

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية  
الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



## **MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

**En** : Electrotechnique

**Spécialité** : Commandes électriques

**Par** : BELMAHI Amine et AHMED BELKACEM Djamel

### **Sujet**

**Étude et simulation d'un filtre actif de puissance parallèle  
multi-niveaux à commande indirecte**

Soutenu publiquement, le 21/06/2022, devant le jury composé de :

Mr. Abdelkader MECHERNENE	MCA	Univ. Tlemcen	Président
Mme. Sihem BOURI	MCA	Univ. Tlemcen	Examinateur
Mr. Mohamed Choukri BENHABIB	Professeur	Univ. Tlemcen	Encadreur
Mr. Mohammed Amine BRIKCI NIGASSA	MAA	Univ. Tlemcen	Co-Encadreur

Année universitaire : 2021 /2022

# Remerciements

Avant tout, Je voudrais remercier ALLAH de m'avoir  
donné la force de finir ce travail.

Je voudrais remercier les membres du jury Mr.  
MECHERNENE Abdelkader et Mme. BOURI Sihem  
pour avoir accepté de juger ce travail.

Je tiens à remercier sincèrement nos encadreurs  
pour ce mémoire Pr. BENHABIB MOHAMED  
CHOUKRI et Dr. BRIKCI NIGASSA MOHAMMED  
AMINE pour leurs aides précieuses.

Je tiens aussi à remercier l'ensemble des enseignants  
de l'électrotechnique.

Aussi, mes vifs remerciements vont à tous ceux qui  
m'ont aidé de près ou de loin avec leurs conseils afin  
de terminer les travaux.

# Dédicace

Tous les mots ne peuvent pas exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance à :

- Mes chers parents qui m'ont aidé à atteindre le niveau d'études actuel.
- Ma sœur et mon frère Adel.
- Mes cousins Abdel Fattah et Ismail.
- Cher grand-père et mes grands-parents décédés ALLAH yarhamhom.
- Mes chers oncles et tantes.
- Mes amies Abdelhadi, Amine, Aymen, Achraf, Nadir, Mokhtar, Imane, Bouthayna, Farah, Salima et mon binôme Djamel.

**BELMAHI AMINE.**

# Dédicace

Tous les mots ne peuvent pas exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance, c'est simplement : Je dédie cette thèse à :

- ma mère et mon père qui m'ont soutenus durant toutes les périodes de vie, que Dieu les protège inshallah.
- Mes chères sœurs
- Mon cousin Mohamed.
- Mes chers amis :  
Laksari abdelkader ,maammar meroune ,zidane ayoub,bechrif bothyna, faycel ,Houssem.
- Mes amis de la promotion 2021/2022 pour leurs aides et supports dans les moments difficiles.
- A tous mes enseignants et enseignantes depuis ma carrière scientifique
- A mon cher binôme BELMAHI AMINE et leur famille pour son soutien et sa sympathie.

**AHMED BELKACEM DJAMEL.**

# Sommaire

Liste des tableaux.....	1
Liste des figures.....	2
Liste des symboles.....	5
Introduction générale.....	6
Chapitre I. Réseaux électriques et qualité de l'énergie .....	7
I.1. Introduction .....	8
I.2. Qualité de l'énergie électrique.....	8
I.3. Perturbation électrique.....	8
I.3.1. Creux et coupures de tension .....	9
I.3.2. Fluctuations de tension.....	10
I.3.3. Déséquilibre du système triphasé de tension.....	10
I.3.4. Harmoniques .....	10
I.3.4.1. Caractérisation des perturbations harmoniques :.....	7
I.3.4.2. Effets des harmoniques :.....	8
I.4. Solutions de dépollution du réseau électrique .....	15
I.4.1. Solutions traditionnelles de dépollution.....	15
I.4.2. Solutions modernes de dépollution .....	16
I.5. Conclusion .....	19
Chapitre II. Étude et simulation d'un filtre actif de puissance parallèle.....	20
II.1. Introduction .....	21
II.2. Principe de fonctionnement du FAPP .....	21
II.3. Structure générale du filtre actif de puissance parallèle .....	21
II.3.1. Partie puissance .....	23
II.3.2. Partie commande .....	25
II.3.3. Généralités sur les méthodes d'identification .....	26
II.3.3.1. Méthode des puissances instantanées:.....	22
II.3.3.2. Méthode de détection du référentiel lié au synchronisme:.....	24
II.3.3.3. Commande par logique floue :.....	25
II.3.4. Méthode de commande de filtre actif.....	30
II.3.4.1. Commande directe :.....	26
II.3.4.2. Commande indirect:.....	27
II.3.5. Simulations par la commande directe utilisant une MLI basée sur la méthode de puissance instantanée :.....	32
II.3.6. Méthode de commande directe par hystérésis basée sur la méthode de puissance instantanée : .....	36

II.4. Conclusion .....	38
Chapitre III. Étude et simulation d'un filtre actif de puissance parallèle Multi-niveaux.....	39
III.1. Introduction :.....	40
III.2. Onduleurs multiniveaux :.....	40
III.3. Différentes topologies d'onduleurs multi niveaux : .....	41
III.3.1. Topologie NPC :.....	42
III.3.1.1. Onduleur trois niveau NPC : .....	43
III.3.1.2 Onduleur cinq niveau NPC : .....	46
III.3.2. Topologie en cascade (H-Bridge) : .....	50
III.3.2.1. Onduleur à TROIS niveaux de type Cascade en pont H :.....	48
III.3.2.2 Onduleur à cinq niveaux de type Cascade en pont H :.....	55
III.3.3. Topologie de L'onduleur à condensateur flottant (FC):.....	59
III.4. Simulation d'un filtre actif de puissance parallèle deux niveaux par la méthode indirecte par MLI basée sur la commande de puissance instantanée .....	59
III.5. Simulation d'onduleur multiniveau : .....	62
III.5.1. Simulation du FAP trois niveaux de type NPC.....	62
III.5.2. Simulation du FAP trois niveaux de type cascade en pont H .....	67
III.5.3. Simulation onduleur cinq niveau NPC :.....	71
III.5.4. Simulation onduleur cinq niveaux de type cascade en pont H.....	75
III.6. Conclusion : .....	79
Conclusion générale : .....	80
Références bibliographiques .....	81
Résumé.....	85

## ***Liste des tableaux***

Tableau I-1 Effet des harmoniques .....	14
Tableau II-1 : paramètres de simulation.....	34
Tableau III-1 : Commutation du convertisseur NPC 3 niveaux.....	44
Tableau III-2 : Table de commutation de l'onduleur NPC à 5 niveaux. ....	50
Tableau III-3 : Commutation du convertisseur cascade en en pont H à 3 niveaux.....	54
Tableau III-4 : Table de commutation de l'onduleur NPC à 5 niveaux. ....	58
Tableau III-5 : Les paramètres de simulation utilisés des quatre simulations. ....	62

## *Liste des figures*

Figure I-1: creux et coupures sa tension.....	9
Figure I-2: Fluctuations de tension.....	10
Figure I-3 : déséquilibre du système triphasé de tension .....	10
Figure I-4 : Exemple d'harmonique .....	11
Figure I-5 : filtre passif amorti ou passe-haut .....	16
Figure I-6 : filtre passif résonnant .....	16
Figure I-7 : filtre actif de puissance parallèle.....	17
Figure I-8 : filtre actif de puissance série .....	18
Figure I-9 : combinaison des filtres actifs série et parallèle.....	19
Figure II-1 : Principe du filtrage actif parallèle.....	21
Figure II-2 : structure générale de filtre actif parallèle .....	22
Figure II-3 : Filtre actif à structure tension .....	23
Figure II-4 : Interrupteur de puissance .....	23
Figure II-5: bloc fonctionnel de calcul des courants de référence [16].....	25
Figure II-6 : schéma représentant le principe de séparation des puissances .....	27
Figure II-7 : Schéma de principe d'une commande par logique floue.....	29
Figure II-8 : configuration interne d'un contrôleur floue.....	30
Figure II-9 : schema de commande directe d'un filtre actif parallèle de puissance.....	31
Figure II-10 : schema de commande indirecte d'un filtre actif parallèle de puissance .....	31
Figure II-11 : Schéma general de la simulation de FAP par la methode directe par MLI a base la méthode de puissance instantanée .....	32
Figure II-12 : schéma commande MLI filtre actif parallèle indirect (p-q) MLI .....	32
Figure II-13 : Schéma la méthode de puissance instantanée FAP direct MLI.....	33
Figure II-14: résultats de simulation du FAP direct MLI.....	35
Figure II-15 : Commande par hystérésis de FAP direct.....	36
Figure II-16 : résultats de simulation de FAP direct hys (p-q).....	37
Figure III-1: Onduleur à niveaux multiples.....	41
Figure III-2 : Onduleurs MPC à quatre niveaux .....	42
Figure III-3: Onduleur NPC à trois niveaux.....	42
Figure III-4 : Structure d'onduleur triphasé à trois niveaux de type NPC. ....	43
Figure III-5 : 1ère onfiguration du 1er bras.....	45
Figure III-6 : 2ieme configuration du 1er bras. ....	45



Figure III-7 : 3eme configuration du 1er bras. ....	46
Figure III-8 : Schéma d'un onduleur NPC à cinq niveaux. ....	46
Figure III-9 : 1ere configuration du 1er bras. ....	47
Figure III-10 : 2ème configuration du 1er bras. ....	48
Figure III-11 : 3eme configuration du 1er bras. ....	48
Figure III-12 : 4eme configuration du 1er bras. ....	49
Figure III-13 : représente 5eme configuration du 1er bras. ....	49
Figure III-14 : Structure d'un onduleur en pont H. ....	51
Figure III-15 : Structure d'un onduleur en pont de Vienna. ....	51
Figure III-16 : Structure d'un onduleur H-Bridge classique ....	51
Figure III-17 : Schéma triphasé d'un onduleur cascade en cascade en pont H à 3 niveaux. ....	52
Figure III-18 : 1ère onfiguration du 1er bras. ....	53
Figure III-19 : 2eme configuration du 1er bras. ....	53
Figure III-20 : 3eme configuration du 1er bras. ....	54
Figure III-21 : Schéma d'un onduleur cascade en H à 5 niveaux ....	55
Figure III-22 : 1ere configuration du 1er bras. ....	56
Figure III-23 : 2ème configuration du 1er bras. ....	56
Figure III-24 : 3eme configuration du 1er bras. ....	57
Figure III-25 : 4eme configuration du 1er bras. ....	57
Figure III-26 : représente 5eme configuration du 1er bras. ....	58
Figure III-27 : onduleur condensateurs flottants de cinq niveaux. ....	59
Figure III-28 : onduleur condensateurs flottants de trois niveaux. ....	59
Figure III-29 : Schéma général de la méthode indirect p-q par MLI ....	60
Figure III-30 : schéma de la commande (p-q) de la methode indirect ....	60
Figure III-31 : Résultats de simulation du FAP indirect à MLI par la méthode p-q. ....	61
Figure III-32 : schéma général de la simulation de l'onduleur trois niveaux NPC. ....	63
Figure III-33 : Schéma de la commande MLI d'un onduleur trois niveau NPC. ....	64
Figure III-34 : Résultats de simulation du FAP 3 niveaux à commande indirecte indirect par la méthode p-q. ....	65
Figure III-35 : Schéma général de la simulation de l'onduleur trois niveau H-BRID ....	67
Figure III-36 : Schéma de la MLI d'un FAP trois niveaux en cascade en pont H (un seul onduleur) ....	68
Figure III-37 : Résultats de simulation du onduleur trois niveau H-BRIDGE. ....	69
Figure III-38 : Schéma général de la simulation de l'onduleur cinq niveaux NPC. ....	71

Figure III-39 : Schéma de la commande MLI de l'onduleur cinq niveaux de type NPC. ....	72
Figure III-40 : Résultats de simulation du onduleur cinq niveaux NPC .....	73
Figure III-41 : Schéma général de la simulation de l'onduleur cinq niveaux cascade en pont H. .....	75
Figure III-42 : Schéma d'un pont H (H-bridge) cinq niveaux .....	76
Figure III-43 : schéma de la commande MLI de l'onduleur cinq niveaux de type cascade en pont H.....	77
Figure III-44 : Résultats de simulation du FAP cinq niveaux de type cascade en pont H.....	78

## *Liste des symboles*

**FAP** : Filtre Actif Parallèle.

**FAS** : Filtre Actif Série.

**UPQC** : Unified Power Quality Conditioner.

**THD** : Taux de Distorsions Harmoniques.

**IGBT** : Le transistor bipolaire à grille isolée, en anglais InsulatedGateBipolar Transistor.

**GTO** : Le thyristor à extinction par la gâchette, en anglais Gâche Turn-Off Thyristor.

**FFT** : Transformée de Fourier rapide.

**CEI** : Commission Electrotechnique Internationale.

**NPC** : Neutral Point Clamped.

**MPC** : Multiple Point Clamped.

**MLI** : Modulation de Largeur d'Impulsion.

**FPH** : Filtre passe haut.

**FPB** : Filtre passe bas.

**PLL** : Phase-Locked Loop (Boucle de verrouillage de phase).

**V<sub>dc</sub>** : Tension aux bornes de condensateur.

**MT** : Moyenne tension.

**BT** : Bas tension

**f** : Fréquence.

**I<sub>eff</sub>** : Courant efficace.

**$\bar{p}$   $\bar{q}$**  : Puissance continue liée à la composante fondamentale active et réactive du courant.

**$\tilde{p}$   $\tilde{q}$**  : Puissance alternative liées à la somme des composantes harmonique du courant.

**V<sub>s</sub>** : Tension de source.

**I<sub>s</sub>** : Courant de la source.

**I<sub>c</sub> - I<sub>ch</sub>** : courant de charge.

**I<sub>f</sub> - I<sub>inj</sub>** : Courant de filtre.

**L** : Inductance

**R** : Résistance

## **Introduction générale**

L'électronique de puissance est un domaine relativement nouveau et en pleine croissance. Durant ces dernières décennies, l'évolution technologique a impliqué une utilisation accrue de ces dispositifs à base d'électronique de puissance dans divers secteurs aussi bien dans le domaine de la traction électrique que dans les domaines de chauffage par induction, les alimentations de secours et autres... Ce large succès est dû aux énormes progrès effectués dans le domaine des semi-conducteurs [4].

