim d'avoir accepté de nous encadrer et pour les efforts qu'ils ont déployé, pour nous aider, conseiller, encourager et pour ses conseils précieuses et le soutien affectif dont j''ai bénéficié et corriger avec une grande gentillesse durant toute cette période.

Nous remercions les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce dernier.

Nous n'oublions pas de remercier tous les enseignants qui ont contribué durant notre formation.

Et enfin nous remercions l'ensemble des collègues de notre promotion, ainsi à tous ceux qui nous ont aidés de prés ou de loin à accomplir ce travail.

الملخص

إن القيود الحالية على الطاقة تدفع الباحثين إلى تصميم وتحسين أجهزة إنتاج الطاقة واستهلاكها.محولات الطاقة كانت دائما خطوة هامة في عملية الطاقة.كجزء من هذه الرسالة، استخدمنا محول الخلايا U (PUC) لوظيفة الترشيح للشبكة الكهربائية،الذي يتكون من التيارات حقن لتحسين نوعية الفولتية، مع ضوابط متقدمة.يمكن استخدام هذا المحول كمعدّل أو عاكس.كما تم اختباره في ثلاث مراحل التحويل ، وكذلك عامل تصفية نشط. كجزء من هذا العمل،قمنا بمحاكاة هذا في بيئة ماتلاب/سيمولينك.وقد تم اختبار عدة أوامر، كما تم عرض مزاياها وسلبياتها في هذا التقرير.

الكلمات الرئيسية: محول الخلايا U (PUC) ، تصفية نشطة ، Matlab / Simulink.

Résumé

Les contraintes énergétiques actuelles poussent les chercheurs à concevoir et optimiser des dispositifs de production et de consommation d'énergie. Les adaptateurs d'alimentation ont toujours été une étape importante dans le processus énergétique. Dans le cadre de ce message, nous avons utilisé un convertisseur à cellules en U (PUC) pour la fonction de filtration du réseau électrique, qui consiste en des courants d'injection afin d'améliorer la qualité des tensions, avec des commandes avancées. Ce convertisseur peut être utilisé comme modificateur ou onduleur. Il a également été testé en conversion triphasée, ainsi qu'en filtre actif. Dans le cadre de ce travail, nous avons simulé cela dans l'environnement Matlab / Simulink. Plusieurs commandes ont été testées et leurs avantages et inconvénients sont présentés dans ce rapport.

Mots clés : Convertisseur à cellules en U (PUC), Filtrage actif, Matlab/Simulink.

Abstract

Current energy constraints are pushing researchers to design and optimize energy production and consumption devices. Power adapters have always been an important step in the energy process. Within the framework of this message, we used a U-cell converter (PUC) for the filtration function of the electrical network, which consists of injection currents in order to improve the quality of the voltages, with advanced controls. This converter can be used as a modifier or inverter. It has also been tested in three-phase conversion, as well as in active filter. As part of this work, we simulated this in the Matlab / Simulink environment. Several commands have been tested and their advantages and disadvantages are presented in this report.

Keywords: U-cell converter (PUC) , Active filtering , Matlab / Simulink.

TABLE DES MATIERES

Liste des Figures……(i)
Liste des Tableaux…… (ii)
Liste de Notations …… (iii)
Introduction Générale…… 1

CHAPITRE I

Généralité sur de la Qualité de l'Energie Electrique.

I.1. INTRODUCTION……3
I.2. DEGRADATION DE LA QUALITE DE L'ENERGIE ELECTRIQUE…… 4
I.2.1. Creux de Tension……4
I.2.2. Déséquilibre du Système Triphasé…… 5
I.2.3. Fluctuations de Tension (Flicker) …… 6
I.2.4. Harmoniques…… 6
I.2.5. Inter-Harmoniques…… 7
I.3. SOLUTIONS POUR AMELIORER LA QUALITE DE L'ENERGIE …… .8
I.3.1. Les Creux de Tension…… 8
I.3.2. Déséquilibre du Système Triphasé…… 8
I.3.3. Fluctuations de Tension (Flicker)…… 9
I.3.4. Dépollution des Harmonique…… 9
I.3.4.1. Solutions traditionnelles…… 9
a). Action sur la structure de l'installation…… 9
b). Augmentation de la puissance de court-circuit …… 9
c). Placement d'une inductance de ligne…… 10
d). Rééquilibrage des courants du réseau électrique ……10
e). Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique …… …10
f). Compensation de la puissance réactive ……10
g). Les filtres passifs……11
g.1). Classification des filtres passifs …… 11
g.2). Filtre passif série…… 11
g.3). Filtre passif parallèle…… 11
g.4). Les avantages et les inconvénients des filtres passifs …… 13
I.2.4.2. Solutions modernes …… 14
a). Redresseur dodécaphasé …… 14
b). Les filtres actifs …… 14
b.1). Classification des filtres actifs …… 16
b.2). Filtre actif parallèle…… 16
b.3). Filtre actif série…… 17
b.4). Filtre actif universelle (UPQC) …… 17
b.5). Les avantages et les inconvénients du filtre actif …… 18
c). Filtre hybride …… 18
c.1). Association d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif parallèle …… 19
c.2). Association d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif série …… 19
c.3). Association d'un filtre actif série et un filtre passif parallèle…… 20
c.4). Association d'un filtre actif série et un filtre passif parallèle…… 20
I.4. COMPARAISON DES DIFFERENTS TYPES DE PERTURBATIONS……21
I.5. CONCLUSION …… 22

CHAPITRE II

Revue de littérature : Les Convertisseurs Multi-niveaux.

II.1. INTRODUCTION 23
II.2. STRUCTURES DE CONVERSION D'ÉNERGIE MILTI NIVEAUX 24
II.2.1. *Convertisseur Clampé le Neutre (NPC)* 24
II.2.2. *Convertisseur milticellulaire série* 28
a). *Onduleur multicellulaire série 3 niveaux* 28
b). *Principe de base d'un convertisseur multicellulaire série* 30
II.2.3. *Convertisseur avec des sources tensions indépendants* 34
II.3. TECHNIQUES DE COMMANDE 36
II.3.1. *Commande linéaires* 36
II.3.2. *Commande non linéaires* 38
II.4. TECHNIQUES DE MODULATION 39
II.4.1. *Modulation de largeur d'impulsion* 40
II.4.2. *Modulation vectoreille* 42
II.4.3. *Modulation par hystérésis* 43
II.5. CONCLUSION 45

CHAPITRE III

Les Convertisseurs PUC.

III.1. ÉTUDE THÉORIQUE 46
III.2. CONVERTISSEUR PUC A SEPT NIVEAUX 48
III.2.1. *Fonctionnement et modes opératoire* 48
III.2.2. *modulation proposée* 52
III.3. CONVERTISSEUR PUC MONOPHASÉ 54
III.3.1. *Foctionnement en onduleur* 54
a). *Topologie* 54
b). *Commande utilisée* 55
a). *Résultats de la simulation* 57
III.3.2. *Fonctionnement en redresseur* 59
a). *Topologie* 59
b). *Commande utilisée* 60
a). *Résultats de la simulation* 62
III.4. CONVERTISSEUR PUC TRIPHASÉ 68
III.4.1. *Introduction* 68
III.4.2. *Fonctionnement en mode onduleur* 68
a). *Présentation de la Topologie* 69
b). *Commande utilisée* 72
a). *Résultats de la simulation* 71
III.4.3. *Fonctionnement et mode redresseur* 74
II.5. CONCLUSION 74

CHAPITRE IV

Filtrage Actif Utilisant La Topologie PUC.

IV.1. INTRODUCTION **75**

IV.2. FILTRE ACTIF MONOPHASÉ **75**

IV.2.1. *Présentation de la topologie* **75**

IV.2.2. *commande utilisée* **76**

IV.2.3. *Résultats* **77**

IV.3. FILTRE ACTIF TRIPHASÉ **79**

IV.3.1. *Présentation de la topologie* **79**

IV.3.2. *commande utilisée* **81**

IV.3.3. *Résultats* **82**

IV.4. CONCLUSION **87**

Conclusion Générale **88**

Annexe **90**

Bibliographie **98**

LISTES DES FIGURES

Figure I.1 : Creux et coupures de tension 4
Figure I.2 : Déséquilibre du système triphasé de tension 5
Figure I.3 : Fluctuations de tansion 6
Figure I.4: Harmoniques 7
Figure I.5 : Filtre passif série 11
Figure I.6 : Filtre passif parallèle 12
Figure I.7 : Filtre amorti 12
Figure I.8 : Filtres résonants agissant sur plusieurs rangs harmoniques 13
Figure I.9 : Pont dodécaphasé 14
Figure I.10 : Schéma généralisé pour le filte actif 15
Figure I.11 :Principe de configuration de filtre actif parallèle 16
Figure I.12 : Principe de configuration de filtre actif série 17
Figure I.13 : Principe de configuration de filtre actif universel « UPQC » 18
Figure I.14 : Filtre actif parallèle avec filtre passif parallèle 19
Figure I.15 : Filtre actif parallèle avec filtre passif série 19
Figure I.16 : Filtre actif série avec filtre passif parallèle 20
Figure I.17 : Filtre actif parallèle avec filtre passif parallèle 20

Figure II.1 : Onduleur NPC 3 niveaux 24
Figure II.2 : Configurations possibles du convertisseur NPC 26
Figure II.3 : Bras d'onduleur à structure NPC à N niveaux 27
Figure II.4 : Bras d'onduleur à structure multicellulaire à N niveaux 28
Figure II.5 : Convertisseur multicellulaire série (a) représentation1,(b) représentation2 29
Figure II.6 : Quatre configurations pour un convertisseur multicellulaire 3 niveaux 30
Figure II.7 : Hacheur dévolteur à 2 cellules 30
Figure II.8 : Les configerations possibles d'un hacheur dévolteur à 2 cellules 31
Figure II.9 : séquences de commande et la tension de sortie pour différents rapports cycliques et différents déphasages entre les commandes des cellules 32
Figure II.10 : Bras de convertisseur multiniveaux monophasé avec sources detensions indépendantes 35
Figure II.11 : Régulateur PID 37
Figure II.12 : Commande par linéarisation exacte 38
Figure II.13 : Commande par mode de glissement (beckmans et Sigimondi) 39
Figure II.14 : Comparaison entre le signal de référence et le signal triangulaire. 40
Figure II.15 : Modulation MLI 5 niveaux 41
Figure II.16 : Types de modulations MLI 42
Figure II.17 : Modulation vectorielle. 43
Figure II.18 : Principe de commande par Hystérésis. 44
Figure II.19 : Modulation hystérésis. 44

Figure III.1 : Cellule d'un convertisseur PUC 47
Figure III.2 : Convertisseur PUC 7 niveaux 47
Figure III.3 : Convertisseur PUC à sept niveaux. 48
Figure III.4 : Tensions positives produites par le convertisseur PUC à sept niveaux.. 50
Figure III.5 : Tensions négatives produites par le convertisseur PUC à sept niveaux. 51
Figure III.6 : Technique de modulation proposée. 52
Figure III.7 : MLI sinusoïdale à sept niveaux. 53
Figure III.8 : Forme d'onde du signal S. 53
Figure III.9 : Schéma de l'onduleur PUC 7 niveaux 55
Figure III.10 : Commande MLI 56

Figure III.11 : comparaison entre Le signal de référence et les six porteuses 56
Figure III.12 : Signal modulé obtenu 57
Figure III.13 : Formes d'ondes de la tension, courant et tension du condensateur 58
Figure III.14 : THD de la tension de charge 58
Figure III.15 : THD du courant de charge 59
Figure III.16 : Redresseur PUC 7 niveaux 60
Figure III.17 : Régulation MLI pour le redresseur PUC 61
Figure III.18 : Commande par Hystérésis 62
Figure III.19 : Tension, Courant et tensions aux bornes des condensateurs 63
Figure III.20 : Redresseur PUC MLI avec variation de charge 64
Figure III.21 : Taux de distorsion harmonique de la tension de source 64
Figure III.22 : Taux de distorsion harmonique du courant de source 65
Figure III.23 : Formes du courant et de la tension pour la commande par Hystérésis 66
Figure III.24 : Tensions aux bornes des condensateurs 66
Figure III.25 : Taux de distorsion harmonique de la tension 67
Figure III.26 : Taux de distorsion harmonique du courant 67
Figure III.27 : Redresseur PUC hystérésis avec variation de charge 68
Figure III.28 : Onduleur PUC triphasé 69
Figure III.29 : Commande MLI de l'onduleur PUC 70
Figure III.30 : Tensions et courants de la charge 71
Figure III.31 : Tension phase-phase 72
Figure III.32 : Tension aux bornes du condensateur C1 72
Figure III.33 : Taux de distorsion harmonique de la tension de charge 72
Figure III.34 : Taux de distorsion harmonique du courant de charge 73
Figure III.35 : Comportement lors de la variation de charge 73

Figure IV.1 : Filtre actif PUC monophasé 76
Figure IV.2 : Commande du filtre actif monophasé PUC 77
Figure IV.3 : Courant de source avec compensation et sans compensation 78
Figure IV.4 : Taux de distorsion harmonique sans compensation. 78
Figure IV.5 : Taux de distorsion harmonique avec compensation. 79
Figure IV.6 : Filtre actif triphasé PUC 80
Figure IV.7 : Régulation pour le filtre actif triphasé PUC 81
Figure IV.8 : Taux de distorsion harmonique du courant de source 82
Figure IV.9 : Formes des signaux pour le filtre actif triphasé 83
Figure IV.10 : Tensions simple et composée aux bornes du filtre 84
Figure IV.11 : Simulation du filtre actif triphasé PUC avec paramètres variables 85
Figure IV.12 : Tensions aux bornes des condensateurs C1 et C2 du premier bras. 85
Figure IV.13: Courants de sources pendant les différentes phases de la simulation 86

LISTES DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Les solutions des équipements spécifiques pour les différents types de perturbations 21

Tableau II.1 : Phases de fonctionnement de l'onduleur NPC 3 niveaux 26

Tableau III.1 : Tableau de commutation du convertisseur PUC 47
Tableau III.2 : Table de commutation. 49
Tableau III.3 : Table de correspondance. 54

LISTE DE NOTATIONS

$U1_i$	:	Composante inverse de tension .
$U1_o$	:	Composante homopolaire de tension.
$U1_d$	:	Composante directe de Tension .
ΔU_i	:	Rapport de la composante inverse sur la composante directe.
ΔU_o	:	Rapport de la composante homopolaire sur la composante directe.
V_s	:	Tension de source .
i_s	:	Courant de source .
R_s	:	Résistance de court circuit de réseau.
L_s	:	Inductance de court circuit de réseau.
R_c	:	Résistance de ligne.
L_c	:	Inductance de ligne.
R_d	:	Résistance de la charge.
L_d	:	Inductance de la charge.
R_f	:	Résistance de filtre de sortie.
L_f	:	Inductance de filtre de sortie.
V_f	:	Tension de filtre.
i_f	:	Courant de filtre.
i_l	:	Courant de charge.
V_c	:	Tension de harmonique.
α	:	Le différent rapport cyclique.
δ	:	Le différent rapport déphasage.
PID	:	Lerégulateur proporsionnel intégral dérivé.
K_p, k_i, K_d	:	Les gains du correcteur PID.
MLI	:	Modulation de largeur d'impulsion.
PUC	:	La convertisseur à cellules en U .
V_{bus}	:	Tension aux bornes de Cbus.
V_{aux}	:	Tension aux bornes de Caux.
E	:	La tension de source .
f_{com}	:	La fréquence de commutation.
R	:	La résistance de la charge.
L	:	L'inductance de la charge.
C	:	La condensateur Bus .
THD	:	Taux de Distorsion Harmonique.
IGBT	:	Insolâtes Gâte Bipolaire Transistor.
FAP	:	Filtre actif parallèle.
FAS	:	Filtre actif série.

P	**:**	Puissance instantané active.
Q	**:**	Puissance instantané réactive.
PLL	**:**	Phased Locked Loop.
NPC	**:**	Neutral Point Clamped.
IEEE	**:**	Institute of Electrical and Electronic Engineers.
AC	**:**	Alternative Current.
DC	**:**	Direct Current.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

En se propageant à travers les réseaux électriques, les tensions et les courants sont idéalement des ondes sinusoïdales à la fréquence fondamentale du réseau. Cependant, selon les travaux de recherches publiées dans la littérature, nous constatons que la qualité de l'onde électrique est loin d'être parfaite, à cause d'une large utilisation de charges non linéaires, telles que des redresseurs à diodes ou thyristors, des alimentations à découpage, etc.

Pour réduire ces perturbations et ainsi améliorer la qualité de l'énergie distribuée, il existe plusieurs solutions, parmi elles: Les filtres passifs, ont été utilisés pour éliminer les harmoniques de courants et améliorer le facteur de puissance. Ces solutions sont très simples, à bas prix, mais les filtres passifs comme solution traditionnelle aux problèmes des harmoniques s'accompagnent de différents inconvénients, donc ils ne répondent pas toujours correctement aux résultats voulues.

C'est pourquoi la solution des filtres actifs de puissance s'est largement développée cette dernière décennie. Ils compensent, en temps réel, les perturbations dues à une charge non linéaire. Néanmoins, la commande des filtres actifs est délicate. Parmi les filtres actifs les plus utilisés, il existe le filtre actif parallèle, qui présente un filtre actif connecté en parallèle avec le système polluant. Le fonctionnement de filtre actif parallèle est assuré par deux blocs : le premier, génère les signaux de référence de commande et le second, exécute le procédé de commande. Ainsi, la qualité de filtrage sera déterminée par la qualité de contrôle de ces deux blocs.

Dans ce projet, nous nous intéressons à deux types de conversion : l'ondulation et le redressement. La non-linéarité de ces structures de conversion, ainsi, causent la pollution du réseau électrique. 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 multiniveaux qui ont l'avantage d'effectuer la conversion en évitant un taux de distorsion harmonique élevé.

La topologie PUC, sujet de ce mémoire, est une topologie de conversion multiniveaux. Elle a été mise au point en 2010 par Ounejjar et Al-Haddad. Elle a l'avantage de fournir un nombre de niveaux élevé pour un nombre de composantes réduit, ce qui la privilégie par rapport à ses concurrentes comme la topologie à point neutre calé (NPC), la topologie à capacités flottantes ou encore le convertisseur de Vienna.

- Dans ce contexte, ce mémoire traite des différents aspects concernant la qualité de l'énergie électrique. Nous examinons les perturbations affectant la qualité de l'onde, les normes pour limiter l'émission des harmoniques et les principaux moyens de mitigation usuels. Nous développons des algorithmes et stratégies de commande des dispositifs de mitigation.Utiliser le convertisseur PUC pour réaliser la fonction de filtrage d'un réseau électrique.qui consiste à injecter des courants afin d'améliorer la qualité des tensions. Avec des commandes avancées. Le travail présenté comporte cinq chapitres organisés comme suit :
- Dans le premier chapitre, nous abordons en premier lieu les différents problèmes affectant la qualité de l'énergie électrique, ce qui tend à montrer leurs origines et leurs conséquences sur les installations. Nous focalisons le point sur celui des harmoniques, compte tenu de sa gravité avec la prolifération des charges non-linéaires. Ensuite nous passons aux moyens de luttes et les différentes solutions traditionnelles et modernes de dépollution harmonique existantes.
- Dans le deuxième chapitre, nous abordons en l'état de l'art de tout ce qui se rapporte à ce travail tel que les convertisseurs multiniveaux,aussi les principales des convertisseurs multicellulaires série a été présenté, quant à elles, utilisent la mise en série des interrupteurs, assurant la répartition de la contrainte en tension du convertisseur sur plusieurs cellules de commutation.
- Dans le troisième chapitre, sera consacré à la revue de la littérature concernant les différentes topologies PUC, et aux différentes méthodes de régulation et de modulation. nous aborderons le convertisseur PUC 7 niveaux en tant que redresseur et en tant qu'onduleur monophasé. Nous avons focalisons utilisé deux méthodes de commande, la commande par MLI et la commande par Hystérésis. Toutes les topologies (onduleur et redresseur) et les commandes utilisées (modulation à largeur d'impulsions et hystérésis).
- Dans Le quatrième chapitre, nous décrivons la structure du filtre actif monophasé et triphasé.sera consacré à la revue de la littérature concernant les différentes topologies PUC. Ensuite,nous aborderons l'étude de la qualité des tensions d'un réseau électrique a base d'un convertisseur à cellules en U (PUC). Les stratégies de commande présentées numériquement sur l'environnement Matlab/Simulink.

- Enfin, notre travail sera clôturé par une conclusion et quelques perspectives.

Chapitre I

GÉNÉRALITÉ SUR DE LA QUALITÉ DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

II.1. Introduction :

La qualité de l'énergie électrique, au niveau de la distribution, se réfère largement à maintenir une tension sinusoïdale, d'une amplitude et fréquence nominales [BEN-07] [NEK-14]. De ce fait la notion « qualité de l'énergie » est devenue très importante, en raison de l'utilisation à grande échelle de systèmes à base d'électronique de puissance à la fois par les utilisateurs et les fournisseurs [DRI-02] [NEK-14]. L'énergie électrique doit d'être délivrée sous forme d'un système de tensions sinusoïdales triphasées et équilibrées. Ce système de tensions est caractérisé par :

- ✓ L'égalité de l'amplitude des trois tensions.
- ✓ La fréquence.
- ✓ La forme d'onde qui doit être sinusoïdale.
- ✓ La symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et leurs déphasages relatifs.

I.2. Degradation de la qualité de l'énergie électrique :

Les perturbations de tension sont la cause la plus fréquente d'un large éventail de perturbations dans les systèmes d'alimentation industriels et commerciaux [WAN-04] [NEK-14]. Les perturbations peuvent être transitoires, de courte durée, de longue durée ou périodiques.

Toutefois, les problèmes les plus souvent rencontrés sont:

- ✓ Creux de tension;
- ✓ Déséquilibre du système triphasé.
- ✓ Fluctuations de tension (ou flicker).
- ✓ Harmoniques et inter-harmoniques.

N'importe quelle perturbation affecte un ou plusieurs paramètres suivants du système:

- ✓ Amplitude de tension ou de courant.
- ✓ Fréquence.
- ✓ Contenu spectral.

Deux facteurs ont une influence directe sur l'effet de la perturbation [NEK-14] [MEN-03]:

- ✓ Durée de la perturbation.
- ✓ Impédance de la source.

I.2.1. Creux de tension :

Un creux de tension est une diminution de la tension à une valeur située entre 1 et 90% de la tension nominale et d'une durée allant de 10 ms jusqu'à 1 minute. Une coupure brève est un cas particulier du creux de tension voir la **figure.I.1.**

Sa profondeur est supérieure à 99% ; elle est caractérisée uniquement par sa durée (inférieure à 3 minutes). Les coupures longues sont supérieures à 3 minutes [ETX-03]. Les creux de tension sont dus à l'apparition de défauts sur l'installation ou sur le réseau de distribution. Les coupures brèves sont généralement la cause de manœuvres des automatismes des réseaux de distribution (réenclencher, isolations de défaut) [CHA-09].

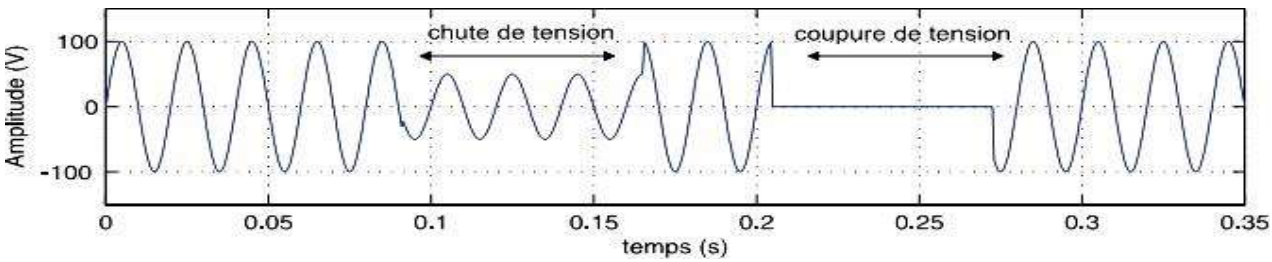


Figure I.1: *Creux et coupures de tension*

- **Conséquences** : perturbation ou arrêt du procédé, pertes de données, données erronées, ouverture de contacteurs, verrouillage de variateurs de vitesse, ralentissement ou décrochage des moteurs et extinction de lampes à décharge [GHE-08].

I.2.2. Déséquilibre du systéme triphasé :

Trois grandeurs de même nature et de même pulsation forment un système triphasé équilibré lorsqu'elles ont la même amplitude et lorsqu'elles sont déphasées de ±120°. Lorsque les grandeurs ne vérifient pas ces conditions de phase et d'amplitude, on parle d'un système triphasé déséquilibré ce qui est bien démontré dans la **figure.I.2** [IGN-06]. Le degré de déséquilibre est défini en utilisant la méthode des composantes de Fortescue par le rapport de la composante inverse ($U1_i$) (ou homopolaire ($U1_o$)) du fondamental à celui de la composante directe($U1_d$) du fondamental.

$$\Delta U_i = \frac{|U1_i|}{|U1_d|} \quad \text{(I.1)}$$

Et

$$\Delta U_o = \frac{|U1_o|}{|U1_d|} \quad \text{(I.2)}$$

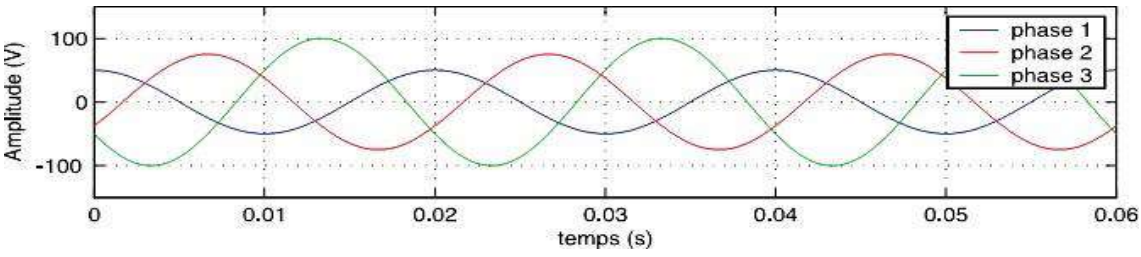


Figure I.2: *Déséquilibre du système triphasé de tension*

- **Conséquences**: couples moteurs inverses (vibrations) et sur-échauffement des machines asynchrones [GHE-08].

I.2.3. fluctuations de tension (Flicker):

Les variations de tension sont des variations de la valeur efficace ou de la valeur crête d'amplitude inférieure à 10 % de la tension nominale et les fluctuations de tension sont une suite de variations de tension ou des variations cycliques ou aléatoires de l'enveloppe d'une tension dont les caractéristiques sont la fréquence de la variation et l'amplitude [GAT-12]. Le terme Flicker est dérivé de l'impact visible sur les lampes (papillotement de la lumière) dû à la fluctuation de la tension. Parmi les causes les plus fréquentes de la fluctuation de la tension dans les réseaux de transmission et distribution sont les fours à arc [ARO-98].

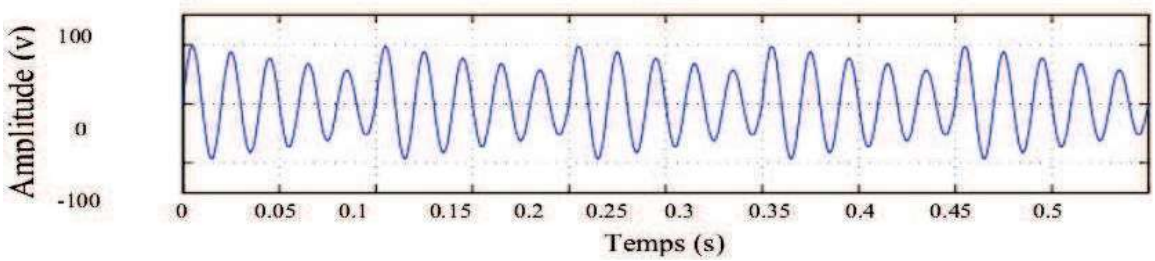


Figure I.3: *Fluctuations de tension*

- **Conséquences** : Fluctuation de la luminosité des lampes (papillotement ou flicker) [GHE-08].

I.2.4. Harmoniques :

Les principales sources d'harmoniques sont les dispositifs contenant des éléments qui commutent (les convertisseurs statiques), et les dispositifs à caractéristique tension- courant non linéaire (fours à arc inductances saturées, transformateurs, machines tournantes, etc.) [IGN-06]. Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences quelconques. Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau [FET-06].

- **Conséquences**: surcharges (du conducteur de neutre, des sources…), déclenchements intempestifs, vieillissement accéléré et dégradation du rendement [GHE-08].

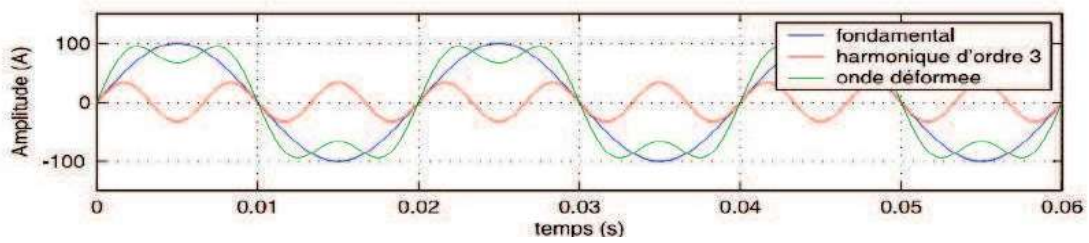


Figure I.4: *Harmoniques*

- **Effets des harmoniques :** Bien que les susceptibilités des différents appareils à l'égard des harmoniques soient très diversifiées, on distingue schématiquement deux sortes d'effets possibles:

  - *Les effets quasi instantanés:*sur certains types d'appareillage, tels que l'électronique de puissance, calculateurs, relais, systèmes de contrôle et régulation, etc., la présence d'harmoniques sur les signaux provoque le déplacement du passage par zéro et des modifications de la valeur de crête de l'onde [ETC-03].

  - *Les effets à terme :* Dans les machines tournantes, les transformateurs et les condensateurs, ils se manifestent par des échauffements supplémentaires ; ce qui entraine la destruction du matériel ou plus fréquemment une diminution de leur durée de vie par surcharge thermique [BER-06].

I.2.5. Inter-Harmoniques :

Les inter-harmoniques sont superposées à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence du réseau [GAT-12] Les inter-harmoniques sont souvent produites par des convertisseurs statiques de fréquence, les cycloconvertisseurs, les moteurs asynchrones et les dispositifs à arc électrique [ARO-98].

- **Conséquences :** perturbation des signaux de tarification et papillotement (Flicker) [GHE-08].

I.3. Solutions pour ameliorer la qualité de l'énergie :

Le choix de la solution la plus appropriée dépend des caractéristiques de l'offre au niveau du point de connexion, les exigences de la charge et de l'économie. Il existe deux possibilités pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique, l'une est appelée conditionnement de la charge qui consiste à rendre les équipements du processus industriel moins sensibles aux problèmes de la qualité de l'énergie, en leur permettant ainsi de les surmonter, l'autre possibilité réside dans l'installation d'un dispositif de conditionnement capable de minimiser ou empêcher les perturbations provenant du réseau [NEK-14].

I.3.1. Les Creux de tension :

Pour les creux de courte durée, peu profondes, ils peuvent être atténués par l'amélioration des caractéristiques de la tolérance d'équipements, pour les creux de longue durée, ils peuvent être évités par le changement et/ou le fonctionnement de la structure de système d'alimentation. Une autre solution consiste à étendre un convertisseur électronique de puissance, utilisé pour connecter un système de grille de production décentralisée, avec un compensateur série. Le compensateur série est capable de restaurer la tension au niveau du côté de la charge en cas de chute de tension [MAC-04] [NEK-14].

I.3.2. Déséquilibre du systéme triphasé :

Puisque les courants déséquilibrés dans un réseau électrique basse tension résultent généralement des charges monophasées et biphasées mal réparties, le système de distribution électrique peut être équilibré en changeant la configuration du système par des opérations manuelles et automatiques de commutation d'alimentation pour transférer des charges entre les circuits [NEK-14].

I.3.3. fluctuations de tension (Flicker):

Pour les fluctuations de la tension, les solutions consistent à changer le mode d'éclairage; installer des alimentations sans interruption; modifier le perturbateur (le changement du mode de démarrage des moteurs à démarrages fréquents permet par exemple de réduire les surintensités), augmenter la puissance de court-circuit; éloigner électriquement la charge perturbatrice des circuits d'éclairage [SAK-07] [NEK-14].

I.3.4. Dépollution des Harmoniques :

Les systèmes d'électronique de puissance utilisée pour l'amélioration de la qualité de l'énergie sont essentiellement des systèmes de compensation. Ils travaillent en combinaison avec le réseau, en superposant leur énergie à celle de ce dernier. Deux types de solutions sont envisageables. La première consiste à utiliser des convertisseurs statiques peu ou moins polluants, tandis que la seconde réalise un filtrage des composantes harmoniques.Deux groupes de solutions de dépollution pour compenser toutes les perturbations peuvent être distingués: les solutions traditionnelles et les solutions modernes [NEK-14].

I.3.4.1. Solutions traditionnelles :

a) Action sur la structure de l'installation :

Il est souhaitable d'alimenter un grand pollueur par un transformateur à part, afin de le séparer d'un récepteur sensible. Face à un pollueur moyen il est préférable d'effectuer l'alimentation par des câbles distincts au lieu de les connecter en parallèle. Une distribution en étoile permet le découplage par les impédances naturelles et/ou additionnelles [NEK-14].

b) Augmentation de la puissance de court-circuit :

La puissance harmonique augmente lorsque la puissance de court circuit diminue si l'on ne prend pas en compte les phénomènes de résonance [DEF-08]. La diminution de l'impédance totale en amont de la charge non-linéaire permet de réduire la tension créée par les harmoniques de courant, et donc de diminuer letaux de distorsion harmonique en tension au point de raccordement. En revanche, les courants

harmoniques ne sont pas atténués [GOU-97].

c) Placement d'une inductance de ligne :

Dans le but de limiter la prolifération des effets nocifs dans le réseau, il est possible de limiter les courants harmoniques de certains convertisseurs [EPA-10]. Cette solution est utilisée pour les entraînements à vitesse réglable (variateurs de vitesse) et les redresseurs triphasés. Elle consiste à introduire une inductance série en amont d'une charge non linéaire. La distorsion en courant est divisée approximativement par deux [BER-00].

d) Rééquilibrage des courants du réseau électrique :

Répartition égale des charges sur les trois phases.

- Compensateur passif, par exemple montage de Steinmetz qui provoque un fort déséquilibre pour les fréquences différentes de 50HZ avec des résonances qu'il faut éviter d'exciter à proximité d'un générateur d'harmonique [KOU-06] [NEK-14].

e) Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique :

L'utilisateur ne souhaite pas résoudre les problèmes de pollution mais seulement le souci de la bonne santé de ses équipements. Cette approche, économiquement très contraignante ne s'applique que pour des nouvelles installations [DEF-08].On procède généralement au surdimensionnement des équipements afin d'assurer leur tenue aux surcharges harmoniques. Cette solution n'agit pas sur les harmoniques qui ne subissent aucune action curative de la part de l'utilisateur [OUL-05].

f) Compensation de la puissance réactive :

Différentes méthodes de compensation sont utilisées pour relever le facteur de puissance [ALA-02]. La plus simple consiste à placer des batteries de condensateurs en parallèle avec le réseau, à proximité des charges qui ont un mauvais facteur de puissance pour la compensation locale ou prés d'un transformateur d'alimentation pour la compensation globale [KOU-06].

g) Les filtres passifs :

g.1) *Classification des filtres passifs :*

Les solutions conventionnelles aux problèmes de distorsion harmonique existent depuis longtemps. Le filtrage passif est la plus simple solution conventionnelle pour atténuer la distorsion harmonique. Les filtres passifs sont des éléments a base d'inductance, capacité et résistance configurés et réglés pour contrôler les harmoniques. On peut classifier les filtres passifs suivant leur fréquence de résonance, leur mode de connexion et leur emplacement sur le réseau. Cela permet de définir deux grands modes de filtres passifs:les filtres séries utilisé pour lescharges génératrices de tensions harmoniques et les filtres parallèles utilisé dans le cas des charges génératrices de courants harmoniques et suivant le modèle choisi, les harmoniques peuvent être : précisément bloqués par une grande impédance série entre le convertisseur, déviés par une faible impédance en parallèle ou une combinaison des deux [NEK-14].

g.2) Filtre passif série :

Une façon d'atténuer les harmoniques générées par les charges non linéaires est d'introduire un filtre passif série **(Figure.I.5),** dans l'alimentation d'entrée ligne de sorte que le filtre offre une impédance élevée à la circulation des harmoniques à partir de la source à la charge non-linéaire. Depuis le filtre passif série est accordé sur une fréquence particulière, il offre une impédance élevée à sa seule fréquence d'accord.Selon la propriété physique de L et C choisie, il existe généralement une bande étroite autour de la fréquence d'accord lorsque l'impédance reste élevée [SWA-05] [NAK-14].

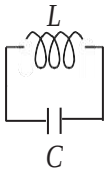


Figure I.5: *Filtre passif série*

g.3) Filtre passif parallèle :

Le filtre passif parallèle est montré sur la **Figure.I.6.** Il est constitué d'une inductance en parallèle avec un condensateur. Il présente une impédance faible pour tous les harmoniques et une impédance suffisamment importante par

rapport au fondamental, ce qui empêche les courants harmoniques de se propager vers le réseau. Le filtre passif parallèle à un comportement inductif pour les fréquences inférieures à la fréquence fondamentale et un comportement capacitif pour les fréquences supérieures à la fréquence fondamentale, ce qui est un avantage majeur pour le contrôle du courant dans l'inductance [HAM-10] [NEK-14].

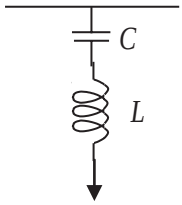
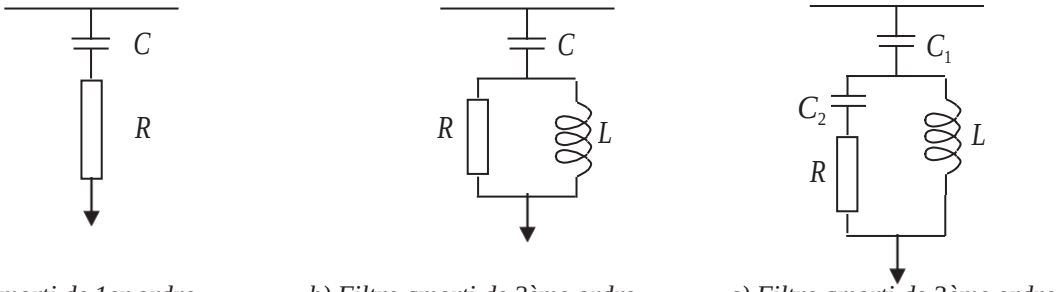


Figure 1.6: *Filtre passif parallèle*

En général dans l'usage, on rencontre deux types de filtres passifs parallèles : le filtre passif amorti et le filtre passifrésonant.

❶ **Filtre passif amorti :**

Le filtre amorti peut réduire le risque de résonance non souhaitée, et permet de réduire considérablement la taille du filtre passif, en fonctionnant sur une large gamme de fréquence. On distingue trois types de filtre amorti : le filtre de premier ordre est très peu utilisé car il exige une grande capacité et provoque des pertes de puissance élevées. Les filtres dedeuxième et troisième ordres sont plus performances [HAM-12].



a) Filtre amorti de 1er ordre *b) Filtre amorti de 2ème ordre* *c) Filtre amorti de 3ème ordre*

Figure.I.7: *Filtre amorti*

❷ **Filtre résonant :**

Le filtre passif résonnant est constitué d'un circuit résonnant composé d'un condensateur et d'une inductance en série accordés sur la fréquence de l'harmonique que l'on veut éliminer. Ce filtre possède une impédance faible pour l'harmonique concerné et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau

[MAG-07]. Lorsque l'on souhaite réaliser le filtrage d'un signal déformé entaché par plusieurs courants harmoniques, il est nécessaire de prévoir un ensemble de filtres où chacun d'entre eux agit sur le rang harmonique à éliminer voir la figure 1.8 [TAD-08].

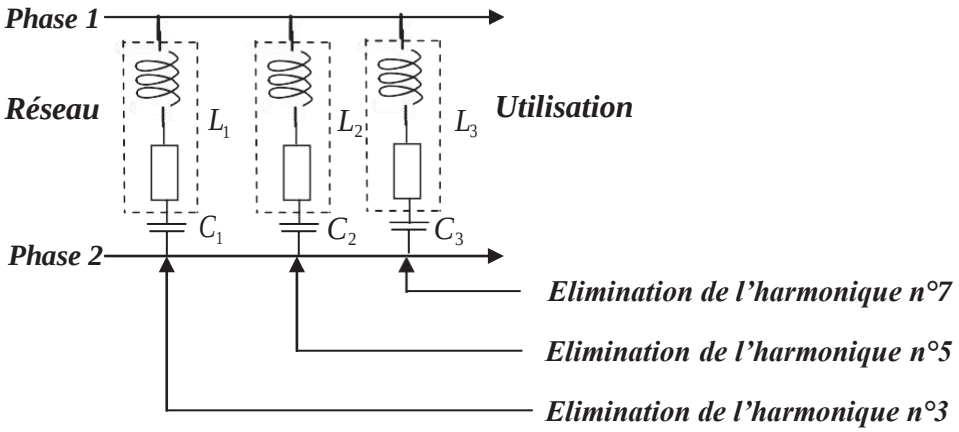


Figure.I.8: *Filtres résonants agissant sur plusieurs rangs harmoniques*

g.4) Les avantages et les inconvénients des filtres passifs :

Le filtrage passif a déjà largement fait ses preuves dans le milieu industriel grâce à son coût faible, son efficacité et son adaptation pour des réseaux de forte puissance. Cependant Il présente les inconvénientssuivants:

- ✓ L'impédance du réseau en présence des filtres passif peut faire apparaîtredes résonances.
- ✓ Le filtrage passif peut absorber les courants harmoniques d'autres charges non linéaires et dans ce cas, le filtre passif peut être surchargé.
- ✓ Lefiltragepassifestpeuflexibleet,encasdemodificationsdansleréseau,il peut avoir du mal à s'adapter aux nouveaux besoins du filtrage.
- ✓ La conception des filtres passifs doit considérer la tolérance de fabrication et les dérives paramétriques qui apparaissent à l'usage.

Ainsi, avant d'installer un filtre de ce type, une étude détaillée doit être menée afin d'analyser, cas par cas, les risques de résonance et de surcharge [NEK-14].

I.3.4.2. Solutions modernes :

a) Redresseur dodécaphasé :

Leur principe consiste à utiliser un transformateur à deux secondaires délivrant des tensions décalées de 30° entre elles (ou deux transformateurs dont les couplages entre les primaires et les secondaires doivent être couplés différemment (Y/Y et Y/D ou D/D et D/Y). Chacun de ces secondaires alimentant un redresseur en pont de Grêtz. On obtient ainsi un redresseur dit dodécaphasé (pont ayant douze bras) dont les redresseurs sont montés en série **(Figure.I.9).** Cette solution permet, par combinaison des courants, d'éliminer au primaire les harmoniques de rang les plus bas tels que 5 et 7 (souvent les plus gênants car de plus fortes amplitudes). Elle nécessite un transformateur à deux secondaires, l'un en étoile et l'autre en triangle ce qui permet de ne générer que les harmoniques de rang 12 k ±1 [NEK-14].

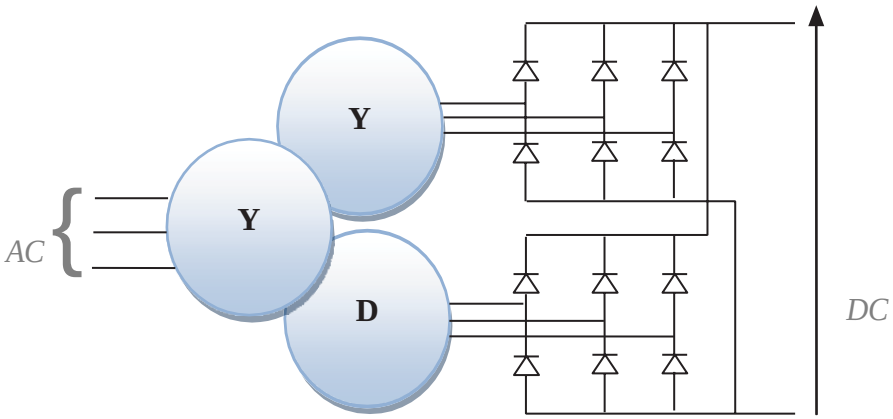


Figure.I.9: *Pont dodécaphasé*

b) Les filtres actifs :

Traditionnellement, un filtre passif est utilisé pour éliminer les harmoniques, cependant cet équipement de compensation comporte certains inconvénients, pour cela les filtres actifs ont été proposés pour bien améliorer la qualité de l'énergie électrique. Une des applications principales de filtres actifs est l'élimination ou la réduction des harmoniques de courant et de tension. Le principe du filtrage actif est

de compenser les harmoniques présents sur les réseaux électriques en injectant des harmoniques de même amplitude mais en opposition de phase. La **Figure.I.10** présente les composants d'un système typique du filtre actif et de leurs connexions. L'information concernant les courants harmoniques et d'autres variables de système sont transmises à la compensation de (courant/tension) estimateur de signal de référence. Le signal de référence de compensationde l'estimateur conduit le contrôleur du système dans son ensemble et fournit la commande du générateur de signal de déclenchement. La sortie du générateur de signal dedéclenchement commande le circuit d'alimentation par l'intermédiaire d'une interface appropriée. Enfin, le circuit d'alimentation dans le diagramme généralisé peut être connecté en configuration parallèle, série ou parallèle –série « filtre actif universelle (UPQC) » [NEK-14].

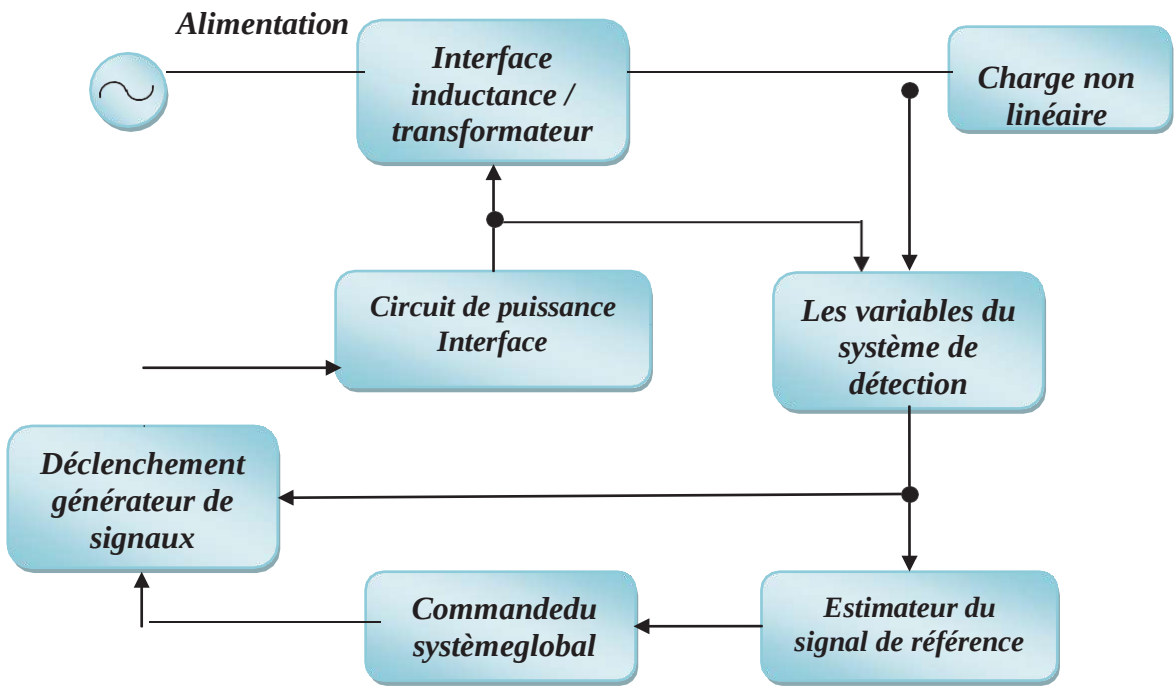


Figure.I.10: *Schéma généralisé pour le filtre actif*

b.1) Classification des filtres actifs :

Dans la littérature il existe une grande variété de types de filtres actifs. Ils sont classés de différentes manières selon le nombre de phases «monophasés ou triphasés», la technologie de l'onduleur «avec ou sans neutre raccordé», et la topologie «l'onduleur de tension ou de courant» [TAD-08].

b.2) Filtre actif parallèle:

Les filtres actifs parallèles sont les plus utilisés et les plus traités dans les travaux de recherches depuis plus de 30 ans [DEF-08].

Le système qui est montré dans la **figure.I.11,** comprend en balance sources d'alimentation de trois phases de tension, un redresseur triphasé à pont de diodes « charge non linéaire » et charge d'inductance Lc et de résistance Rc. Le filtre actif parallèle est connecté à la ligne triphasée à travers l'inductance L. Ce filtre est le plus souvent commandé comme un générateur de courant, il génère des courants harmoniques, en opposition de phase avec le réseau, afin que la somme avec ceux-ci soit nulle. Ceci est réalisé par l'élaboration de la forme d'onde de compensation de courant (i_c), en utilisant les commutateurs de l'onduleur. La forme du courant de compensation est obtenue par la mesure du courant de charge (i_l) et en la soustrayant la référence sinusoïdale. Le but de filtre actif parallèle est d'obtenir une source de courant sinusoïdale (i_s) [NEK-14].

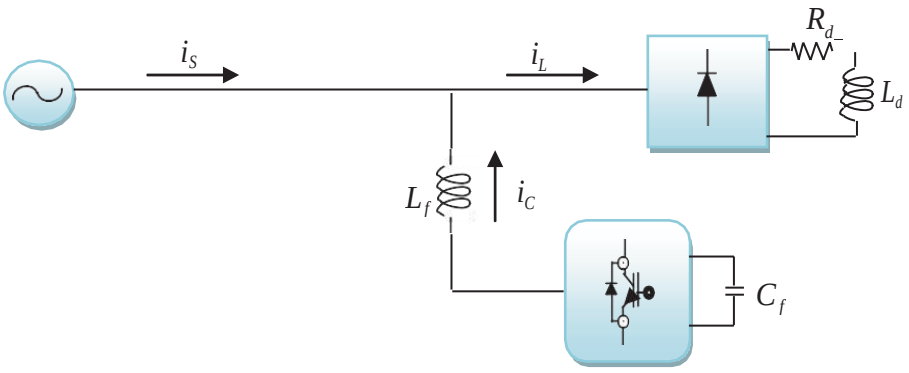


Figure.I.11: *Principe de configuration de filtre actif parallèle*

b.3) Filtre actif série :

Le filtre actif série est connecté en série avec l'alimentation par l'intermédiaire d'un transformateur d'adaptation, de sorte qu'il est applicable à la compensation des harmoniques d'un redresseur à diodes de grande capacité avec un condensateur de liaison à courant continu. L'approche est basée sur le principe d'isolement harmonique en contrôlant la tension de sortie du filtre actif série. Ceci est obtenu par l'injection de tensions harmoniques (v_c) à travers le transformateur d'interface [NEK-14].

Les tensions injectées harmoniques sont ajoutées / soustraites, à/de la tension de source afin de maintenir une forme d'onde de tension sinusoïdale pure à travers la charge non linéaire. Il est commandé de telle sorte qu'il présente une impédance nulle pour la composante fondamentale, mais apparaît comme une résistance à haute impédance pour les fréquences de composante harmoniques [TAN-06] [NEK-14].

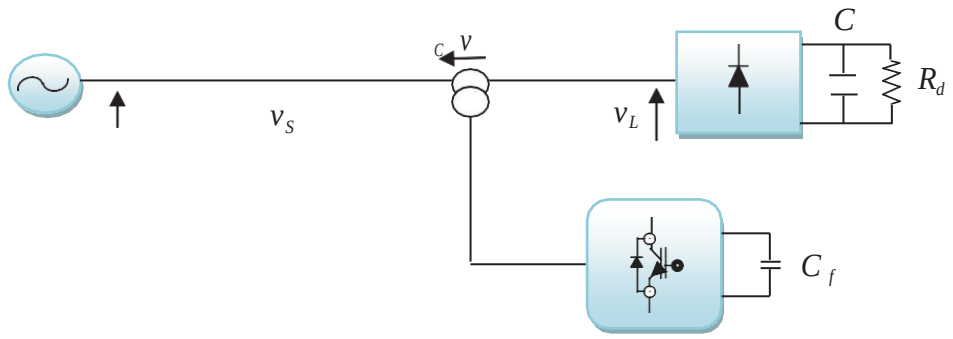


Figure.I.12: *Principe de configuration de filtre actif série*

b.4) Filtre actif universelle (UPQC) :

La figure (I.13) montre la combinaison parallèle- série, elle est appelée UPQC (Unified Power QualityConditioner), elle résulte de l'association des deux filtres actifs parallèle et série. Le but principal du filtre actif série est d'isolée les harmoniques entre un système de sous-transmission et un système de distribution. En outre, le filtre actif série a la capacité de compensé le déséquilibre de tension, ainsi que la régulation de tension et la compensation des harmoniques. Le but principal du filtre actif parallèle est d'absorber les harmoniques de courant, pour compenser la puissance réactive et le courant inverse, et de régler la tension continue intermédiaire entre les deux filtres actifs. Le filtre actif universel présente de bonnes performances, cependant son coût est élevé et sa commande est complexe. Du fait qu'il y a beaucoup de semi-conducteurs impliqués [NEK-14].

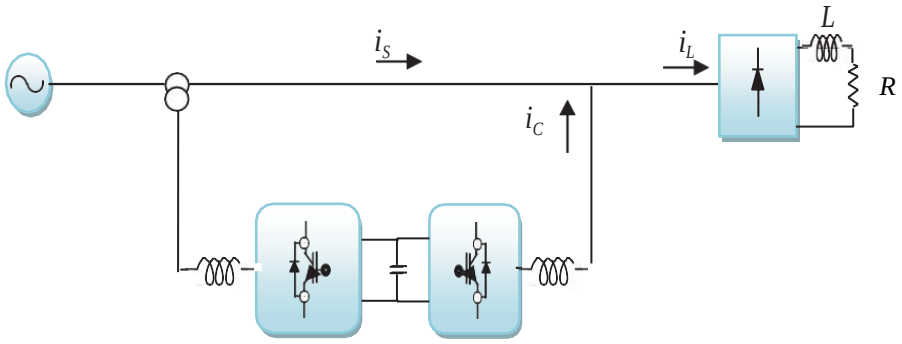


Figure.I.13: *Principe de configuration de filtre actif universel «UPQC»*

b.5) Les avantages et les inconvénients du filtre actif:

Le filtre actif offre de nombreux avantages [MAG-07] :

- Il peut compenser plusieurs rangs harmoniques (dans la limite de sa bande passante).
- Il s'adapte automatiquement à l'évolution des charges et du réseau.
- Il est insensible à la variation des caractéristiques du réseau.
- Il n'y a aucun risque de surcharge lorsque le niveau de pollution harmonique à compenser dépasse le dimensionnement du filtre actif, puisqu'il fonctionne au maximum de ses capacités et tout risque de destruction estécarté ;
- La compensation de la puissance réactive est envisageable.
- Le risque de résonance (amplification des harmoniques) entre filtre et impédance du réseau, qui existe avec un filtre passif est supprimé.

Toutefois, le filtrage actif présente quelques inconvénients [REC-02] :

- Le filtrage actif n'est possible que dans le cas des réseaux de faible puissance.
- Il permet la compensation de l'énergie réactive, mais à un coût très élevé par rapport au filtrage passif.
- Son coût est beaucoup plus élevé que celui du filtre passif.

c) Filtre hybride :

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs, l'association de filtres actifs à des filtres passifs peut être une solution. Dans ce cas on connectera en parallèle ou en série des filtres passifs pour compenser les harmoniques prépondérants. Ainsi, les filtres passifs éliminent les harmoniques en

basses fréquences, ce qui permet de réduire le dimensionnement du filtre actif qui ne compense que le reste des perturbations. En conséquence, le filtre hybride est plus petit que pour un filtre actif et la réponse est bien meilleure qu'avec des filtres passifs seuls. Cette structure permet d'améliorer les caractéristiques de compensation des filtres passifs et de réaliser ainsi une réduction de la valeur nominale du filtre actif. Souvent le filtre passif est formé par deux filtres réglés aux fréquences des harmoniques 5 et 7 et un filtre passe haut réglé autour de la fréquence de l'harmonique 11. Ainsi dans ce cas, le filtre actif permet d'éviter des résonances entre les éléments passifs et le réseau [NEK-14].

c.1) Association d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif parallèle :

Dans cette topologie, le filtre actif est connecté en parallèle avec le filtre passif. Tous les deux sont également en parallèle avec la charge.

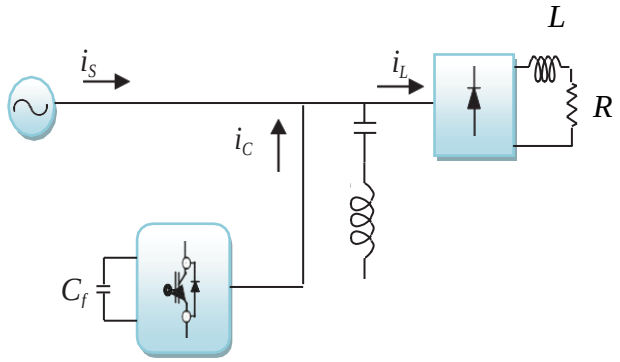


Figure.I.14: *Filtre actif parallèle avec filtre passif parallèle*

Le filtre actif parallèle sert à compenser les courants harmoniques de basses fréquences émis par la charge polluante, alors que le filtre passif accordé sur une fréquence harmonique élevée, permet de compenser les harmoniques de hautes fréquences [NEK-14] [ABD-08].

c.2) Association d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif série :

Dans cette configuration, les deux filtres actif et passif sont directement connectés en série, sans l'intermédiaire d'un transformateur. L'ensemble est connecté en parallèle sur le réseau comme il est présrnté dans la **figure.I.15.**

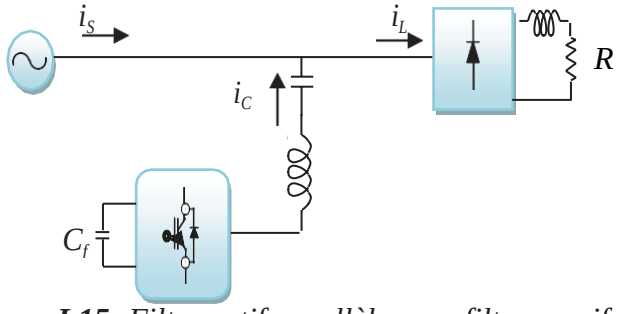


Figure.I.15: *Filtre actif parallèle avec filtre passif série*

Dans ce cas, le filtre passif se comporte comme une impédance faible à la fréquence d'accord et comme une grande impédance à la fréquence fondamentale. Ce système présente deux avantages : le dimensionnement en puissance du filtre actif est encore plus réduit du fait que le courant qui le traverse est plus faible et le filtre actif est à l'abri d'un éventuel court- circuit de la charge [NEK-14] [ABD-08] [ALA-02].

c.3) Association d'un filtre actif série et un filtre passif parallèle :

Le rôle du filtre actif série dans ce cas est d'empêcher les courants harmoniques de circuler vers le réseau et de les obliger à passer par les filtres passifs raccordés à leurs fréquences [NEK-14] [KOU-04].

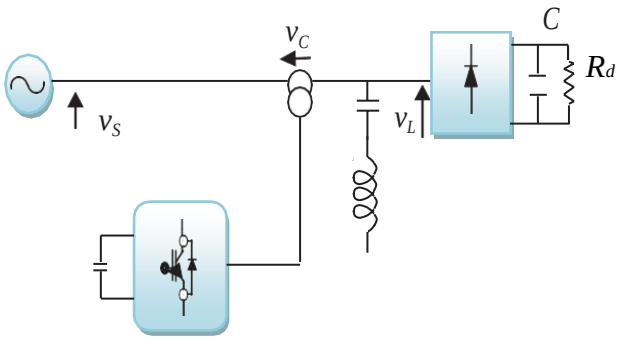


Figure.I.16: *Filtre actif série avec filtre passif parallèle*

c.4) Association d'un filtre actif série et un filtre passif parallèle :

Le principe de fonctionnement de cette configuration est le même que le précédent. Il a l'avantage de réduire encore le dimensionnement du filtre actif série car le courant qui le traverse est faible, de plus, le filtre actif série est à l'abri d'un éventuel court circuit de la charge [BOU-07][NEK-14].

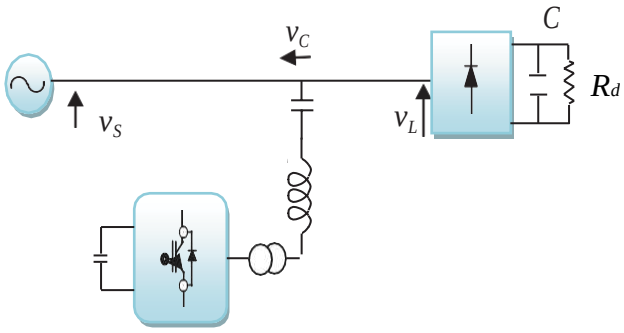


Figure.I.17: *Filtre actif parallèle avec filtre passif parallèle*

I.4. Comparaison des diferents types depertubations :

Le **tableau.I.1** montre une comparaison des différents types de perturbations ainsi leurs solutions [NEK-14].

Types de perturbation	Origines	Conséquences	Exemples de solutions
Creux de tension	-Court-circuit, commutation de charges de forte puissance (démarrage moteur…).	- Perturbation ou arrêt du procédé : pertes de données, ouverture de contacteurs, verrouillage de variateurs de vitesse, ralentissement où décrochage de moteurs.	- ASI, compensateur automatique en temps réel, Régulateur électronique dynamique de tension, démarreur progressif, compensateur électronique série- - Augmenter la puissancede court-circuit (Pcc).
Déséquilibre de tension	- Charges déséquilibrées (charges monophasées de forte puissance).	Couples moteurs inverses (vibrations) et sur échauffement des machines asynchrones.	- Equilibrer lescharges. - Compensateur électronique shunt, régulateurélectronique dynamique detension. - Augmenter la Pcc.
Variations et Fluctuationsde tension	- Variations importantes de charges (machines à souder, fours à arc…).	Fluctuation de la luminosité des lampes (papillotement ou flicker).	-Compensateur électromécanique d'énergie réactive, compensateur automatique en temps réel compensateur électroniquesérie, régleur en charge.
Harmoniques	- Charges non linéaires (variateurs de vitesse, fours à arc, machines à souder, lampes à décharge, tubes fluorescents…).	Surcharges (du conducteur de neutre, des sources…), déclenchements intempestifs, vieillissement accéléré, dégradation du rendement énergétique, perte de productivité.	-Self anti-harmonique, filtre passif ou actif, filtre hybride, -Inductance de ligne. -Augmenter la Pcc. -Confiner les charges polluantes. - Déclasser les équipements.
Inter-harmonique	- Charges fluctuantes (fours à arc, machines à souder…), convertisseur de fréquence.	- Perturbation des signaux de tarification, papillotement (flicker).	-Réactance série.

Tableau .I.1 : *Les solutions des équipements spécifiques pour les différents types de perturbations*

II.5. Conclusion :

Comme nous avons pu le constater dans ce premier chapitre, la qualité de l'énergie électrique est affectée par des différents type des perturbations comme les creux de tension, le déséquilibre ainsi que les harmoniques, qui engendrent la dégradation de la qualité de l'énergie et donc une mauvaise satisfaction et prestation duclient.

Cependant aux perturbations elles subies des solutions existent, soit traditionnelles ou modernes, doivent être prise afin de minimiser les effets des perturbations et garantir une alimentation de qualité. Les solutions traditionnelles comme les filtres passifs qui ne sont pas très performants avec des charges non linéaire et variable. Pour cela et avec les progrès de l'électronique de puissance et de l'informatique, les travaux de recherches ont été orientés vers des nouvelles solutions à savoir les filtres actifs : série, parallèle et hybride, qu'il nous aide à déterminer la stratégie et les points de contributions de notretravail.

Chapitre II

REVUE DE LITTÉRATURE : LES CONVERTISSEURS MULTI-NIVEAUX

II.1. Introduction :

Au début des années 90, une nouvelle structure de convertisseurs multi niveaux a été inventée [MEY-92] [GAT-97]. Cette structure est basée sur la mise en série de cellules de commutation entre lesquelles une source de tension flottante est insérée. Ces sources de tension flottantes sont réalisées par des condensateurs. La structure multicellulaire série peut être adaptée à toutes les configurations : montage en hacheur ou en onduleur (avec un point milieu capacitif), en demi pont ou en pont complet. La **Figure II.4** montre le schéma d'un bras d'un convertisseur multicellulaire série à N niveaux, constitué de $p = N - 1$cellules.

Le premier avantage de ces convertisseurs est la réduction des contraintes en tension sur les interrupteurs. Les sources de tension flottantes imposent sur chaque cellule une contrainte en tension égale à E/p. Par contre, le calibre en courant des interrupteurs est identique à celui d'une structure classique : c'est le courant de la charge. Les convertisseurs multicellulaires série permettent aussi d'améliorer la forme d'onde de la tension de sortie et permettent plus de flexibilité pour obtenir des niveaux de tension différents (par rapport à la structure NPC) [KHE-09] [GUI-97]. D'autre part, la contrainte de ces convertisseurs est la

nécessité d'un grand nombre de condensateurs, notamment pour une configuration triphasée [GAT-97].

II.2. Structures de conversion d'énergie multi niveaux :

Les structures de conversion d'énergie multi niveaux reposent sur les associations de semi-conducteurs de puissance et pour certaines topologies de leurs connexions en série.

Cette section est consacrée à la présentation du fonctionnement, de la commande et des particularités des principales structures de conversion d'énergie multi niveaux : le convertisseur clampé par le neutre, le convertisseur multicellulaire série. Au niveau de ce paragraphe, les semi-conducteurs de puissance sont supposés parfaits (i.e. aucune perte n'est considérée en conduction et en commutation), ainsi que les sources de tension et de courant.

II.2.1. Convertisseur Clampé par le Neutre (NPC) :

Le convertisseur NPC (Neutral Point Clamped) 3 niveaux est apparu au début des années 1980 [BRE-80] (**Figure II.1**).

La répartition de la tension d'entrée sur les interrupteurs à l'état bloqué est assurée par des diodes connectées à un point milieu C. Ces deux diodes imposent un potentiel à E/2 aux points A et B.

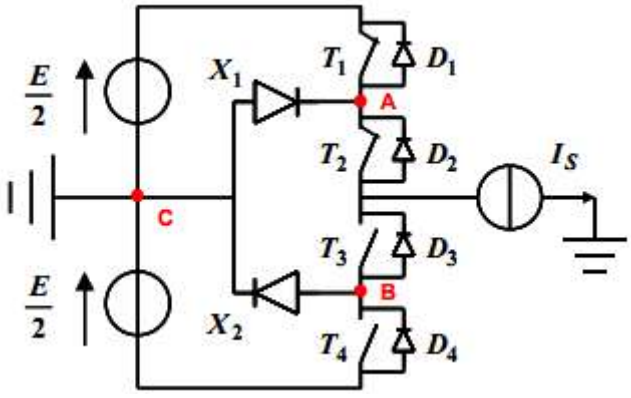


Figure II.1 : Onduleur NPC 3 niveaux

Les trois niveaux de tension possibles en sortie $(-E/2, 0 \ et \ E/2)$ sont obtenus en fonction du choix des interrupteurs rendus passants.

La **Figure II.2** illustre les configurations possibles du convertisseur en fonction du signe du courant et de la tension de sortie. T_1 et T_3 (respectivement T_2 et

T_4) sont commandés de manière complémentaire. Durant la moitié de la période de modulation T_{mod}, l'état de deux interrupteurs sur 4 est toujours figé :

- Pendant l'alternance positive de la référence, T_2 est toujours passant et T_4 toujours bloqué. Si T_1 est amorcé, alors T_3 est OFF et la tension de sortie est fixée à E*/2* (cas A) ; au contraire si T_3 est ON, alors T_1 est OFF, et la tension de sortie est égale à *0 V* (cas C).
- De manière analogue, pendant l'alternance négative de la référence, T_1 est toujours bloqué et T_3 toujours passant. Si T_4 est amorcé, alors T_2 est OFF et la tension de sortie est fixée à $-E/2$ (cas B) ; à l'inverse si T_2 est ON, alors T_4 est OFF, et la tension de sortie est égale à *0 V* (cas C).
- Le signe du courant de charge indique si celui-ci circule à travers une diode ou un transistor.

L'une des particularités de cette topologie est que les semi-conducteurs externes, T_1 et T_4, ne découpent pas pendant au moins la moitié de la période de modulation. Les diodes X_1et X_2 n'interviennent pas pour les phases de fonctionnement A et B. En revanche, l'une d'entre elles est passante dans le cas C et permet de fixer le potentiel du point A ou du point B à 0 V. Le signe du courant de charge indique quelle diode est rendue passante : si $I_s > 0$, X_1 est amorcée et X_2 est bloquée ; la configuration est inversée pour $I_s < 0$.

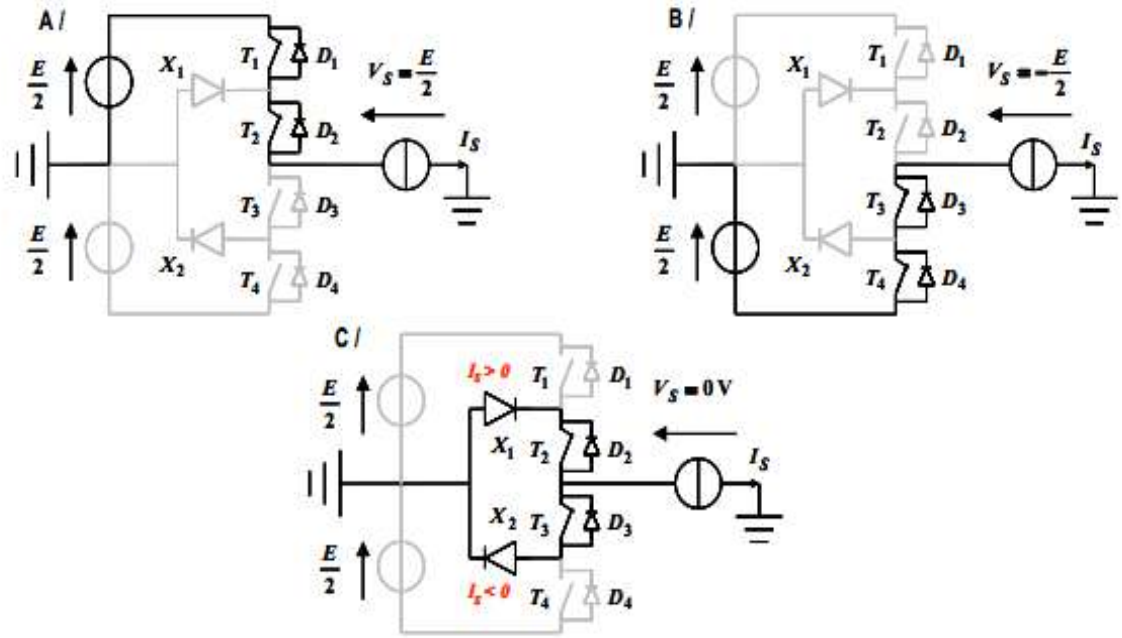


Figure II.2 : Configurations possibles du convertisseur NPC.

Le **tableau II.1** résume le fonctionnement de l'onduleur NPC 3 niveaux en fonction du sens de circulation du courant de charge.

Outre les variations du potentiel du point milieu, la tension aux bornes des interrupteurs de puissance n'excède jamais la moitié du bus d'entrée.

Tableau II.1 : Phases de fonctionnement de l'onduleur NPC 3 niveaux

Sens de courant	Le courant circule à travers	Tension découpée
Is>0	T_1,T_2	**E/2**
	X_1,T_2	**0**
	D_4,D_3	**-E/2**
Is<0	T_3,T_4	**-E/2**
	T_3,X_2	**0**
	D_2,D_1	**E/2**

Applications:

Le convertisseur NPC permet d'obtenir des performances statiques et dynamiques très intéressantes par rapport à une structure à deux niveaux et ses

applications sont diverses de nos jours : entraînement moyenne tension pour l'industrie, appareillages pour la marine, activité minière et traction. Le NPC apparaît également prometteur dans le domaine de l'énergie éolienne, ainsi que pour les applications basse tension [TEI-03]. Cependant, l'utilisation d'un pont diviseur capacitif fait apparaître des problèmes d'équilibrage du point milieu [CEL-00]. Le potentiel de celui-ci peut onduler avec une amplitude importante, voir diverger dans certains cas. De nombreuses solutions ont été étudiées et ont permis d'apporter des réponses à ce problème soit par utilisation de commandes actives [BRU2-05] soit par introduction de circuits annexes assurant une stabilité du potentiel du point milieu. Ces solutions, très performantes, sont également très pénalisantes en termes de complexité et de coût global du convertisseur et condamnent, dans la plupart des cas, l'utilisation de la topologie NPC pour un nombre de niveaux supérieur à trois (**Figure II.3** – onduleur NPC N niveaux).

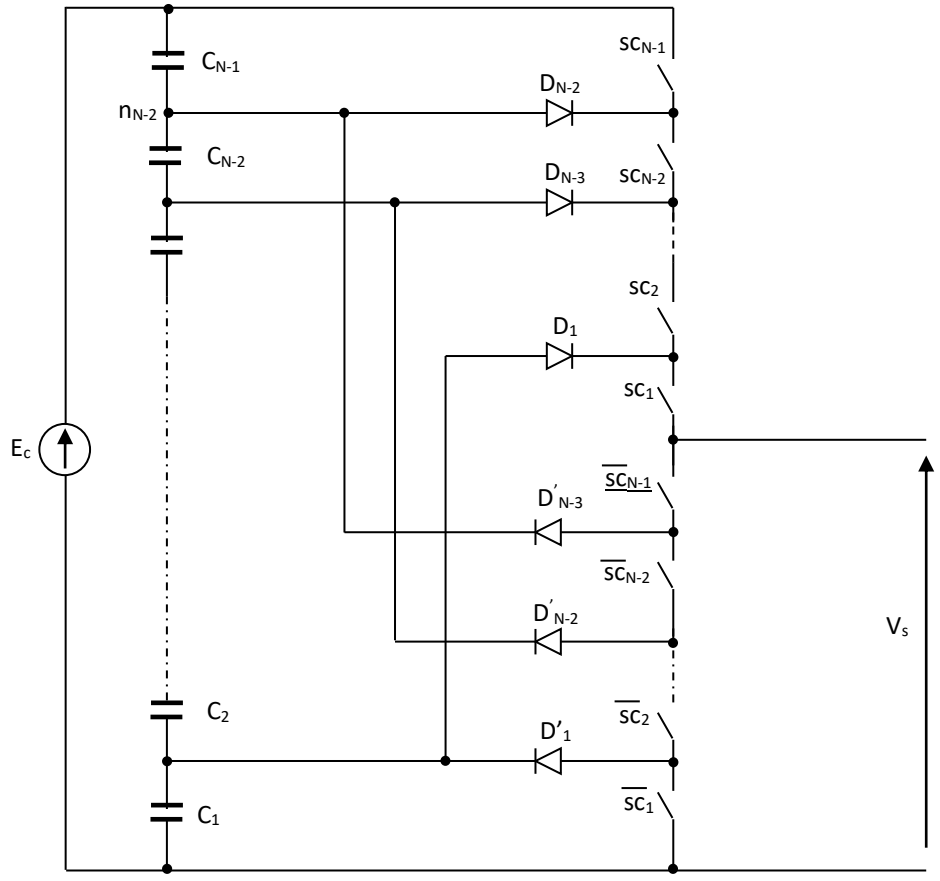
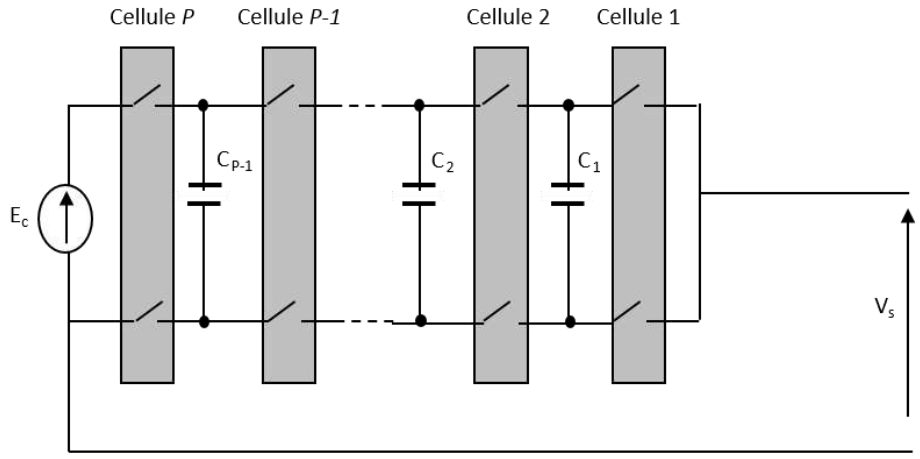


Figure II.3 : Bras d'onduleur à structure NPC à N niveaux

II.2.2. Convertisseur multicellulaire série :

Le convertisseur multicellulaire est une topologie de conversion d'énergie qui repose sur la mise en série d'interrupteurs commandés. Elle est apparue au début des années 1990 à la suite d'un brevet déposé par Thierry A. Meynard et Henri Foch [MEY-92].