La problématique des harmoniques dans le réseau électrique, également appelée pollution harmonique, n'est pas un phénomène nouveau. La distorsion harmonique est générée en générale par ces charges à base d'électronique de puissance dite charge non linéaires connectées au réseau, qui absorbent des courants non sinusoïdaux. Ces harmoniques de courant vont à leur tour générer des tensions harmoniques aux différents points de connexion du réseau.

L'objectif de ce mémoire est de simuler l'efficacité filtres actifs de puissance de structure multi-niveaux qui sont plus avantageux et qui offre la possibilité de réduire ces harmoniques [1].

Ainsi, ce mémoire sera divisé en trois chapitres :

Dans le premier, on présentera les notions générales sur les harmoniques, leurs sources, leurs conséquences et les méthodes classiques et modernes pour les compenser.

Le deuxième chapitre sera consacré au principe de filtrage en utilisant les filtres actifs de puissance parallèle. Nous montrerons aussi les méthodes d'identifications des courants harmoniques basés sur l'utilisation des puissances actives et réactives instantanées.

Le troisième chapitre présentera l'objectif principal de notre travail qui est l'étude des filtres actifs de puissance multi-niveaux commandé par MLI. Les onduleurs multiniveaux sont abordés avec leurs principes de fonctionnement et les différentes structures qui existent appliquer aux filtres actifs de puissance. A la fin, les résultats de simulation des différentes structures sont présentés, comparés et interprétés.

Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale.

# **Chapitre I. Réseaux électriques et qualité de l'énergie**

## I.1. Introduction

L'utilisation des appareils électriques est en augmentation que ce soit pour des applications industrielles ou domestiques. Cependant la plupart de ces appareils tels que les redresseurs, les gradateurs, le matériel informatique, les appareils de climatisation ou encore l'éclairage à base de tubes fluorescents absorbent des courants non sinusoïdaux, ce qui provoque des distorsions harmoniques dans l'ensemble du réseau électrique. Ces harmoniques peuvent perturber le fonctionnement normal de certains équipements électriques voir même les endommager.

Nous commencerons ce chapitre par un exposé des principaux défauts affectant la tension et le courant du réseau électrique. Nous parlerons également de leurs origines et des conséquences sur le matérielle. Nous discuterons pour terminer des solutions traditionnelles et modernes utilisés pour pallier aux problèmes liés aux perturbations harmoniques.

## I.2. Qualité de l'énergie électrique

La qualité de l'énergie électrique est devenue un élément important des systèmes d'alimentation et des machines électriques. Le sujet a attiré l'attention de nombreuses universités et industries, et un certain nombre des articles ont été publiés dans ce domaine.

À en juger par les différentes définitions, la qualité de l'énergie est généralement censée exprimer la qualité de la tension et/ou la qualité du courant et peut être définie comme : la mesure, l'analyse et l'amélioration de la tension d'une ligne en maintenant sa forme d'onde sinusoïdale et une fréquence fixe de 50Hz. Cette définition inclut tous les phénomènes en régime transitoire et permanent. [3]

## I.3. Perturbation électrique

Les tensions d'un réseau électrique constituent un système alternatif triphasé, dont la fréquence de base est de 50 ou 60 Hz selon le pays. Les paramètres caractéristiques d'un tel système sont :

- La fréquence.
- L'amplitude des tensions.
- La forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde.
- Et la symétrie du système triphasé (égalité des amplitudes et des déphasages entre les phases).

---

La qualité de la tension peut être affectée, soit du fait de certains incidents inhérents à la nature physique ou liées à l'exploitation du réseau, soit du fait de certaines charges. Ces défauts se manifestent sous forme de différentes perturbations affectant un ou plusieurs des quatre paramètres précédemment définis.

### I.3.1. Creux et coupures de tension

Le creux de tension est une diminution brutale de la tension à une valeur située entre 10% et 90% de la tension nominale pendant une durée allant de 10 ms jusqu'à quelque second.

(Figure I-1)

Les creux de tension sont dus à des phénomènes naturels comme la foudre, ou à des défauts sur l'installation ou dans les réseaux tant publics que ceux des utilisateurs. Ils apparaissent également lors de manœuvres d'enclenchement mettant en jeu des courants de fortes intensités (moteurs, transformateurs, etc.) [13]

Une coupure de tension quant à elle est une diminution brutale de la tension à une valeur supérieure à 90% de la tension nominale ou disparition totale pendant une durée généralement comprise entre 10 ms et une minute pour les coupures brèves et supérieure à une minute pour les coupures longues. La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms.

- **Causes** : Une chute de tension est une chute courte et temporaire de l'amplitude de la tension dans le réseau de distribution ou le système électrique du client. Elle peut être causée par divers défauts dans les réseaux de transport et de distribution, des défauts dans les équipements connectés ou des courants d'appel et de commutation élevés dans l'installation du client.
- **Conséquences** : Les creux de tension sont susceptibles de perturber le fonctionnement de certaines installations industrielles et tertiaires. En effet, ce type de perturbation peut causer des dégradations de fonctionnement des équipements électriques qui peuvent aller jusqu'à la destruction totale de ces équipements [2].

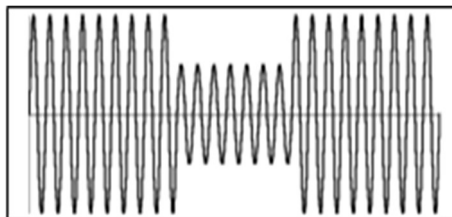


Figure I-1: Creux et coupures sa tension

### I.3.2. Fluctuations de tension

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 la tension sont une suite de variations de la tension ou des variations cycliques ou aléatoires de l'enveloppe de la tension (Figure I-2).

- **Causes** : Variations importantes de charges (machines à souder, fours à arc...).
- **Conséquences** : Fluctuation de la luminosité des lampes (papillotement ou flicker) [3].

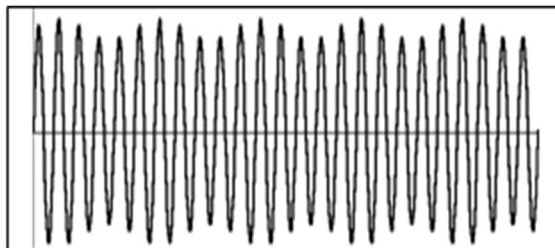


Figure I-2: Fluctuations de tension

### I.3.3. Déséquilibre du système triphasé de tension

On dit qu'il y a déséquilibre dans un réseau électrique, lorsqu'on enregistre en régime permanent, des asymétries d'amplitudes et de déphasage des tensions de phases. Ce type de perturbation est causé essentiellement par les asymétries d'impédances des lignes du réseau ou des charges, et aussi par des courts-circuits monophasés ou biphasés. (Figure I-3)

Le déséquilibre se manifeste par des perturbations dans les machines tournantes, des échauffements... [3].

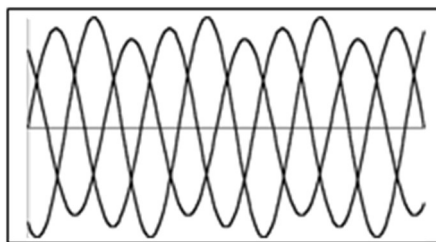


Figure I-3 : Déséquilibre du système triphasé de tension

### I.3.4. Harmoniques

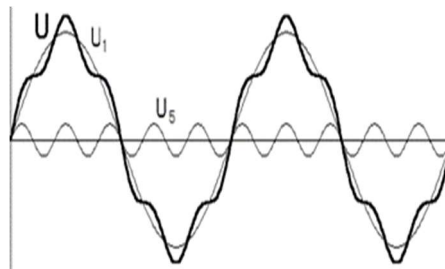
Le terme 'Harmonique' a été originalement utilisé en relation avec le son et signifiait la vibration d'une corde ou d'une colonne d'air à fréquence multiple de celle du fondamental. En électrotechnique, les harmoniques sont des signaux périodiques de fréquence ( $f$ ) et de forme quelconque, qui peuvent se décomposer en une somme de signaux sinusoïdaux comprenant :

- Un signal sinusoïdal à la fréquence fondamentale.



- Des signaux sinusoïdaux dont les fréquences sont des multiples entiers du fondamental.
- et éventuelle d'une composante continue.

Chacun des harmoniques est caractérisé par une amplitude (Figure I-4) généralement exprimée en pourcentage de l'amplitude du fondamental et par une phase [4].



**Figure I-4 : Exemple d'harmonique**

La cause principale de l'existence des harmoniques de tension est l'injection des courants non sinusoïdaux par des charges non linéaires, ou des charges déséquilibrées branchées au réseau.

Les convertisseurs statiques sont les sources d'harmoniques les plus gênantes du fait du nombre et de la puissance des dispositifs installés. On peut citer de manière non exhaustive :

- Les redresseurs monophasés et triphasés.
- Les gradateurs utilisés dans les entraînements.
- Les systèmes d'éclairage et de chauffage et les systèmes de conduite des réseaux.
- Les variateurs de vitesse électroniques constitués principalement d'un convertisseur statique et d'une partie électrique.

L'éclairage, par les lampes à décharge et tubes fluorescents, est également générateur de courants harmoniques. Le taux individuel d'harmonique 3 peut même dépasser 100 % pour certaines lampes fluo-compactes modernes, d'où une attention particulière à porter à la détermination de la section et de la protection du conducteur neutre qui, véhiculant la somme des courants d'harmoniques 3 des trois phases, risque un échauffement important.

Dans le cas du four à arc à courant alternatif, l'arc est non linéaire, dissymétrique et instable. Il va induire des spectres possédant des raies impaires, paires et un spectre continu (bruit de fond à toutes les fréquences). Le niveau spectral est en fonction du type de four, de sa puissance, de la période de fonctionnement considérée : fusion, affinage... [5]

### I.3.4.1. Caractérisation des perturbations harmoniques

#### ✓ Rang de l'harmonique

On définit le rang harmonique comme le rapport de sa fréquence  $f_n$  à celle du fondamental (généralement la fréquence industrielle, 50 ou 60 Hz) [5].

$$n = \frac{f_n}{f_1} \quad (1.1)$$

$n$  : rang de l'harmonique.

$f_n$  : La fréquence de l'harmonique.

$f_1$  : La fréquence de fondamentale.

#### ✓ Taux de distorsion harmoniques

La perturbation harmonique est caractérisée par le taux de distorsion harmonique (THD) défini en tension ou en courant. [5].

$$\text{THD \%} = 100 \times \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2(t)}}{I_1} \quad (1.2)$$

#### ✓ Facteur de puissance

En présence des harmoniques, la puissance apparente  $S$  est composée en trois parties : active  $P$ , réactive  $Q$  et déformante  $D$ . Son expression est donnée par l'équation suivante :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (1.3)$$

Avec :

$S$  : la puissance apparente.

$P$  : la puissance active.

$Q$  : la puissance réactive.

$D$  : la puissance déformante ou de distorsion.

Pour faire intervenir la participation des harmoniques dans la puissance apparente, nous définissons la puissance déformante  $D$  [5].

$$D = 3V_1 \sqrt{\sum_{h1}^{\infty} I_h^2} \quad (1.4)$$

La valeur efficace :

$$I_{eff} = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_n^2(t)} \quad (1.5)$$

Et le facteur de puissance par :

$$F = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (1.6)$$

---

On voit bien que les harmoniques affectent aussi le facteur de puissance [5].

### **I.3.4.2. Effets des harmoniques**

Les harmoniques ont des effets néfastes sur les installations et équipements électriques qu'on peut classer sous deux catégories :

#### **✓ Effets instantanés**

Les effets instantanés sont les conséquences immédiates de la perturbation harmonique sur le fonctionnement de certains appareils électriques ou électroniques, les effets instantanés les plus rencontrés sont [6] :

Les effets instantanés qui apparaissent immédiatement sur les équipements, tel que :

#### **▪ Systèmes électroniques et électromécaniques**

On peut citer parmi les effets, le dérangement des commutations des thyristors lorsque les grandeurs harmoniques déplacent le passage à zéro de la tension, l'augmentation de la marge d'erreur des appareils de mesures, ou encore le déclenchement intempestif des relais de protection.

#### **▪ Effets électrodynamiques**

La présence d'harmoniques qui entraîne des vibrations et des bruits dans les appareils électromagnétiques. Des couples mécaniques parasites dus aux champs tournants harmoniques donnant des vibrations dans les machines tournantes.

#### **▪ Télécommunication**

Bruit dans les réseaux de télécommunication et nuisance à la qualité de l'image (téléviseur) et du son.

#### **▪ Bruits et vibrations**

Les courants harmoniques sont à l'origine des bruits et vibrations acoustiques dans les appareils électromagnétiques (transformateurs, inductances, machines tournantes).

D'autres effets instantanés qu'on peut citer :

- Dégradation de la classe de précision et erreurs de lecture de certains appareils de mesure et compteurs d'énergie.
- Dysfonctionnement des récepteurs de télécommande centralisée et un déclenchement intempestif des relais de protection.
- Dégradation de la qualité de l'image des micro-ordinateurs.

- Réduction du facteur de puissance.