.

Figure II.4: Bras d'un convertisseur multicellulaire série à N niveaux

a- Onduleur multicellulaire série 3 niveaux :

La structure multicellulaire 3 niveaux est composée de 2 cellules, contenant chacune deux interrupteurs, et connectées entre elles par un condensateur flottant (**Figure II.5**). Il est important de constater que les interrupteurs T_1 et T_4, ou T_2 et T_3, ne doivent jamais être passants en même temps pour ne pas court-circuiter les sources de tension. Ainsi, les interrupteurs T_1 et T_4 (respectivement T_2 et T_3) sont commandés de manière complémentaire. Ces couples d'interrupteurs forment donc des cellules de commutation.

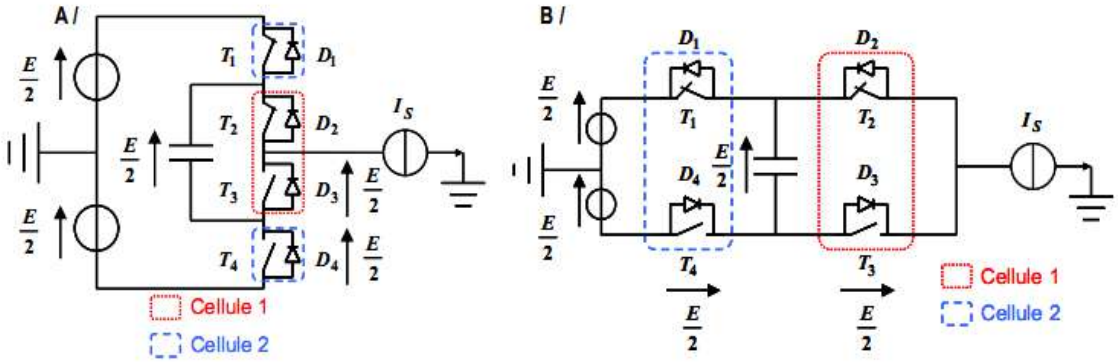


Figure II.5 : Convertisseur Multicellulaire Série (a) représentation 1, (b) représentation 2

Les tensions appliquées aux cellules de commutation sont imposées par les sources de tension flottantes ; ces dernières sont, dans le cas de la **Figure II.5**, égales à $E/2$ quel que soit l'état des interrupteurs. La contrainte en tension aux bornes des interrupteurs bloqués ne dépasse donc pas cette valeur. Les cellules de commutation sont indépendantes les unes par rapport aux autres et les semi-conducteurs découpent pendant l'intégralité de la période de modulation.

Il existe quatre configurations possibles pour un convertisseur multicellulaire 3 niveaux, configurations présentées par la **Figure II.6**. Cette structure permet d'obtenir trois niveaux de tension en sortie : 0 et $\pm E/2$. Le niveau de tension intermédiaire *(0 V)* peut être généré de deux manières différentes (cas C et D), ce qui implique un transit d'énergie en fonction du sens de circulation du courant de charge. Cette particularité permet de contrôler la tension aux bornes du condensateur flottant.

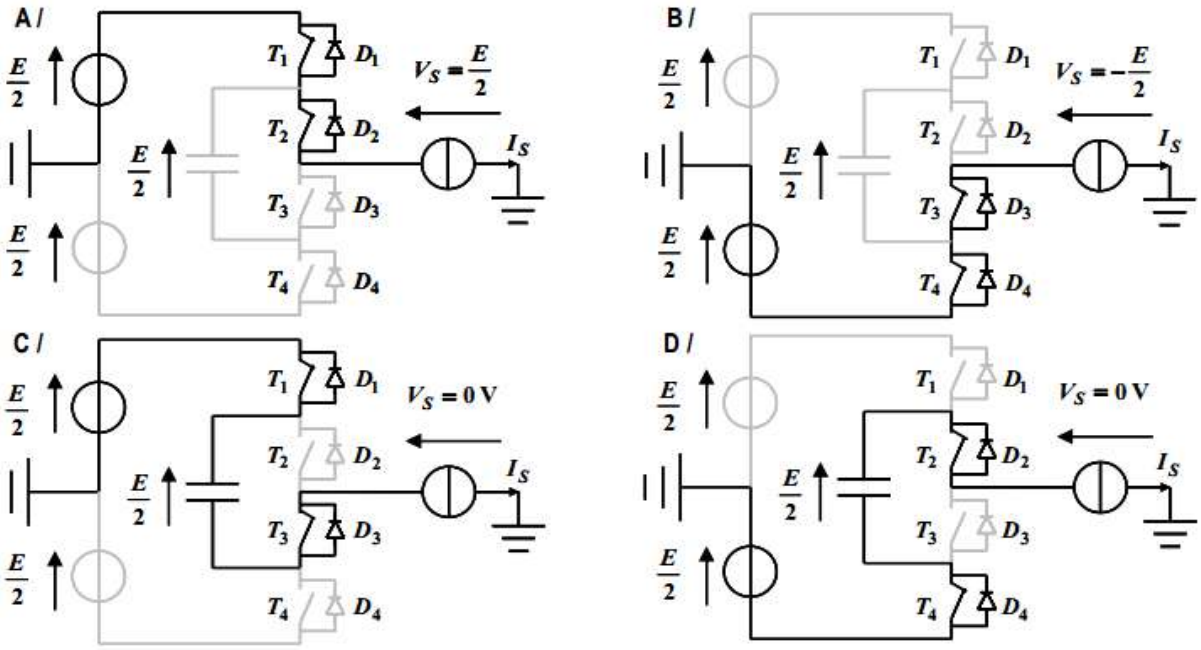


Figure II.6 : quatre configurations pour un convertisseur multicellulaire 3 niveaux

b- Principe de base d'un convertisseur multicellulaire série :

Afin d'étudier le fonctionnement du convertisseur et l'effet des décalages des ordres de commande sur les formes d'ondes en sortie nous considérons l'hacheur à deux cellules présenté sur la **Figure II.7.** Dans cette structure, la cellule 1 est celle qui est connectée à la charge.

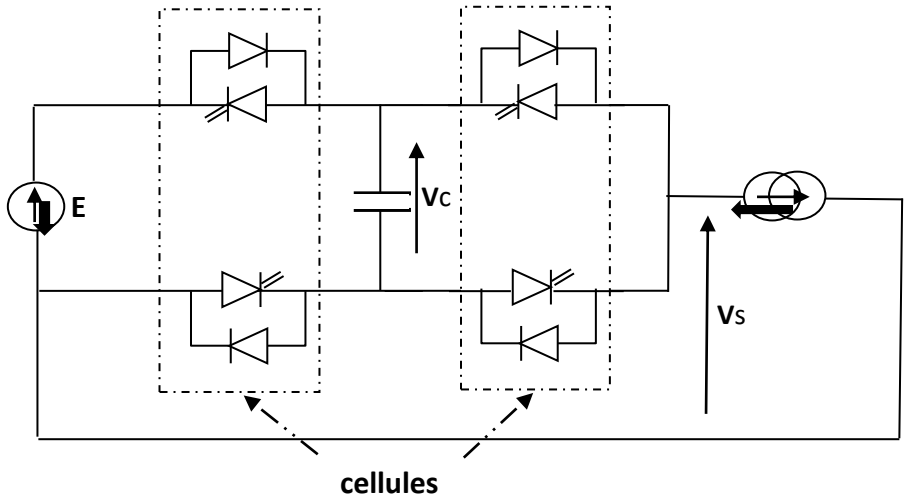


Figure II.7 : Hacheur dévolteur à *2* cellules

Pour simplifier l'étude on suppose que le condensateur est chargé et reste chargé à sa valeur d'équilibre$E/2$. La **Figure II.8** montre qu'il existe 4 configurations différentes selon les commandes des interrupteurs. Les configurations b et c, permettent d'avoir un niveau de tension supplémentaire de $E/2$par rapport à une structure classique.

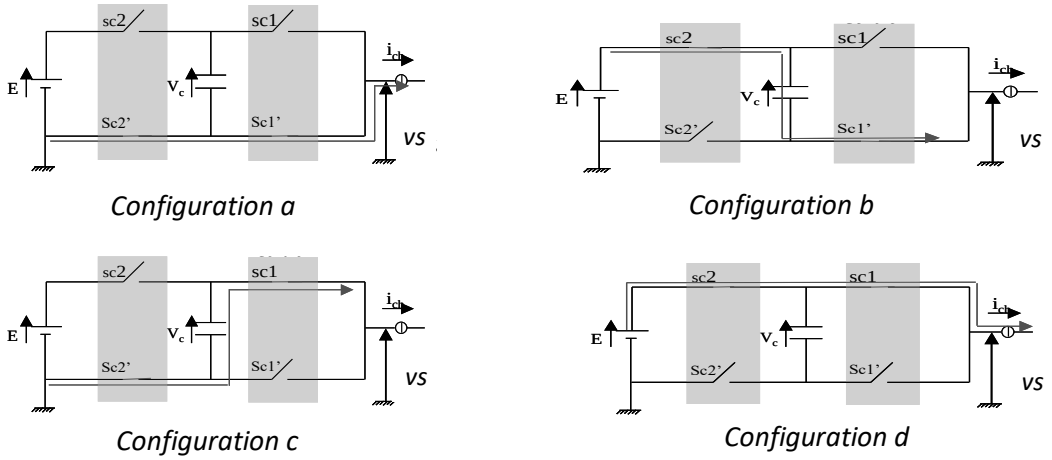
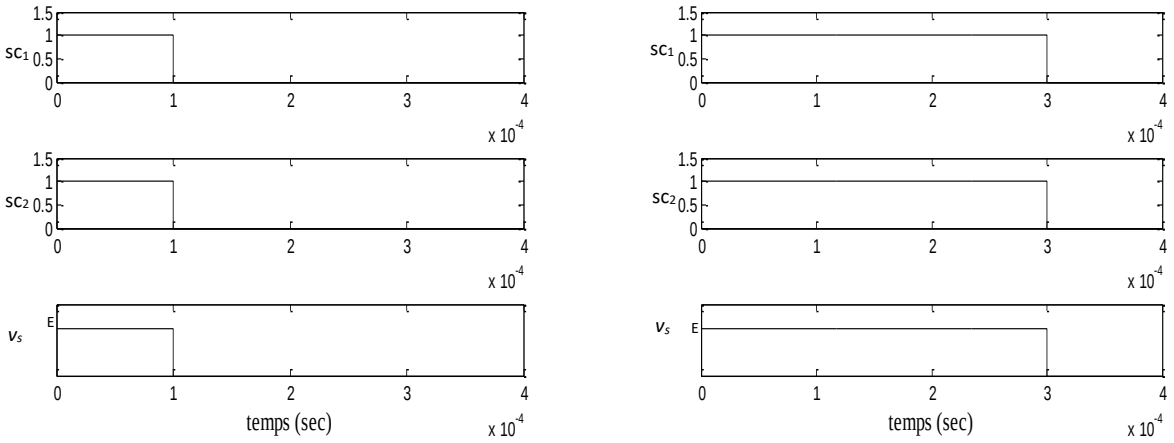


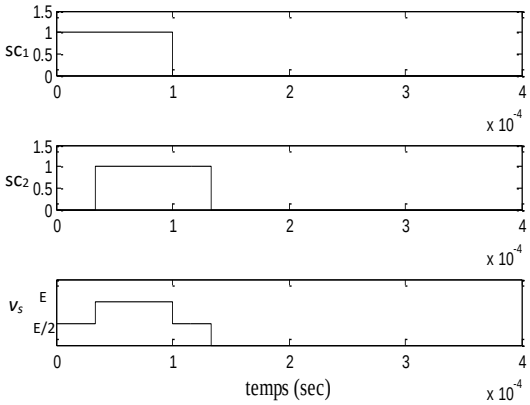
Figure II.8 : Les configurations possibles d'un hacheur dévolteur à *2* cellules

Dans la **Figure II.9**, nous avons présenté les séquences de commande des deux cellules sc_1 et sc_2 et la tension de sortie v_s obtenue pour les différents rapports cycliques α et différents déphasages δ entre les commandes des cellules sur une période de découpage.

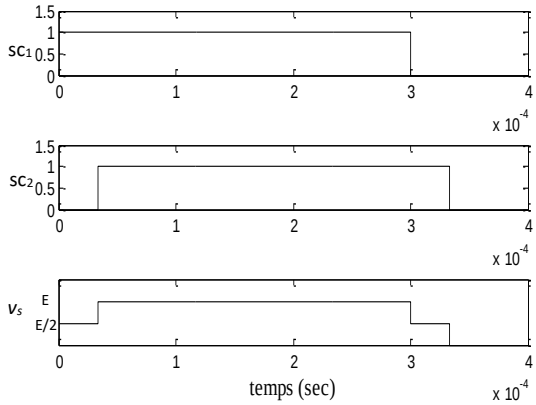


a)- Séquences de commande et la tension de sortie pour $\alpha = 0.25$ et $\delta = 0$

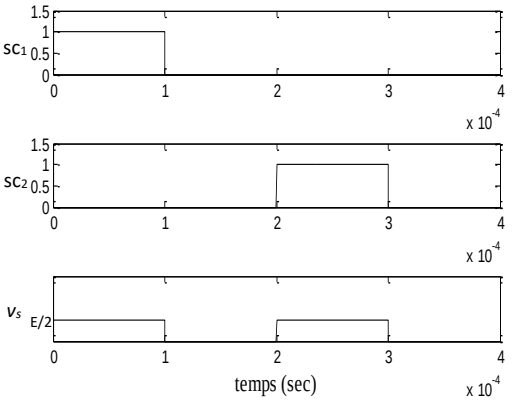
b)- Séquences de commande et la tension de sortie pour $\alpha = 0.75$ et $\delta = 0$



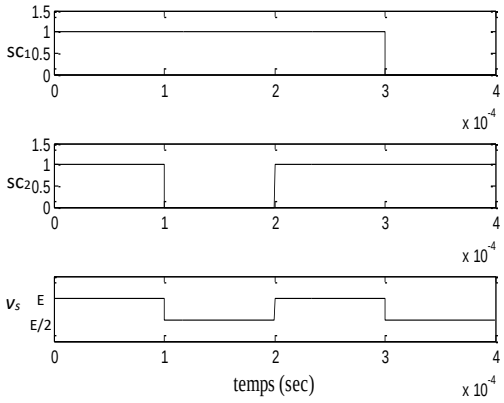
c)- Séquences de commande et la tension de sortie pour $\alpha = 0.25$ et $\delta = {}^{\pi}/_{6}$



d)- Séquences de commande et la tension de sortie pour $\alpha = 0.75$ et $\delta = {}^{\pi}/_{6}$



e)- Séquences de commande et la tension de sortie pour $\alpha = 0.25$ et $\delta = \pi$



f)- Séquences de commande et la tension de sortie pour $\alpha = 0.75$ et $\delta = \pi$

Figure II.9 : Séquences de commande et la tension de sortie pour différents rapports cycliques et différents déphasages entre les commandes des cellules

On remarque que pour un déphasage nul entre les signaux de commande et quelques soit le rapport cyclique, la tension de sortie oscille entre O et E. Ce type de fonctionnement est donc similaire en termes de formes d'onde, au cas d'un hacheur avec un seul interrupteur.

Lorsque l'on déphase légèrement les signaux de commande (${}^{\pi}/_{6}$ dans notre exemple), on fait alors apparaître, quel que soit le rapport cyclique appliqué sur les cellules, les trois niveaux de tension $(O, {}^{E}/_{2}, E)$. L'amplitude maximum des variations est donc toujours égale àE.

On remarque que pour un déphasage entre les signaux de commande de π, la tension vue par la charge oscille entre 0 et $E/2$ quand$\alpha = 0.25$ et entre $E/2$ et E quand $\alpha = 0.75$. Ceci démontre la possibilité de fonctionner en multi niveaux. Un autre résultat très intéressant obtenu avec ce déphasage est que la fréquence apparente vue par la charge est le double de la fréquence de découpage des interrupteurs. On remarque également que l'amplitude de variation de la tension de sortie est divisée par deux.

De plus, les variations de déphasage n'influencent pas la valeur moyenne de la tension de sortie qui dépend uniquement de la tension d'alimentation et de la valeur du rapport cyclique commun à toutes les cellules.

Nous pouvons donc en tirer les propriétés suivantes en généralisant à p cellules de commutations [GAT-97] :

Propriété 1 : *Pour un convertisseur multicellulaire série à p cellules de type hacheur, si on impose des rapports cycliques égaux et des déphasages réguliers de $\frac{2\pi}{p}$ entre les signaux de commande des cellules alors l'ondulation de la tension de sortie est divisée par p.*

Propriété 2 : *Pour un convertisseur multicellulaire série à p cellules de type hacheur, si on impose des déphasages réguliers de $\frac{2\pi}{p}$ entre les signaux de commande des cellules et si le rapport cycliqueα est compris entre $\frac{(i-1)}{p}$ et $\frac{i}{p}$ avec $i \in [1,2,\dots,p]$ alors la tension de sortie prendra les valeurs $\frac{(i-1)E}{p}$ et $\frac{iE}{p}$ sur une période de hachage.*

Propriété 3 : *Pour un convertisseur à p cellules de type hacheur, si on impose des rapports cycliques égaux et des déphasages réguliers de $\frac{2\pi}{p}$ entre les signaux de commande des cellules alors la fréquence de commutation apparente de la tension de sortie est multipliée par p.*

Propriété 4 : *Dans le cas où le rapport cyclique est égale à $\frac{k}{p}$ avec $k \in [1,2,\dots,p-1]$, la tension de sortie n'est plus découpée car quand une des cellules de commutation passe à l'état haut, une autre passe à l'état bas en même temps. Ceci implique une tension de sortie du bras égale à $k\frac{E}{p}$*

II.2.3. Convertisseurs avec des sources de tensions indépendantes :

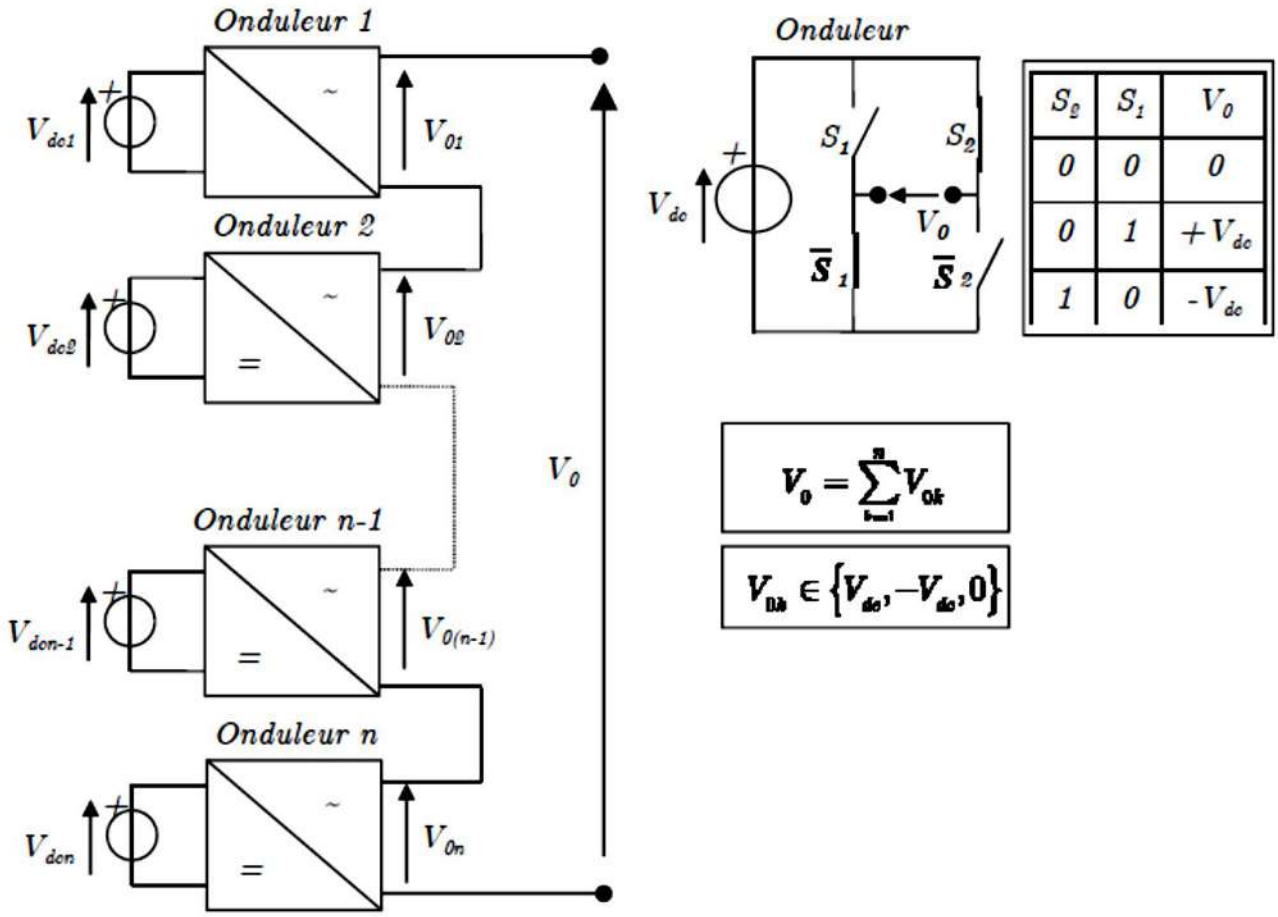
Le principe de cette structure consiste à connecter en série plusieurs onduleurs monophasés avec des sources de tension isolées et indépendantes. Le but étant d'obtenir une forme d'onde sinusoïdale composée de plusieurs niveaux de tensions. Les sources de tensions peuvent être assurépar des batteries, des cellules de combustible, des panneaux solaires ou par des condensateurs dont la charge sera obtenue d'une tension alternative redressée. Sur la **Figure II.10** on présente un bras d'onduleur monophasé représentatif de cette topologie.

Chaque onduleur mis en cascade est alimenté par une source de tension indépendante. A la sortie de chaque onduleur on peut avoir trois niveaux différent de tension, $+V_{dc}, 0 \quad et - V_{dc}$, en connectant à la sortie la source de V_{dc} à l'aide de différentes configuration des S_i.

Les sorties des onduleurs individuels sont connectées en série de sorte que la forme d'onde en sortie du bras est égale à la somme des tensions de chaque onduleur individuel.

Cette structure présente la flexibilité de pouvoir ajouter des niveaux de tensions de manièrefacile, d'autre part, les éléments de définition des potentiels (diodes et condensateurs) ne sont pasnécessaires.

Du côté des contraintes il faut remarquer qu'une source de tension indépendante est nécessaire pour chaque pont, ce qui limite l'application de ce type de structure. Elle peutêtre



S_2	S_1	V_0
0	0	0
0	1	$+V_{dc}$
1	0	$-V_{dc}$

Figure II.10 : Bras de convertisseur multiniveaux monophasé avec sources detensions indépendantes

Intéressante pour des applications comme la compensation statique ou le filtrage actif. Aussi on pourrait l'utiliser pour les applications automobiles où la présence des batteries peut être favorable.

Egalement, en présence de sources d'énergies renouvelables cette structure pourrait être intéressante.

En résumé, les caractéristiques de cette structure sont :

a) Parmi les différentes structures multiniveaux, celle-ci utilise le moindre nombre decomposants pour le même nombre de niveaux.

b) Expansion facile du nombre de niveaux.

c) Plus facile à commander.

d) Adapté pour des applications où plusieurs sources de tensions sont disponibles.

II.3. Techniques de commande :

Les topologies des convertisseurs et des filtres cités ci-haut reposent sur l'état des interrupteurs de puissance qui permettront le passage du courant, et sur le maintien d'une valeur précise de tension aux bornes des condensateurs. Cela fait qu'il faut contrôler l'état de ces interrupteurs afin d'assurer un fonctionnement bien précis. Lors de la conception de la commande, les facteurs suivants doivent être pris en considération :

- La forme des courants avec un taux de distorsion harmonique faible.
- Facteur de puissance unitaire.
- Régulation de la tension du bus DC.
- Robustesse en cas des variations aux niveaux du réseau et de la charge.

À cause de la commutation des interrupteurs entre les valeurs 0 et 1, les convertisseurs sont des structures non linéaires. Les techniques de commandes peuvent être classifiées en deux groupes : Les techniques de commande linéaire et les techniques de commande non linéaire [STO-91].

II.3.1. Commandes linéaires :

Cette famille de contrôleurs est conçue pour les systèmes linéaires. Pour les systèmes non linéaires comme les convertisseurs, elle peut être utilisée en linéarisant des boucles de commande autour d'un point de fonctionnement. En conséquence de ce mode de commande basé sur une linéarisation autour d'un ou de quelques points de fonctionnement, le contrôle peut être perdu en cas de changement de paramètres de fonctionnement.

Pour les systèmes linéaires on utilisera des correcteurs linéaires, pour en citer quelques-uns, le correcteur à avance ou à retard de phase, la commande par retour d'état linéaire, ou encore les contrôleurs à minimum de critère quadratique, sont des régulateurs testés et approuvés dans la commande des convertisseurs de puissance. Néanmoins, le régulateur proportionnel intégral dérivé (PID) reste le contrôleur le plus utilisé de l'industrie.

Le régulateur PID repose sur l'action de trois composantes (proportionnelle, intégrale et dérivée) à travers la fixation de leurs gains K_p, $K_i$et K_d. La première de ces actions est l'action proportionnelle dont l'effet est de réduire l'erreur statique, mais plus le gain K_p augmente plus la réponse devient oscillatoire. L'action intégrale annule complètement l'erreur statique, cependant, son augmentation rend le système instable. Enfin, le gain de l'action dérivée, s'il est bien choisi, aura pour effet l'atteinte de la stabilité du système plus rapidement et la diminution du dépassement, sinon il causera l'instabilité totale de la régulation. Ces trois composantes seront combinées afin d'obtenir un compromis entre la précision, la stabilité et la rapidité de la réponse.

$$C(s) = K_p + \quad K_i \frac{1}{\mathrm{s}} + K_d \mathrm{s} \tag{II.1}$$

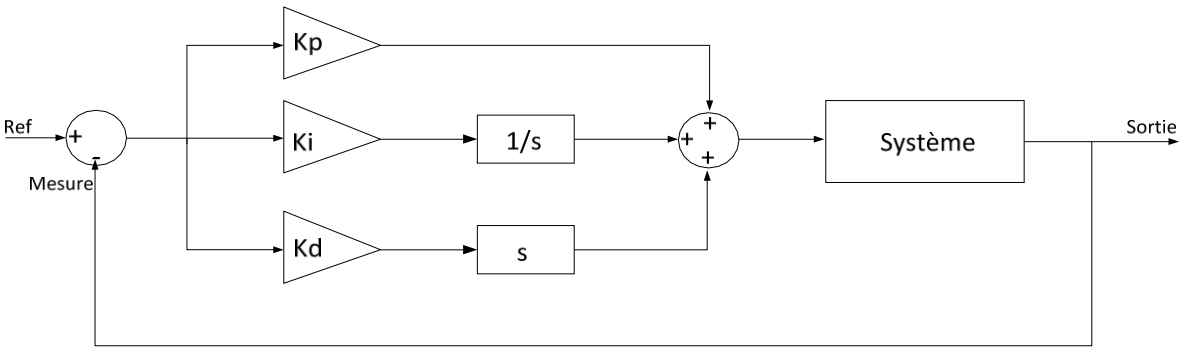


Figure II.11 : Régulateur PID

Le régulateur à avance et/ou retard de phase est un régulateur simple conçu pour la correction des systèmes linéaires, mais il a tout de même été utilisé pour le contrôle des structures d'électronique de puissance à plusieurs reprises. Ce compensateur peut avoir soit l'une des deux actions (avance et retard de phase) soit les deux actions en même temps. Il est représenté de la manière suivante :

$$C(s) = K.\frac{1 + \mathrm{aTs}}{1 + \mathrm{Ts}} \tag{II.2}$$

$$C(s) = K.\frac{1 + \mathrm{Ts}}{1 + \mathrm{bTs}} \tag{II.3}$$

$$C(s) = K.\frac{1 + \mathrm{aTs}}{1 + \mathrm{Ts}}.\frac{1 + \mathrm{T's}}{1 + \mathrm{bT's}} \tag{II.4}$$

L'équation 1I.2 représente un compensateur à avance de phase qui ressemble dans son fonctionnement à un contrôleur PD; **L'équation 1I.3** représente un compensateur à retard de phase dont le fonctionnement ressemble au fonctionnement d'un contrôleur PI; Enfin **l'équation 1I.4** représente un compensateur à avance-retard de phase et dont l'effet se rapproche de l'effet d'un contrôleur PID. Notons que a et b doivent toujours être strictement supérieurs à 0.

Le correcteur à avance de phase a pour effet d'améliorer la stabilité en réduisant le dépassement maximal et la rapidité du système en réduisant le temps de montée, alors que le correcteur à retard de phase a comme effet la réduction de l'erreur statique. Les deux actions peuvent être combinées dans le but de chercher un arrangement entre stabilité, rapidité et précision.

II.3.2. Commandes non linéaires :

À l'opposé des types de commandes linéaires, les commandes non linéaires prennent en considération les non linéarités des convertisseurs. La plupart des techniques reposent sur la théorie de stabilité de Lyapunov. Il existe deux techniques principales.

La première technique est la linéarisation exacte (connue en anglais sous le nom de «Feedback Linearization»). Elle consiste à linéariser le système en compensant ses non- linéarités, puis à lui appliquer une commande linéaire. La linéarisation peut être appliquée de deux manières différentes, celle au sens Entrée-Sortie et celle au sens Entrée-État. Le système étant linéarisé, des techniques de régulation linéaire peuvent être utilisées efficacement [YAC-06] [STO-91].

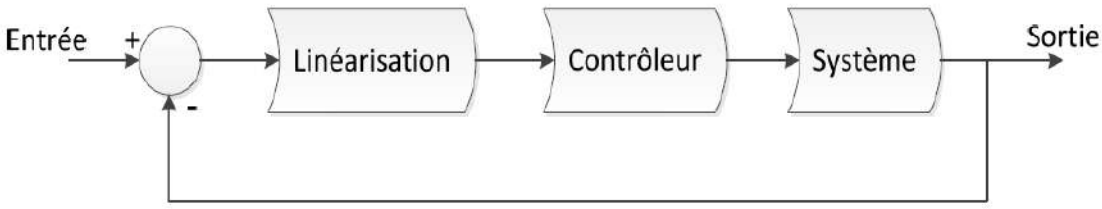


Figure II.12 : Commande par linéarisation exacte

La deuxième technique est la commande par mode de glissement, c'est une commande à structure variable (Variable Structure Controllers), basée également sur la théorie de stabilité de Lyapunov. Sa conception consiste aux trois étapes suivantes :

- Définir une surface dans laquelle le système est stable.
- Établir les conditions de convergences assurées par la théorie de stabilité de Lyapunov
- Définir les lois de commande.

Cette technique a l'avantage d'être simple et facile d'implémentation, elle est aussi robuste face aux changements de paramètres. Cependant, elle a l'inconvénient de fonctionner à un spectre de fréquences de commutation hautes, variables, et non contrôlable [UTK-99].

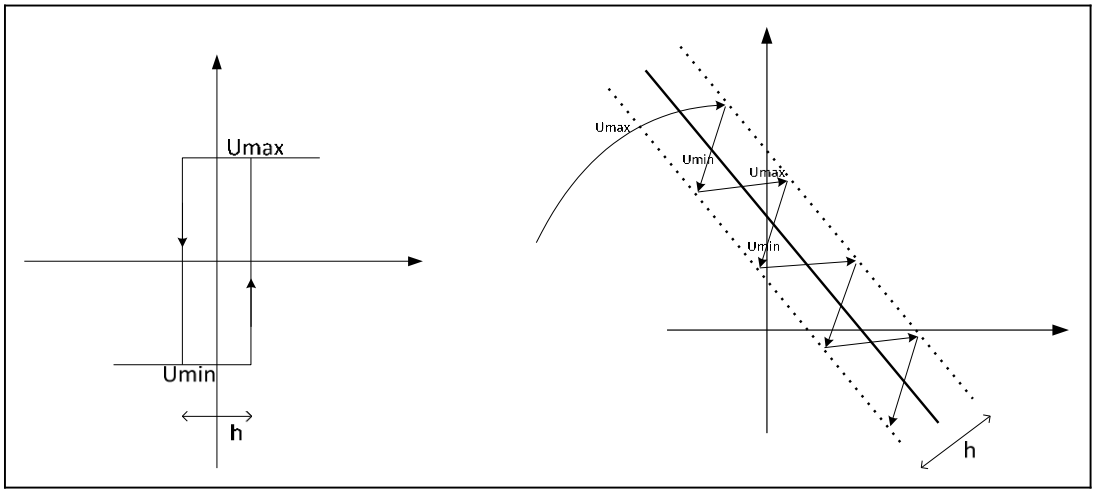


Figure II.13 : Commande par mode de glissement (Beckmans et Sigimondi)

II.4. Techniques de modulation :

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 [KAN-05] [MAR-05].

II.4.1. 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.

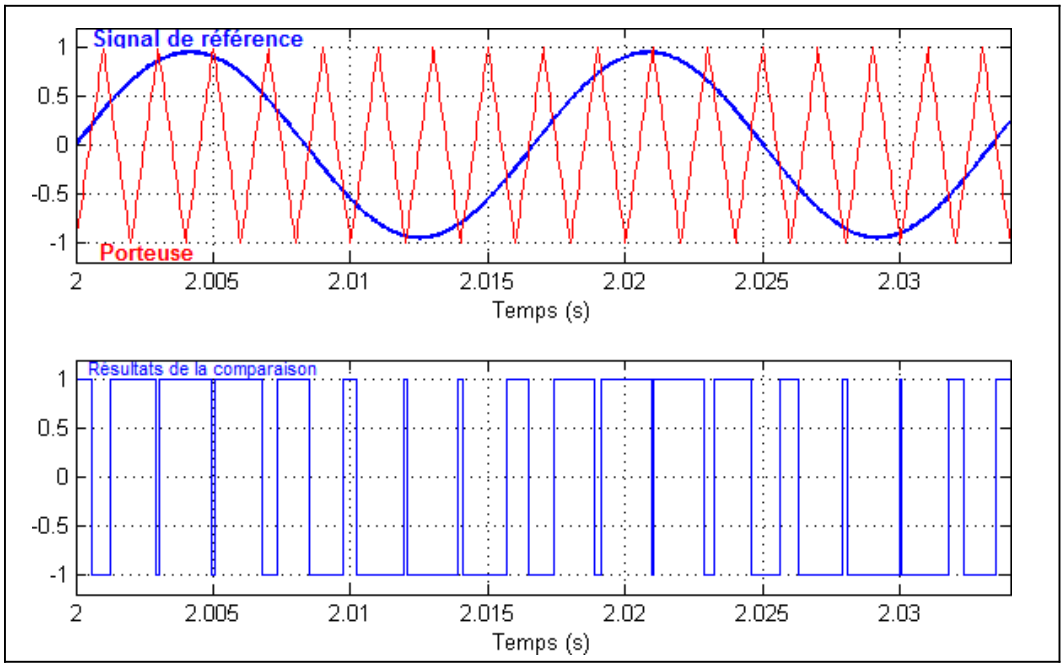


Figure II.14 : Comparaison entre le signal de référence et le signal triangulaire.

Dans la figure suivante, le signal de référence doit être modulé sur 5 niveaux. Il est alors comparé avec 4 porteuses triangulaires et donnant 4 signaux carré dont la somme donne le signal final modulé.

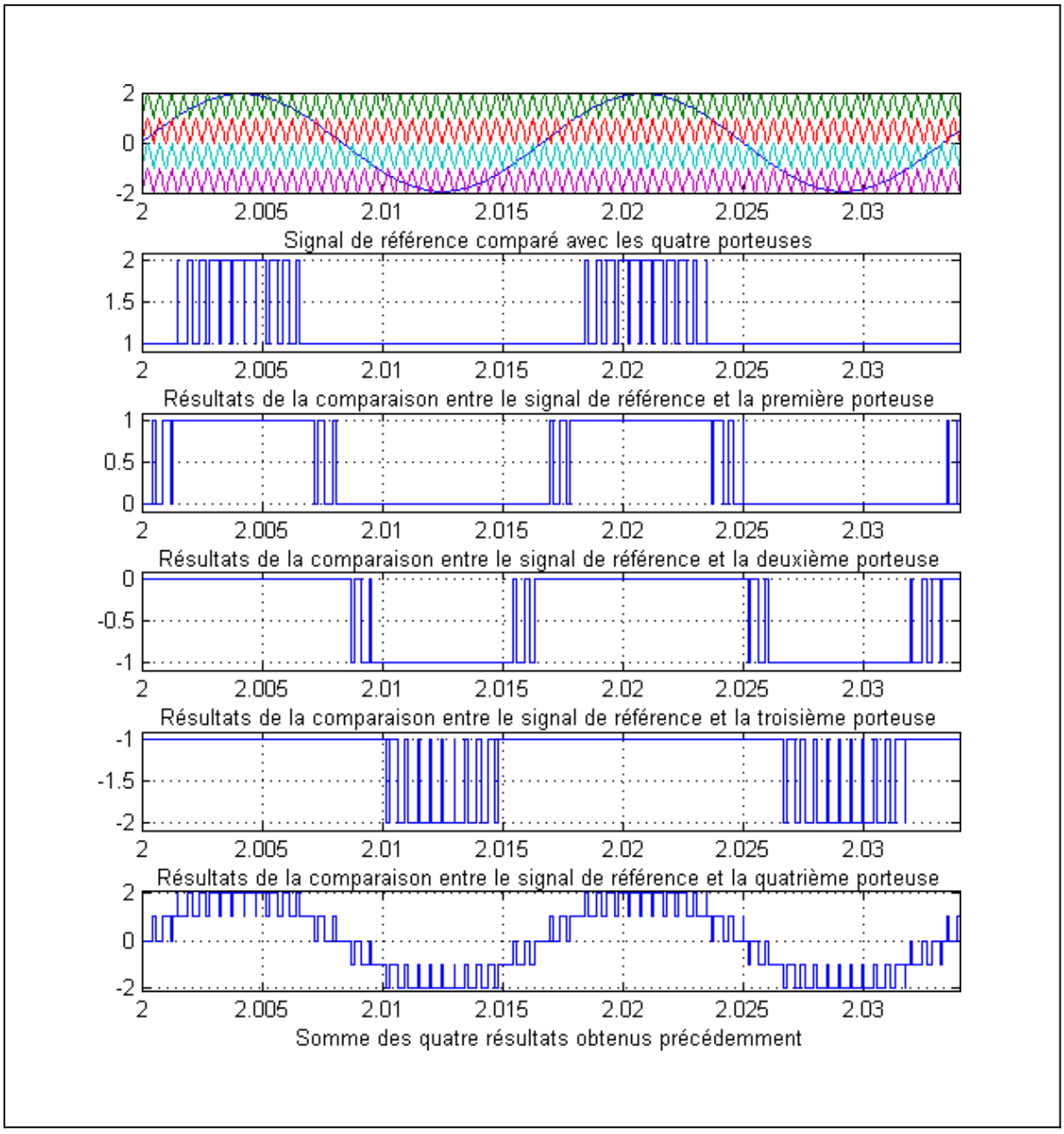


Figure II.15 : Modulation MLI 5 niveaux

Les méthodes de modulation PWM peuvent être classées par le type de l'agencement des porteuses [KHO-10] :

- Phase Disposition (PD) : Toutes les porteuses sont identiques en amplitude, en fréquence et en phase. C'est la méthode MLI la plus utilisée vue la simplicité de son implémentation.
- Phase Opposition Disposition (POD) : Les porteuses de la partie négative sont en opposition de phase avec ceux de la partie positive. Toutes les porteuses ont les mêmes fréquences et amplitudes.