#### ✓ Effets à terme

Les effets à terme sont essentiellement de nature thermique. En effet, les harmoniques génèrent des pertes supplémentaires (pertes par effets joules dans les enroulements accentuées par l'effet de peau, et les pertes par hystérésis et courants de Foucault dans les circuits magnétiques) qui sont à l'origine de l'échauffement des conducteurs et de tous les composants traversés par les courants harmoniques. La dégradation du rendement des équipements tel que les transformateurs et les machines tournantes et le vieillissement prématuré des isolants et donc la diminution de la durée de vie des équipements. Dans ce cas le surdimensionnement des équipements est nécessaire, en particulier le conducteur du neutre.

Lorsque des charges monophasées absorbent des courants homopolaires (harmoniques de rang 3 et ses multiples), ces courants se trouvent en phase et s'additionnent dans le neutre pour former un courant très élevé qui peut être deux fois le fondamental dans le cas d'une charge ayant un harmonique 3 de 67 % [6].

**Tableau I-1 Effet des harmoniques**

Nature du matériel électrique	Effet de la « pollution harmonique »
Machines tournantes, Moteurs triphasés, alternateurs	Echauffements supplémentaires (effet joule) dans les enroulements statoriques. Couples oscillatoires. Augmentation du bruit.
Transformateurs	Pertes supplémentaires dans le fer (par courants de Foucault) et dans les enroulements (par effet joule). Risque de saturation en présence d'harmoniques pairs.
Câbles	Augmentation des pertes surtout dans le câble de neutre ou s'ajoutent les harmoniques de rang 3 et multiples de 3. Pertes diélectriques supplémentaires.
Électronique de puissance	Troubles fonctionnels liés à la forme d'onde
Convertisseur statique	(commutation, synchronisation).
Compteur d'énergie	Erreurs de mesure
Ordinateur	Dysfonctionnement lié aux couples pulsatoires des moteurs d'entraînement des supports magnétiques
Dispositifs de protection (Fusibles. Disjoncteurs)	Fonctionnement intempestif
Téléviseurs	Déformation d'image
Lampes à décharge	Risque de vacillement sous l'effet de l'harmonique de rang 2
Condensateurs de puissance	Pertes diélectriques supplémentaires aboutissant à un vieillissement prématuré des condensateurs

---

---

## I.4. Solutions de dépollution du réseau électrique

Une dégradation de qualité peut conduire à une modification du comportement des performances ou même à la destruction des équipements et des procédés dépendants, avec des conséquences possibles sur la sécurité des personnes et des surcoûts économiques.

Pour résoudre ce problème, des solutions peuvent être mise en œuvre pour [8] :

- Corriger un dysfonctionnement dans une installation.
- Agir de façon préventive en vue de raccordement de charges polluantes.
- Mettre en conformité l'installation par rapport à une norme ou à des recommandations du distributeur d'énergie.
- Réduction du facteur énergétique.

### I.4.1. Solutions traditionnelles de dépollution

Afin de dépolluer les réseaux électriques, plusieurs solutions ont été proposées dans la littérature, dont le but est de limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques, tel que le :

#### ✓ Filtrage passif

Cette solution de dépollution consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, On distinguera deux types de filtres assurant la limitation des tensions harmoniques, à savoir [10] ;

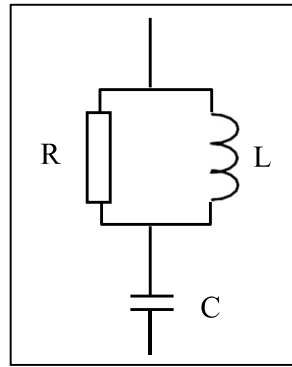
#### ○ Filtre passif parallèle

On place en parallèle avec le réseau d'alimentation une impédance très faible accordée à la fréquence d'harmonique à piéger. Parmi les filtres passifs parallèles nous avons :

1. **Filtre passif amorti** : Le filtre passif amorti ou passe-haut (Figure I-5) compense les harmoniques supérieurs ou égales à sa fréquence propre. Il peut se connecter en parallèle avec d'autres résonants. Ces dispositifs sont utilisés pour empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques, et pour compenser la puissance réactive. Leurs inconvénients sont les suivants :

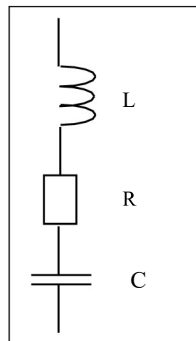
- Manque de souplesse à s'adapter aux variations du réseau et de la charge.

- Equipements volumineux.



**Figure I-5 : Filtre passif amorti ou passe-haut**

2. **Filtre résonant** : C'est un filtre très sélectif constitué d'un ensemble RLC en série, voire la figure 6, qui est accordé sur une fréquence déterminée. Sa performance est caractérisée par la réduction de la tension harmonique entre ses bornes [10]. Cette solution consiste aussi à offrir au courant harmonique que l'on désire éliminer, un chemin moins résistant que la ligne. Elle exploite la résonance série des circuits formés par l'association d'éléments inductifs et capacitifs, ces circuits, pour chaque paire (L, C) une fréquence dite de résonance où l'impédance de circuit est très basse, Figure (I-6).



**Figure I-6 : Filtre passif résonnant**

#### ○ Filtre passif série

Le principe est le même que le précédent, mais au lieu de piéger les harmoniques, on les empêche de remonter à la source. Un exemple de filtre passif série est le circuit bouchon.

### I.4.2. Solutions modernes de dépollution

Ces solutions sont proposées comme des solutions efficaces de dépollution des réseaux électriques afin de traiter les inconvénients inhérents aux solutions traditionnelles comme les filtres passifs (non adaptatifs aux variations de la charge et du réseau, phénomènes de résonance). Parmi toutes les solutions modernes, on trouve deux types de structures

classiquement utilisées, à savoir :

- Le filtre actif de puissance (série, parallèle ou bien encore associant les deux).
- Le filtre actif hybride (série ou parallèle avec un filtre passif).

Le but de ces filtres actifs de puissance est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant ou la tension redevienne sinusoïdal.

Le filtre actif de puissance est connecté au réseau soit en série (FAS), soit en parallèle (FAP) suivant qu'il est conçu respectivement pour compenser les tensions ou les courants harmoniques, soit associé à des filtres passifs.

Pour fournir aux consommateurs une énergie électrique de qualité, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs de puissance sont proposés comme des solutions de dépollution des réseaux électriques. Dans la suite de ce chapitre, différentes topologies de filtres actifs de puissance usuels sont présentées [11], à savoir :

#### a. Filtre actif de puissance parallèle

Ce filtre est le plus souvent commandé comme un générateur de courant, il génère des courants harmoniques, en opposition de phase avec les courants harmoniques qui se propagent dans le réseau électrique, afin que la somme avec ceux-ci soit nulle. On obtient alors des courants sinusoïdaux au niveau du réseau. Il permet donc de supprimer au point de raccordement tous les harmoniques de courants de charge non linéaire. En générale, le filtre actif parallèle est utilisé pour la dépollution des réseaux BT et MT. Son impédance totale vis à vis de la source et de la charge lui confère une bonne auto-adaptabilité avec les performances appréciables Figure (I-7). [8].

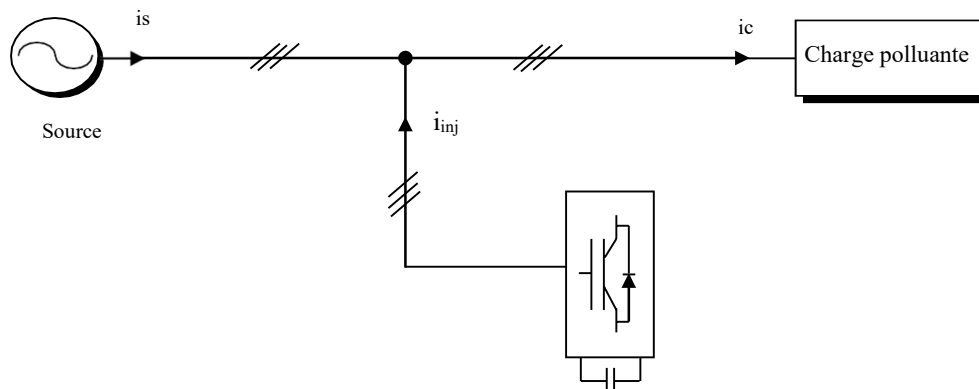


Figure I-7 : Filtre actif de puissance parallèle

### b. Filtre actif de puissance série

C'est une solution pour protéger les charges sensibles contre les perturbations de tension du réseau électrique. Il est destiné à protéger les installations sensibles aux perturbations provenant du réseau telles que les harmoniques de tension, les surtensions, les déséquilibres et les creux de tension.

En revanche, le filtrage série ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge.

En plus, ce filtre nécessite une protection complexe contre les courts-circuits des réseaux.

En effet, lors d'un court-circuit côté réseau, ce dernier peut être amené à supporter tout le courant de court-circuit Figure (I-8). [12].

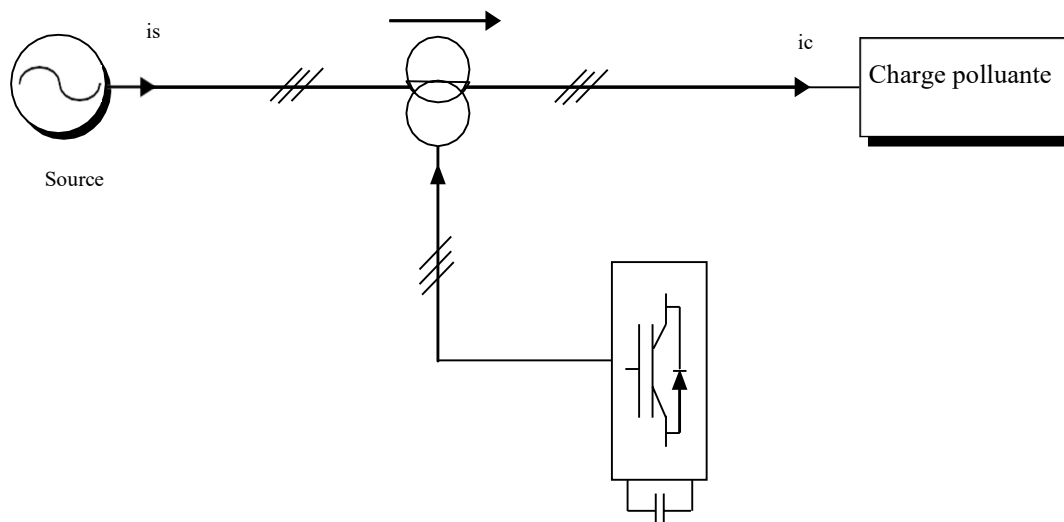


Figure I-8 : Filtre actif de puissance série

### c. UPQC

Association de deux filtres actifs parallèle et série, également appelée « Unified Power Quality Conditionner » (UPQC). Cette structure bénéficie des avantages des deux types série et parallèle. Il est donc possible de garantir simultanément l'égalité du courant sinusoïdal et de la tension du réseau. Figure (I-9)



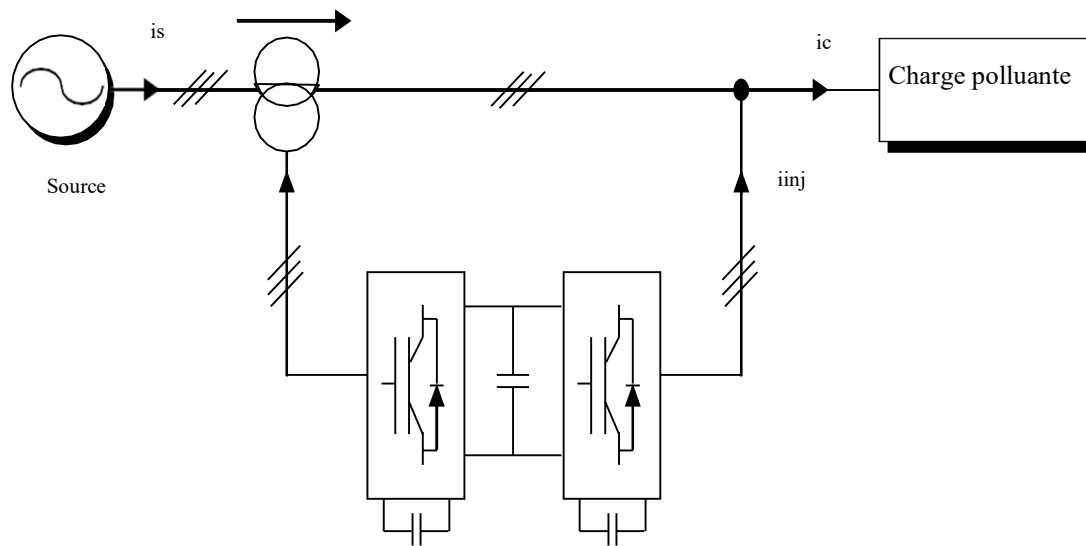


Figure I-9 : Combinaison des filtres actifs série et parallèle

## I.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons essayé de faire la lumière sur les principales perturbations qui peuvent prendre naissance dans les réseaux de distribution, leurs origines et leurs conséquences sur les équipements essentiellement existant dans le réseau, et les installations industrielles.

Nous avons également présenté les différentes solutions classique et moderne qui existent. Dans le chapitre 2 nous allons présenter plus en détail les filtres actifs de puissance parallèle.

## **Chapitre II. Étude et simulation d'un filtre actif de puissance parallèle**

## II.1. Introduction

Les filtres actifs de puissance parallèle (FAP), sont une solution moderne et efficace qui permet de compenser les courants harmoniques et l'énergie réactive lorsque des charges non linéaires sont connectées à des réseaux monophasés ou triphasés équilibrés ou déséquilibrés. Tout d'abord, nous présenterons dans ce chapitre le principe de fonctionnement et la structure générale de ce filtre actif de puissance. Ensuite une série de simulations sera effectuée pour valider notre modèle.