- Alternative Phase Opposition Disposition (APOD) : Chaque porteuse est déphasée de 180° par rapport à ses adjacentes. Les fréquences et les amplitudes des porteuses sont égales.

- Phase Shifted (PS) : Chaque porteuse est déphasée de 90° par rapport à ses adjacentes. Comme pour les précédents types, les fréquences et les amplitudes des porteuses sont identiques.

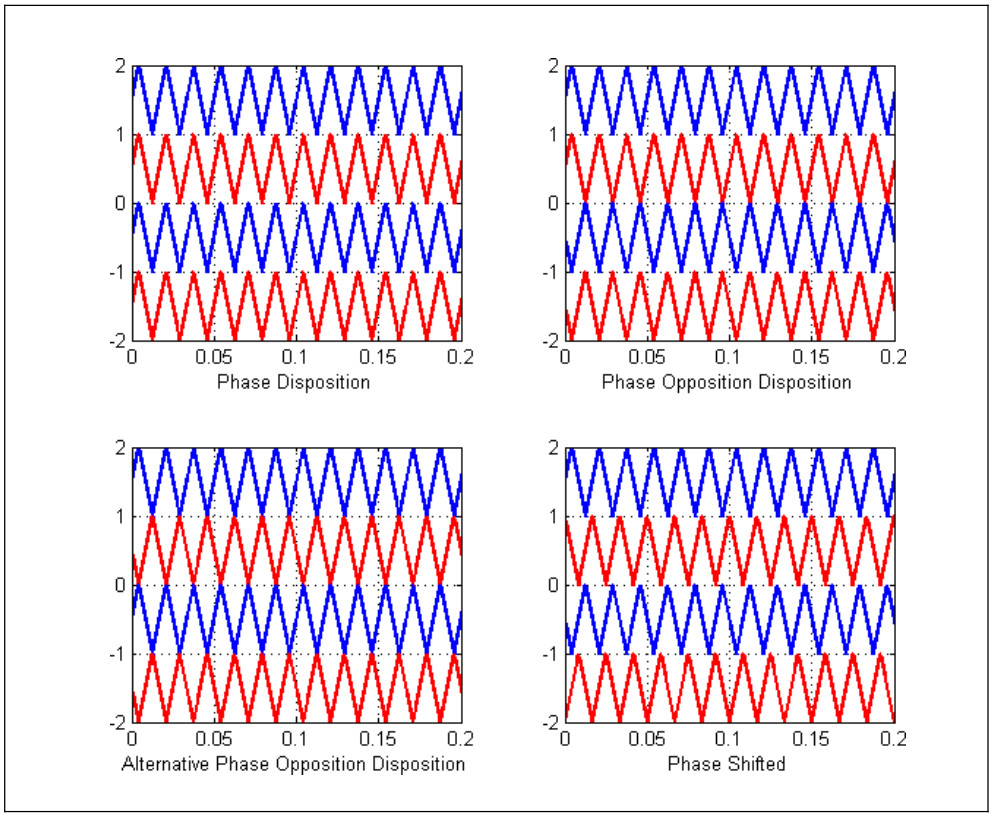


Figure II.16: Types de modulations MLI

II.4.2. Modulation vectorielle :

La modulation vectorielle est une variante de la MLI (Modulation de largeur d'impulsion), Elle a été introduite en Allemagne par Baschle en 1971. Elle est généralement utilisée dans la commande des machines électriques [CEL-00]. Cette technique consiste à présenter les tensions sous forme de vecteurs et à appliquer ces vecteurs pendant une période de temps donnée. Cette composition de vecteurs est présentée sous forme d'un diagramme vectoriel. La SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation) se distingue de la MLI inter sélective par le fait de ne pas utiliser

trois modulateurs séparés pour les trois bras d'un onduleur mais un seul vecteur global qui représente les états des trois bras en même temps.

Le travail de la SVPWM consiste au calcul des intervalles de temps accordés à chaque vecteur de tension pendant la durée du cycle de modulation, afin d'obtenir le vecteur de référence **(Figure II.17)** [SAE-08].

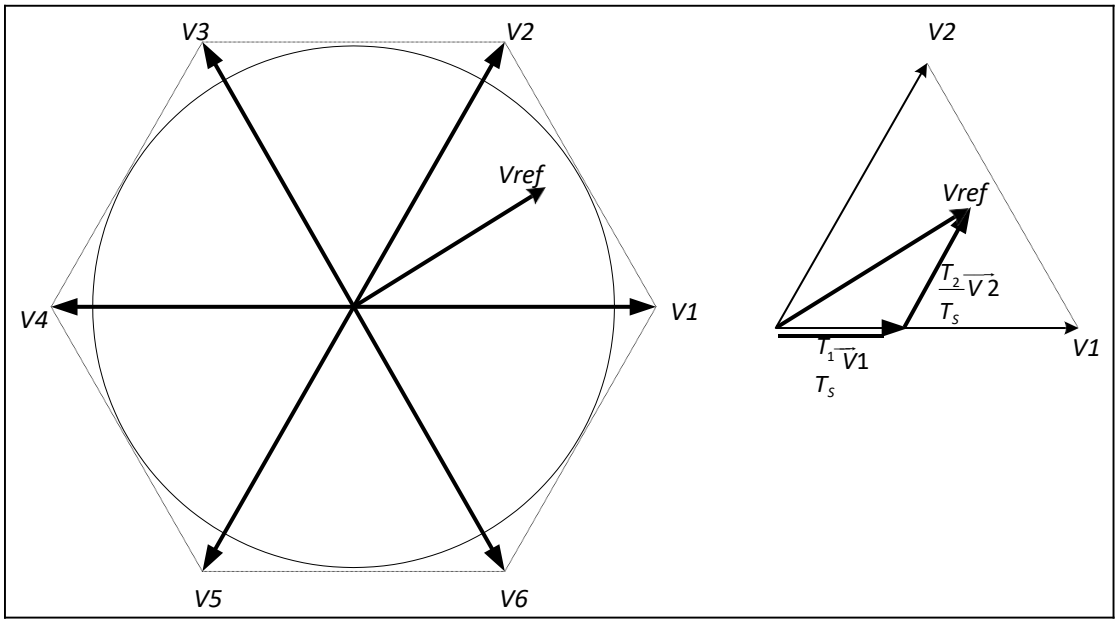


Figure II.17: Modulation vectorielle.

II.4.3. Modulation par Hystérésis :

La réalisation de cette technique, régulation par tout ou rien, consiste à accomplir les deux étapes suivantes :

- Comparer le courant mesuré avec le courant de référence ce qui produit un signal de commande qui sera le signal d'entrée appliqué au comparateur à hystérésis.
- Fixer une bande dans laquelle le coutant peut évoluer. L'atteinte du courant à l'une des limites provoque le changement du fonctionnement des interrupteurs de telle manière que le courant ne dépasse pas cette limite et se dirige vers l'autre

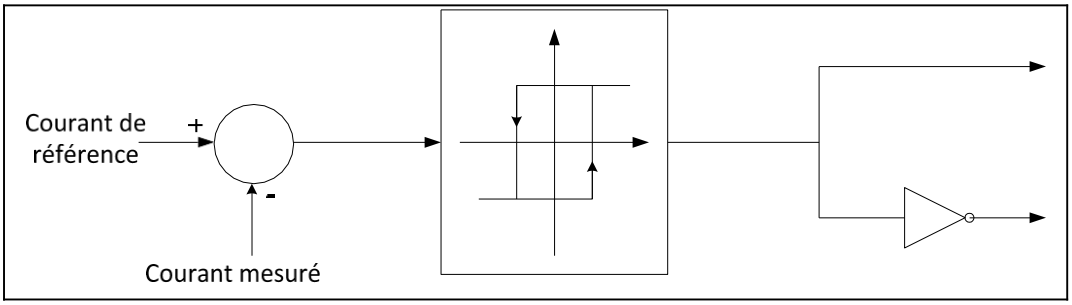


Figure II.18 : Principe de commande par Hystérésis.

Cette technique a l'avantage d'être simple et facile d'implémentation. À l'opposition de la technique de modulation MLI, celle-ci, a l'inconvénient de fonctionner à des fréquences de commutation variables et non contrôlables [KAN-05]. Plusieurs solutions ont été proposées afin de régler ce problème. Parmi elles la commande par hystérésis modulée qui consiste à comparer le signal d'erreur, produit suite à la première comparaison entre le courant de référence et le courant réel, avec un signal triangulaire qui fixe la fréquence de commutation.

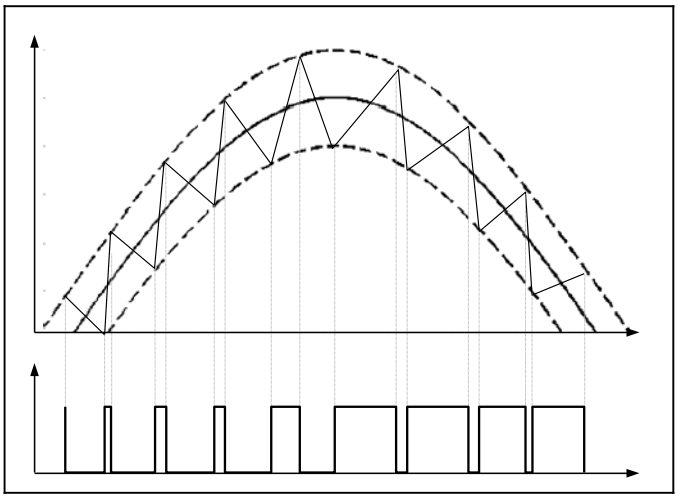


Figure II.19 : Modulation hystérésis.

II.5. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté l'état de l'art de tout ce qui se rapporte à ce travail tel que les convertisseurs multiniveaux, nous avons aussi présenté les principales des convertisseurs multicellulaires série a été présenté, et nous avons montré que les topologies multicellulaires, quant à elles, utilisent la mise en série des interrupteurs, assurant la répartition de la contrainte en tension du convertisseur sur plusieurs cellules de commutation.

Différents tests en commande MLI naturelle de simulation ont été faits pour le convertisseur multiniveaux et enfin les techniques de commande et modulation .

Chapitre III

LE CONVERTISSEUR PUC

III.1. Étude théorique :

Le convertisseur à cellules en U empilées PUC (Packed U Cells) est un convertisseur multiniveaux conçu en 2008 par Ounejjar et Al-Haddad (2008 et 2010) [OUN-08] [OUN-10]. Il est constitué par des cellules dont chacune est composée de deux interrupteurs (avec leurs diodes en antiparallèle) ainsi que d'un condensateur **(Figure III.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 7 niveaux est constitué de 6 interrupteurs et de deux condensateurs **(Figure III.2).** Le tableau 7 présente les différentes combinaisons que peut donner ce convertisseur. Pour avoir 7 niveaux équidistants il faut réguler la tension aux bornes du condensateur V_{aus} de manière à ce qu'elle soit égale au tiers de la tension aux bornes du condensateur V_{buc}.

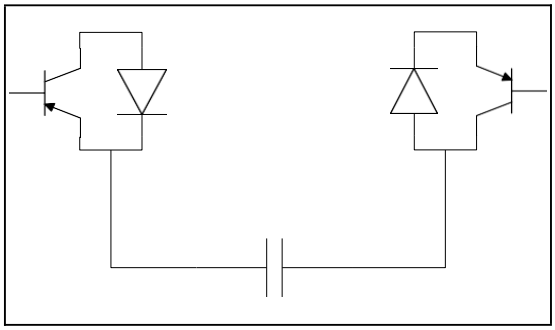


Figure III.1 : Cellule d'un convertisseur PUC

Tableau III.1 : Tableau de commutation du convertisseur PUC

État	**T1**	**T2**	**T3**	**Vs**	**Vs (avec V_{aux} =1/3 V_{bus})**
0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	V_{aus}	1/3 V_{buc}
2	0	1	0	$V_{buc} - V_{aus}$	2/3 V_{buc}
3	0	1	1	V_{buc}	V_{buc}
-3	1	0	0	$-V_{buc}$	$-V_{buc}$
-2	1	0	1	$-(V_{buc} - V_{aus})$	-2/3 V_{buc}
-1	1	1	0	$-V_{aus}$	-1/3 V_{buc}
0	1	1	1	0	0

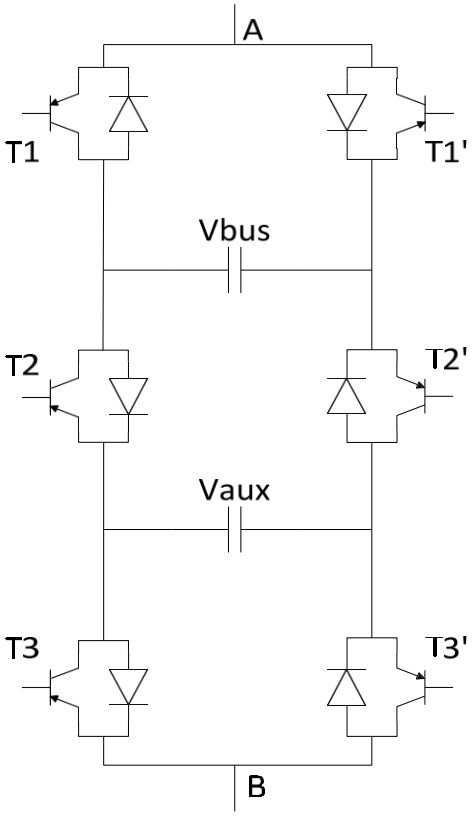


Figure III.2 : Convertisseur PUC 7 niveaux

III.2. Convertisseur PUC à sept nineaux :

III.2.1. Fonctionnement et modes opératoire :

Le convertisseur PUC à sept niveaux est constitué de six interrupteurs **(voir figure III.3).** Chaque interrupteur ne peut avoir que deux états, à savoir un état où il est bloqué et un autre où il saturé, ce qui permet d'atteindre (2^3) huit états dont deux redondants. **Le tableau III.2** montre les sept niveaux de tension produits en fonction des états des interrupteurs. **Les figures III.4** et **III.5** mettent en retrait les huit états du convertisseur PUC à sept niveaux [OUN-11].

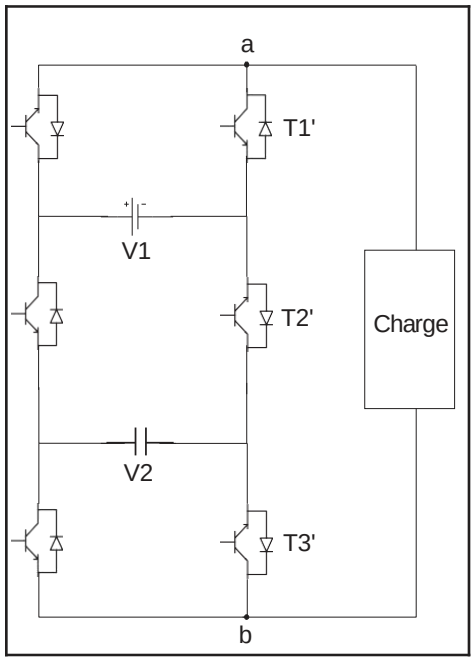


Figure III.3 : Convertisseur PUC à sept niveaux.

Tableau III.2 : Table de commutation.

V_{ab}	T1	T2	T3
V1	1	0	0
V1-V2	1	0	1
V2	1	1	0
0	1	1	1
0	0	0	0
-V2	0	0	1
V2-V1	0	1	0
-V1	0	1	1

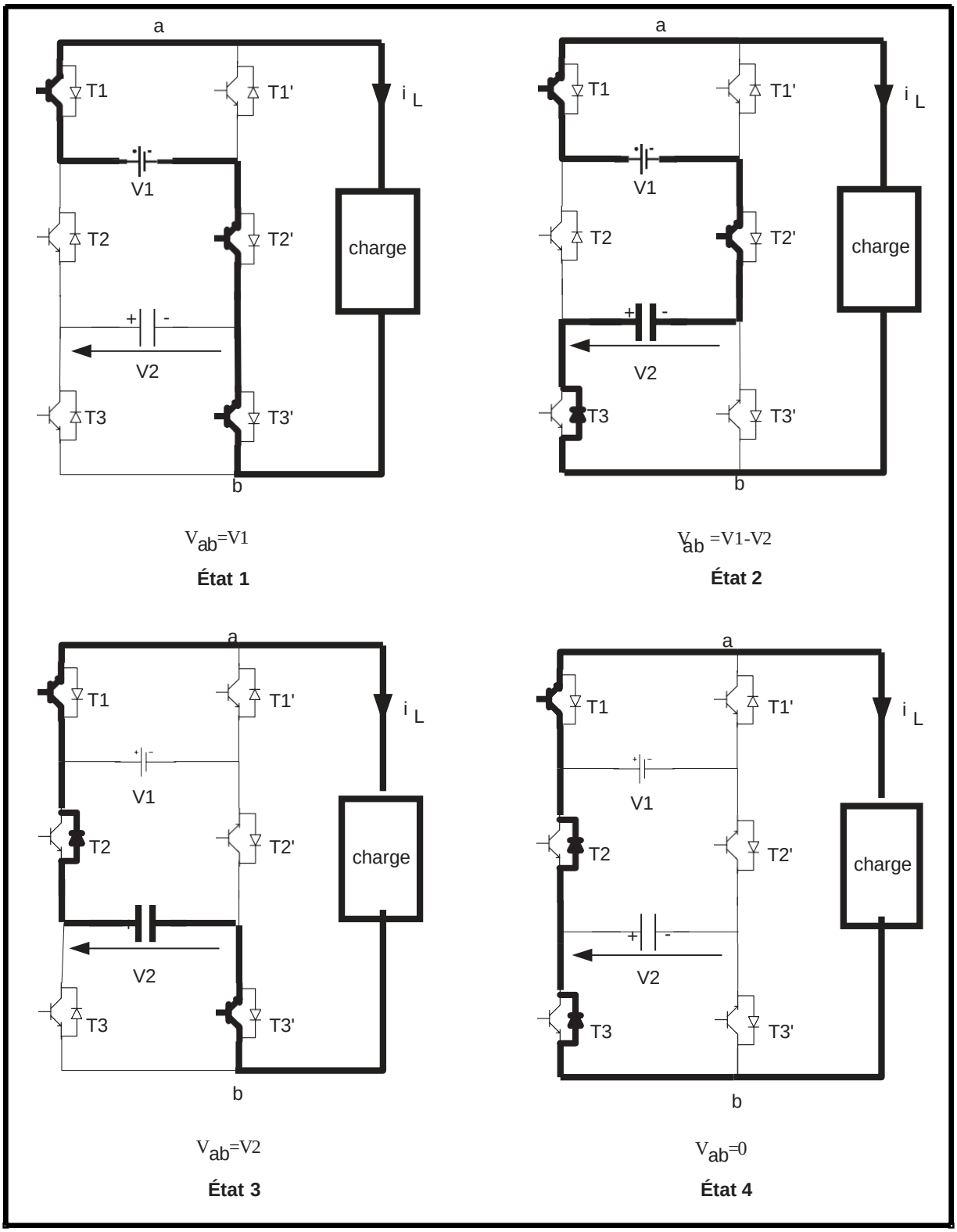


Figure III.4 : Tensions positives produites par le convertisseur PUC à sept niveaux.

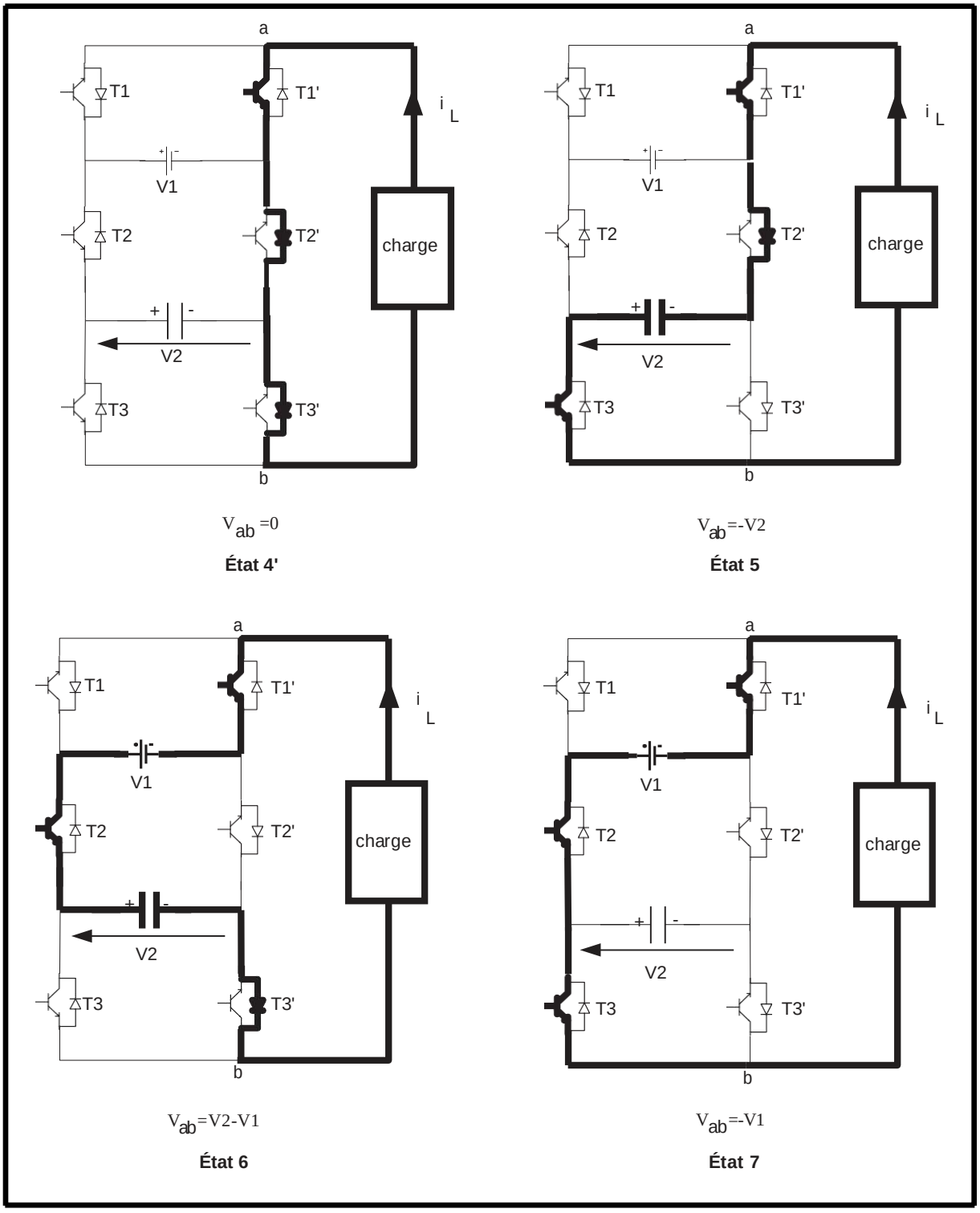


Figure III.5 : Tensions négatives produites par le convertisseur PUC à sept niveaux.

III.2.2. Modulation proposée :

En subdivisant la sinusoïde désirée en six parties, trois positives et trois négatives, et en utilisant la modulation sept niveaux on peut générer six signaux. Nous faisant en sorte que quelques signaux issus de l'alternance positive prennent la valeur 1 ou 2 et de même pour l'alternance négative prennent la valeur -1 ou -2. Les autres signaux auront la valeur 0 ou 1 pour l'alternance positive et -1 ou 0 pour l'alternance négative comme montré à **la figure III.6.** La somme de ces signaux résulte sur un signal unique qu'on notera avec la lettre S. Ce signal est constitué de huit niveaux qui correspondent à ceux désirés pour la tension de sortie. Il est à noter qu'il y a deux niveaux (2 et -2) qui sont redondant et réfèrent le niveau de tension nul **(voir figure III.7).** La forme d'onde du signal S est donnée à **la figure III.8.** [OUN-11].

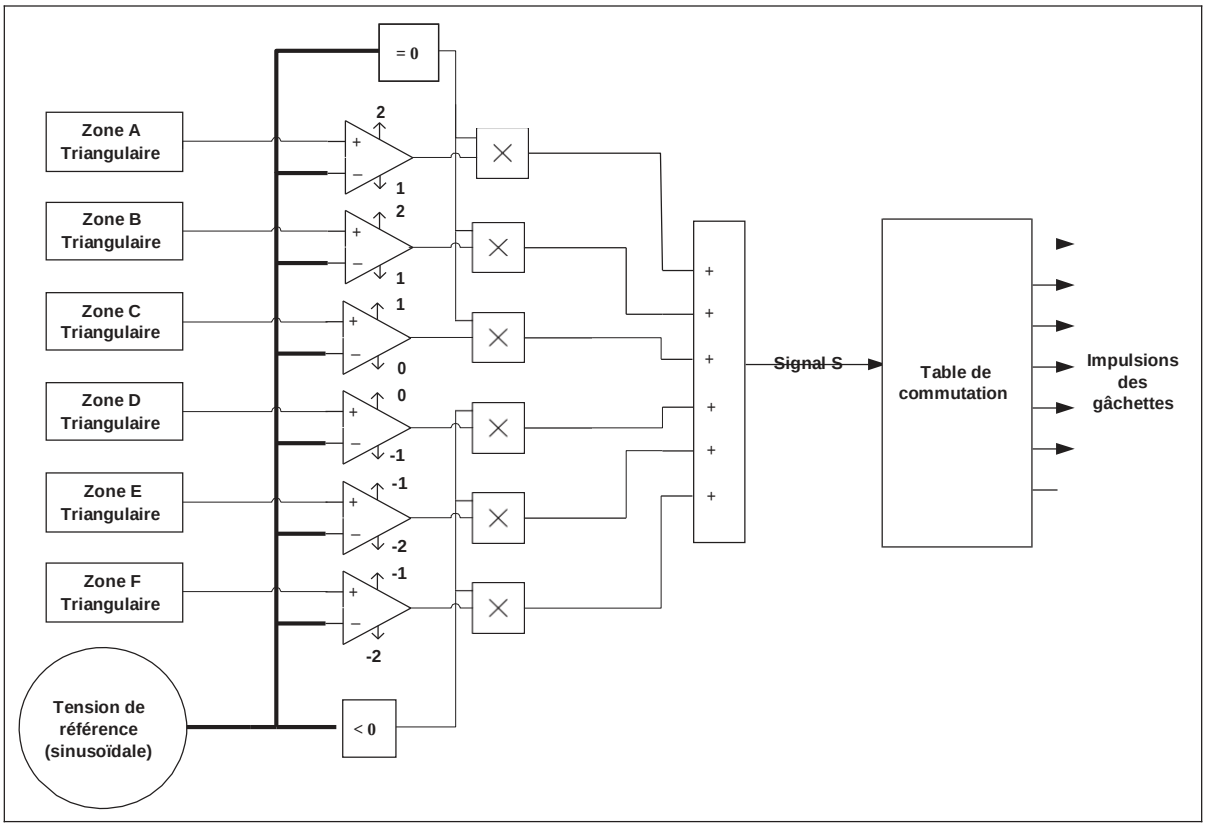


Figure III.6 : Technique de modulation proposée.

Après la génération de ce signal S, les impulsions des gâchettes sont obtenues à travers une table de commutation. Le tableau 3.3 montre la correspondance entre les états fonctionnels, le signal S et les tensions produites par le convertisseur PUC.

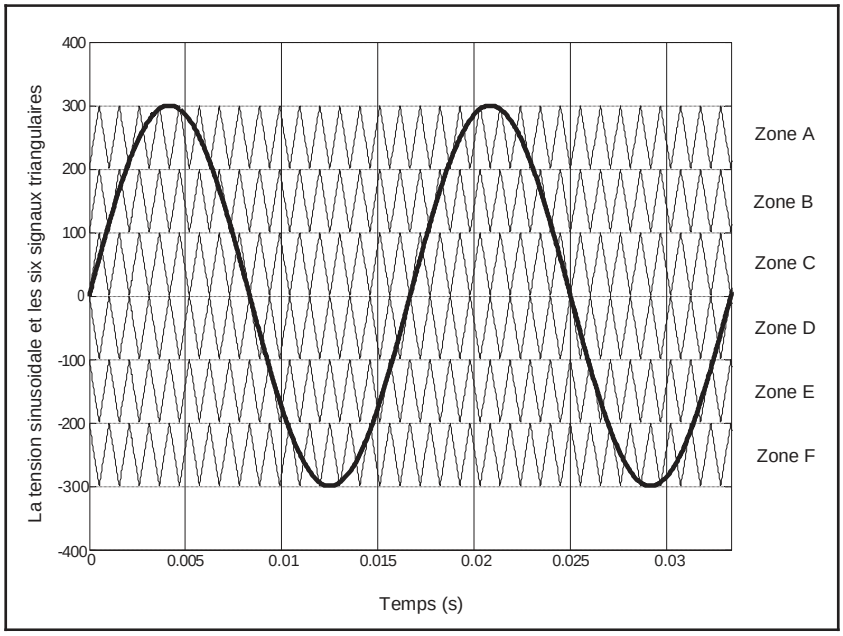


Figure III.7 : MLI sinusoïdale à sept niveaux.

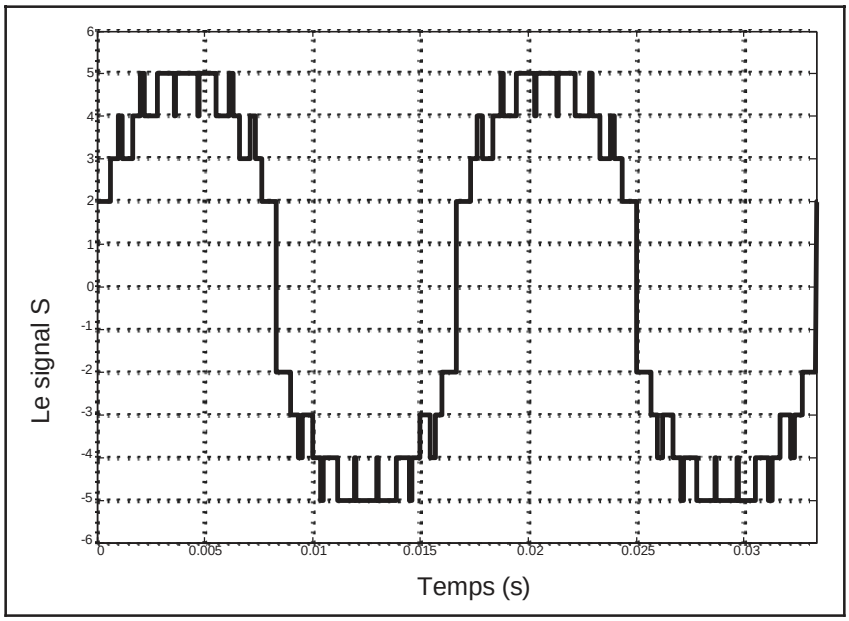


Figure III.8 : Forme d'onde du signal S.

Tableau III.3 : Table de correspondance

État	Signal S	Tension produite
1	5	V1
2	4	V1-V2
3	3	V2
4	2	0
4’	2-	0
5	3-	-V2
6	4-	V2-V1
7	5-	-V1

III.3. Convertisseur PUC Monophasé :

III.3.1. Fonctionnement en onduleur :

a)Totologie :

Dans le fonctionnement en mode onduleur, le convertisseur PUC comporte une source de tension continue V_{buc} et un condensateur V_{aus}. La charge est connectée aux bornes des points A et B. Comme indiqué précédemment, la tension aux bornes du condensateur V_{aus} doit être régulée au tiers de la tension V_{buc}. Si on suppose que la tension d’alimentation V_{buc} est égale à 300 V et que la tension aux bornes du condensateur V_{aus} 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][CHE-14].

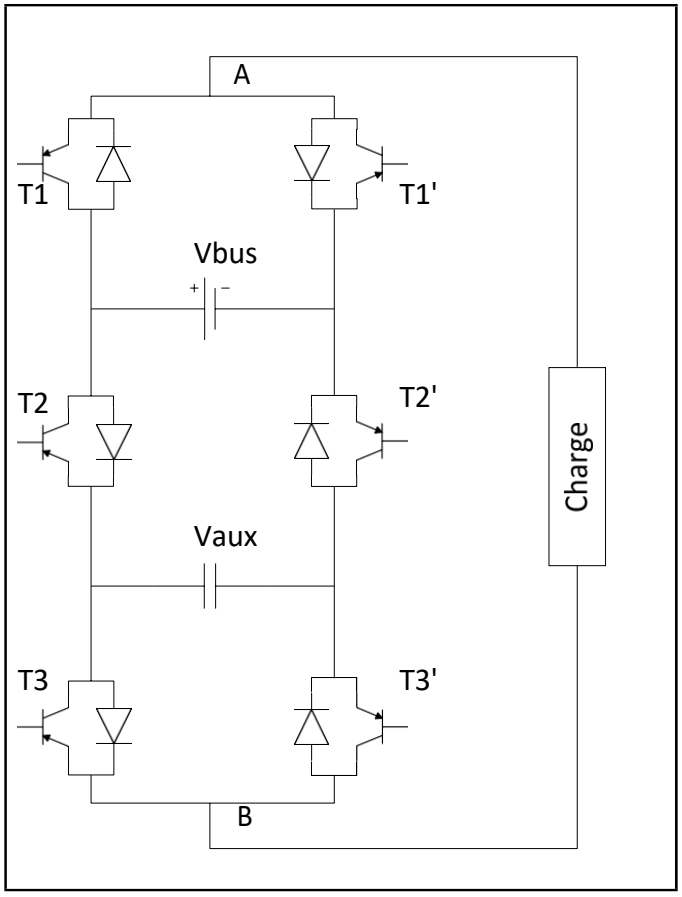


Figure III.9 : Schéma de l'onduleur PUC 7 niveaux

b) Commande Utilisée :

Pour mieux expliquer cette commande nous allons la diviser en trois parties. La première partie consiste en la régulation de la tension aux bornes du condensateur. Cette régulation est effectuée à l'aide d'un contrôleur PI qui donne le signal de référence pour la régulation du courant de charge (à l'aide d'un contrôleur proportionnel). La deuxième phase de la commande est la modulation du signal obtenu, il sera comparé à six signaux triangulaires d'amplitude unitaire repartis entre -3 et 3. L'astuce consiste à créer un décalage dans les signaux triangulaires de la MLI (6 porteuses qui permettront de produire 7 niveaux de tension comme le montre **la figure III.11**). Ce décalage permettra de charger et de décharger le condensateur de telle manière à garder sa tension autour de la valeur désirée, ce qui nous donnera un signal modulé sur sept niveaux **(figure III.12).** La troisième partie de la commande

consiste à récupérer ce dernier signal (signal sur 7niveaux de **la figure III.12**) et d'attribuer les signaux des interrupteurs afin d'obtenir une tension semblable sur sept niveaux. **La figure** suivante **(III.10)** montre le fonctionnement de cette commande [GRE-09] [CHE-14].

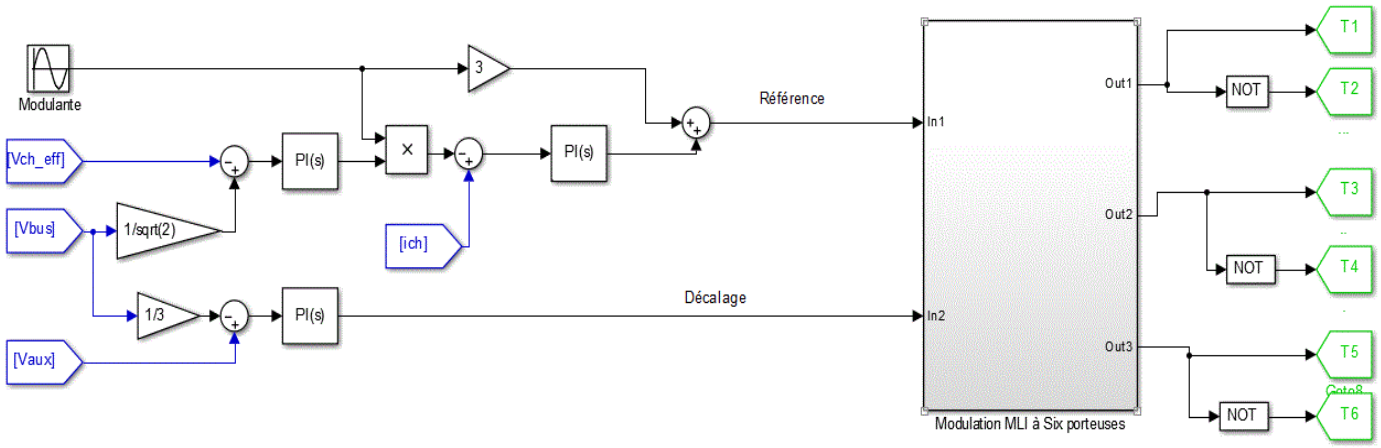


Figure III.10 : Commande MLI

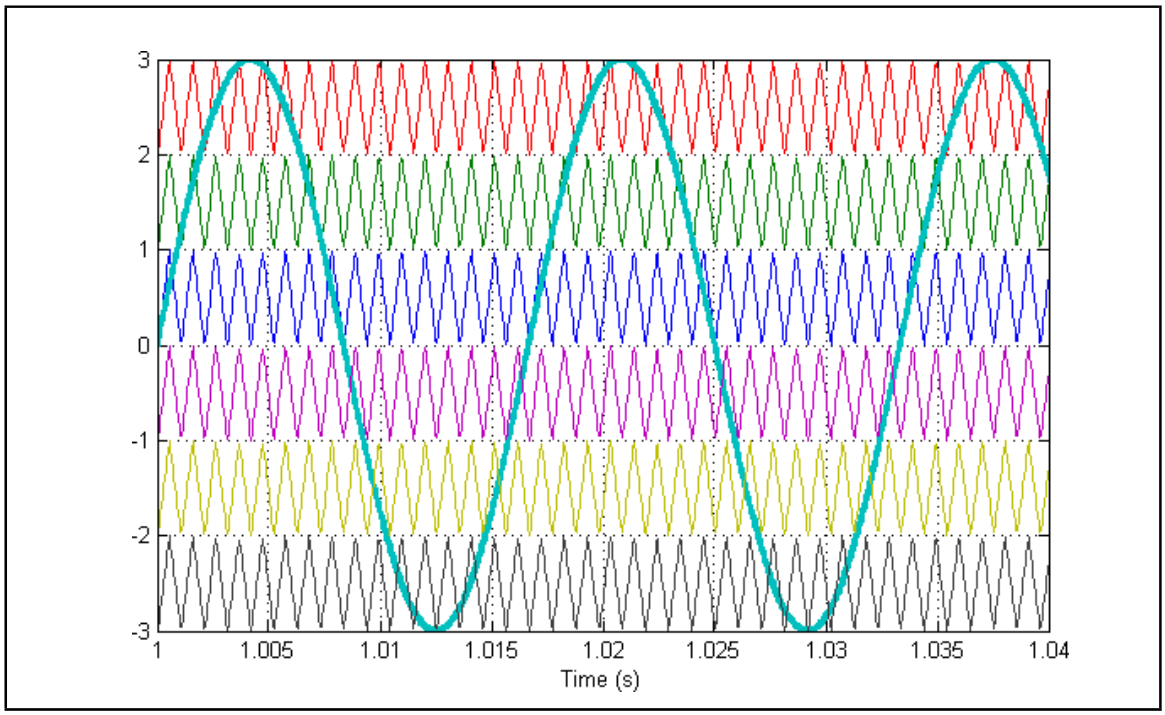


Figure III.11 : comparaison entre Le signal de référence et les six porteuses

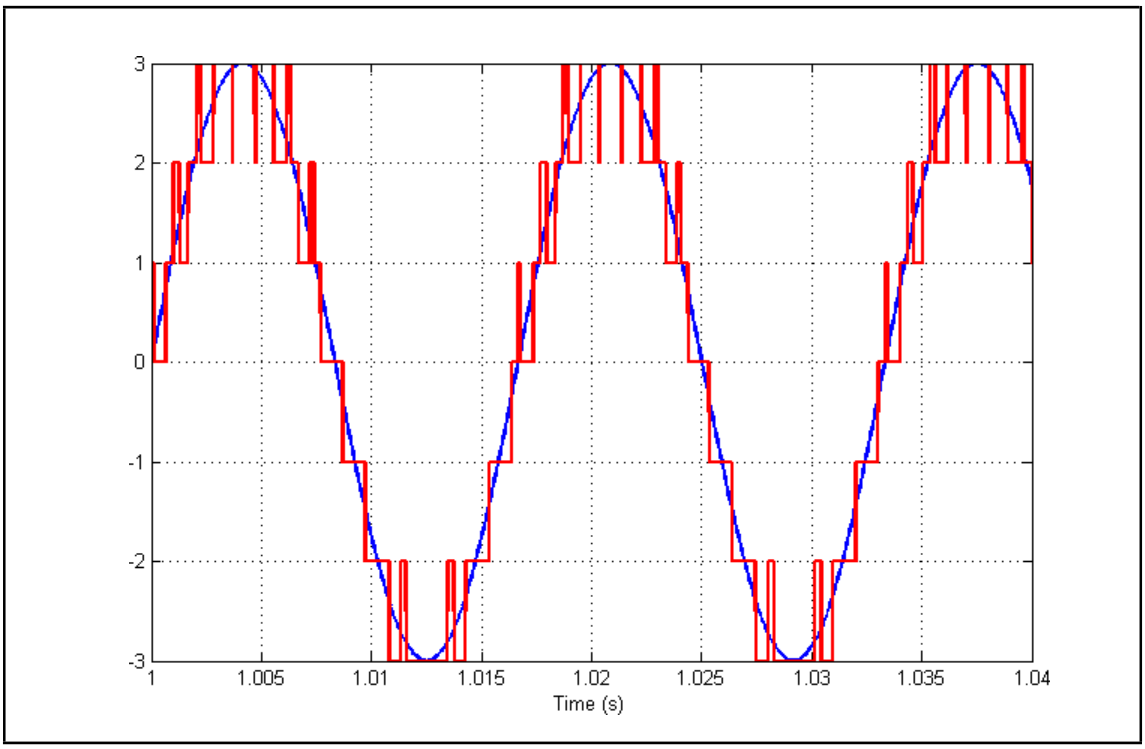


Figure III.12 : Signal modulé obtenu

c) Résultats de la simulation :

Le circuit de puissance est composé des éléments suivants : une source de tension continue V_{buc} de 300V, un condensateur de 4000uF qui doit être régulé à 100V (soit 1/3 de V_{buc}), les 6 interrupteurs (IGBT avec des diodes en antiparallèle) et enfin une charge composée d'une résistance et d'une inductance (R = 40 Ohm, L = 20mH).

Paramètres de simulation de l'onduleur monophasé PUC :

- La tension de source $E = 300V$
- La fréquence de commutation $f_{com} = 10kHz$
- La résistance de la charge $R = 40\Omega$
- L'inductance de la charge $L = 20mH$
- Le condensateur Bus $C = 4000\mu F$

La figure suivante **(III.13)** montre les formes de signaux obtenus. La tension de charge est une tension repartie sur sept niveaux, le courant de charge est de forme

sinusoïdale, il a un taux de distorsion harmonique de 3.4%. Le taux de distorsion harmonique de la tension est de 8.6% ce qui est aussi un bon taux. 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.

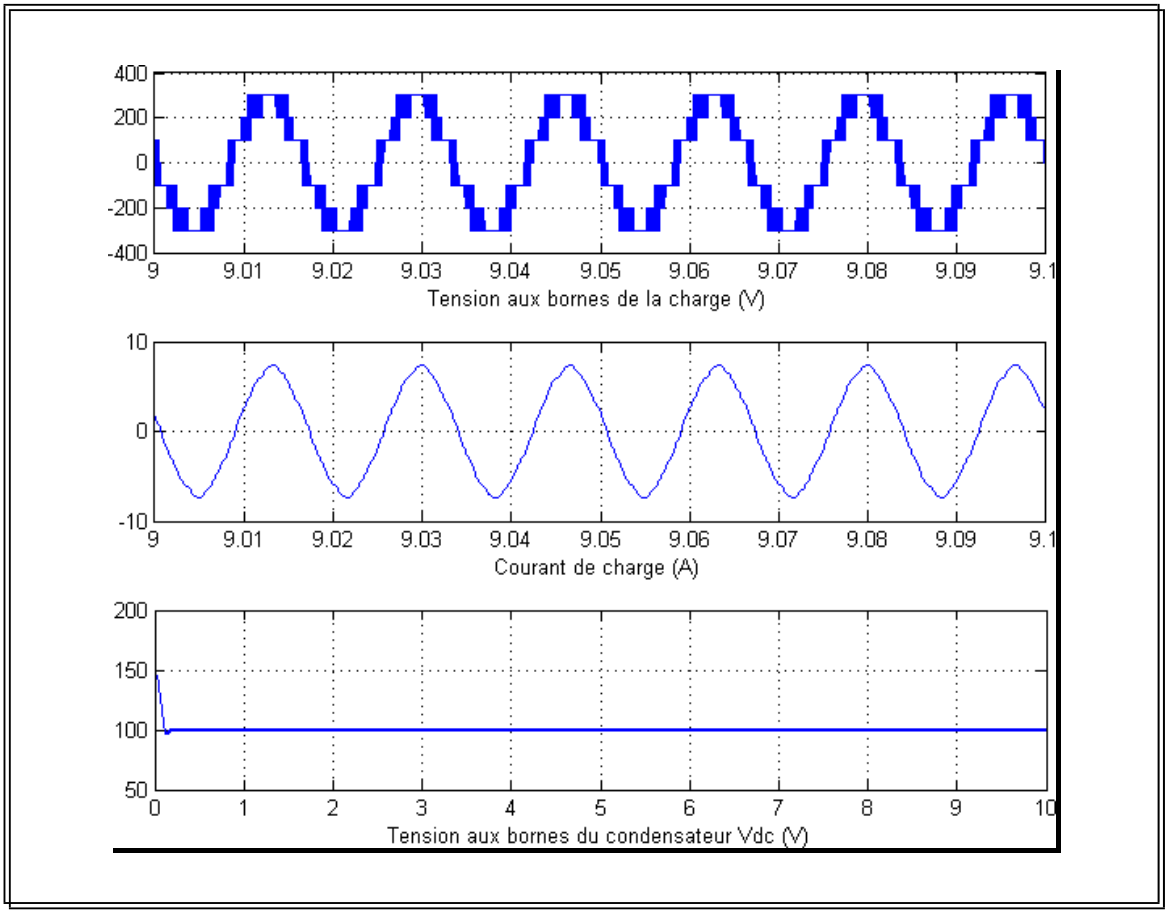


Figure III.13 : Formes d'ondes de la tension, courant et tension du condensateur

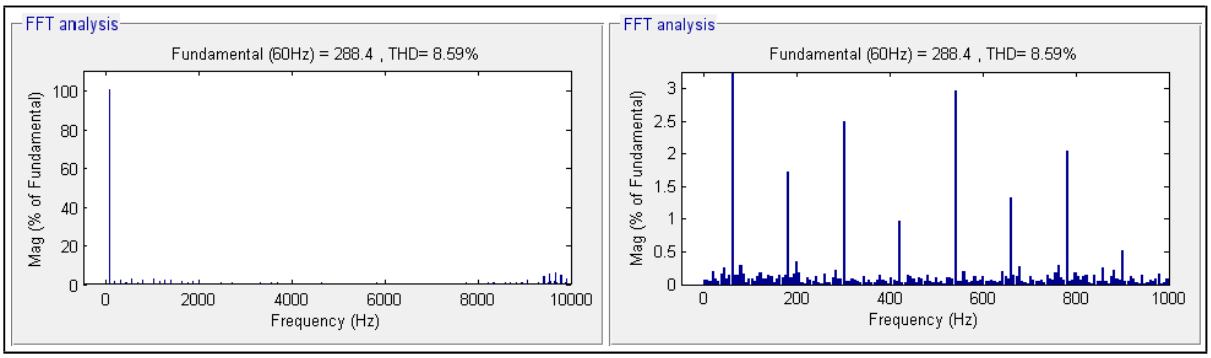


Figure III.14 : THD de la tension de charge

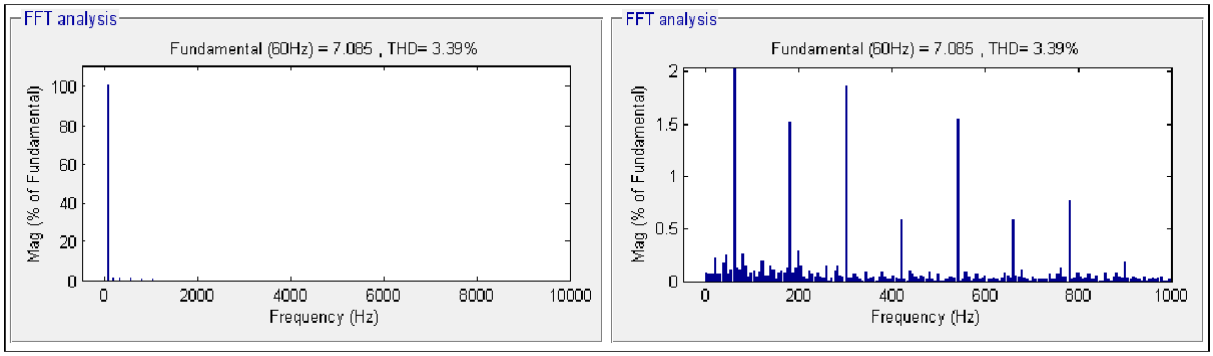


Figure III.15: THD du courant de charge

III.3.2. Fonctionnement en redresseur :

a)Totologie :

Pour la topologie en mode redresseur, la source de tension continue est remplacée par un condensateur alors que la charge est remplacée par une source de tension alternative. Une résistance et une inductance de ligne sont ajoutées en série avec la source alternative. Leurs valeurs sont : R=0.2 Ohm et L=3 mH. Deux résistances sont connectées aux bornes des condensateurs C1 et C2, elles peuvent être considérées comme charges résistives [CHE-14].

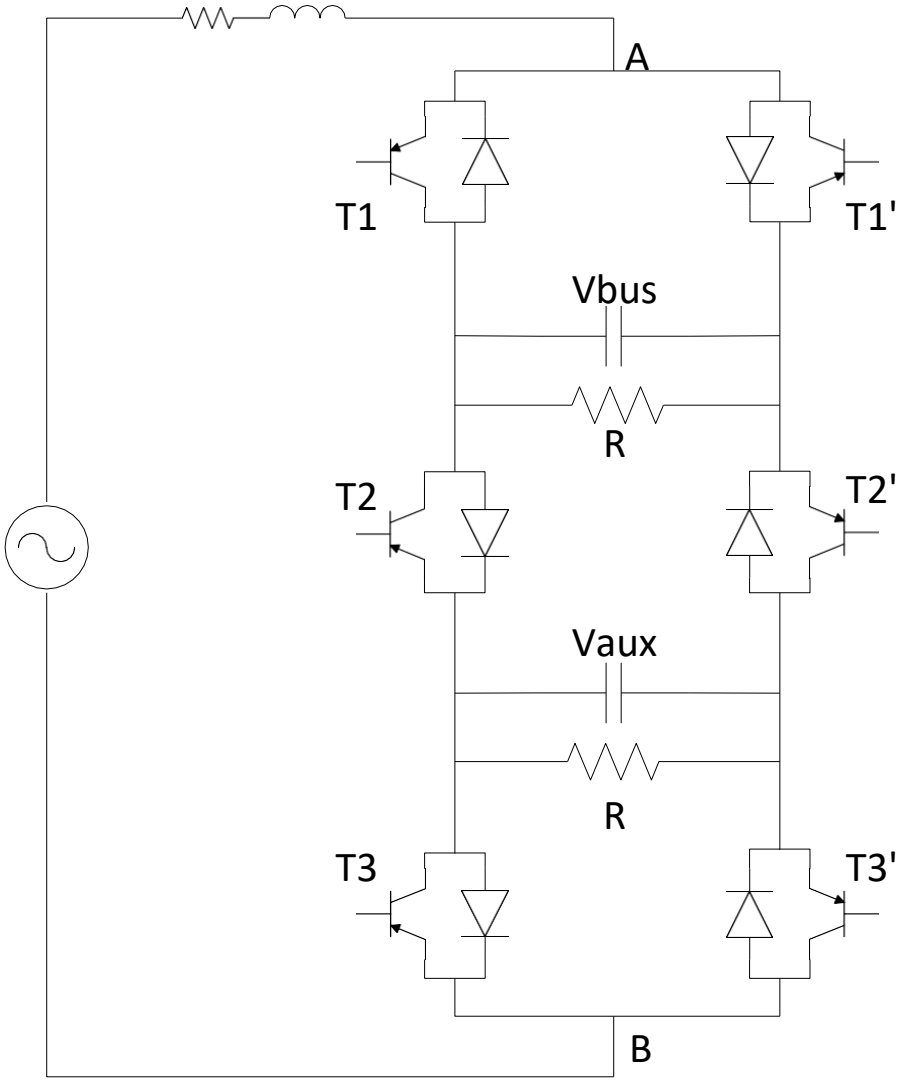


Figure III16 : Redresseur PUC 7 niveaux

b)Commande Utilisée :

Deux types de régulation seront utilisés pour la commande en mode redresseur, soit la commande MLI (semblable à celle utilisée avec l'onduleur) et une commande par Hystérésis. En mode redresseur il y a des petites différences puisque pour ce mode il faut réguler deux condensateurs au lieu d'un seul [CHE-14].

- Commande MLI :

La commande MLI est très similaire à celle de l'onduleur mais il faut noter quelques légères différences. En excluant l'ajustement des gains, la régulation est identique à celle utilisée pour l'onduleur. Au niveau de la modulation il faut inverser le signe du décalage [CHE-14].

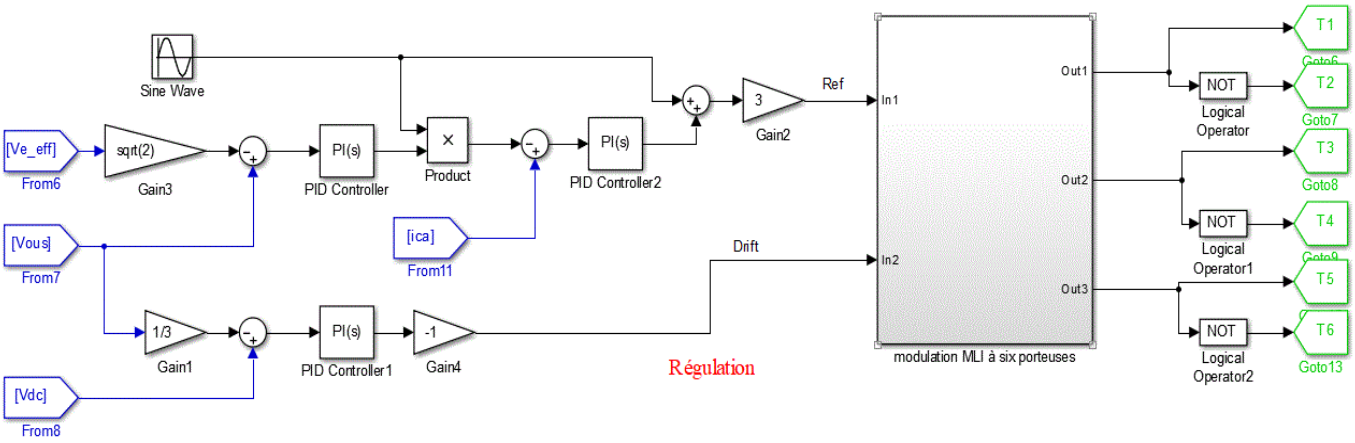


Figure III.17 : Régulation MLI pour le redresseur PUC

- Commande pas Hystérésis :

La régulation par Hystérésis est légèrement différente comme le montre la figure suivante. Les deux tensions aux bornes des condensateurs sont régulées avec des correcteurs PI, leur somme est à son tour régulée avec un PI, ce qui donne le signal de référence pour le courant. Le courant mesuré sera comparé au signal de référence précédent et régulé avec un correcteur proportionnel. Le signal de référence final est présenté à un système de modulation hystérésis à six bandes [OUN-11] [CHE-14].

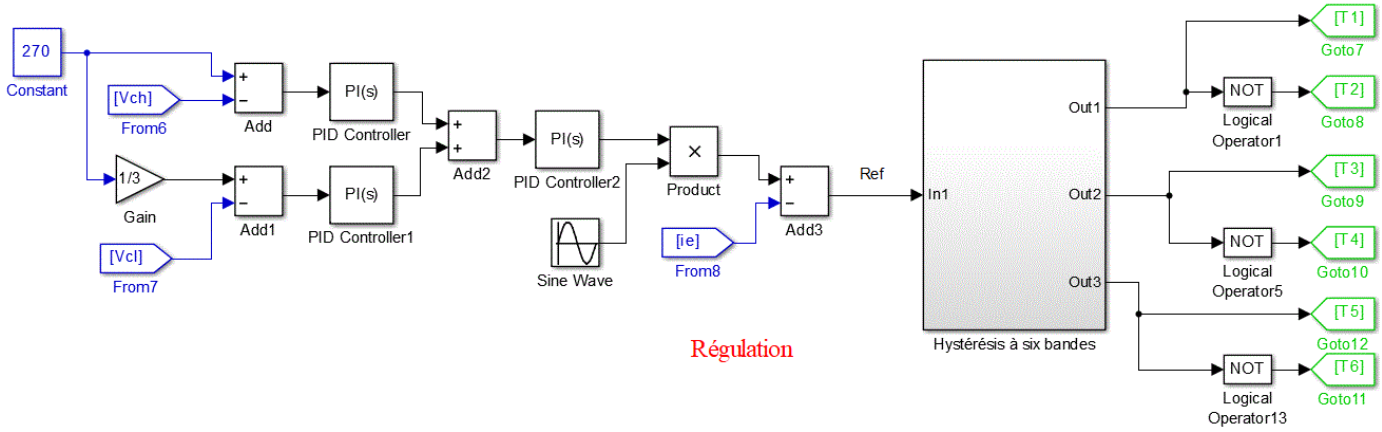


Figure III.18 : Commande par Hystérésis

c)Résultats :

Pour ces deux types de commande les résultats sont similaires, toutes les deux fonctionnent parfaitement. Nous remarquons des performances légèrement meilleures pour la commande par hystérésis en termes de taux de distorsion harmonique, cependant les changements des conditions de fonctionnement témoignent d'une meilleure robustesse pour la commande à MLI.

- Résultats pour la commande MLI :

Paramètres de simulation du redresseur MLI :

- La tension de source $E = 120\sqrt{2}\,V$
- La résistance bus principal $R = 20\,\Omega$
- L'inductance bus auxiliare $L = 80\,mH$
- La résistance de ligne $R = 0.2\,\Omega$
- L'inductance de ligne $L = 3\,mH$
- La fréquence de commutation $f_{com} = 10kHz$
- Le condensateur bus principal $C = 4000\mu F$
- Le condensateur bus auxiliare $C = 4000\mu F$

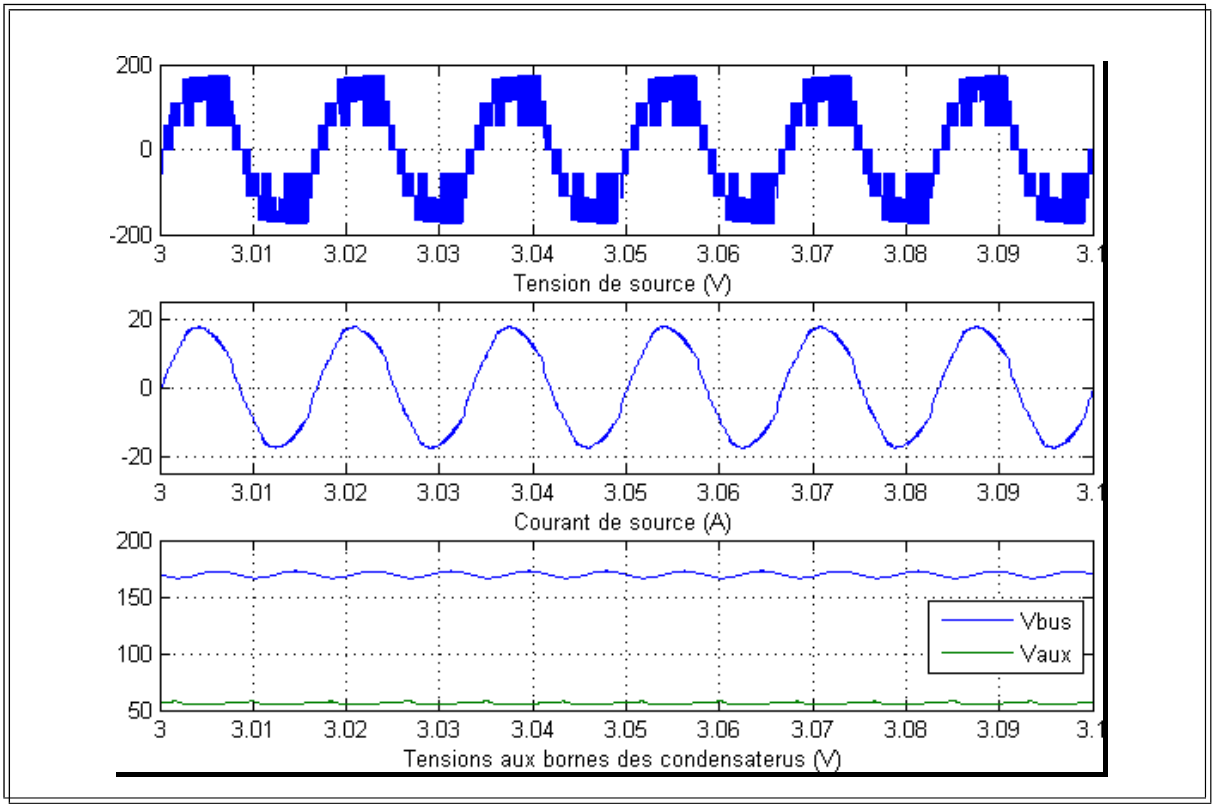


Figure III.19 : Tension, Courant et tensions aux bornes des condensateurs

Les résultats montrent que la tension est répartie sur les 7 niveaux souhaités, son taux de distorsion harmonique est de 11%, il est élevé mais reste tout à fait ordinaire pour une tension multiniveaux. Le courant est sous forme sinusoïdale avec un taux de distorsion harmonique de 5%. Les tensions des condensateurs Vbus et Vdc sont correctement régulées :

$$Vbuc = 120 * \sqrt{2} = 170V \text{ (Égale à Vmax)}$$

$$Vdc = (1/3) * Vbuc = 57V \text{ VcIc}$$

La variation de la charge (en la réduisant de moitié en cours de fonctionnement) montre que le système reste fiable et réagit très bien aux changements. En effet, le courant de source double entre les instants 3s et 4s mais sa forme reste sinusoïdale. Les tensions aux bornes des condensateurs ne sont pas affectées. Le facteur de puissance demeure unitaire et constant tout au long de la simulation.

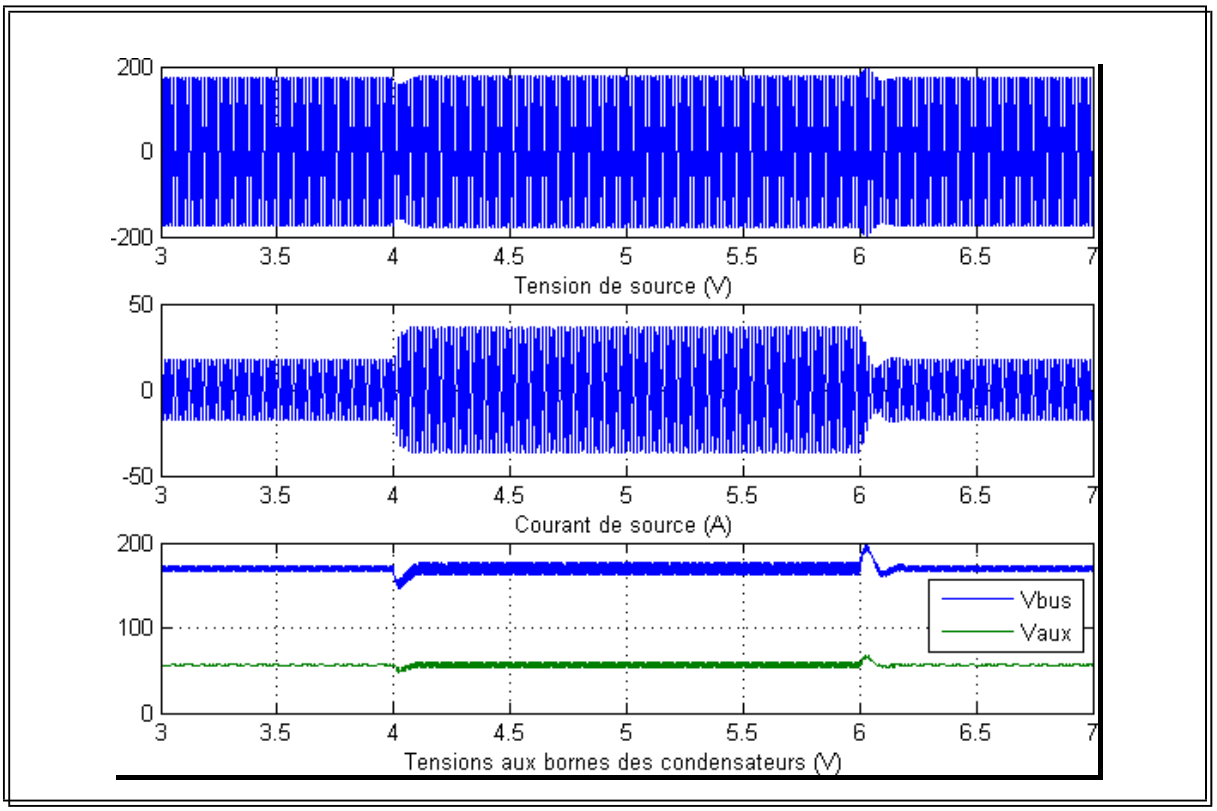


Figure III.20 : Redresseur PUC MLI avec variation de charge

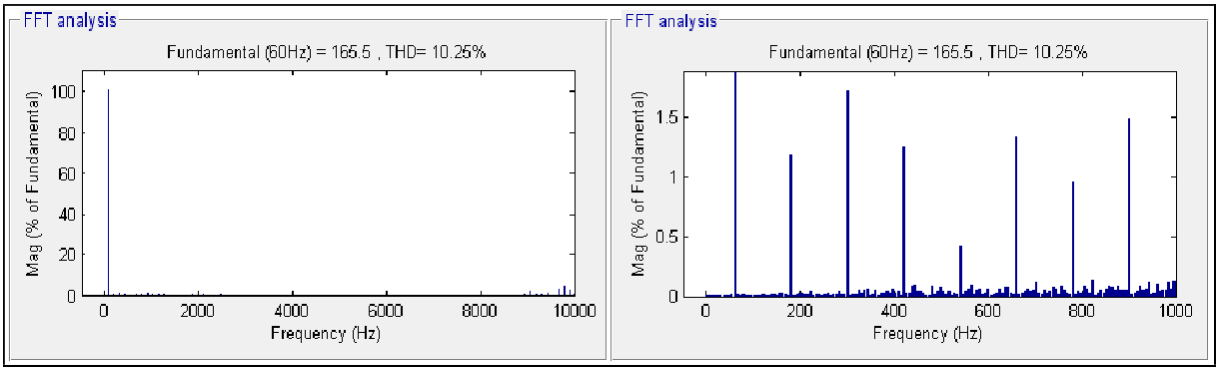


Figure III.21 : Taux de distorsion harmonique de la tension de source

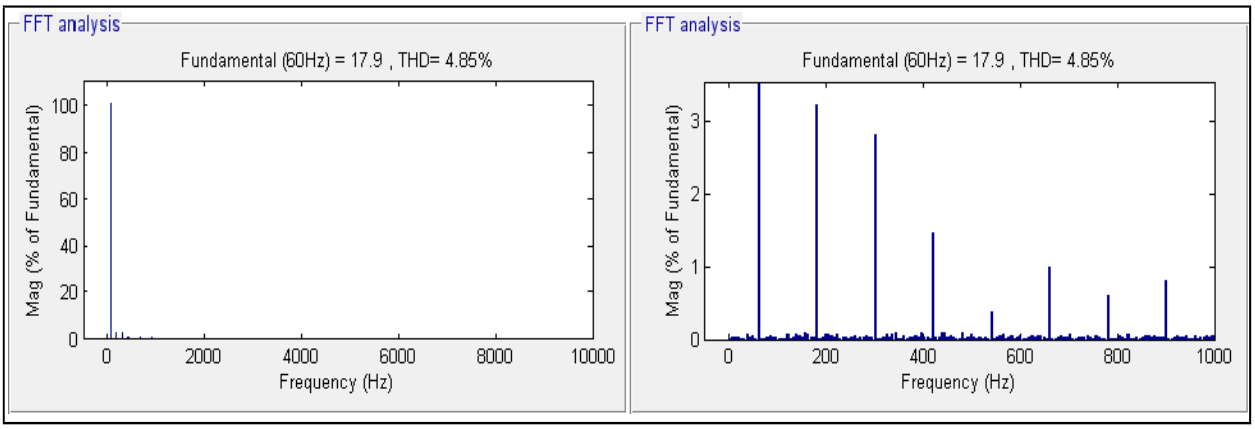


Figure III.22 : Taux de distorsion harmonique du courant de source

- Résultats pour la commande par Hystérésis :

Paramètres de simulation du redresseur PUC monophasé Commande Hystérésis :

- La tension de source $E = 120\sqrt{2}\,V$
- La résistance bus principal $R = 40\,\Omega$
- L'inductance bus auxiliare $L = 80\,mH$
- La résistance de ligne $R = 0.2\,\Omega$
- L'inductance de ligne $L = 3\,mH$
- Le condensateur bus principal $C = 4000\mu F$
- Le condensateur bus auxiliare $C = 4000\mu F$

Les figures suivantes montrent que cette commande fonctionne correctement aussi. Le signal de sortie se compose de sept niveaux de tensions. Les taux de distorsion harmonique de la tension et du courant sont légèrement meilleurs que ceux obtenus avec la régulation précédente et sont de l'ordre de 3.8% et 11%, ce qui est considéré comme excellent. Le fonctionnement à facteur de puissance unitaire est aussi assuré.

La référence de la tension Vbus est de 270 V, donc celle de Vaux est de 90 V. Les tensions observées aux bornes des condensateurs sont donc régulées aux bonnes valeurs.

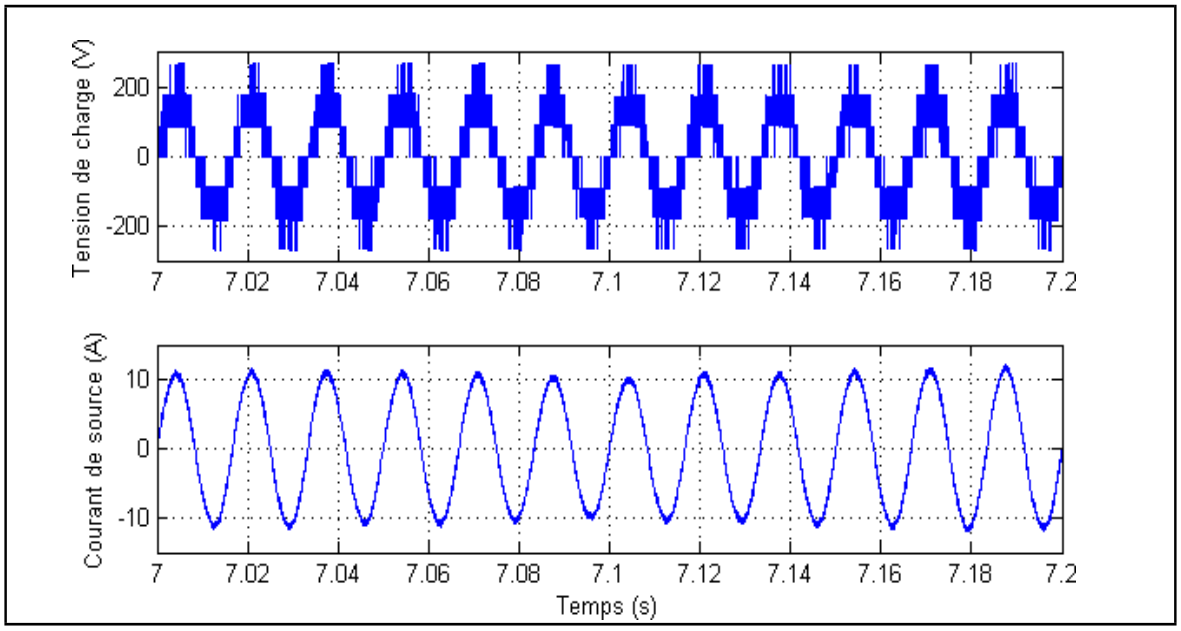


Figure III.23 : Formes du courant et de la tension pour la commande par Hystérésis

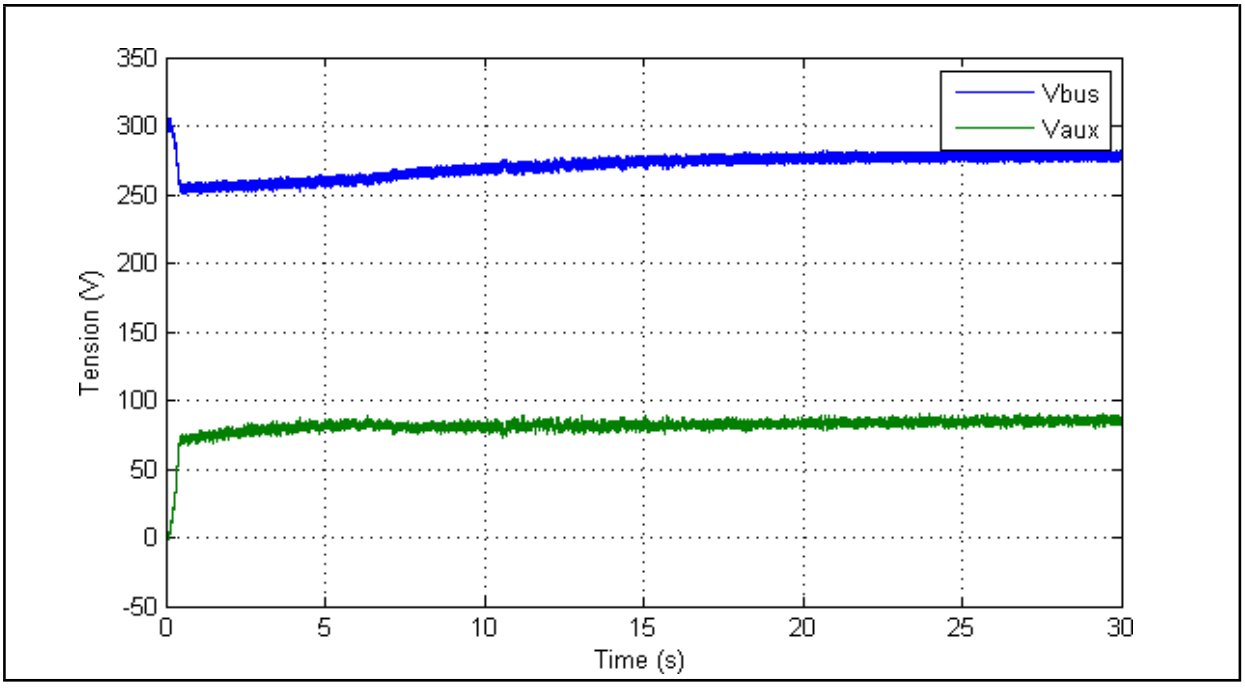


Figure III.24 : Tensions aux bornes des condensateurs

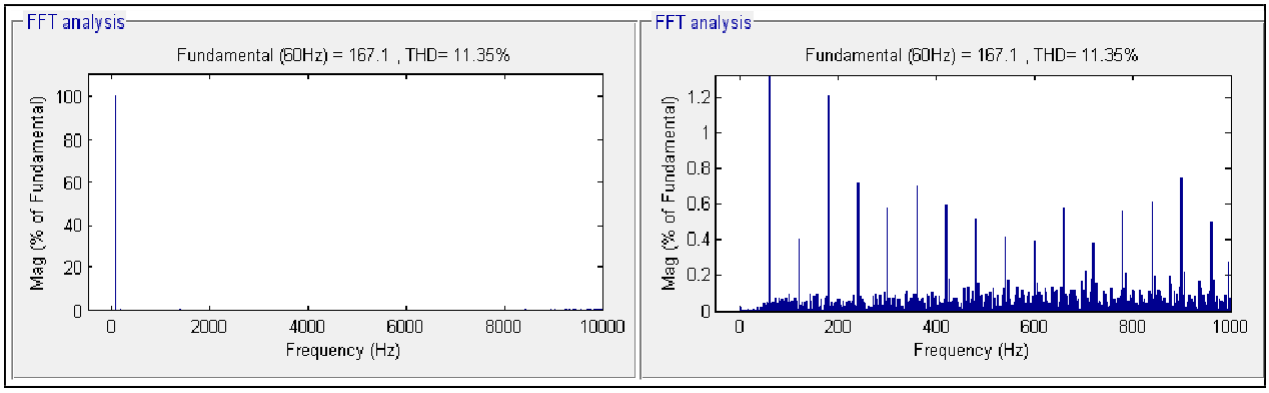


Figure III.25 : Taux de distorsion harmonique de la tension

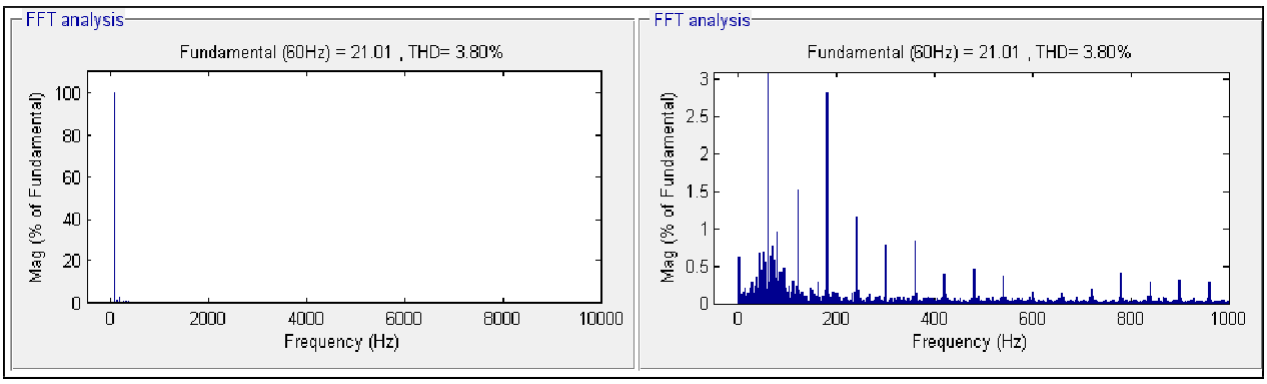


Figure III.26 : Taux de distorsion harmonique du courant

Nous remarquons que lors de la variation de charge le système perd en stabilité, les tensions aux bornes des condensateurs ne suivent pas parfaitement leur consignes, cependant elles restent fixe et ne divergent pas. Cela fait que la tension de source perd l'équivalence entre les sept niveaux qui dépendent directement des tensions des bus principal et auxiliaire. Cependant le courant de source tend vers la valeur imposée et reste toujours de forme parfaitement sinusoïdale.