## II.2. Principe de fonctionnement du FAPP

Ce type de filtre actif de puissance est piloté comme un générateur de courant, qui produit des courants harmoniques déphasés par rapport à ceux produits par des charges dites non linéaires, d'où des courants sinusoïdaux à la source.

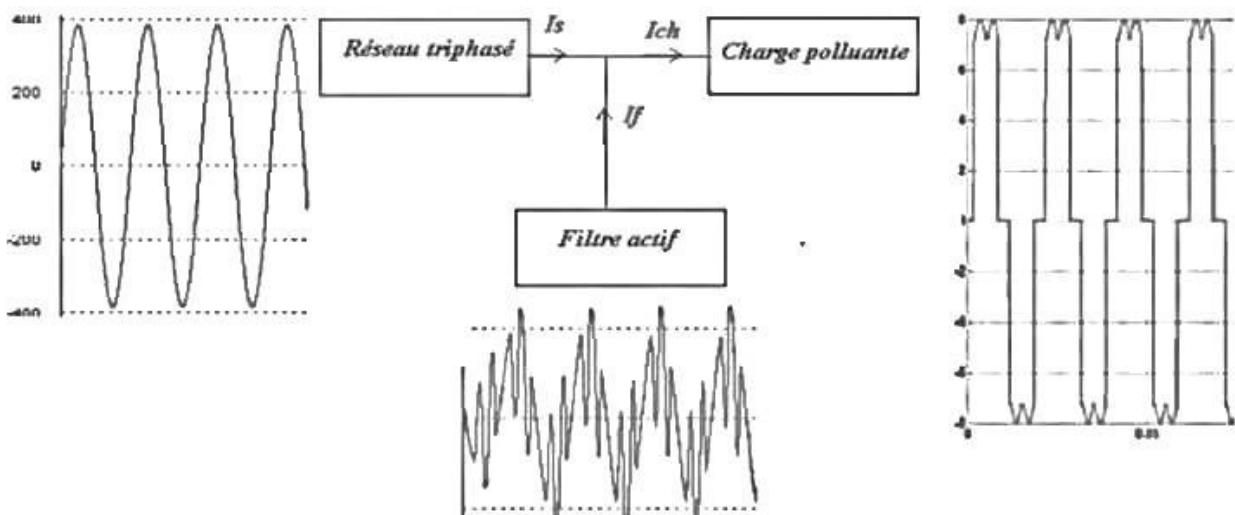


Figure II-1 : Principe du filtrage actif parallèle

Un filtre actif de puissance parallèle est utilisé pour la décontamination des réseaux basse tension (BT) et Moyenne tension (MT). À l'heure actuelle, les filtres actifs de puissance parallèles sont principalement installés par des utilisateurs industriels. [5]

## II.3. Structure générale du filtre actif de puissance parallèle

La figure suivante illustre la structure générale d'un filtre actif de puissance parallèle. Nous avons vu que la structure est divisée en deux parties, à savoir la partie puissance et la partie commande.

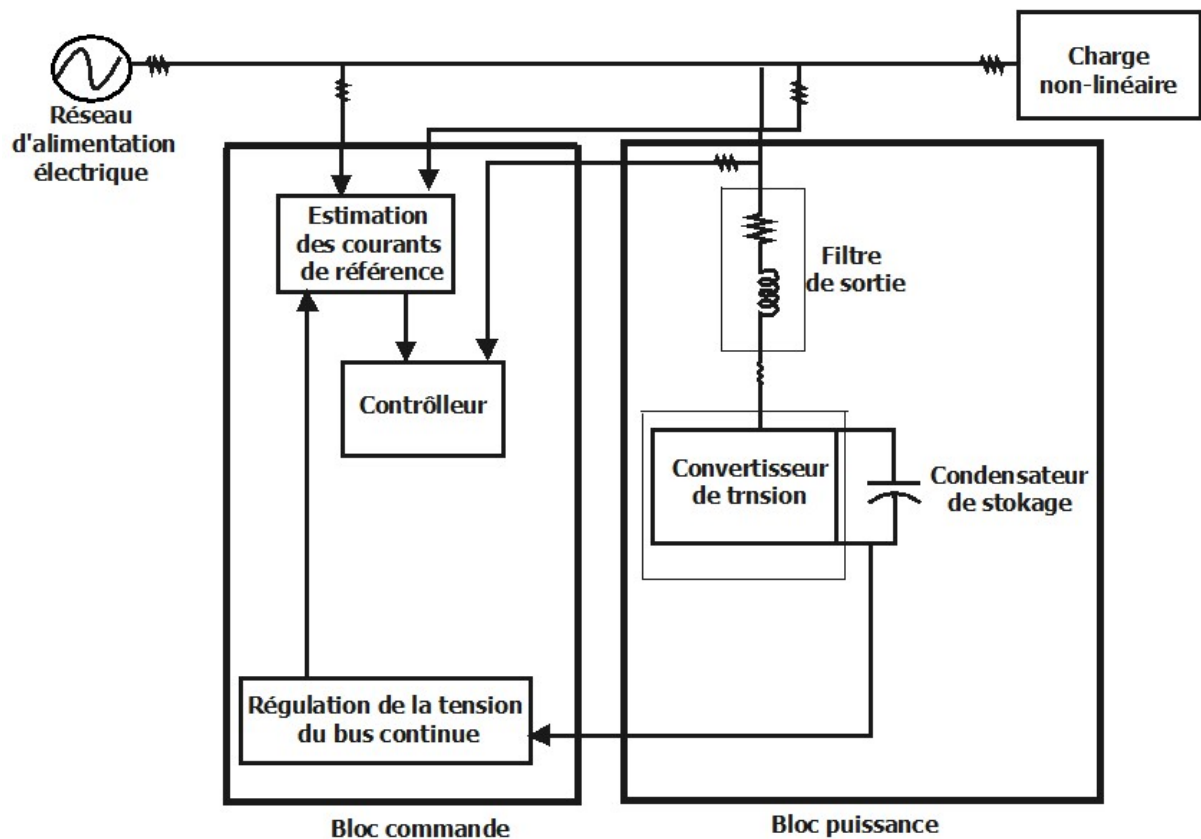


Figure II-2 : Structure générale du filtre actif de puissance parallèle

La première partie comprend principalement :

- Un convertisseur de tension
- Un filtre de découplage
- Et une source de stockage d'énergie. [4]

Les deux derniers éléments déterminent la nature du filtre actif de puissance (structure en tension ou en courant), selon qu'il repose sur un convertisseur de tension ou sur un convertisseur de courant.

La deuxième partie comprend :

- Un estimateur de courant de référence,
- Un régulateur de tension pour maintenir la tension continue aux bornes de l'élément de stockage,
- Et un contrôleur qui peut être à hystérésis ou à MLI.

Les deux parties qui suivent seront examinées plus en détail par les sections suivantes.

### II.3.1. Partie puissance

En raison de sa capacité à exécuter un grand nombre de fonctions, l'onduleur de tension a naturellement été mis à profit dans la poursuite des objectifs de compensation. Il est en général composé de trois bras, chacun avec deux interrupteurs bidirectionnels qui sont commandés par un transistor (MOSFET, IGBT, GTO) et une diode antiparallèle pour la réversibilité des courants. L'énergie est stockée dans un condensateur  $C$ , qui sert également de source de tension continue  $V_{dc}$ . Un filtre passif, aussi appelé filtre de sortie, relie l'onduleur de tension au réseau électrique. L'onduleur triphasé et les interrupteurs de puissance sont représentés sur les figures (II-3) et (II-4), respectivement.

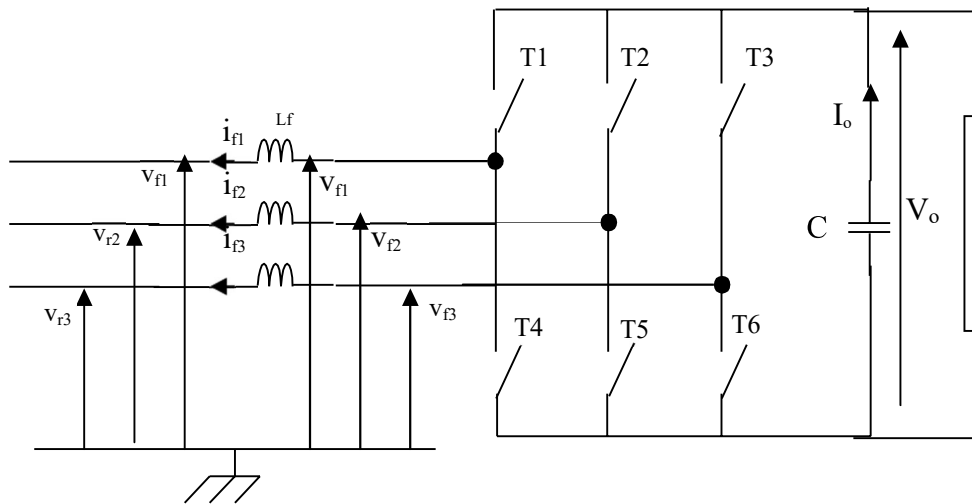


Figure II-3 : Filtre actif à structure tension

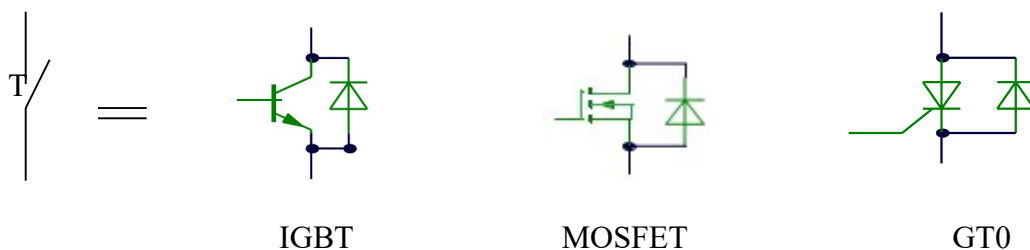


Figure II-4 : Interrupteur de puissance

Pendant son fonctionnement, le convertisseur statique est relié par l'intermédiaire de ses interrupteurs à la source de tension alternative avec le contrôle et l'échange avec une source de tension continue l'énergie. Pour rendre cette connexion possible, deux règles doivent être respectées [15].

- Deux interrupteurs en général des IGBTs sur le même bras ne peuvent pas être fermés en même temps, car il y a un risque de court-circuiter le condensateur de stockage.
- Et d'une diode en antiparallèle pour chaque IGBT afin d'assurer la bidirectionnalité en courant.

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de la figure (II-3) sont spécifiées par les fonctions de commutation ( $u_1, u_2, u_3$ ) définies par :

$$\begin{aligned}
 u_1 &= \begin{cases} \text{T1 activé T4 désactivé} \\ \text{T1 désactivé T4 activé} \end{cases} \\
 u_2 &= \begin{cases} \text{T2 activé T5 désactivé} \\ \text{T2 désactivé T5 activé} \end{cases} \\
 u_3 &= \begin{cases} \text{T3 activé T5 désactivé} \\ \text{T3 désactivé T5 activé} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{II-1}$$

Les tensions entre phases imposées par l'onduleur sont alors égales à :

$$\begin{bmatrix} v_{f1} - v_{f2} \\ v_{f2} - v_{f3} \\ v_{f3} - v_{f1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 - s_2 \\ s_2 - s_3 \\ s_3 - s_1 \end{bmatrix} \cdot V_{dc} \tag{II-2}$$

$v_{f1}, v_{f2}$  et  $v_{f3}$  sont les tensions par rapport au point neutre, elles vérifient l'équation :

$$\begin{bmatrix} v_{f1} \\ v_{f2} \\ v_{f3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix} + L_F \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{f1} \\ i_{f2} \\ i_{f3} \end{bmatrix} \tag{II-3}$$

En supposant un système équilibré, et que la tension du réseau est une onde sinusoïdale triphasée ET équilibrée ET LA somme des courant est nulle à la fréquence (50 Hz), ils sont définis comme suit

$$V_{s1} + V_{s2} + V_{s3} = 0 \tag{II-4}$$

$$i_{f1} + i_{f2} + i_{f3} = 0 \tag{II-5}$$

On déduit des équations (2.3), (2.4) et (2.5) que :

$$V_{f1} + V_{f2} + V_{f3} = 0 \tag{II-6}$$

A partir des équations (2.2) et (2.6) on trouve :

$$\begin{bmatrix} V_{f1} \\ v_{f2} \\ v_{f3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2S_1 & -S_2 & -S_3 \\ -S_1 & 2S_2 & -S_3 \\ -S_1 & -S_2 & 2S_3 \end{bmatrix} \cdot \frac{V_{dc}}{3} \tag{II-7}$$

### II.3.2. Partie commande

Une commande du filtre actif de puissance doit remplir plusieurs fonctions, à savoir :

- Dans la plupart des structures de contrôle, la génération des références nécessite une procédure d'extraction des harmoniques de la charge.
- Envoyer une commande à l'interrupteur de l'onduleur pour asservir le courant du filtre actif de puissance à sa valeur de référence.
- Réguler la tension de l'onduleur côté DC.

La stratégie de commande est basée en générale sur la détection des courants perturbateurs dans le domaine temporel. Trois possibilités d'identification des courants perturbateurs existent :

- Identification à partir de la détection en cours des charges polluées.
- Identification à partir de la détection de courant source.
- Identification dès la détection de la tension source.

La première méthode est la mieux adaptée aux filtres actifs de puissance parallèle installés sur les consommateurs pour compenser les courants perturbateurs causés par leurs charges polluantes. C'est pourquoi cette méthode de détection sera utilisée dans ce travail.