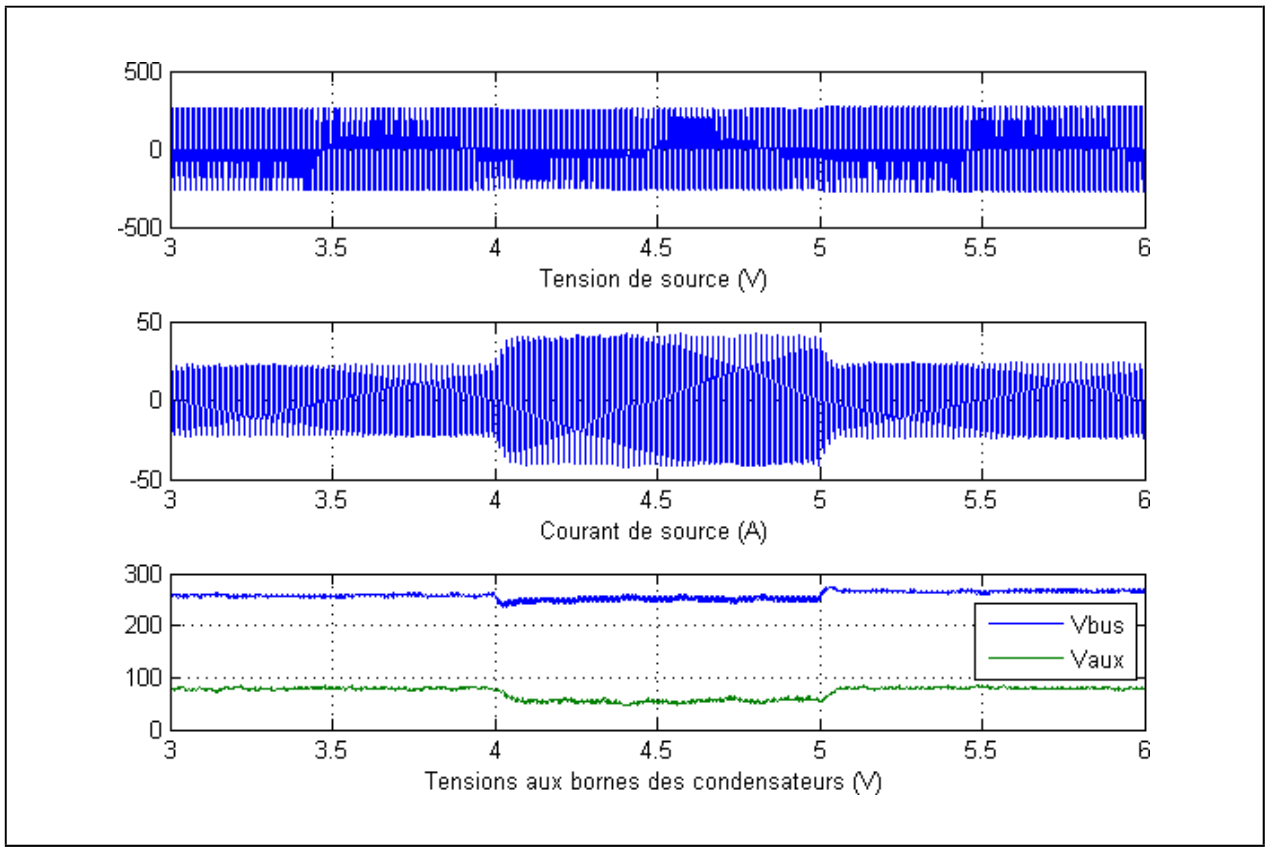


Figure III.27 : Redresseur PUC hystérésis avec variation de charge

III.4. Convertisseur PUC Triphasé :

L'utilisation du convertisseur en triphasé est beaucoup plus intéressante que le système monophasé vu les applications industrielles qui demandent une quantité d'énergie importante. Cependant, la structure non bidirectionnelle de cette topologie rend la réalisation du convertisseur pas très conventionnelle [CHE-14].

III.4.1. Fonctionnement en mode onduleur :

Trois bras d'un onduleur monophasé permettent d'assembler un onduleur triphasé. Toutefois, la régulation proposée oblige à utiliser trois sources distinctes de tension continue, ce qui constitue un inconvénient [CHE-14].

a) Présentation de la Totologie :

L'onduleur triphasé consiste à utiliser trois bras en parallèle, les sources de tension continue doivent être indépendantes. Chaque bras est régulé indépendamment avec la régulation et la modulation de l'onduleur MLI monophasé, la seule différence est le déphasage de 2pi/3 entre les trois bras. Les valeurs des résistances et des condensateurs de la charge triphasée utilisés dans cette simulation sont : R=15 Ohm et L= 8 mH [CHE-14].

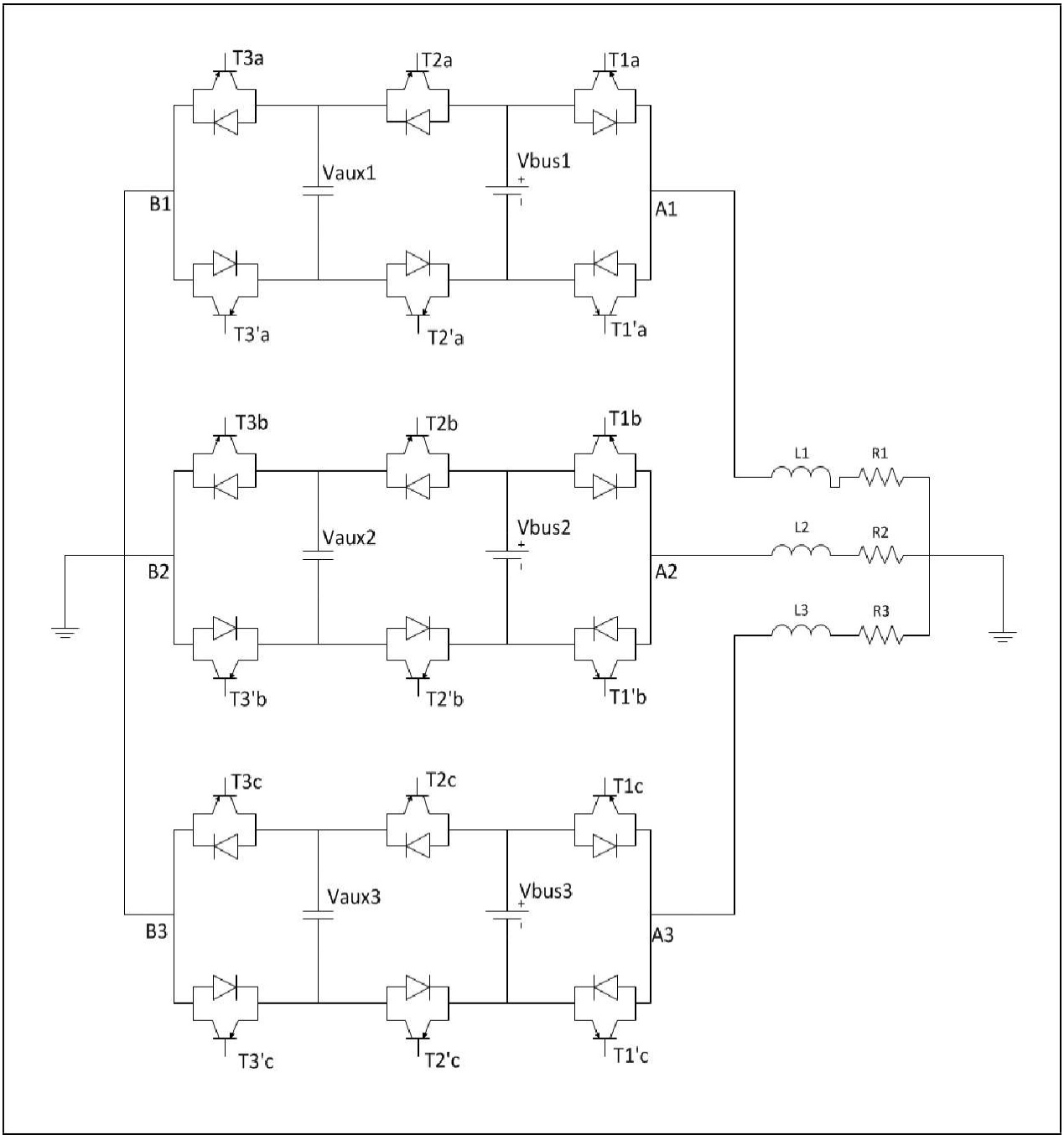


Figure III.28 : Onduleur PUC triphasé

b) Commande Utilisée :

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 [CHE-14].

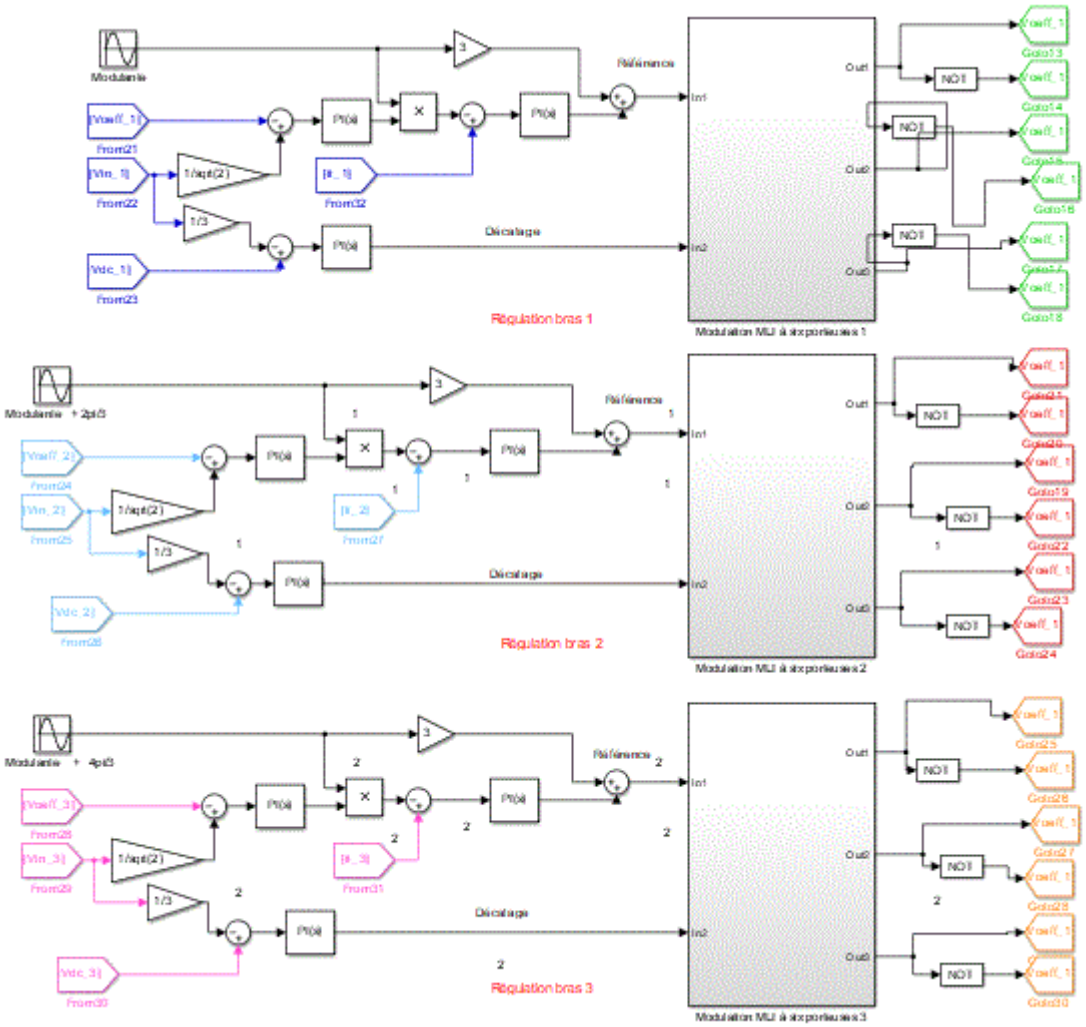


Figure III.29 : Commande MLI de l'onduleur PUC

c) Résultats :

Les résultats obtenus montrent qu'en régime permanent (avec charge fixe non déséquilibrée), les formes des courants et des tensions coté réseau sont sinusoïdaux, les taux de distorsion harmonique sont de 12% pour la tension et de 7% pour le courant. Les tensions aux bornes des condensateurs sont régulées autour des valeurs souhaitées **(figure III.32).** Le signal de la tension (Phase-neutre) est réparti sur 7 niveaux, mais il est remarquable que le niveau supérieur contient moins de commutations que le niveau inférieur du signal. Le signal (Phase-phase) est reparti sur 13 niveaux comme le montre le graphe de **la figure III.31.**

Paramètres de simulation de l'onduleur PUC triphasé :

- La tension de source (par phase) $E = 120V$
- La fréquence de commutation $f_{\text{com}} = 10kHz$
- La résistance de la charge $R = 15\Omega$
- L'inductance de la charge $L = 8mH$
- Le condensateur Bus $C = 4000\mu F$

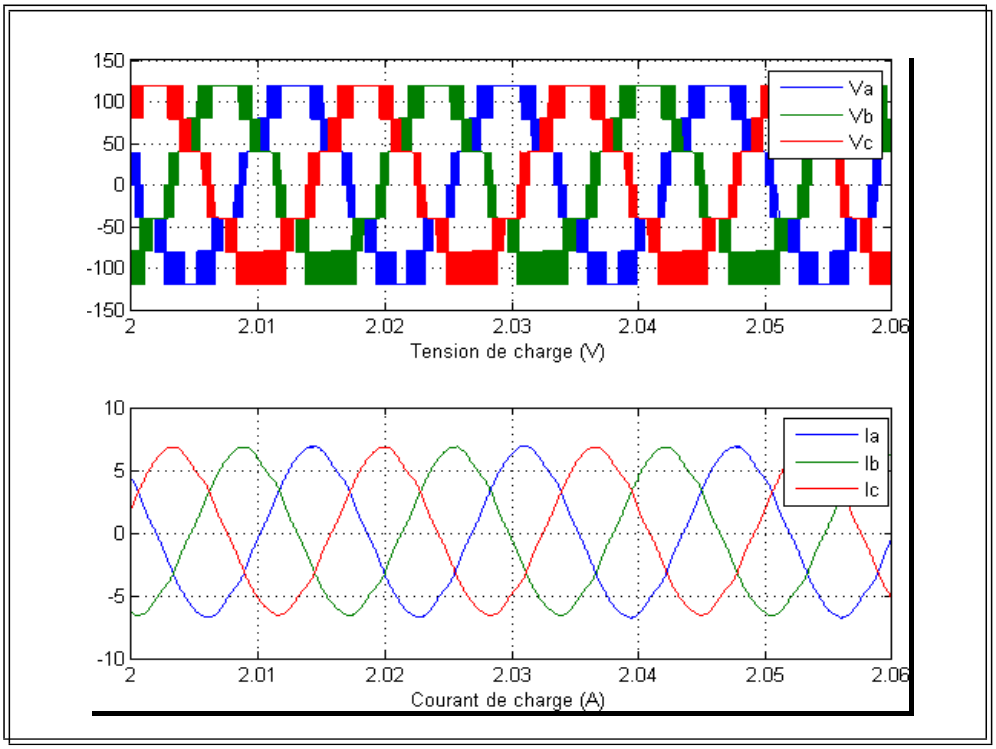


Figure III.30 : Tensions et courants de la charge

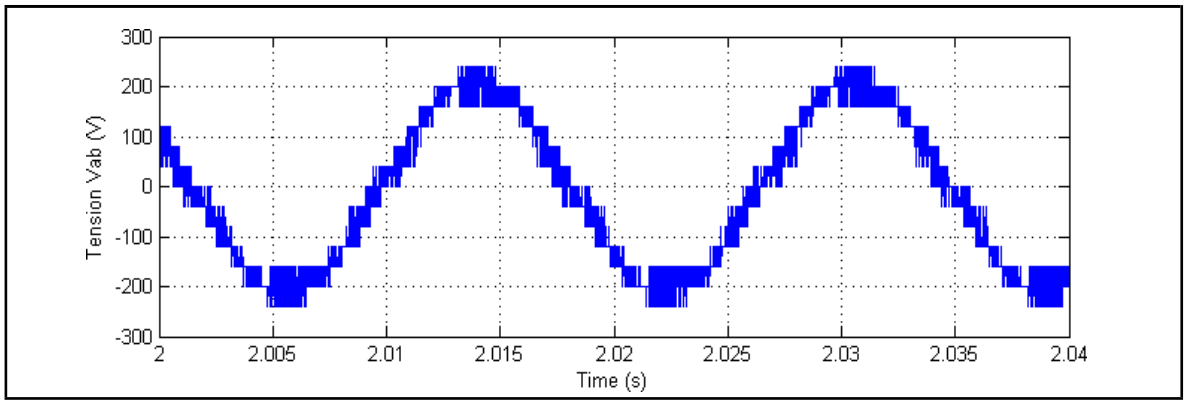


Figure III.31 : Tension phase-phase

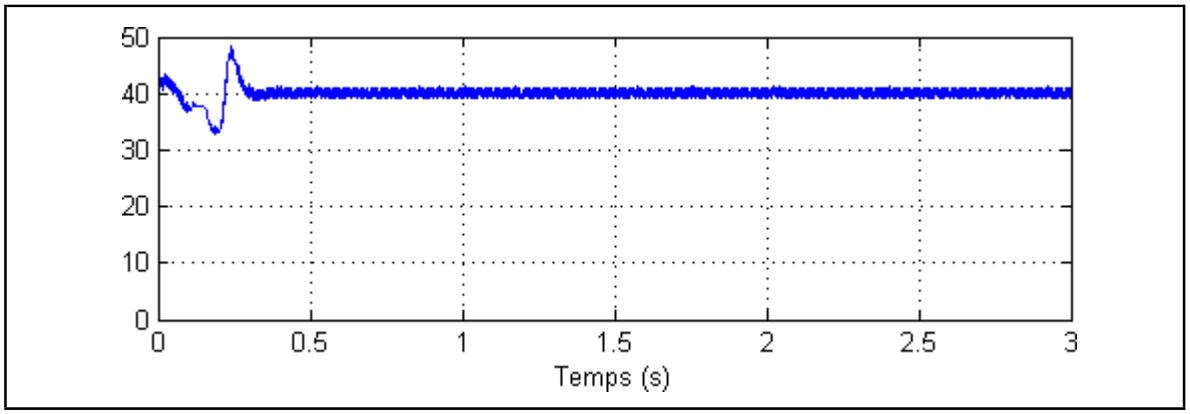


Figure III.32 : Tension aux bornes du condensateur C1

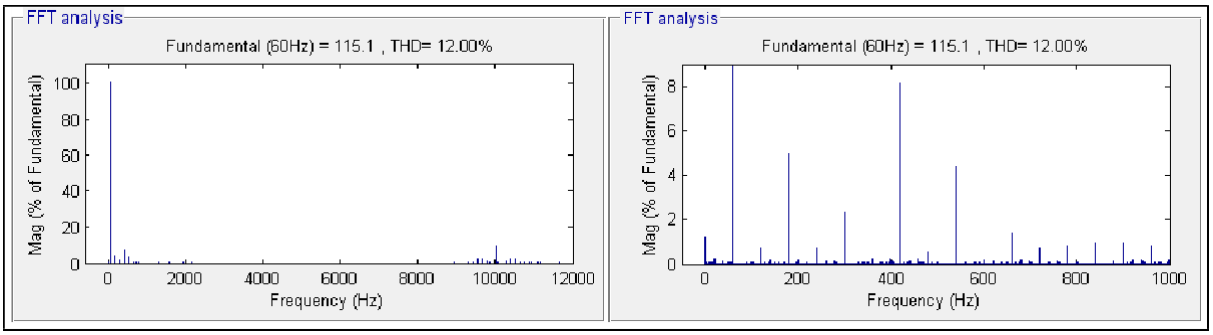


Figure III.33: Taux de distorsion harmonique de la tension de charge

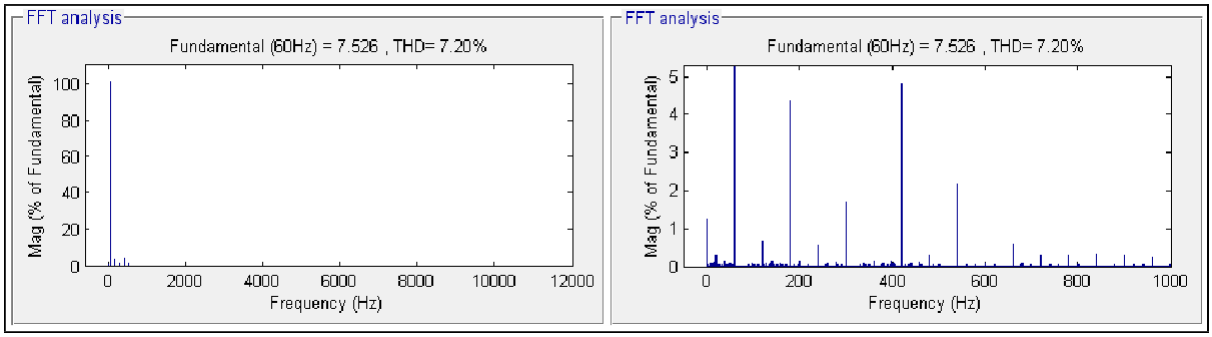


Figure III.34 : Taux de distorsion harmonique du courant de charge

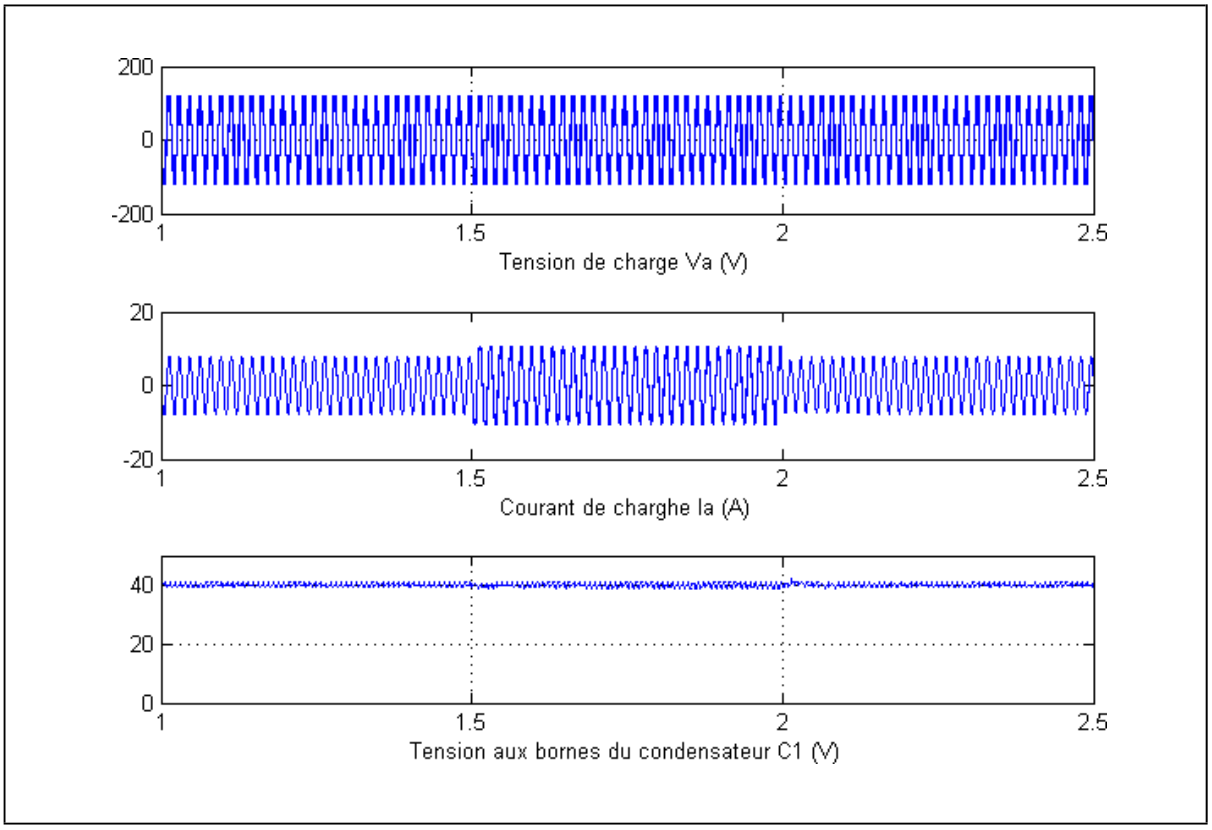


Figure III.35:Comportement lors de la variation de charge

Nous avons varié la charge en la diminuant de 15Ω à 10Ω, et les résultats obtenus démontrent la robustesse de la commande. La tension de charge et la tension aux bornes du condensateur n'ont pas changé, alors que le courant de charge s'installe rapidement autour de la valeur souhaitée **(figure III.35).**

III.4.2. Fonctionnement en mode redresseur :

Cette topologie ne sera pas traité dans ce memoire varie la non bidirectionnalité du convertisseur, et puisque le redresseur triphasé à été d'une memoire differente.

III.5. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté le convertisseur PUC 7 niveaux en tant que redresseur et en tant qu'onduleur monophasé. Nous avons utilisé deux méthodes de commande, la commande par MLI et la commande par Hystérésis. Toutes les topologies testées (onduleur et redresseur) et les commandes utilisées (modulation à largeur d'impulsions et hystérésis) ont donné des résultats satisfaisants. Les tensions obtenues sont répartis sur sept niveaux et les taux de distorsion harmonique varient entre 2% et 5%. L'utilisation de ce convertisseur en triphasé est beaucoup plus compliqué que son utilisation en monophasé.Cela est dû principalement à la non-bidirectionnalité de ce convertisseur, ce qui fait que les commandes de contrôle pour ces topologies doivent être précises, robustes et complexes.Nous pouvons conclure que le convertisseur fonctionne parfaitement dans sa version monophasée ce qui constitue une base solide pour les prochains chapitres ou il sera testé en version triphasée et en filtre actif.

Chapitre IV

FILTRAGE ACTIF UTILISANT LA TOPOLOGIE PUC

IV.1. Introduction :

Vu les exigences des fournisseurs d'énergie en matière de taux de distorsion harmonique, et les inconvénients d'utiliser les filtres passifs en terme d'encombrement, les grands consommateurs d'énergie électriques ont recours à l'utilisation des filtres actifs. Ils ont beaucoup d'avantages et permettent de rencontrer les contraintes imposées, mais ces filtres demandent un contrôle afin de fournir le fonctionnement souhaité et de compenser les courant harmoniques [CHE-14].

IV.2. Filtre actif monophasé :

Un filtre actif monophasé n'a pas de grande importance sur le plan pratique et utile mais il représente une étape importante sur le plan de la recherche et pour la réalisation d'un filtre actif triphasé beaucoup plus utile sur le plan pratique pour les grands consommateurs d'énergie [CHE-14].

IV.2.1. Présentation de la Topologie :

Le circuit électrique de base est composé d'une source alternative de 120 V, d'une charge polluante non linéaire (redresseur en pont à diode et d'une charge RL composée d'une inductance de 10mH et d'une résistance de 20 Ω). L'onduleur PUC est placé en parallèle en amont de la charge dans le but de compenser les courants harmoniques et de réduire le taux de distorsion du courant de source. Le montage est présenté dans **la figure IV.1.** [CHE-14].

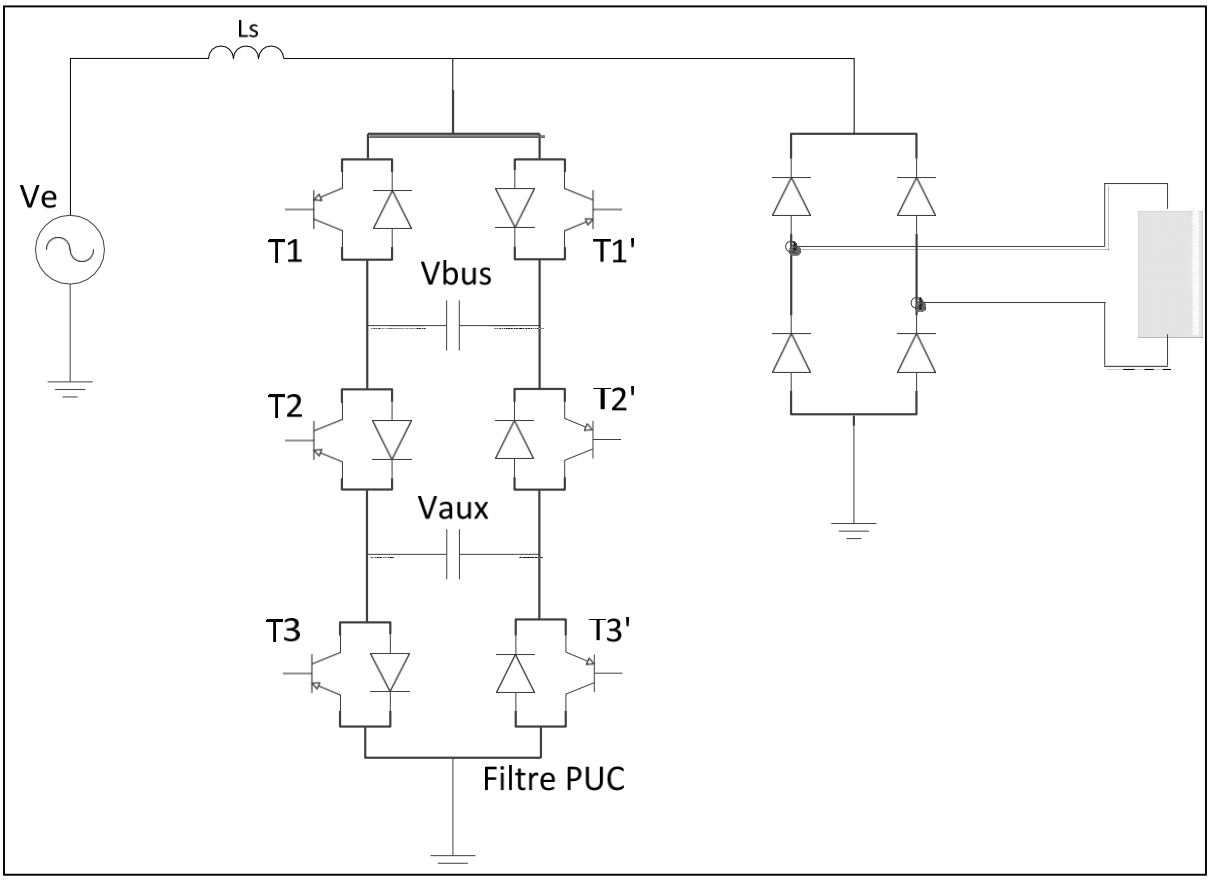


Figure IV.1 : Filtre actif PUC monophasé

IV.2.2. Commande utilisée :

La commande utilisée est identique à la commande utilisée en mode redresseur. La tension V_{buc} régulée avec un régulateur PI servira de référence pour la régulation du courant, et la régulation de la tension V_{dc} servira de décalage pour les porteuses. Cette commande permet de générer les signaux des gâchettes des six

interrupteurs que comporte le convertisseur. La fréquence des porteuses est de 10KHz [CHE-14].

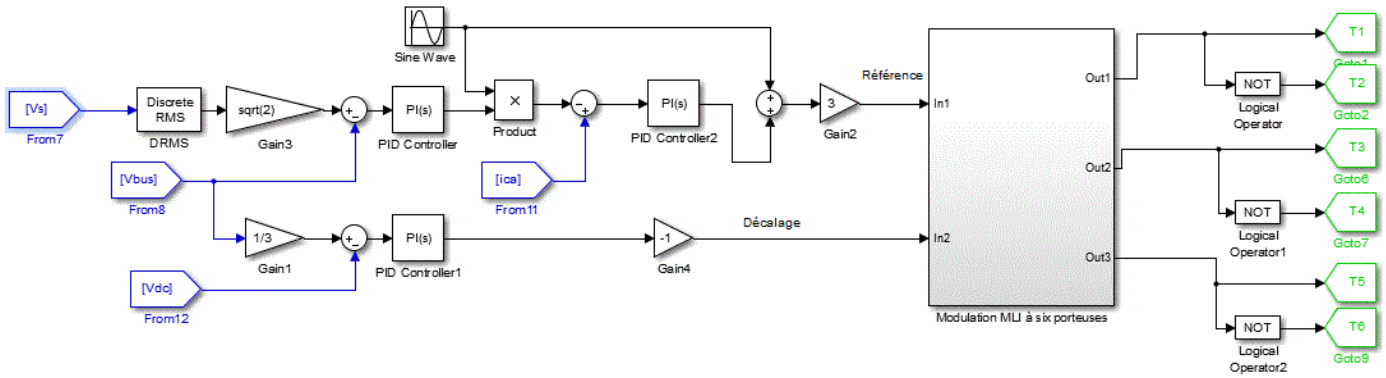


Figure IV.2: Commande du filtre actif monophasé PUC

IV.2.3. Résultats :

Les résultats démontrent le bon fonctionnement du filtre. En effet le taux de distorsion harmonique du courant est réduit de 34% en passant de 36% à 2% ce qui représente un excellent taux conforme aux normes appliquées et cela en ayant un net avantage par rapport aux topologies concurrentes en considérant le nombre de composants utilisés et la simplicité de la commande utilisée.

Paramètres de simulation du filtre actif monophasé multicellulaire série :

- La tension de source $120\sqrt{2}V$
- La résistance de la charge 20Ω
- L'inductance de la charge $10mH$
- La résistance de la ligne 0.2Ω
- L'inductance de la ligne $3mH$
- Le condensateur filtre Bus principal $4000\mu F$
- Le condensateur filtre Bus auxiliare $4000\mu F$
- La fréquence de commutation $10kHz$

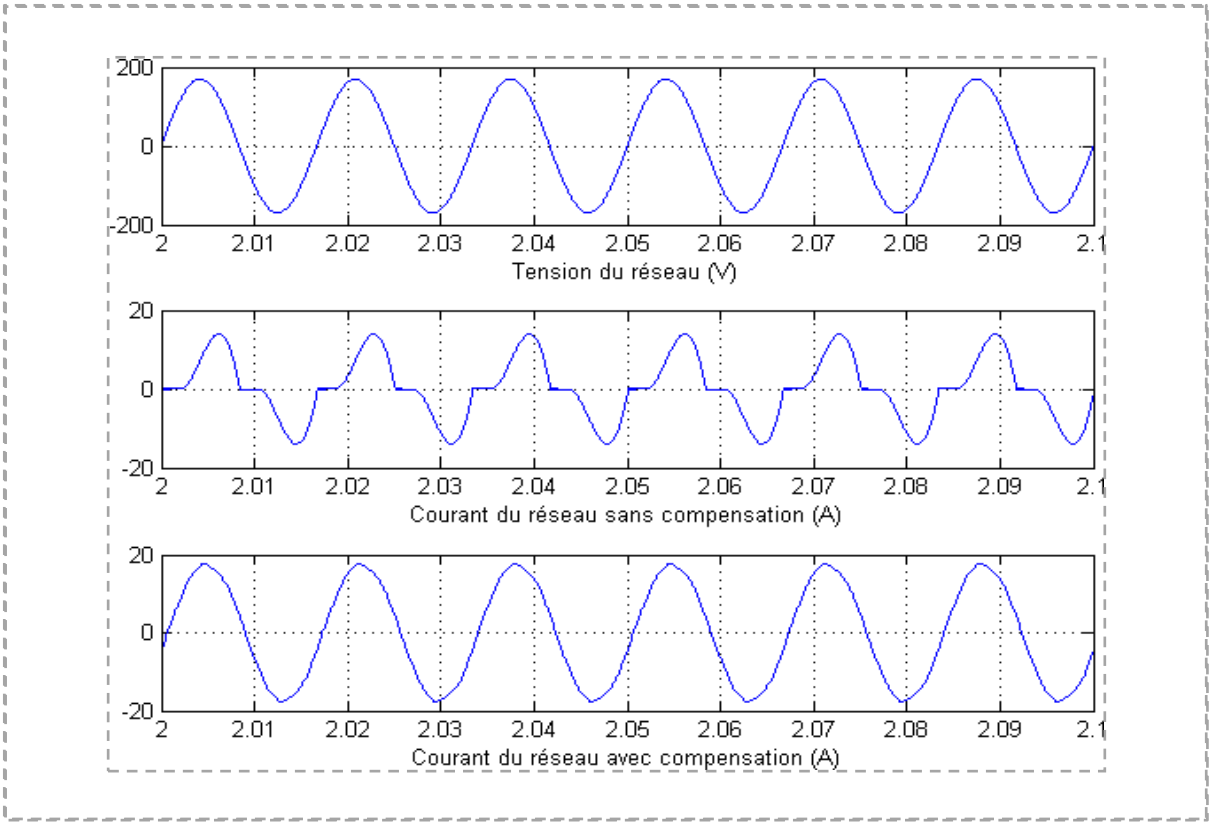


Figure IV.3 : Courant de source avec compensation et sans compensation

Nous pouvons remarquer l'effet de la compensation qui rend le courant de source beaucoup plus sinusoïdal. Comme illustré aux **figures IV.4** et **IV.5**, le taux de distorsion harmonique passe de 36% à 2%, ce qui démontre l'efficacité du filtre.