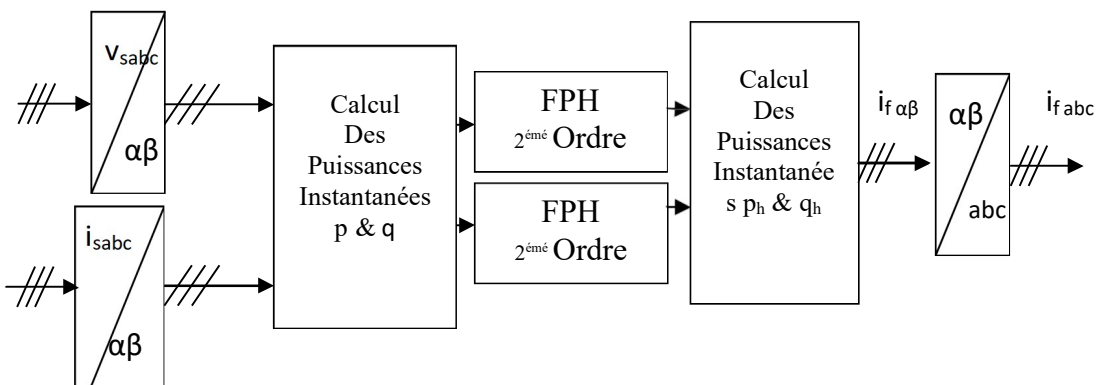


Figure II-5: Bloc fonctionnel de calcul des courants de référence [16]

### II.3.3. Généralités sur les méthodes d'identification

Dans la littérature, différentes méthodes ont été développées pour l'identification des courants perturbateurs [18], qui ont pour effet d'améliorer les performances des systèmes classiques de décontamination des installations électriques. L'identification des composantes harmoniques se fait généralement dans l'espace des courants ou dans l'espace des puissances [19]. L'une des méthodes d'identification les plus anciennes est la transformée de Fourier rapide, qui nécessite une grande puissance de calcul pour effectuer toutes les transformations en temps réel [20]. Cette méthode est bien adaptée aux charges dont le contenu harmonique varie lentement, et l'avantage est qu'elle offre la possibilité de sélectionner les harmoniques individuellement et de choisir de ne compenser que les harmoniques les plus dominantes

Les deux autres méthodes d'identification en temps réel, les plus utilisées, basées sur le filtrage des signaux sont : la méthode de détection du référentiel lié au synchronisme et la méthode des puissances instantanées, elles sont fondées sur le principe de la séparation du fondamental des harmoniques par filtrage.

#### II.3.3.1. Méthode des puissances instantanées

La méthode de puissance instantanée n'est utilisable que si la tension réseau est parfaitement sinusoïdale et équilibrée. La première étape consiste à utiliser la transformation de Concordia pour amener les tensions de la source et les courants de la charge dans le repère de Concordia.

Cette transformation transforme un système triphasé en système un système biphasé, ce qui simplifie les équations mathématiques et réduit les coûts d'installation.

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{II-8})$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ch1} \\ i_{ch} \\ i_{ch3} \end{bmatrix} \quad (\text{II-9})$$



Les homopolaires du système triphasé du courant et de la tension sont représentées par des composants avec l'indice (0). Le réseau étudié est considéré comme isolé et composé de trois fils, empêchant la circulation des homopolaires. Ainsi nous aurons uniquement :

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{II-10})$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ch1} \\ i_{ch2} \\ i_{ch3} \end{bmatrix} \quad (\text{II-11})$$

Les puissances instantanées, p actives et q réactives, sont calculées à l'aide d'équations (2.10) et (2.11), et sont données par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II-12})$$

Les puissances instantanées p et q peuvent être divisés en deux parties : les composants continus liés aux composants fondamentaux ( $\bar{p}$  et  $\bar{q}$ ) et les composants alternatifs ( $\tilde{p}$  et  $\tilde{q}$ ) pour les harmoniques, comme suit :

$$\begin{aligned} p &= \bar{p} + \tilde{p} \\ q &= \bar{q} + \tilde{q} \end{aligned} \quad (\text{II-13})$$

Pour séparer les composants de puissance liés aux harmoniques des composants de puissance liés aux fondamentaux [16], un filtre de puissance est utilisé. La figure suivante représente le schéma qui représente le principe de séparation du puissance (II-6)

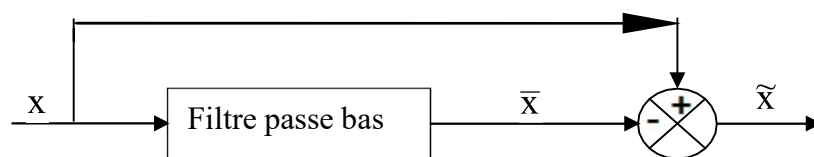


Figure II-6 : Schéma représentant le principe de séparation des puissances

La fréquence de couplage du filtre est choisie selon que la charge est équilibrée ou non [16], de sorte qu'il puisse bloquer le passage des composants harmoniques de puissances instantanées et ne permettre le passage de composants continus représentant des puissances actives et réactives à la fréquence fondamentale.

Après avoir séparé les puissances, on calcule les courants harmoniques dans le repère  $\alpha\beta$  en utilisant l'expression (2.14) comme suit :

$$\begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_0 - \tilde{p} \\ -\tilde{q} - \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II-14})$$

Avec

$$\Delta = v_\alpha^2 + v_\beta^2 \quad (\text{II-15})$$

$P_0$  est la puissance active fournie par la boucle de tension nécessaire à la régulation de la tension continue.

La relation (2.16) est utilisée afin de compenser l'ensemble des harmoniques et la compensation de l'énergie réactive.

Le courant de perturbation triphasé représentant le courant identifié, appelé courant de référence  $i_{ref}$ , est alors calculé à partir de la transformation inverse de Concordia. Ces courants sont donnés par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} i_{ref1} \\ i_{ref2} \\ i_{ref3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II-16})$$

### II.3.3.2. Méthode de détection du référentiel lié au synchronisme

La méthode de détection du référentiel lié au synchronisme, fonctionne dans l'espace d-q, elle nécessite donc moins de calculs tout en étant plus précise et robuste [18]. Comme la méthode de puissance instantanée, la méthode de détection du référentiel lié au synchronisme ne fonctionne que lorsque la tension du réseau est entièrement sinusoïdale et équilibrée.

Tout d'abord, nous utilisons la transformée de Concordia pour amener le courant triphasé de la charge polluée dans le domaine de Concordia, en utilisant une PLL pour générer les signaux sinus et cosinus, comme suit :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II-17})$$

Comme pour la méthode de la puissance instantanée, le réseau étudié est considéré comme composé de trois fils, avec  $\theta$  est l'angle obtenu par la PLL. Dans le domaine de la dépollution du réseau, la pulsation de référence est fixe.

Les courants dans l'axe d-q sont constitués d'une composante continue liée à l'onde fondamentale et d'une composante alternative liée aux harmoniques.

$$\begin{aligned} i_d &= \bar{i}_d + \tilde{i}_d \\ i_q &= \bar{i}_q + \tilde{i}_q \end{aligned} \quad (\text{II-18})$$

Pour séparer ces deux composantes du courant et extraire la composante continue, on utilise un filtre passe bas et un soustracteur comme dans la Figure (II-6), si nous utilisons une commande dite directe.

Finalement, pour calculer les courants harmoniques dans le système triphasés qui représentent les courants identifiés, dits courants de référence  $i_{\text{ref}}$ , nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} i_{\text{ref}1} \\ i_{\text{ref}2} \\ i_{\text{ref}3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) & \sin \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\text{ref}d} \\ i_{\text{ref}q} \end{bmatrix} \quad (\text{II-19})$$

### II.3.3.3. Commande par logique floue

La commande par logique floue est l'application la plus largement utilisée de la logique floue. Contrairement aux méthodes de commande traditionnelles, la commande par logique floue ne repose pas sur des formules ou des relations mathématiques bien définies ou précises.

Il manipule des inférences avec un ensemble de règles basées sur les opérateurs « et, ou pas, alors, etc. », qu'il applique aux variables linguistiques. La structure d'une commande par logique floue est illustrée sur la figure II-7. [28]

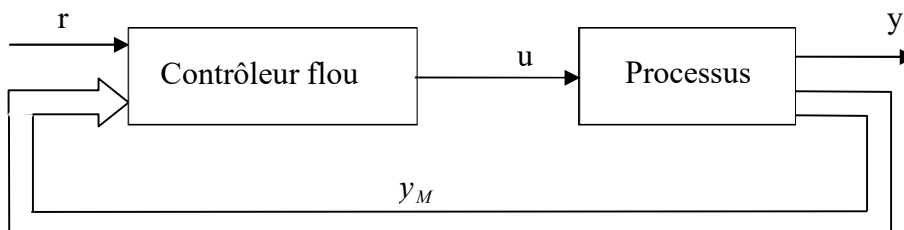


Figure II-7 : Schéma de principe d'une commande par logique floue

Trois étapes principales apparaissent lors de la mise en œuvre, à savoir :

- la première étape, appelée fuzzification, traite des entrées du contrôleur ;
- la deuxième étape est constituée d'une base de règles et d'un moteur d'inférence ;
- la troisième étape, appelée défuzzification, est l'inverse de la première. [28]

La configuration interne d'un contrôleur flou est présentée par la Figure. II-8 :

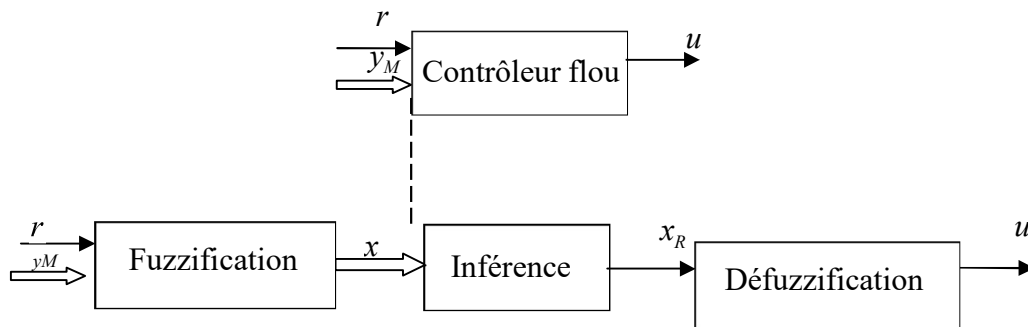


Figure II-8 : Configuration interne d'un contrôleur flou

#### II.3.4. Méthode de commande de filtre actif

Il existe deux méthodes de commandes pour les filtres actifs de puissance parallèle, à savoir :

##### II.3.4.1. Commande directe

La commande est dite directe si son fonctionnement est basé sur la comparaison du courant de référence qui est obtenu en extrayant les courants en charge, avec les courants injectés par le filtre de puissance actif, comme le montre la figure (II-9)

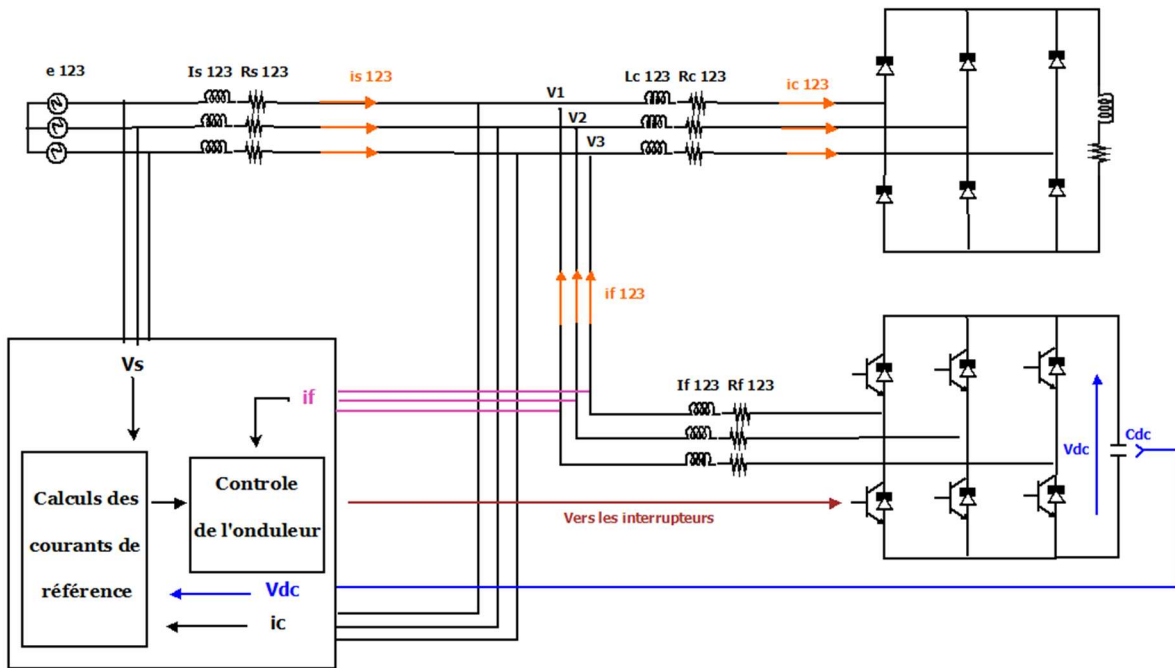


Figure II-9 : Schéma de commande directe d'un filtre actif parallèle de puissance

### II.3.4.2. Commande indirecte

La commande indirecte est basée sur une comparaison du cours de référence avec le cours de source, comme le montre la figure (II-10) :

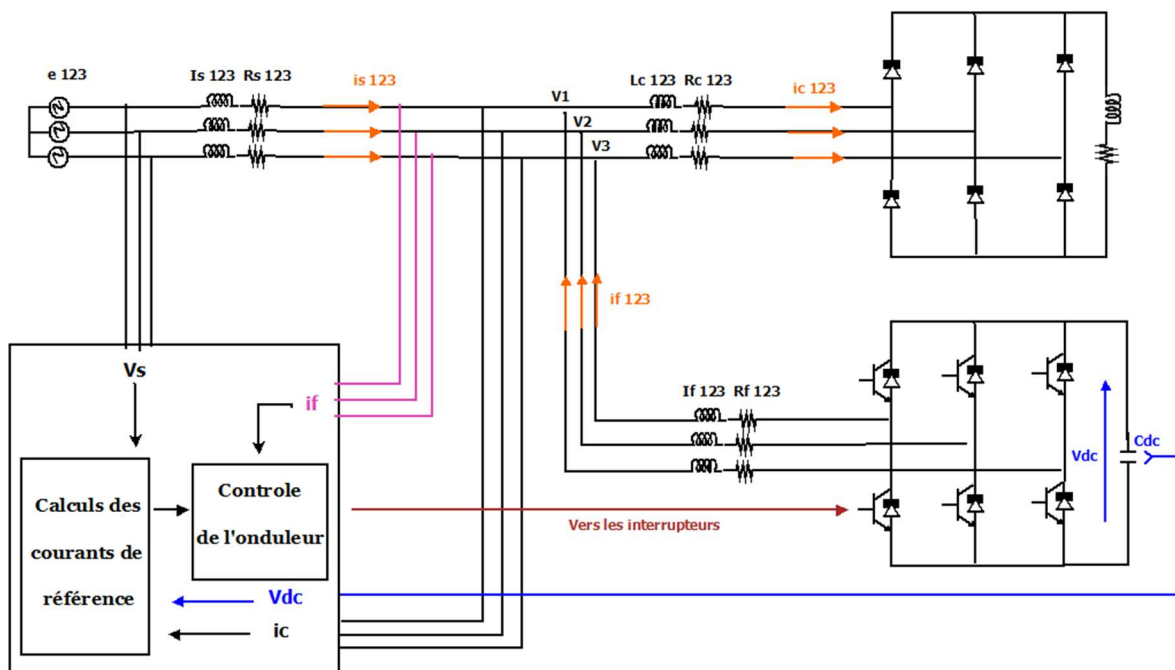
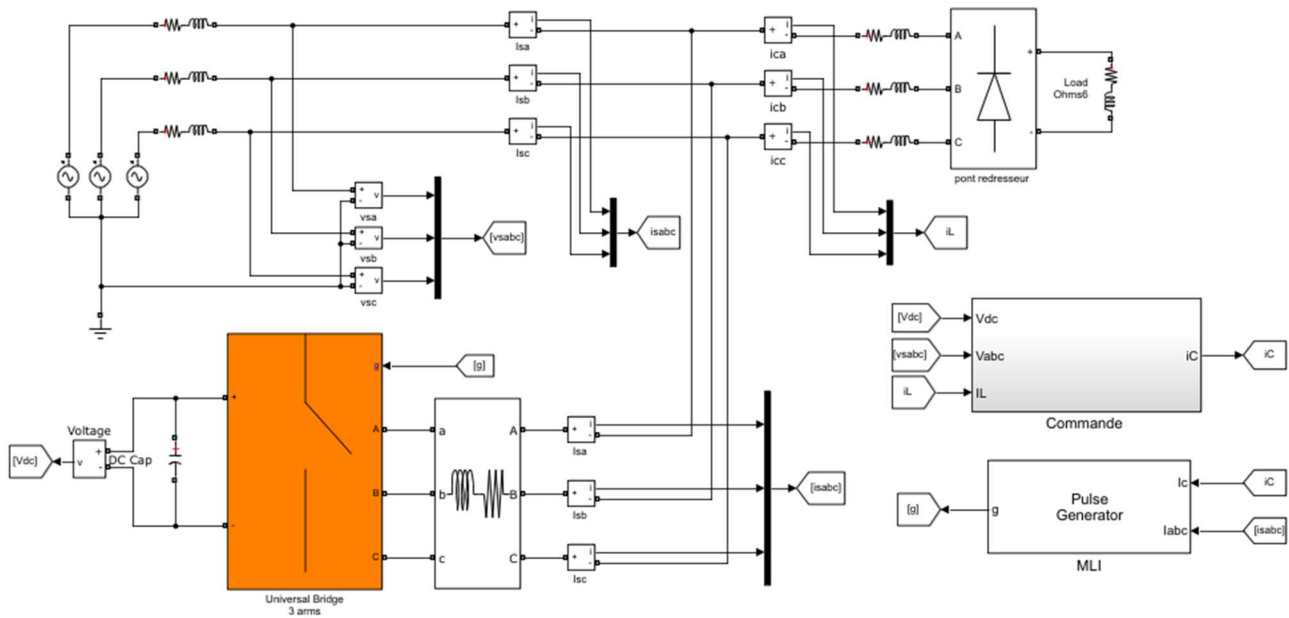


Figure II-10 : Schéma de commande indirecte d'un filtre actif parallèle de puissance

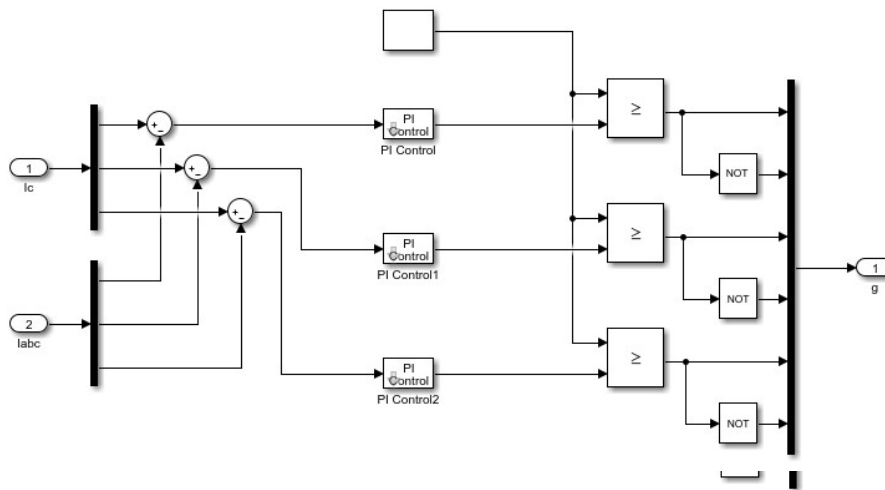
**II.3.5. Simulations par la commande directe utilisant une MLI basée sur la méthode de puissance instantanée :**

Le schéma montre le système simulé (II-11).



**Figure II-11 : Schéma general de la simulation de FAP par la methode directe par MLI a base la méthode de puissance instantanée**

Les figures suivantes montrent le schéma de la MLI et de la commande complète.



**Figure II-12 : Schéma commande MLI filtre actif parallèle indirect (p-q) MLI**

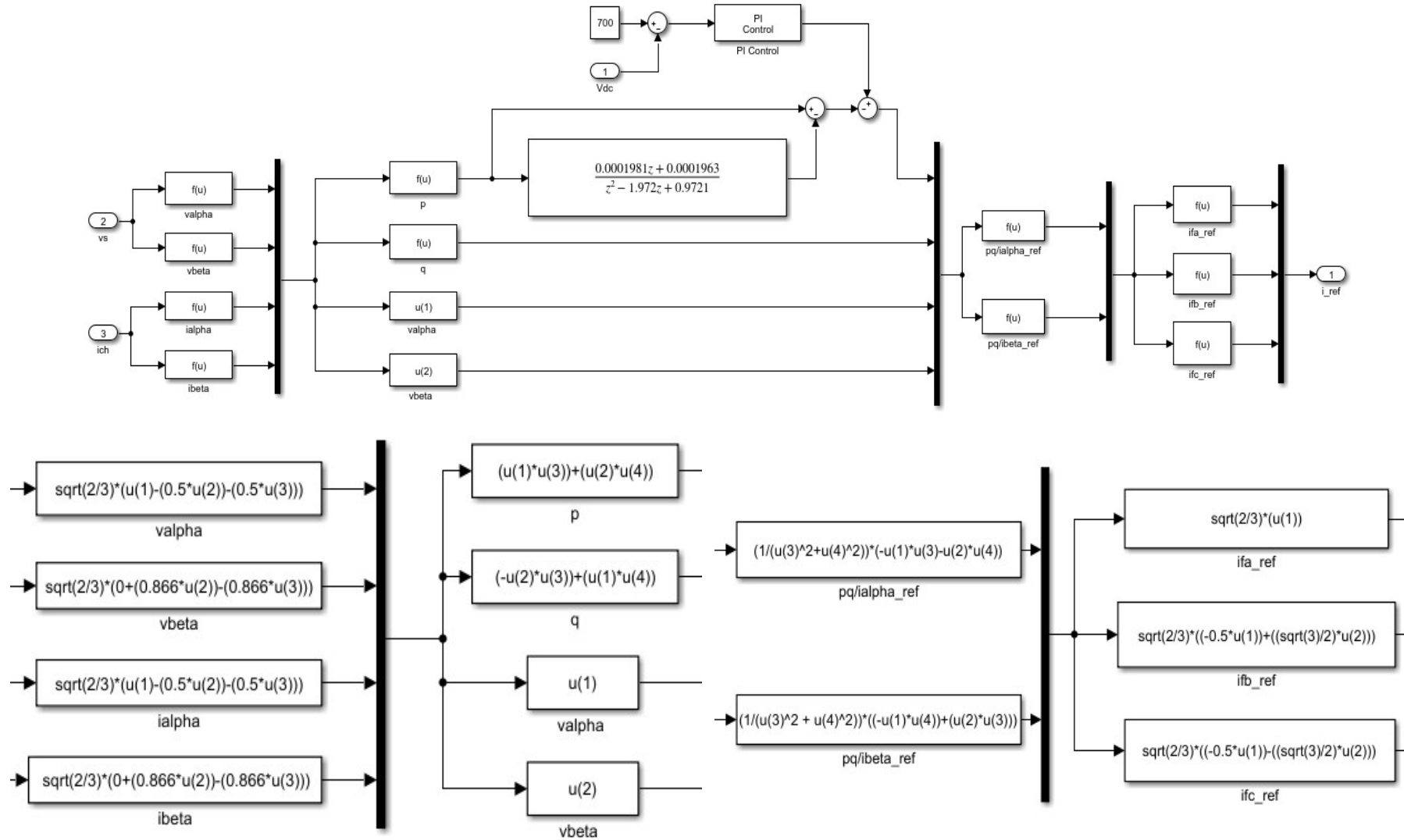


Figure II-13 : Schéma la méthode de puissance instantanée FAP direct MLI

Notre système complet est composé d'un réseau électrique alimentant d'un pont de redressement et d'un filtre actif de puissance. Le réseau électrique est représenté par un système triphasé de ayant comme forme de tension sinusoïdales et ayant en série une inductance et une résistance. Le pont redresseur est relié à une charge R-L-C. Le filtre actif est composé d'un onduleur à six interrupteurs et d'une source de tension parfaite. Les IGBT sont utilisés pour former les interrupteurs de l'onduleur. Les paramètres de simulation utilisés sont indiqués dans le tableau (II-1)

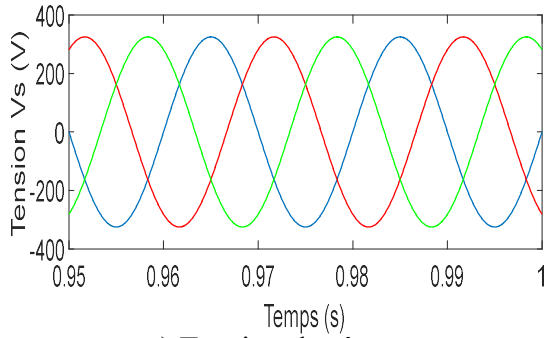
**Tableau II-1 : paramètres de simulation**

Elément de l'installation	Valeur de paramètre
Réseau	Source triphasée sinusoïdale et équilibrée $f=50$ Hz $V_s=230$ v $R_s=0.001$ ohm, $L_s =1 \times 10^{-6}$ H
Redresseur	Charge RL $R_c = 0.00273$ ohm $L_c=0.0001$ H Charge RL $R_L = 5$ ohm $L_L = 0,0026$ H
Filtre actif parallèle	Convertisseur à six interrupteurs Charge RL $R_f = 0.00001$ ohm $L_f=0,000182$ H

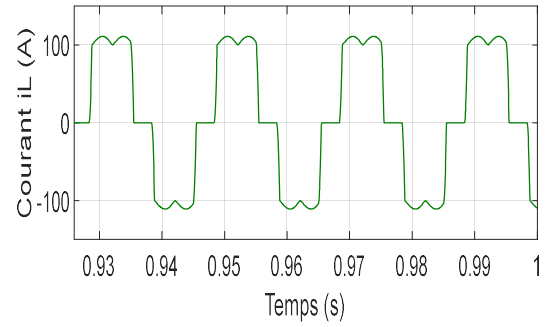
Les figures II-14 illustre (a) la tension source comme un signal parfaitement sinusoïdal avec une amplitude de 400V. Les figures (b, c et d) représentent respectivement le courant de charge, le courant de source et le courant injecté par le filtre actif de puissance. On remarque que le courant de source après filtrage est sinusoïdal. La figure (II-14.e) représente la tension aux bornes du condensateur il est constant et donc on remarque que la régulation de la Vdc fonctionne correctement.

Les figure (II-14. f et g) représente La FFT des courants avant et après filtrage. On remarque que le THD est descendu de 27.85 % à 5.88%. C'est un très bon résultat qui respecte les normes CEI.