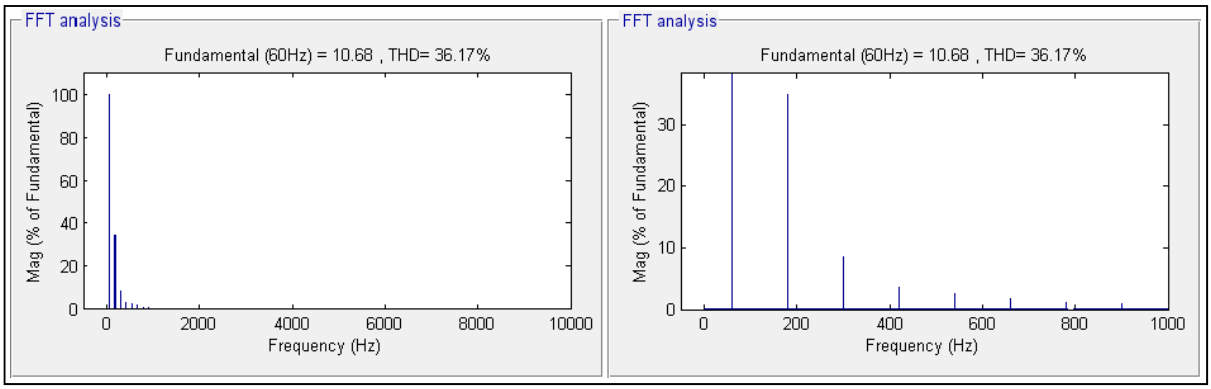


Figure IV.4 : Taux de distorsion harmonique sans compensation.

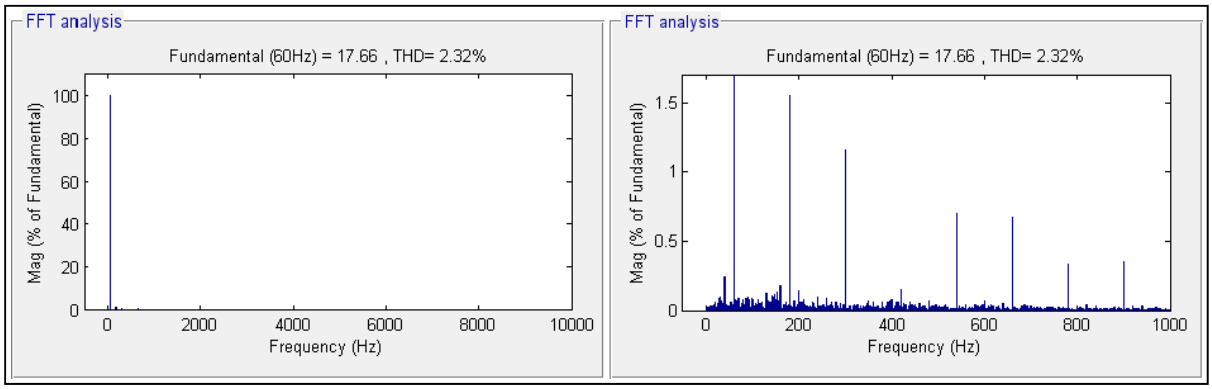


Figure IV.5 : Taux de distorsion harmonique avec compensation.

IV.3. Filtre actif Triphasé :

L'utilisation de ce convertisseur en tant que filtre actif peut donner plusieurs avantages, en effet, le nombre de niveaux de tensions que le convertisseur peut atteindre permet de diminuer d'une manière considérable le taux de distorsion harmonique. Le nombre d'interrupteurs et de composants utilisés font que le volume et le poids du filtre seront réduits ce qui constitue un facteur d'importance pour une éventuelle commercialisation [CHE-14].

IV.3.1. Présentation de la Topologie :

La topologie consiste à placer trois bras d'un convertisseur PUC monophasé en parallèle avec un pont à diode et une charge RL. Chaque bras a pour but d'injecter un courant compensatoire afin d'annuler l'effet des courants harmoniques causés par la non-linéarité du redresseur à diodes. Le circuit est composé d'une source de tension triphasée, d'un pont à diodes triphasé et d'une charge RL (R = 20 Ohm, L = 20 mH) [CHE-14].

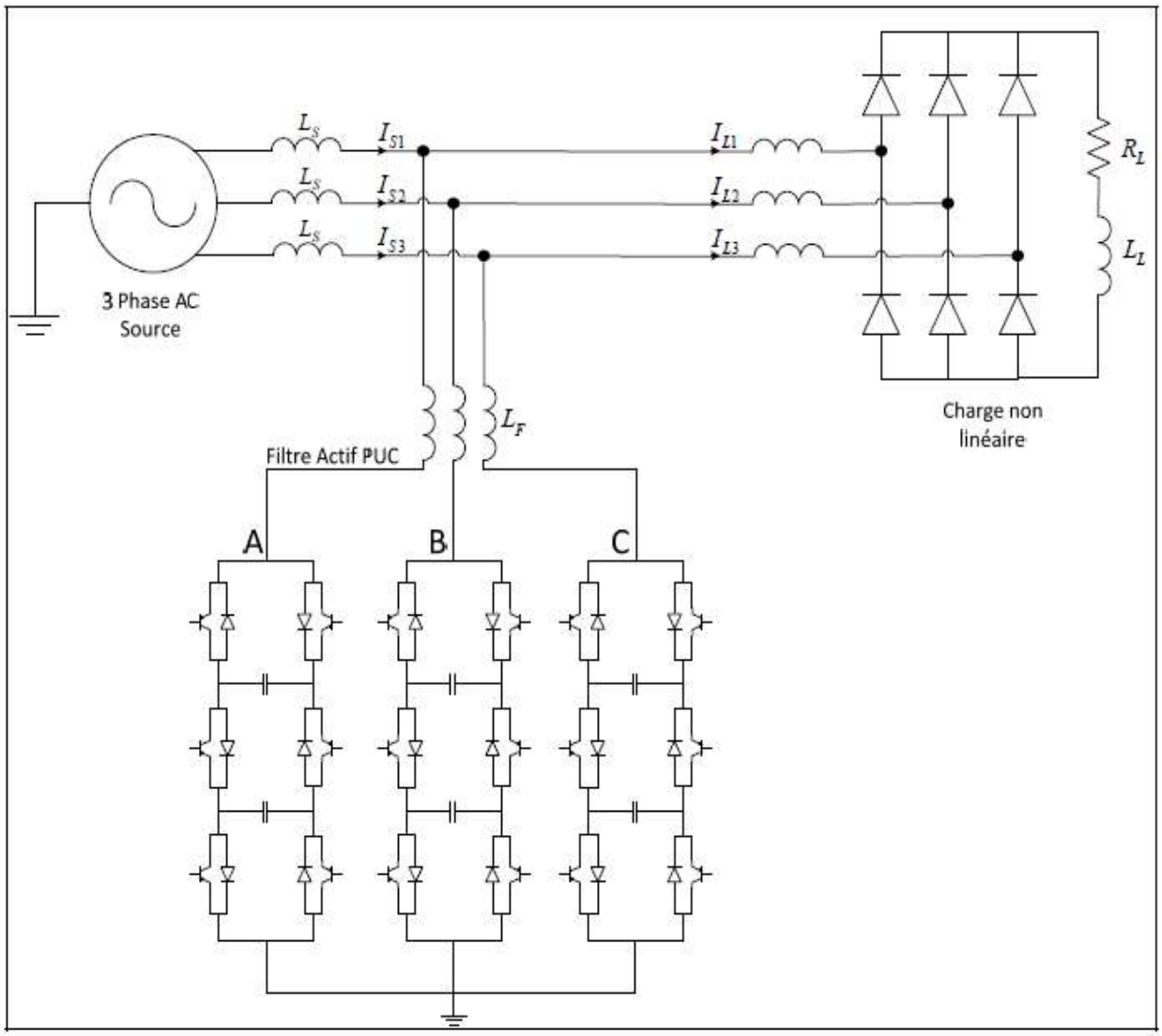


Figure IV.6 : Filtre actif triphasé PUC

IV.2.2. Commande utilisée :

Le système de régulation du filtre triphasé est basé sur la régulation MLI utilisé dans les simulations précédentes. Il est composé de trois blocs de régulation pour un filtre monophasé; chaque bras est déphasé de 2pi/3 par rapport aux deux autres bras [CHE-14].

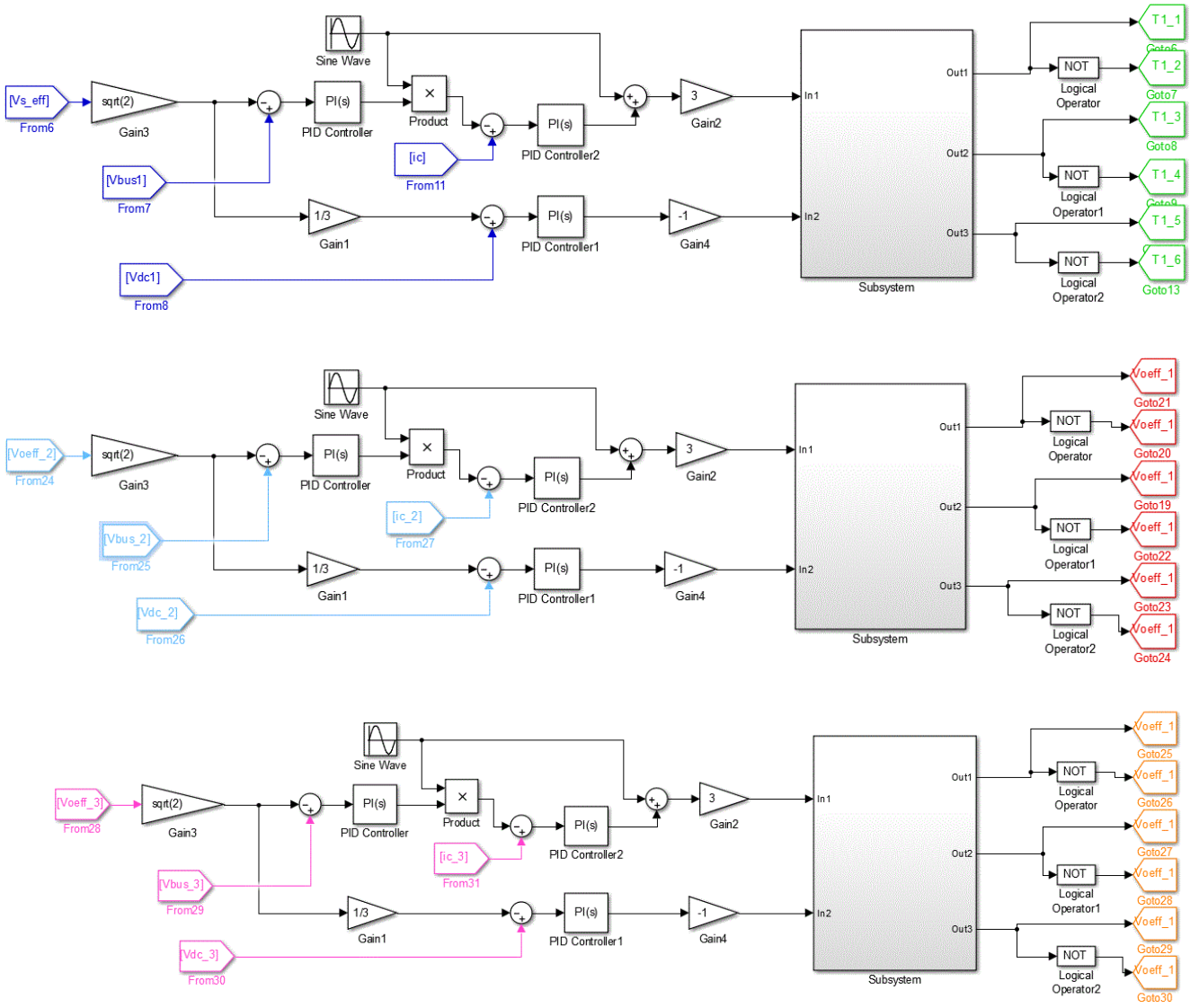


Figure IV.7 : Régulation pour le filtre actif triphasé PUC

IV.3.3. Résultats :

Les résultats suivants montrent des formes pratiquement parfaites pour les courants de sources, en effet le taux de distorsion harmonique obtenu est égal à 3%. Le contenu du spectre harmonique est présenté dans **la figure IV.9.** Les tensions aux bornes du filtre sont multiniveaux, la tension simple est composée de 7 niveaux et la tension composée est constituée de 13 niveaux. Le facteur de puissance est également corrigé, il est unitaire.

Paramètres de simulation du filtre actif triphasé multicellulaire série :

- La tension du réseau $120\sqrt{2}V$
- La résistance de la ligne 0.001Ω
- L'inductance de la ligne $1.5mH$
- La résistance à l'entrée du pont 0.001Ω
- L'inductance à l'entrée du pont $0.5mH$
- La résistance à l'entrée du filtre 0.001Ω
- L'inductance à l'entrée du filtre $0.5mH$
- La résistance bus principal (filtre) 200 Ω
- La résistance bus auxiliaire (filtre) 150 Ω
- Le condensateur bus principal (filtre) 4000 μF
- Le condensateur bus auxiliaire (filtre) 4000 μF
- La résistances de charge 25 Ω
- L'inductance de charge 10 mH
- La fréquence de commutation 10 kHz

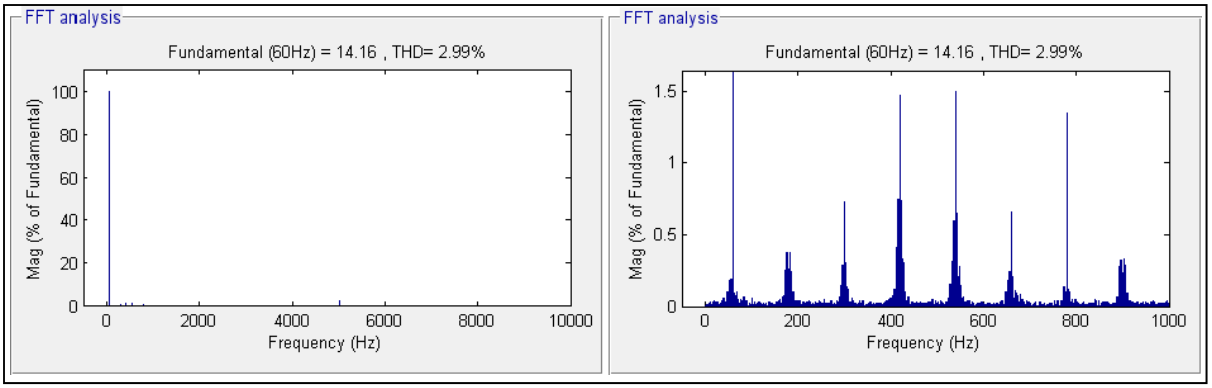


Figure IV.8 : Taux de distorsion harmonique du courant de source

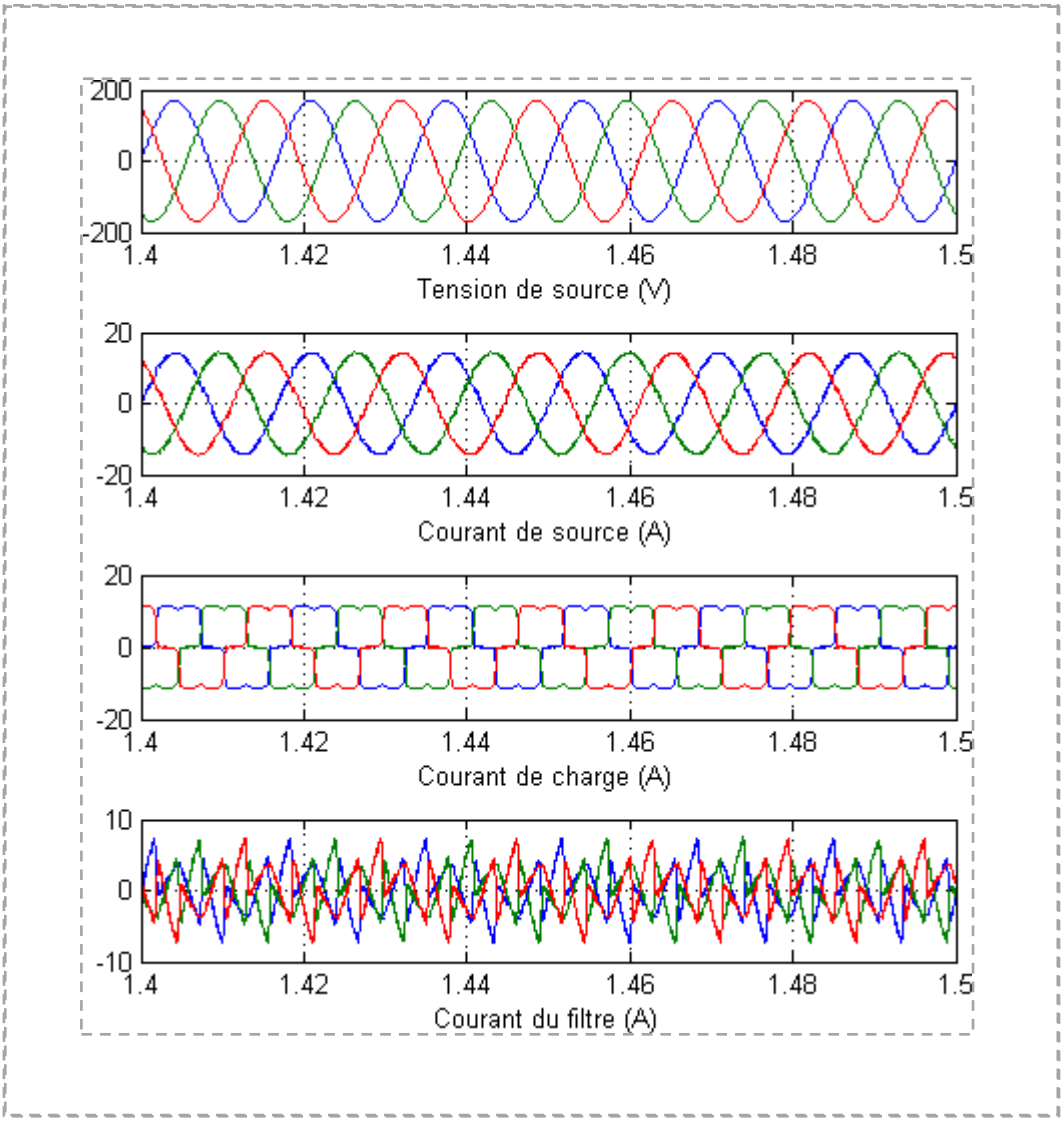


Figure IV.9 : Formes des signaux pour le filtre actif triphasé

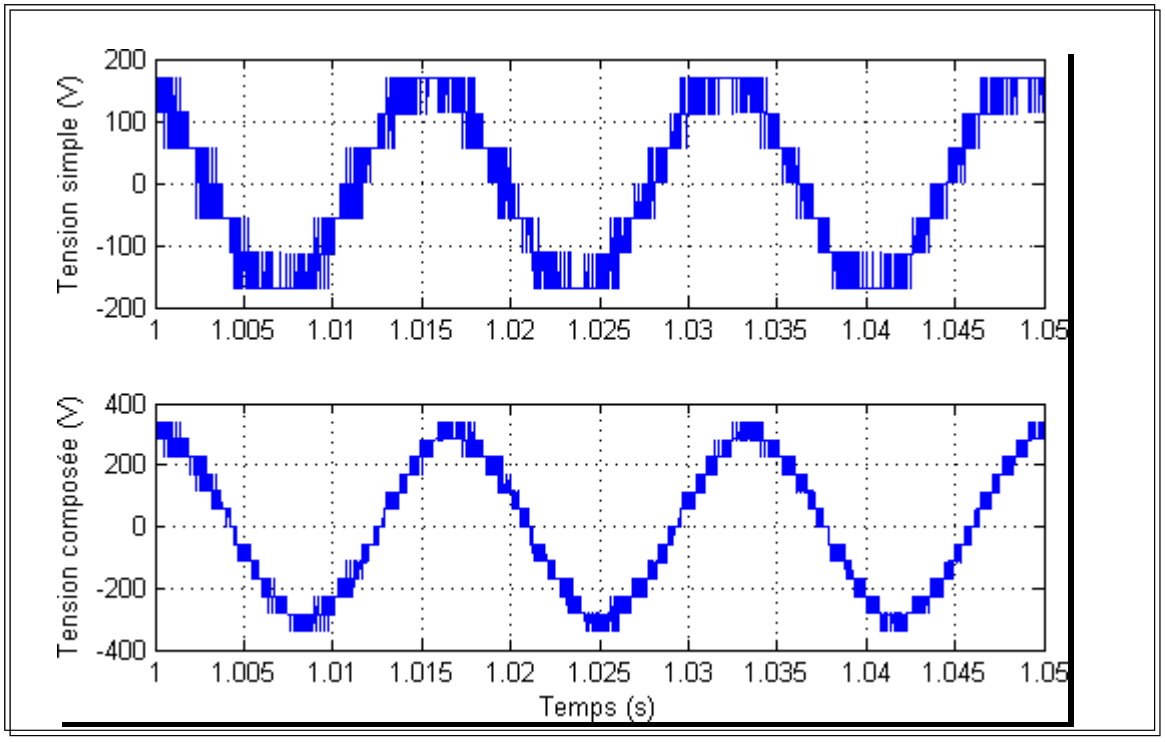


Figure IV.10 : Tensions simple et composée aux bornes du filtre

Une simulation contenant plusieurs changements de paramètres a été réalisée **figure IV.11**. La simulation contient les étapes suivantes :

- de 0s à 0.5s le filtre n'est pas activé;
- de 0.5s à 1s le filtre est activé avec une charge RL (R = 25 Ohm, L = 10 mH);
- de 1s à 1.5s le filtre est activé mais la charge a été variée (R = 40 Ohm, L = 10 mH);
- de 1.5s à 2s le réseau a été déséquilibré.

Les résultats montrent que le filtre réagit bien à la variation de charge, En effet, la régulation s'effectue correctement et le filtre arrive à injecter des courants compensatoires et corriger la forme des courants de source. Cependant, la mise hors de fonctionnement d'une ligne montre la limite du filtre dans ce cas. Cela revient principalement au type de la commande utilisée car elle régule chaque bras distinctement, nous pensons qu'une autre commande qui prend en compte les trois bras en même temps remédierait à ce problème.

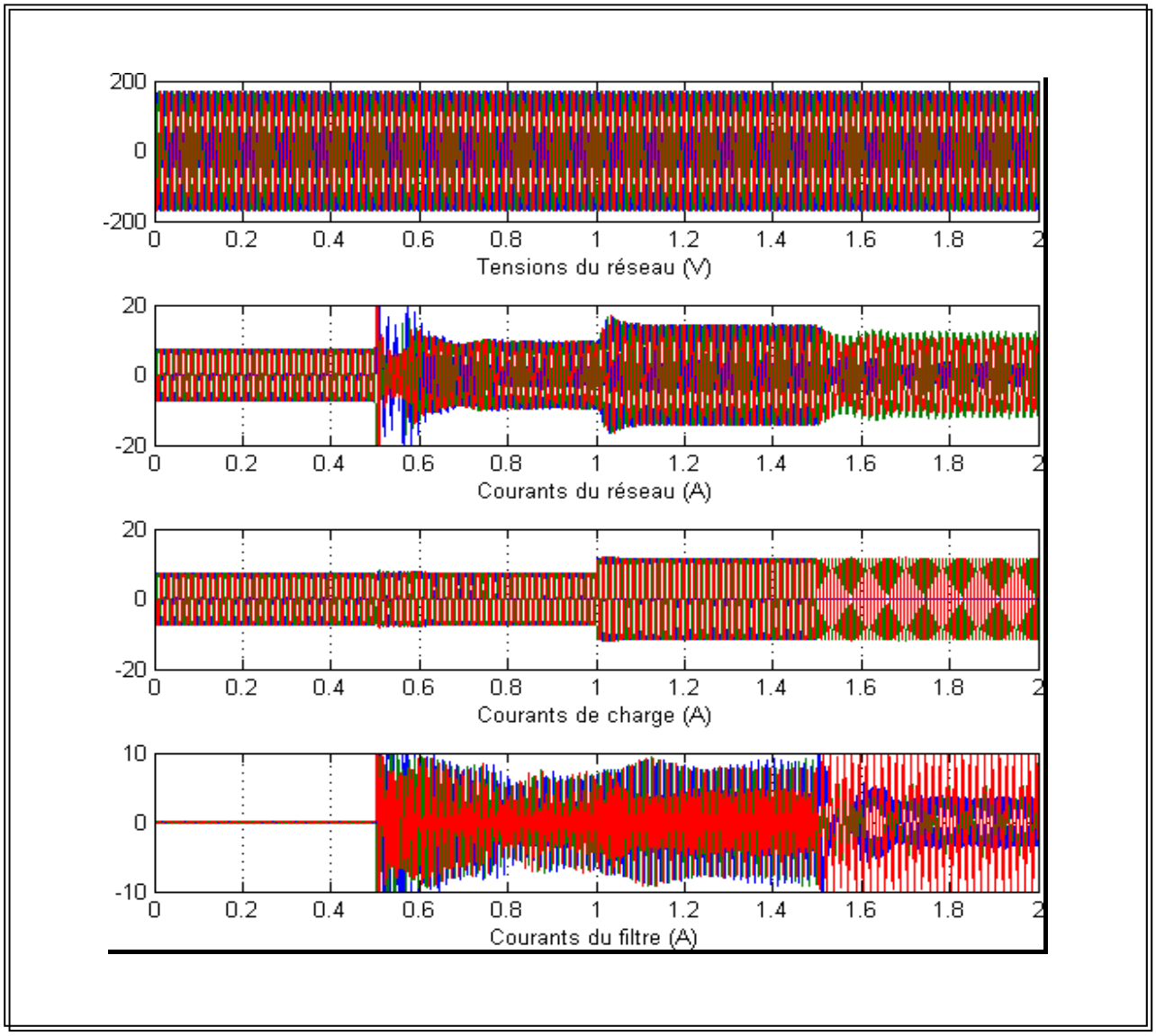


Figure IV.11 : Simulation du filtre actif triphasé PUC avec paramètres variables

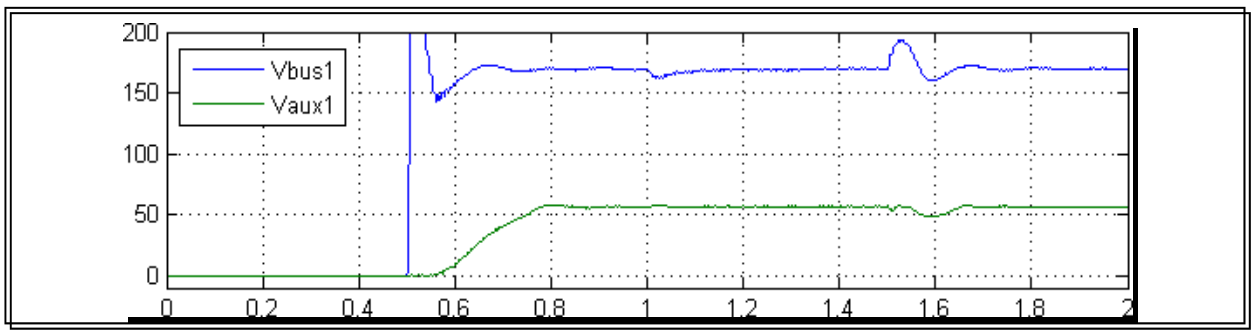


Figure IV.12 : Tensions aux bornes des condensateurs C1 et C2 du premier bras

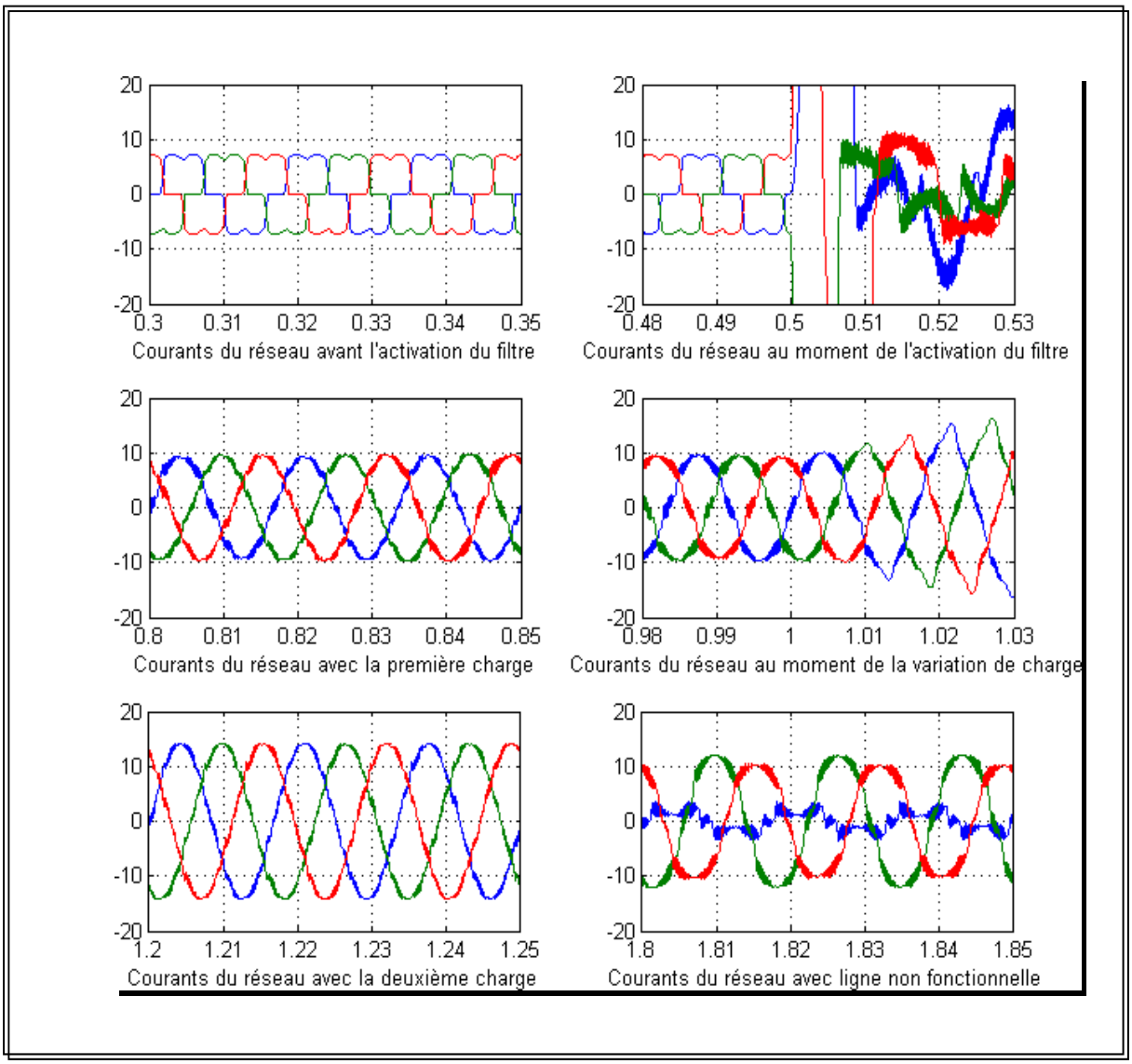


Figure IV.13 : Courants de sources pendant les différentes phases de la simulation

IV.4. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons utilisé le convertisseur PUC en tant que filtre actif. Ce qui nous intéresse davantage est son fonctionnement en filtre actif triphasé. Avec une commande MLI pour chaque bras, le filtre fonctionne parfaitement en injectant des courants compensatoires rendant les courants de source d'une forme sinusoïdale parfaite avec un taux de distorsion harmonique de 3%.

CONCLUSION GÉNÉRALE

La consommation de l'énergie électrique est très répondue en courant continu, pour cela les redresseurs sont les plus utilisés. Mais le besoin croissant enduit automatiquement une multiplication de ces équipements, qui, à leurs tours provoquent la pollution du réseau électrique. Ces pollutions sont principalement causées par des charges non linéaires, ces charges non linéaires à base de convertisseurs de puissances offrent de l'énergie sous plusieurs formes et sont de plus en plus utilisées dans l'industrie.

Une des solutions les plus efficaces pour corriger ces inconvénients est l'utilisation des filtres actifs parallèles ayant pour but, de dépolluer le réseau et de compenser l'énergie réactive. Ce qui nous permettons d'avoir un réseau plus stable avec un facteur de puissance unitaire.

Ce travail présenté dans ce mémoire consiste à l'étude et simulation des trois techniques d'identifications des courants de référence du filtre actif parallèle deux niveaux et trois niveaux, pour but de la dépollution des réseaux électriques afin d'améliorer la qualité d'énergie.

Ce mémoire a pour objectif d'étudier les stratégies de commande du filtre actif parallèle, pour le filtrage des harmoniques dans le réseau électrique. Après une présentation des problèmes de dégradation de la qualité de l'énergie électrique, on a étalé un état de l'art actuel des filtres actifs.

Dans ce mémoire nous avons exposé le convertisseur de puissance PUC (Packed U Cells). Ce convertisseur présente un potentiel d'efficacité énergétique très important vu qu'il permet d'obtenir 7 niveaux de tensions avec seulement six interrupteurs et deux condensateurs. Dans ce travail, le convertisseur PUC a été utilisé en tant qu'onduleur, en tant que redresseur, en monophasé et en triphasé. Il a aussi été pour la première fois utilisé en tant que filtre actif triphasé.

Ce convertisseur a plusieurs avantages, parmi lesquels nous pouvons citer :

- Nombre de composants réduit par rapport à ses concurrents;
- Volume et poids réduits;
- Taux de distorsion harmonique faible;
- Facteur de puissance unitaire.

Deux types de commandes ont été testés et comparés en conversion monophasée, soit la commande à MLI et la commande par Hystérésis. Le taux de distorsion harmonique est légèrement meilleur avec la commande par Hystérésis mais la commande à MLI est plus robuste en cas de changement de conditions de fonctionnement.

L'onduleur triphasé donne de bons résultats mais la nécessité d'utiliser trois sources de tension distinctes constitue un inconvénient majeur. Ceci peut être corrigé en développant une nouvelle méthode de contrôle. Pour effectuer le redressement en triphasé, les auteurs ont dû combiner le convertisseur PUC avec le convertisseur NPC. Les résultats trouvés sont partiellement réussis et ne sont pas conformes aux résultats montrés par les concepteurs.

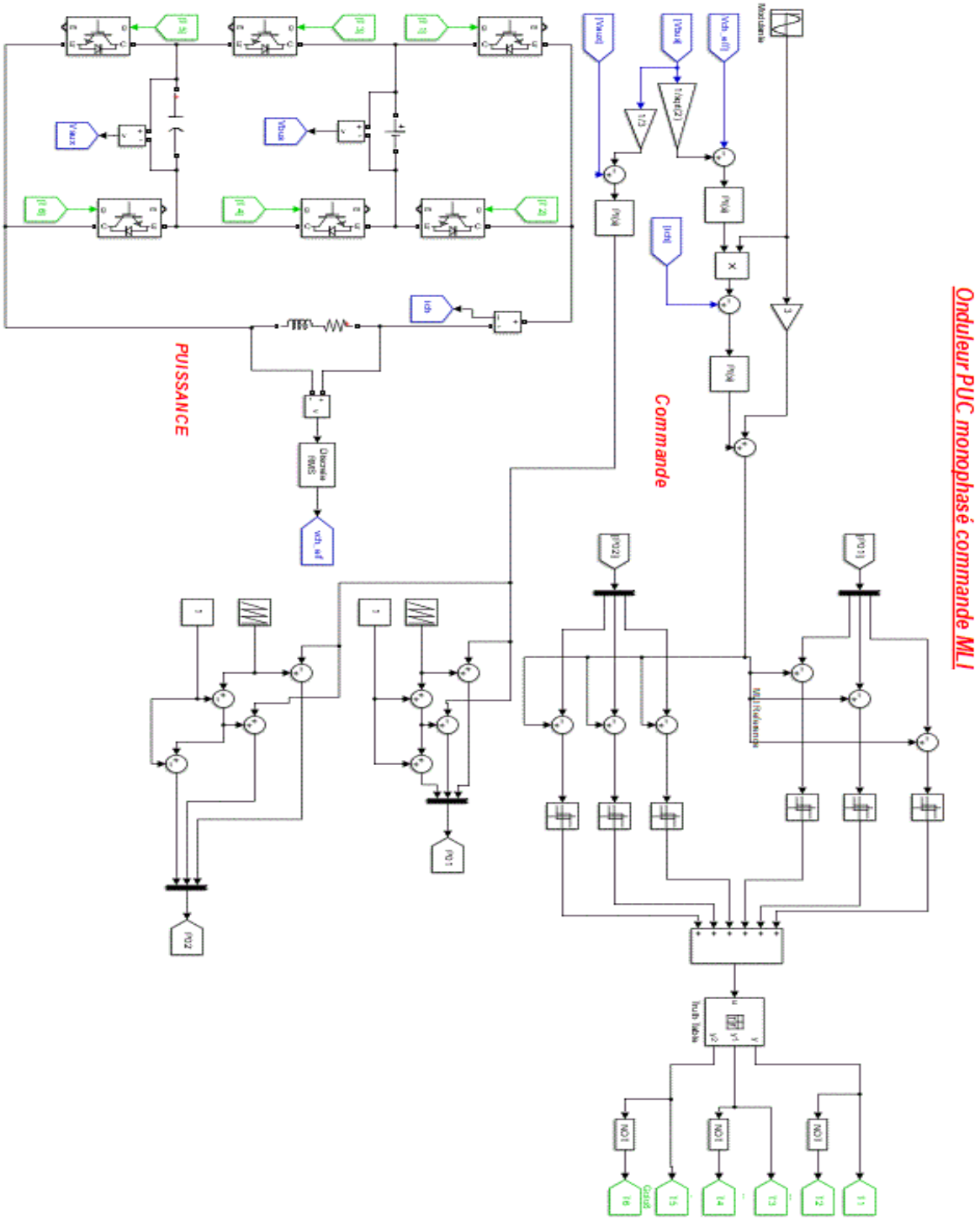
Les résultats obtenus sont en général très satisfaisants car les taux de distorsion harmonique obtenus sont inférieurs à 5% en simulation. Le filtre actif triphasé a été testé en mode charge variable, il a montré sa robustesse face aux variations de la charge, néanmoins la méthode de contrôle utilisée ne permet pas de corriger le déséquilibre de la charge.

Cette topologie est encore en cours d'exploration, elle a été utilisée très peu de fois ce qui fait que les travaux de recherche à venir seront nombreux et très prometteurs vu le potentiel important de cette structure. Parmi les possibles travaux futurs nous recommandons le développement de nouvelles méthodes de commande; de les comparer entre elles afin de trouver la meilleure en termes de justesse et de robustesse.

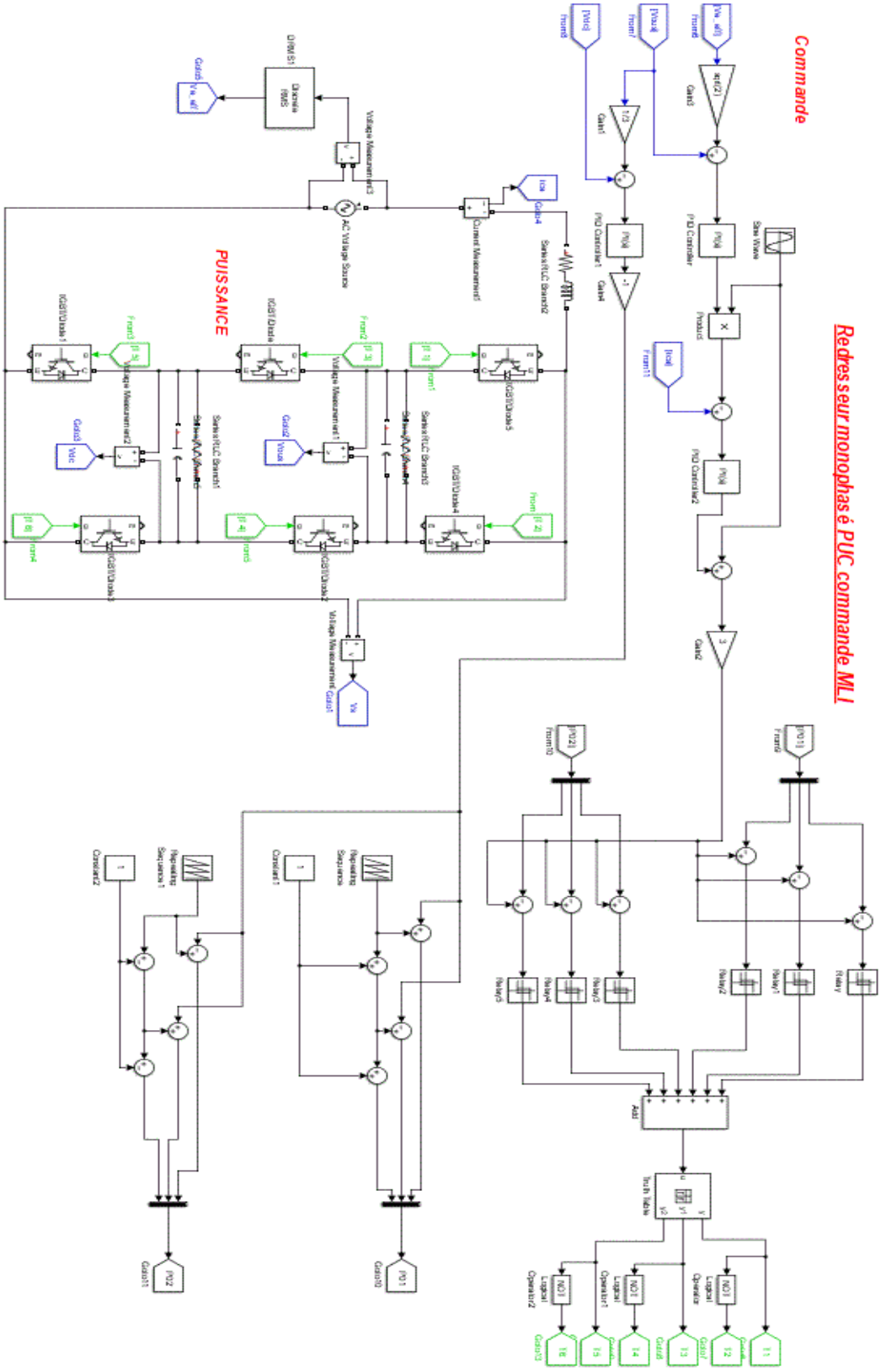
Pareillement, la combinaison de ce convertisseur avec des sources d'énergies renouvelables peut démontrer tout le potentiel de cette topologie, comme par exemple un redresseur PUC combiné à une éolienne, ou encore un onduleur PUC combiné à un panneau photovoltaïque.

Enfin, le présent travail nous a permis d'approfondir nos connaissances et de mesurer combien la problématique est riche en interrogations et en perspectives, qui feront l'objet de nos futures travaux. Pour cela notre travail ne serait complet sans la réalisation pratique du filtre actif parallèle.

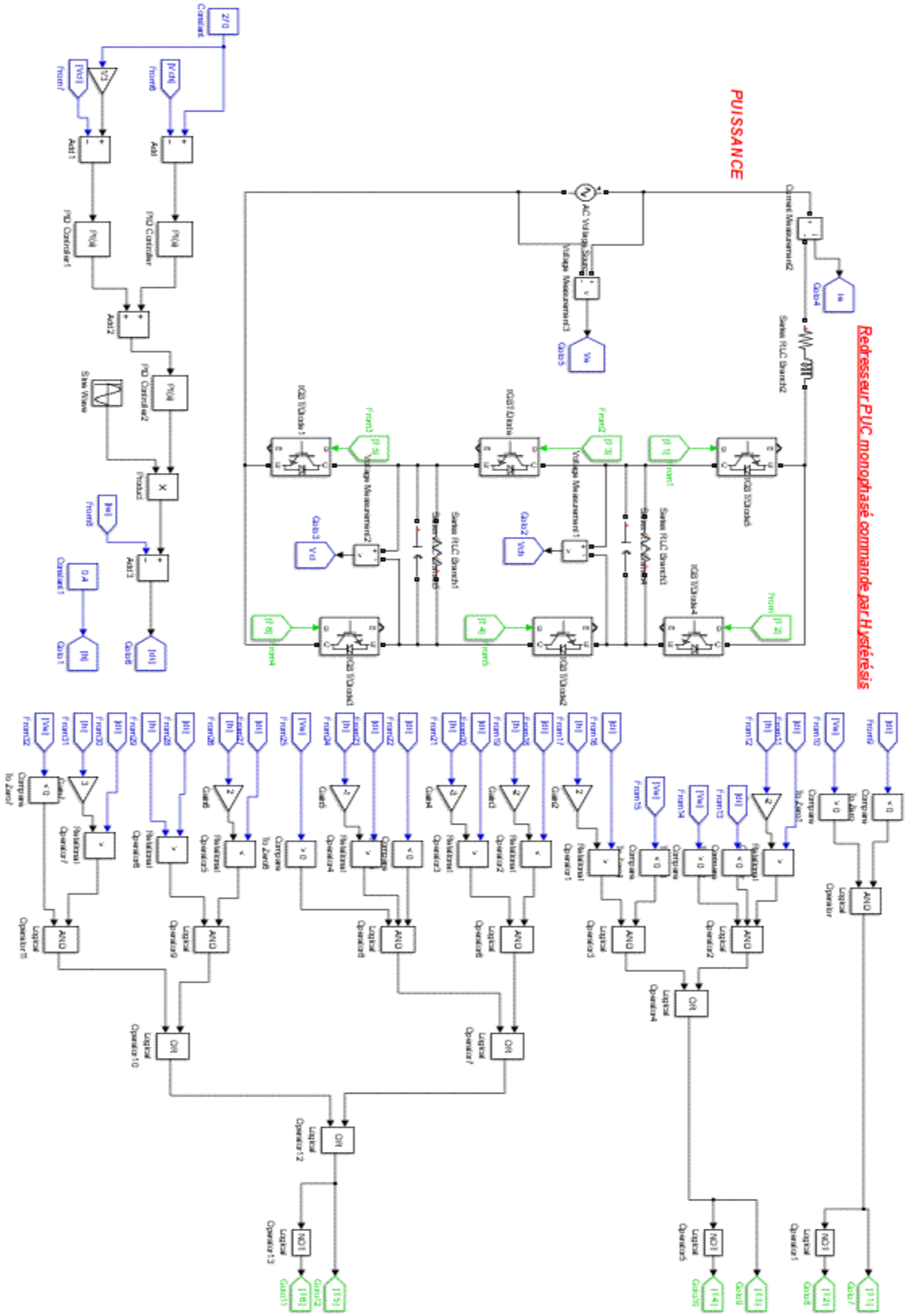
Onduleur PUC monophasé commande MLI :



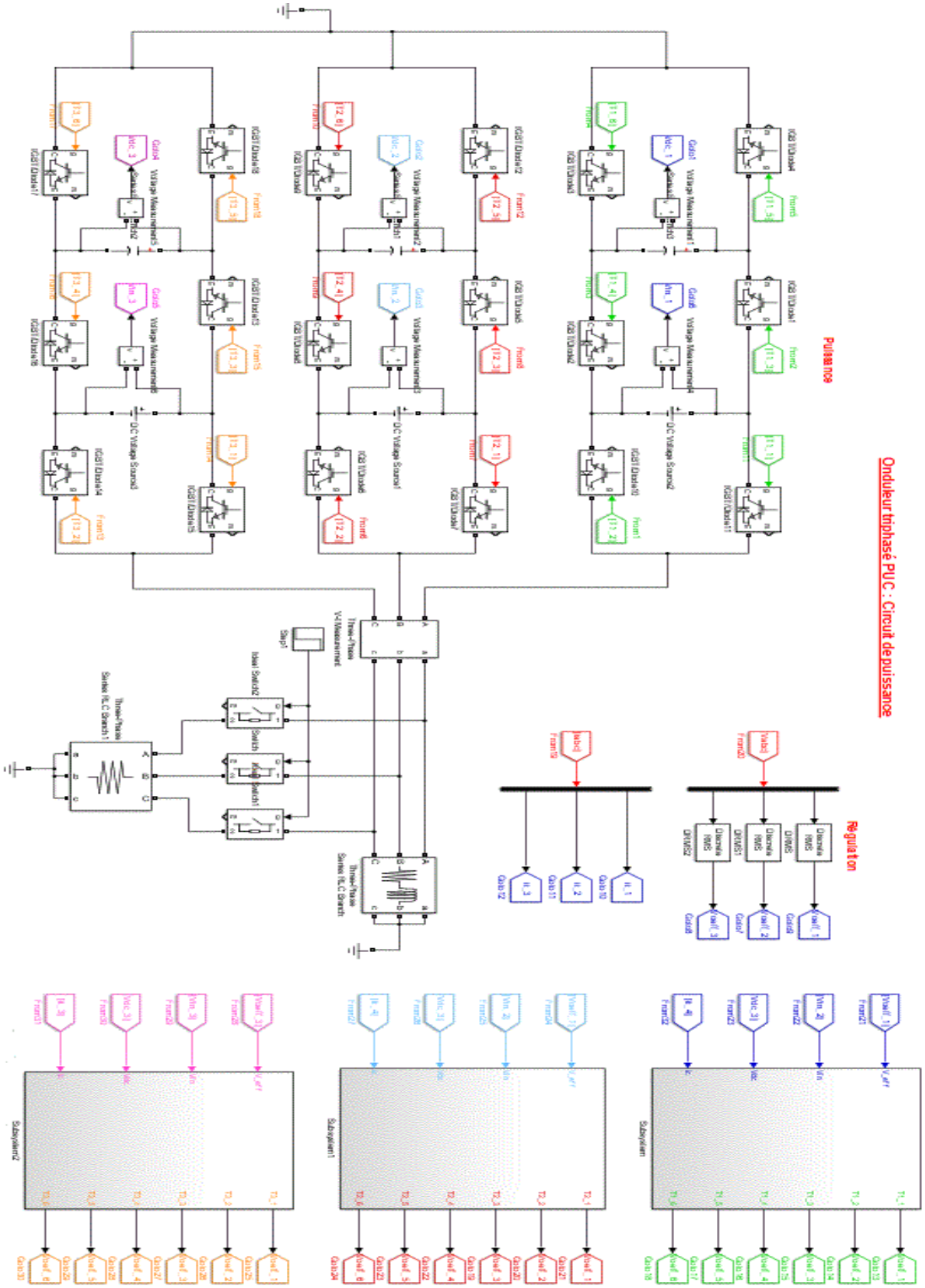
Redresseur monophasé PUC commande MLI :



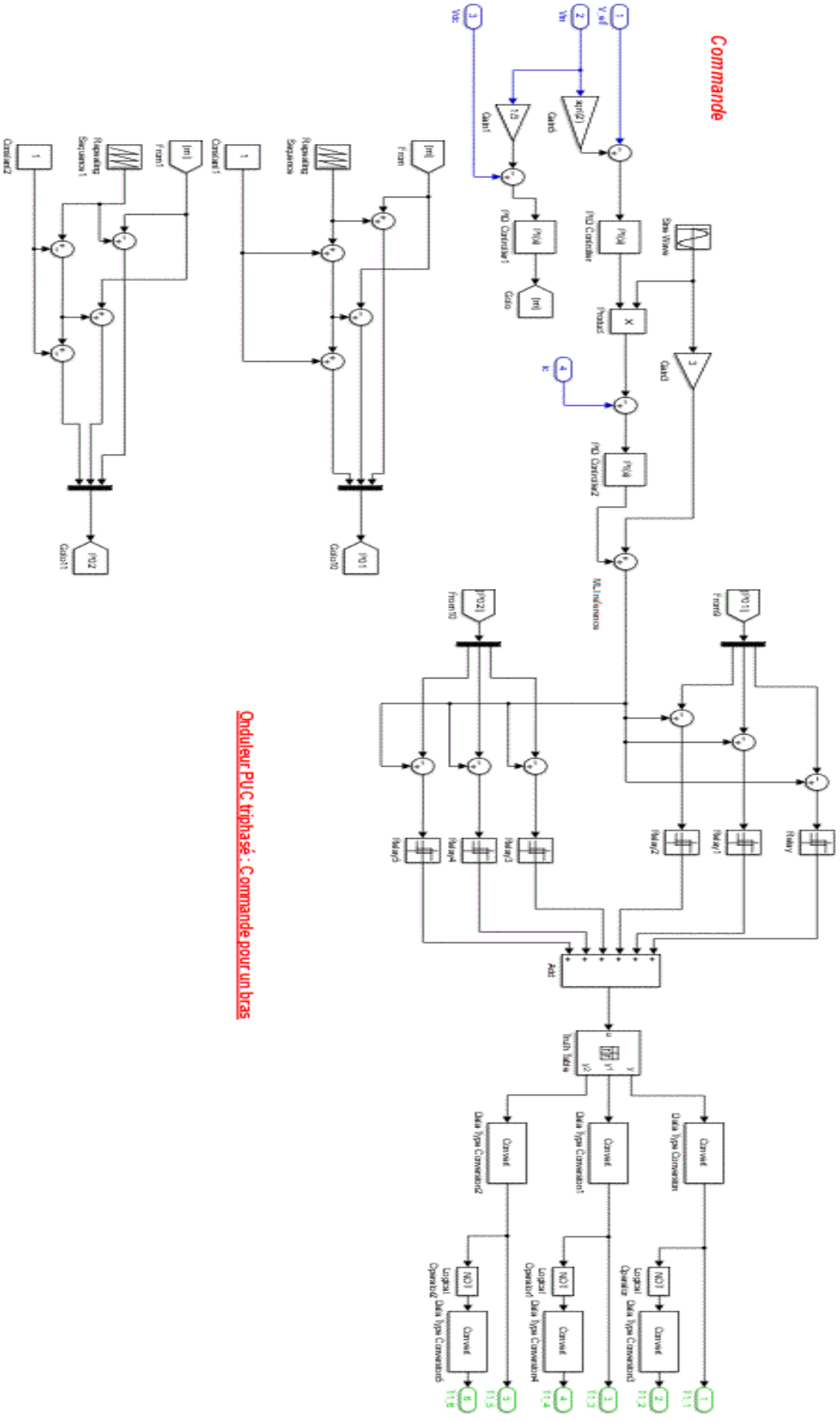
Redresseur PUC monophasé commande par Hystérésis :



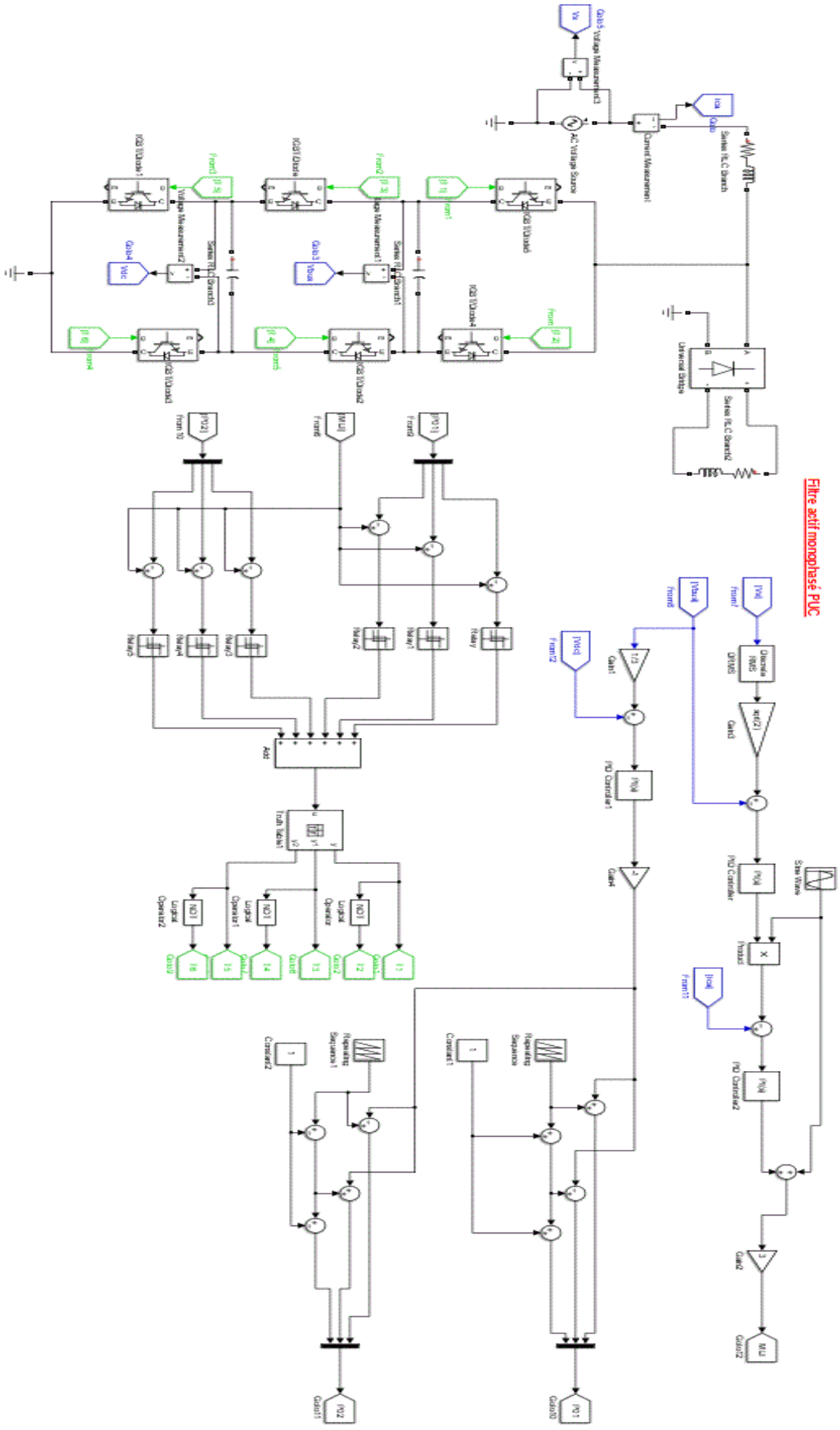
Onduleur triphasé PUC : Circuit de puissance :



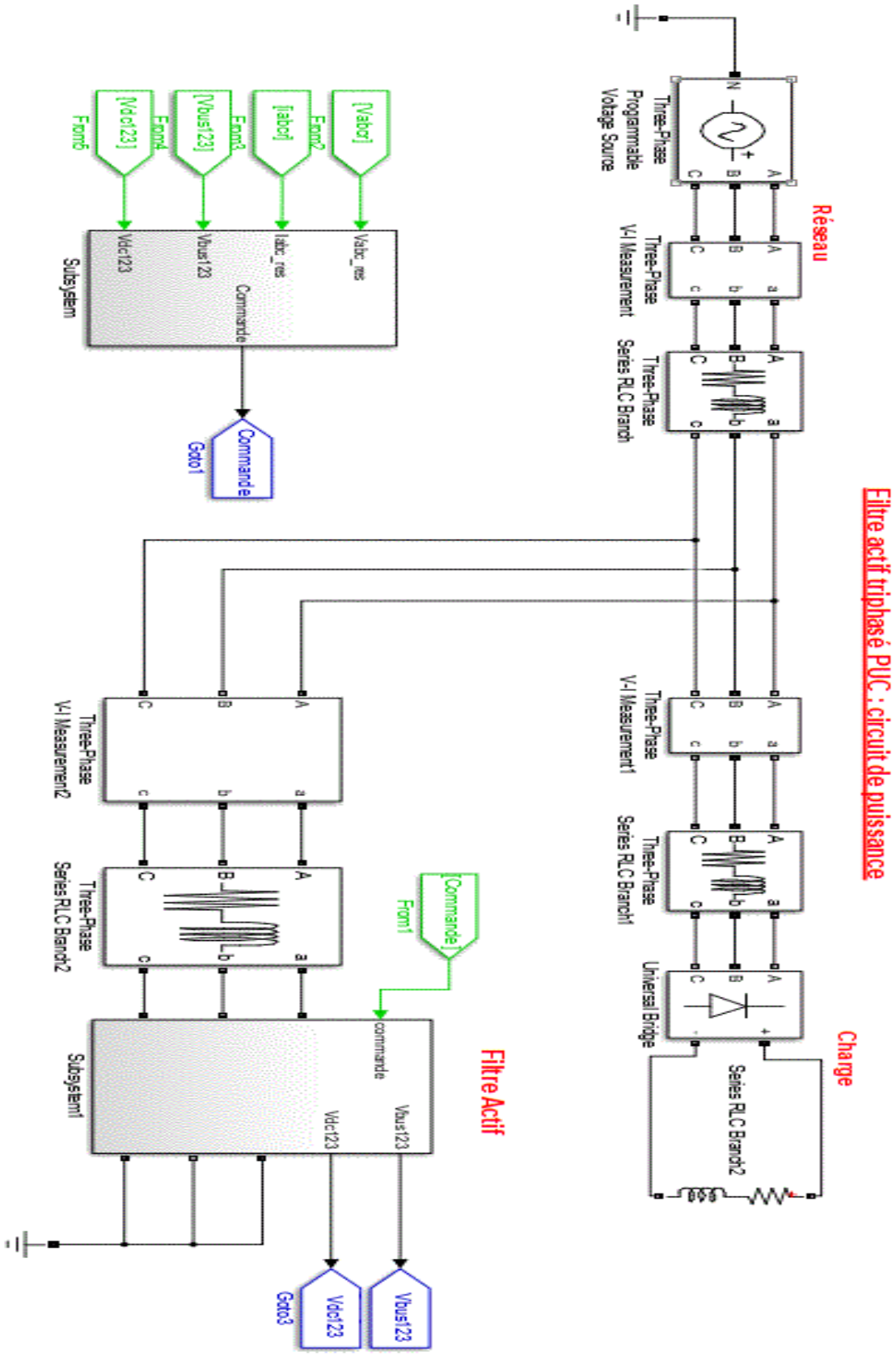
Onduleur PUC triphasé : Commande pour un bras :



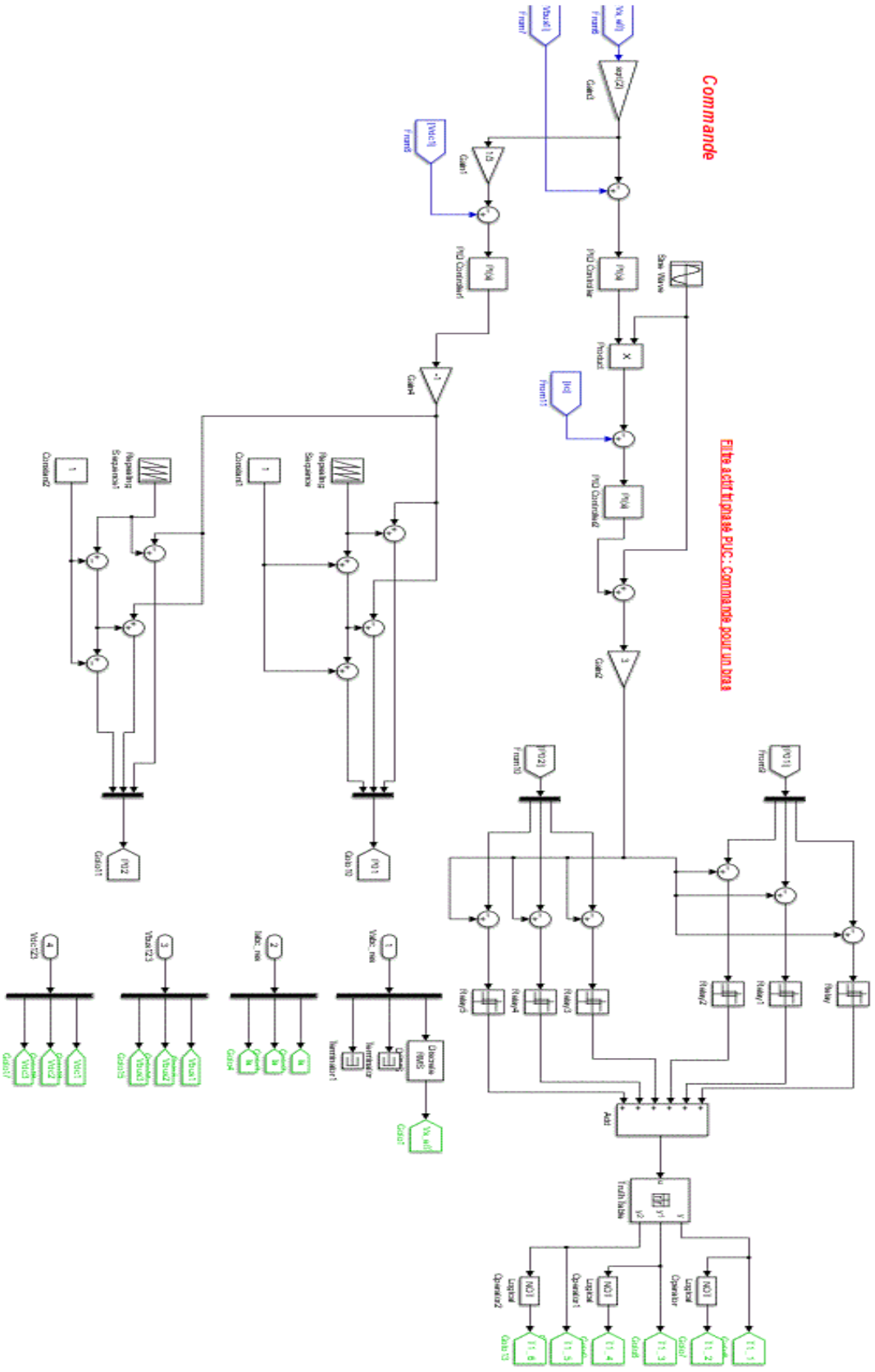
Filtre actif monophasé PUC :



Filtre actif triphasé PUC : circuit de puissance :



Filtre actif triphasé PUC : Commande pour un bras :



BIBLIOGRAPHIE

[ABD-08] M.M. Abdusalam « **Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales** », Thèse Doctorat. Université Nancy-I 2008.

[ALA-02] M.A.E. Alali « **Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension** », Thèse Doctorat. Université Strasbourg I 2002.

[ARO-98] A. Arora « **Solutions innovatrices pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique** »,Revue Qualité De L'énergie Electrique ABB 3/1998.

[BEN-07] G. Benysek, « **Improvement in the Quality of Delivery Electrical Energy Using Power Electronics Systems** », Springer-Verlag London Limited 2007.

[BER-00] S. Bernard et G. Trochain « **Compensation des courants harmoniques générés par les ordinateurs grâce à un compensateur actif d'harmoniques révolutionnaire** », Publication: MGE UPS SYSTEMS-01/2000.

[BER-06] A.L.D. Bermeo « **Commandes avancées des systèmes dédies a l'amélioration de la qualité de l'énergie : de la basse tension a la montée en tension** », Thèse Doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble 2006.

[BOU-07] A. Boukadoum « **Contribution à l'analyse et la réduction de la pollution harmonique dans le réseau électrique** », Mémoire de Magister. Université d'Annaba 2007.

[BRU-05] T. BRÜCKNER, S. BERNET, H.GÜLDNER, "**The Active NPC Converter and Its Loss-Balancing Control**", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 52, no. 3, June 2005.

[CEL-00] N. CELANOVIC , D. BOROYEVICH, "**A comprehensive study of neutral point voltage balancing problem in three-level neutral-point-clamped voltage source PWM inverters**", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 15, no. 2, pp. 242–249, March 2000.

[CHA-09] B. CHARIER « **La qualité de l'énergie électrique: critères et définitions** », Revue technologie 2009.

[CHA-10] A. Chaoui « **Filtrage actif triphasés pour charges non linéaires** », Thèse Doctorat. Université de Sétif 2010.

[CHE-08] N. Gheorghe « **Perturbations dans les réseaux électriques** », Revue Polyewpert Technique N°53 2008.

[CHE-14] Mohamed Talel CHEBBAH «**étude et simulation d'un convertisseur multi niveaux type puc** » maitrise en génie, concentration énergies renouvelables et efficacité énergétique. montréal, avril 2014

[DEF-08] F. Defaÿ « **Commande prédictive directe d'un convertisseur multicellulaire triphasé pour une application de filtrage actif** », Thèse Doctorat. Université De Toulouse 2008.

[DRI-02]: J. Driesen « **Development of a measurement system for power quantities in electrical energy distribution systems**», Instrumentation and Measurement Technology Conference, IMTC/2002. Proceedings of the 19th IEEE, pp.1625-1630, Vol.2, 2002.

[DZO-11] S.R Dzonde Naoussi « **Implantation de réseaux neuromimetiques sur cible FPGA application a l'intégration d'un système de filtrage actif** », Thèse Doctorat. Université de Strasbourg 2011.

[EPA-10]: M.D. Epanya « **Application du filtrage actif pour une mise en œuvre de méthode de prédiction et de contrôle d'harmoniques dans un réseau de distribution électrique**», Mémoire comme exigence partielle de la maitrise en génie électrique. Université du Québec 2010.

[ETX-03] I. Etxeberria-Otadui « **Sur les systèmes de l'électronique de puissance dédies à la distribution électrique-application à la qualité de l'énergie** », Thèse Doctorat. Institut national polytechnique de Grenoble 2003.

[FET-06] C. Fetha « **Analyse et amélioration de l'indice de la non-symétrie de tension dans la qualité del'énergie électrique** », Thèse Doctorat. Université de Batna 2006.

[GAT-97] G.GATEAU, "**Contribution à la commande des convertisseurs statiques Multicellulaires série, commande non linéaire et commande floue"**, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 1997.

[GAT-12] B. Gattal « **Méthodes d'analyse des perturbations électriques dans la qualité de l'énergie électrique en utilisant des nouvelles techniques pour l'application aux creux de tension** », Mémoire de Magister. Université de Batna 2012.

[GOU-97] T. GOURAUD « **Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique**», Thèse Doctorat. Université de Nantes 1997.

[GRE-09] Grégoire, Luc-André, Kamal Al-Haddad et Youssef Ounejjar. 2009. « **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.

[HAM-10] A. Hamadi « **Contribution à l'étude des filtres hybrides de puissance utilises pour améliorer la qualité de l'énergie dans le réseau électrique de distribution**», Thèse Doctorat. Université du Québec 2010.

[HAM-12] F. Hamoudi « **Contribution aux stratégies de commande avancées d'un filtre actif shunt à quatre fils** », Thèse Doctorat. Université de Batna 2012.

[IGN-06] V. Ignatova « **Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique Application aux creux de tension et à la pollution harmonique** », Thèse Doctorat. Université de Grenoble 2006.

[KAN-05] 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.

[KHE-09] Khelifa BENMANSOUR, « **Réalisation d'un banc d'essai pour la Commande et l'Observation des Convertisseurs Multicellulaires Série: Approche Hybride** »,Thèse De Doctorat, Université de Cergy Pontoise, France,2009.

[KHO-10] Khomfoi, Surin et Leon M. Tolbert. 2010. «**Multilevel Power Converter**» in *Power Electronics Handbbok*, sous la dir. de Muhammed H. Rashid. 2nd ed, p. 451-482. Academic Press.

[KOU-04] A. Kouzou « **Compensation active des perturbations dans un réseau basse tension** », Mémoire de Magister. Université de Boumerdes 2004.

[KOU-06] H. Kouara « **Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension** », Mémoire de Magister. Université de Batna 2006.

[MAC-04] K.J.P. MACKEN «**Mitigation of voltage dips through distributed generation systems**»,IEEE Transactions on Industry Applications, pp.1686-1693, Vol.40, No.6, November/December 2004.

[MAG-07] M. Magraoul « **Validation de techniques de commande d'un filtre actif parallèle**», Mémoire comme exigence partielle à l'obtention de la maitrise en génie électrique. Université du Québec 2007.

[MAR-05] Mariethoz, Jean-Sebastien. 2005. « **Étude Formelle pour la Synthèse de Convertisseurs Multiniveaux Asymétriques : Topologies, Modulation et Commande**». Thèse en génie électrique, Lausanne, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 331p.

[MEN-03] N.H. Mendalek « **Qualité de l'onde électrique et moyens de mitigation**», Thèse doctorat, Ecole de technologie supérieure, Université du Québec 2003.

[MEY-92] T.A. MEYNARD and H. FOCH, "**Dispositif Electronique de Conversion d'Energie Electrique**", French Patent n° 91.09582 du 25 Juillet 1991 ; Europe, Japon, USA, Canada n°92/00652 du 8 Juillet 1992.

[NEK-14] D. Nekkar, « **Contribution à l'Etude des Stratégies de Commande des Filtres Actifs Triphasés** », Mémoire de Magister. Université Mohamed Chérif Messaadia de Souk-Ahras 2014.

[OUL-05] D. Ould Abdeslam « **Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques: application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension** », Thèse Doctorat. Université de Haute-Alsace 2005.

[OUN-08] 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.

[OU N-10] 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.

[OUN-11] Youssef OUNEJJAR « **Convertisseur électronique de puissance multiniveaux et à faible répercussion sur de réseau électrique** », Université de Quèbec, canada,2011.

[OUN-11] Ounejjar, Youssef, Kamal Al-Haddad et Louis A. Dessaint. 2011. « **A Novel Six-Band Hysteresis Control for the Packed U Cells Multilevel Converter: Experimental Validation**». In *IEEE International Symposium Industrial Electronics ISIE*. (Bari, Jul 4-7 2010), p.3199-3204.

[ROU-93] Round & Duke « **Active filter optimization for efficient variable frequency remote generation** », Industry Applications Society Annual Meeting. Conference Record of the IEEE, pp. 894-898, Vol.2, October 1993.

[REC-02] S. Rechka « **Etude de méthodes de filtrage des harmoniques dans les réseaux électriques de distribution** », Mémoire comme exigence partielle pour l'obtention d'un diplôme de maître en sciences appliquées en génie électrique. Université du Québec à Trois-Rivières 2002.

[SAE-08] Saeedifard, Maryem. 2008. « **Space Vector Modulation of Multi-Level and Multi-Module Converters for High Power Applications**». Thèse en genie électrique, Toronto, University of Toronto, 176p.

[STO-91] Stoline, Jean Jacques E. et Weiping Li. 1991. « **Applied Nonlinear Control**». 1st ed, New Jersey: Prentice Hall Englewood Cliffs, 461p.

[SWA-05] M.M. Swamy « **Passive techniques for reducing input current harmonics** », WP.AFD.01 Copyright by Yaskawa Electric America, Inc. 2005.

[SAK-07] H. Sakkou « **Conception d'une compensatrice active multifonction corrigeant toutes les perturbations en tension générées par les charges non linéaires et les fours à arc** », Mémoire comme exigence partielle à l'obtention de la maitrise en génie électrique. Université de Québec 2007.

[TAN-06] C. Tan Perng « **A single-phase hybrid active power filters with photovoltaic application** », Thèse de Master en Genie Electrique, Université de Technologie Malaysia 2006.

[TAD-08] S.A. Tadjer « **Etude d'un système de compensation d'harmonique en utilisant un générateur photovoltaïque 'GPV'** », Mémoire de Magister. Université de Boumerdes 2008.

[TEI-03] R. TEICHMANN and S. BERNET, "**Three-level topologies for low voltage power converters in drives, traction, and utility applications**". IEEE Industrial Applications Society Annual Meeting, pp. 160–167, Salt Lake City, UT, 2003

[UTK-99] Utkin, Vadim, Jurgen Guldner et Jingxin Shi. 1999. « **Sliding Mode Control in Electromechanical Systems**». Philadelphia, Taylor and Francis, 328p.

[WAN-04] M. Wang « **Classification of power quality events using optimal time frequency representations, part1: theory** », Power Delivery, IEEE Transactions, pp.1488-1495, Vol.19, N.3, July 2004.

[YAC-06] Yacoubi, Loubna, Kamal Al-Haddad, Louis-A. Dessaint et Farhat Fnaiech. 2006. « **Linear and Nonlinear Control Techniques for a Three-Phase Three-Level NPC Boost Rectifier**». *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, n°6, (December), p. 1908-1918.