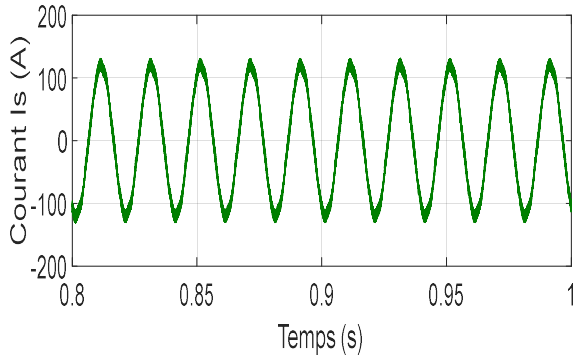




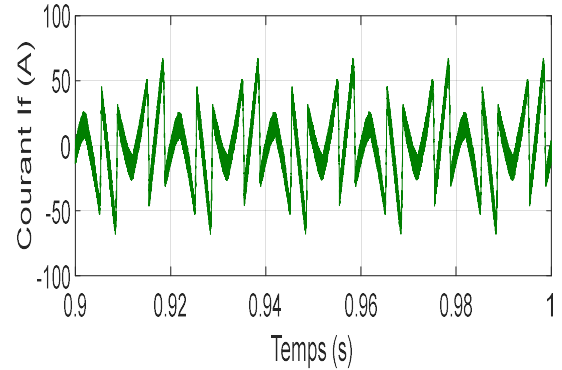
a) Tension de réseau



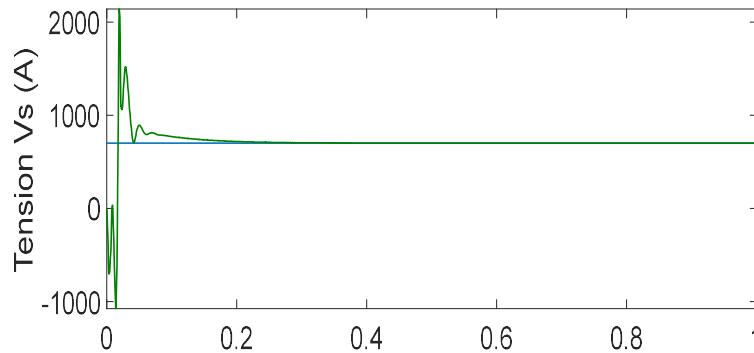
b) Courant de charge



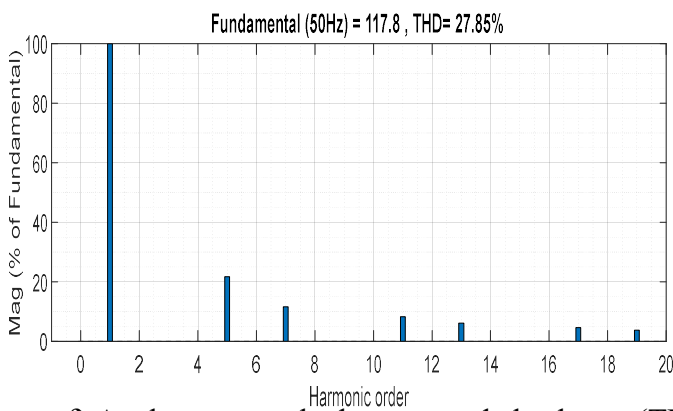
c) Courant de source



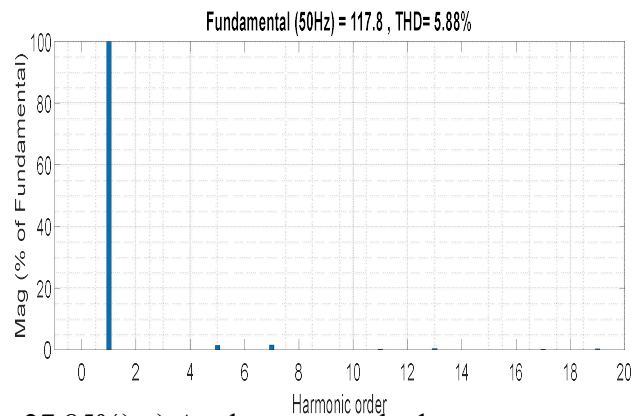
d) Courant injecté



e) Tension aux bornes de condensateur



f) Analyse spectrale du courant de la charge (THD=27.85%)



g) Analyse spectrale du courant de la source (THD= 5.88%)

Figure II-14: Résultats de simulation du FAP directe par MLI

### II.3.6. Méthode de commande directe par hystérésis basée sur la méthode de puissance instantanée

En gardant le même système avec la même commande mais en remplaçant maintenant uniquement la MLI par hystérésis comme le montre la figure suivante :

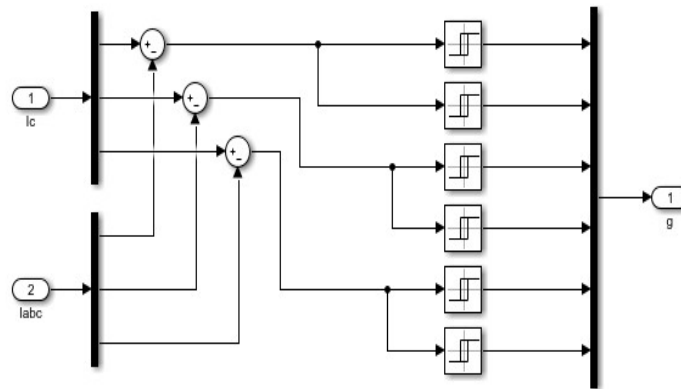
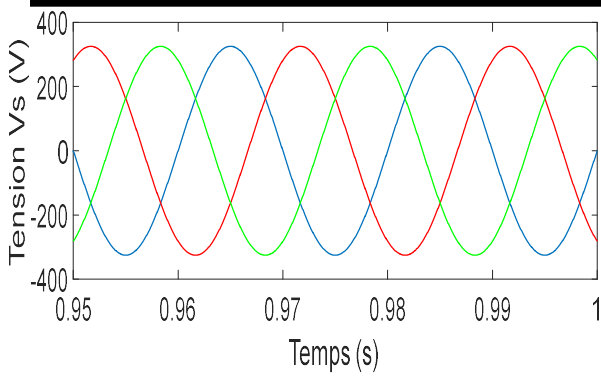
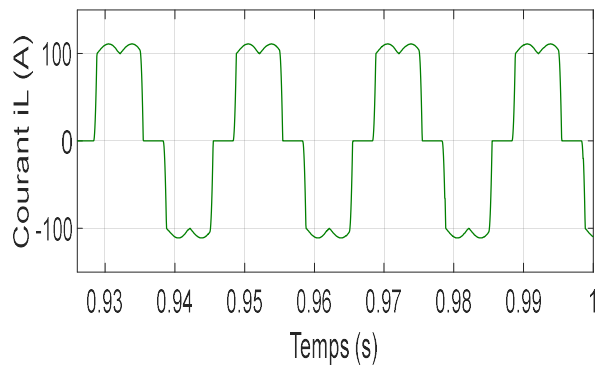


Figure II-15 : Commande par hystérésis de FAP direct

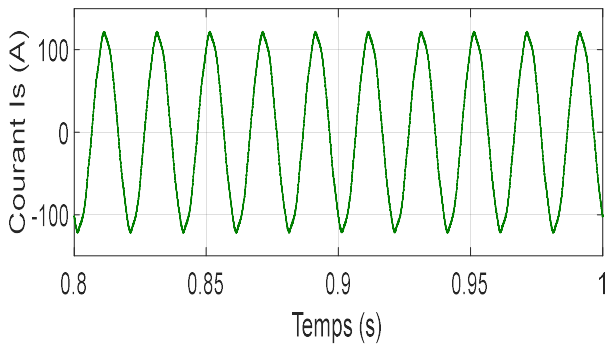
Nous obtenons les résultats de simulation pour cette commande. Les figures (II-16. a, b, c, d et e) sont les mêmes que la simulation précédente de même forme de signal, juste que sur les figure (II-16. f et g) le spectre harmonique change, on remarque que le THD est descendu de 27.85 % à 2.24% ce qui meilleur que la simulation précédente.



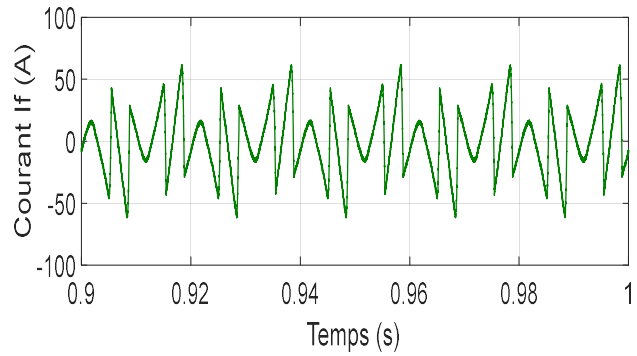
a) Tension de réseau



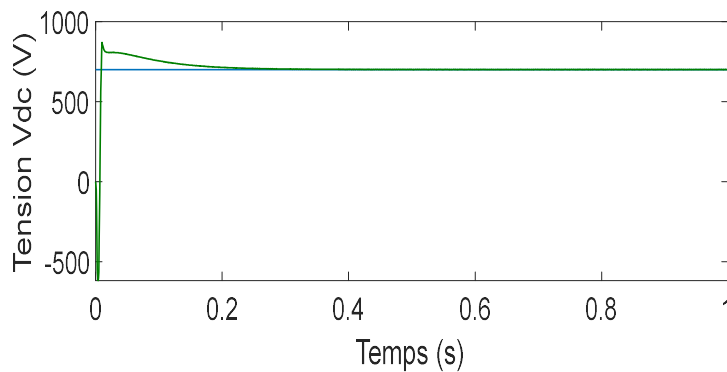
b) Courant de charge



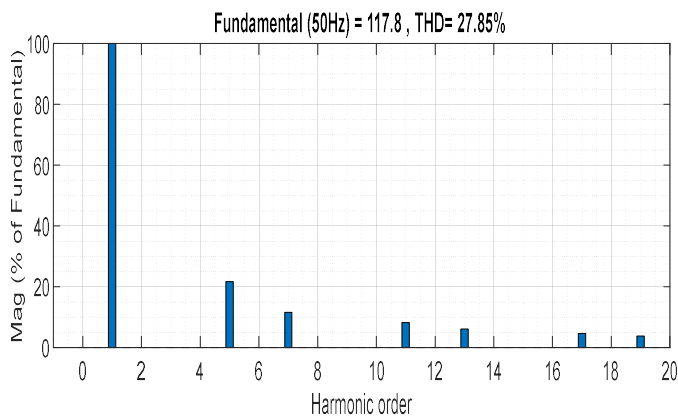
c) Courant de source



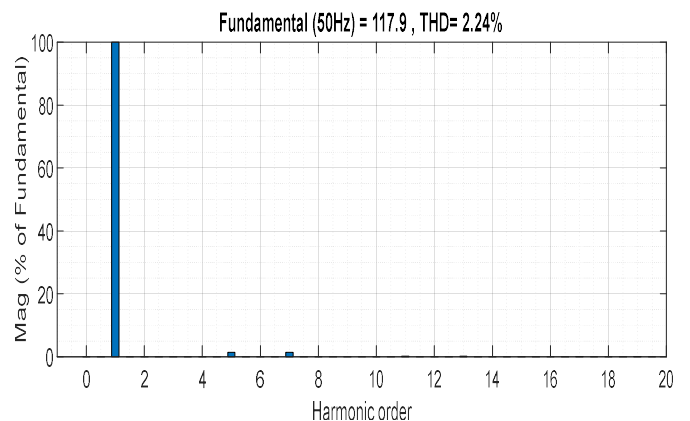
d) Courant injecté



e) Tension aux bornes de condensateur



f) Analyse spectrale du courant de la charge (THD=27.85%)



g) Analyse spectrale du courant de la source (THD= 2.24%)

Figure II-16 : Résultats de simulation de FAP directe (p-q) par Hystérésis

## II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord étudié le filtre actif de puissance parallèle à structure tension, connecté en parallèle sur le réseau afin d'injecter les courants permettant d'éliminer la pollution harmonique des charges non linéaires. Nous avons présenté différents algorithmes d'identification des courants de références. La méthode des puissances instantanées et la méthode du référentiel lié au synchronisme ont été présentées. Pour les simulations nous avons utilisé la méthode des puissances instantanées. Les résultats de simulation montrent que la commande par hystérésis donne de meilleurs résultats en termes de qualité du filtrage, mais elle représente une fréquence de commutation variable qui représente un inconvénient. La modulation par MLI sinusoïdale donne des bons résultats avec l'avantage d'une fréquence de commutation contrôlable.

# **Chapitre III. Étude et simulation d'un filtre actif de puissance parallèle Multi- niveaux**

### III.1. Introduction

Malgré ses avantages, les onduleurs conventionnels sont limités aux applications à faible et moyenne puissance. Pour augmenter la puissance et la tension, certains chercheurs ont introduit des onduleurs multiniveaux avec une structure de tension permettant tension plus élevée et un rendement de meilleure qualité que les convertisseurs. Leur utilisation principale est dans le domaine des tensions moyennes et élevées avec des fréquences de pulsation élevées. Il se distingue par le nombre de niveaux de tension de sortie qu'il génère ; en général, le nombre de niveaux choisis est impair ; néanmoins, une paire de niveaux est également possible. Ce chapitre comprend deux parties. Tout d'abord, nous effectuons une présentation des différentes catégories d'onduleurs multiniveaux et les différentes topologies. Ensuite, nous enquêterons sur plusieurs onduleurs multiniveaux et leurs commandes. Les simulations du système seront effectuées à l'aide de la stratégie de contrôle indirect de la puissance p-q et de la commande MLI.

### III.2. Onduleurs Multiniveaux

Un onduleur à plusieurs niveaux est un dispositif capable de fournir des niveaux de tension alternatif souhaité plus élevé à sa sortie. L'onduleur peut fonctionner à une tension de sortie plus élevée tout en générant des composants harmoniques plus faible. Ce type de structure est devenu de plus en plus populaire dans les environnements industriels et les applications de systèmes électriques [29]. Fondamentalement, l'utilisation de nombreux niveaux d'onduleurs a la capacité de fournir une tension de haute qualité avec une faible fréquence de commutation, ce qui réduit les pertes d'énergie et les contraintes sur les composants statiques.

Les convertisseurs multi-niveaux d'un bras sont illustrés sur la figure (III-1). Les commutateurs semi-conducteurs ont été remplacés par un commutateur idéal. Dans la figure (III-1.a) il n'y a que deux valeurs possibles pour la tension de sortie : 0 ou  $V_{dc1}$ . Dans la figure (III-1.b), la tension de sortie à trois niveaux peut prendre trois valeurs différentes : 0,  $V_{dc1}$  ou  $V_{dc1} + V_{dc2}$ . Enfin, la figure (III-1.c) illustre le cas général des niveaux m [30].

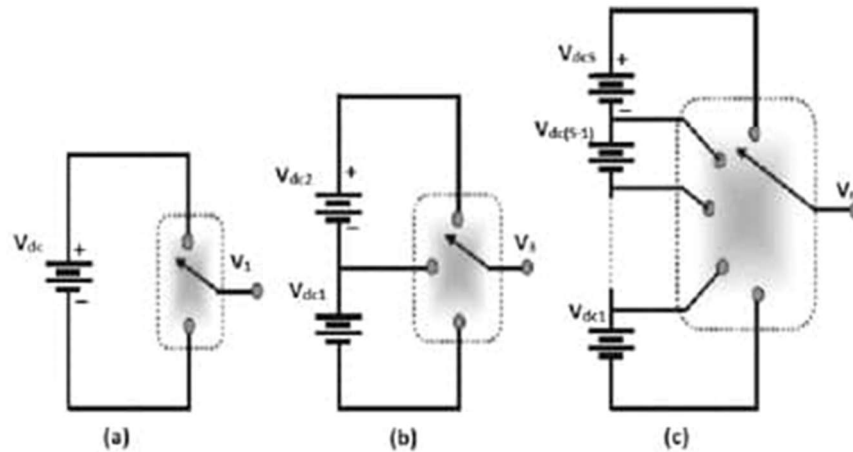


Figure III-1: Onduleur à niveaux multiples

- (a) : Onduleur à niveaux multiples à deux
- (b) : Onduleur à niveaux multiples à trois
- (c) : Onduleur à niveaux multiples à m niveaux

La répartition de la tension dans un onduleur à plusieurs niveaux peut être obtenue dans un état stable, permettant à chaque semi-conducteur d'être commuté indépendamment des autres semi-conducteurs. Cela rend le convertisseur plus puissant et efficace pendant le processus de conversion. L'amplitude de la tension du commutateur est réduite, ce qui facilite la gestion du commutateur.

Les onduleurs avec plusieurs niveaux de tension produisent plus de tension que les onduleurs avec deux niveaux de tension, ce qui améliore la qualité de la forme d'onde et réduit la distorsion.

### III.3. Différentes topologies d'onduleurs multi niveaux

Les principales topologies des onduleurs multiniveaux sont [32] :

- Les onduleurs à diodes de bouclage (en anglais clamping diodes appelé diodeClamp) NPC (Neutral Point Clamped) et MPC (Multiple Point Clamped)
- L'onduleur à condensateur flotteur [ou Flying Capacitor (FC)]
- L'onduleur à pont en cascade H-bridge.
- L'onduleur MNP (Multiple Point Clamped)

### III.3.1. Topologie NPC

Baker a proposé l'onduleur Neutral Point Clamped (NPC) dans les années 1970 [33]. Il a permis de maintenir un faible niveau de tension. Le premier onduleur NPC a été créé pour une tension de sortie à trois niveaux en combinant deux interrupteurs élémentaires, chacun étant alimenté par une source de tension continue distincte.

Après le brevet de Baker pour le premier onduleur NPC, plusieurs chercheurs ont développé d'autres structures basées sur le NPC. L'onduleur NPC permet d'avoir un nombre impair de niveaux pour obtenir des niveaux de tension élevés. En revanche, l'onduleur Multiple Point Clamped (MPC) a été créé en 1990. Ces deux formes d'onduleurs sont illustrées sur les figures (III-2 et III-3). [34]

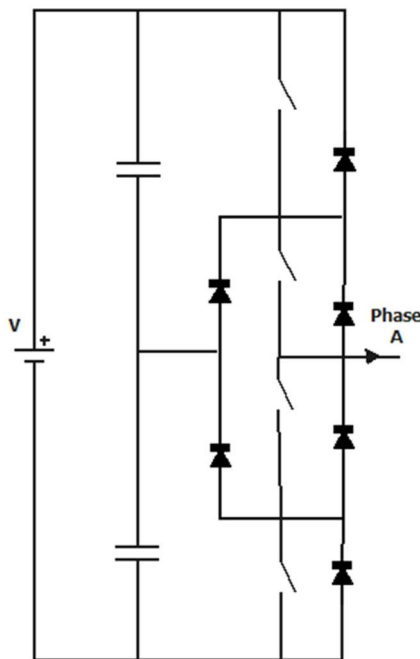


Figure III-3: Onduleur NPC à trois niveaux

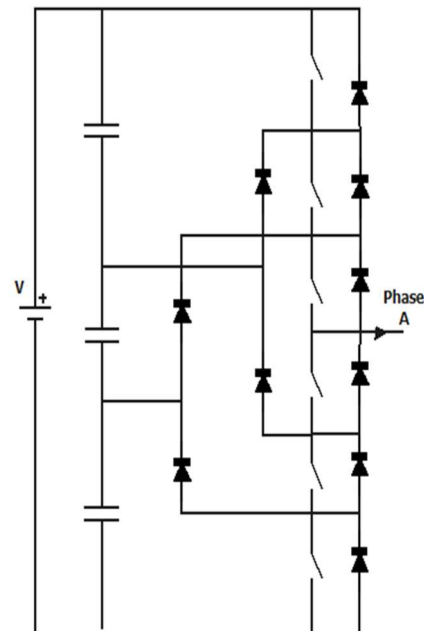


Figure III-2 : Onduleurs MPC à quatre niveaux

Parmi les avantages de la topologie NPC, nous avons :

- Cette topologie peut être généralisée, et les principes utilisés dans la topologie de l'onduleur à trois niveaux peuvent être utilisés pour les topologies de n'importe quel niveau.
- Chaque étage est desservi par le même bus continu.
- La méthode de contrôle est assez simple.
- Par rapport aux onduleurs triphasés traditionnels, les onduleurs à trois niveaux offrent une meilleure qualité spectrale, ce qui se traduit par des filtres passifs plus petits [34].



Cependant cette structure comporte des inconvénients, qui sont

- Cette topologie nécessite un plus grand nombre de condensateurs que les autres topologies.
- La topologie est intrinsèquement intolérante aux pannes.

### III.3.1.1 Onduleur trois niveau NPC

L'idée de base derrière l'onduleur NPC est d'obtenir une tension de sortie trois niveaux en superposant deux interrupteurs de base, dont chacun est fourni par une source de tension séparée. Trois bras et deux sources de tension continue composent l'onduleur triphasé. La structure de base est illustrée sur la Figure III-4. [35]

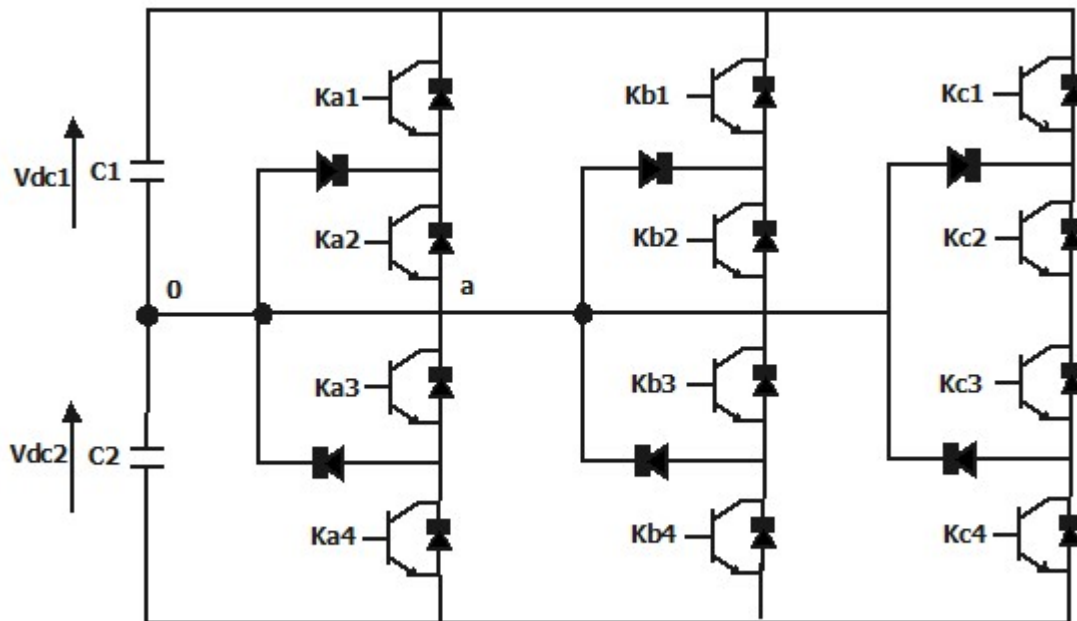


Figure III-4 : Structure d'onduleur triphasé à trois niveaux de type NPC.

L'objectif d'un onduleur triphasé NPC à trois niveaux est de réduire l'amplitude des harmoniques injectés dans la charge par l'onduleur pour des applications telles que la puissance du moteur.

Cette structure, connue sous le nom de convertisseur à clampé par neutre, n'utilise pas d'isolateur et assure une distribution continue de la tension entrante avec ces différents interrupteurs via une diode connectée au point au milieu des capacités.

Il est nécessaire de déterminer la valeur de la tension simple  $V_{ao}$  qui peut être utilisée entre le palier de charge (a) et le point neutre O.

Les états (0 ou 1) des quatre interrupteurs  $K_{a1}$ ,  $K_{a2}$ ,  $K_{a3}$  et  $K_{a4}$  définissent complètement la tension. Cependant seulement trois des  $2^4 = 16$  configurations possibles ont été mises en œuvre. Les autres séquences n'ont aucun effet et doivent être évitées. Ils provoquent en effet un court-circuit dans la source continue de tension ou le décharge de la charge.

En raison de la symétrie de l'onduleur à trois niveaux, l'étude peut être limitée au fonctionnement d'un seul bras (avec trois configurations différentes). Le tableau récapitulatif est présenté ci-dessous (tableau III-1), il représente la tension  $V_{ao}$  d'un onduleur NPC à trois niveaux en fonction de l'état des interrupteurs ; la tension aux bornes des interrupteurs de puissance ne dépasse jamais la moitié du bus d'entrée.

**Tableau III-1 : Commutation du convertisseur NPC 3 niveaux.**

Etat des interrupteurs				Tension de sortie $V_{ao}$
$K_{a1}$	$K_{a2}$	$K_{a3}$	$K_{a4}$	
1	1	0	0	$E/2$
0	1	1	0	0
0	0	1	1	$-E/2$

Sur ce tableau la structure à trois niveaux de l'onduleur est réduite.  $E/2$  est la tension appliquée à chaque interrupteur lorsqu'il est désactivé, mais dans la configuration traditionnelle d'un onduleur à deux niveaux, la tension est égale à la tension totale continue  $E$ . Cette fonction d'onduleur à trois niveaux permet d'augmenter la tension et la puissance tout en travaillant avec des applications à haute puissance.

Contrairement à l'onduleur à deux niveaux, chacun des demi-bas de l'onduleur à trois niveaux utilise deux interrupteurs au lieu d'un, permettant l'exécution d'une commande déléguée [35]. Seules trois configurations sont fonctionnelles pour ce type d'onduleur. Ils sont décrits comme suit :

**1ere Configuration {1100}**

$K_{a1}$ ,  $K_{a2}$ , sont passant, mais  $K_{a3}$  et  $K_{a4}$  sont bloqué. La tension de sortie est égale  $v_{ao} = +E/2$ .

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqué est :  $V_{Ka3} = V_{Ka4} = +E/2$

La (Figure III-5) présent la 1ere configuration d'un bras :

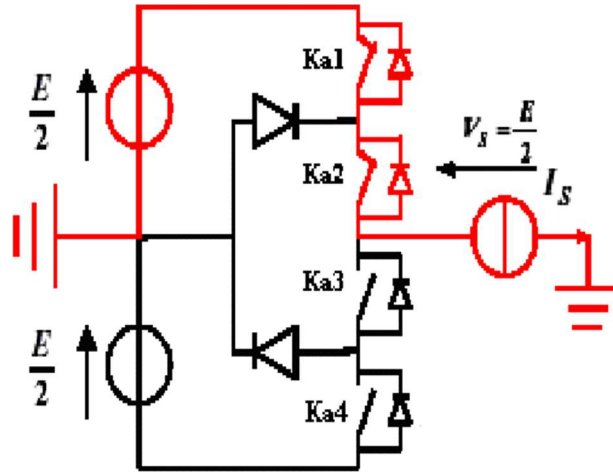


Figure III-5 : 1ère onfiguration du 1er bras.

**2ème Configuration {0110}**

$K_{a2}$ ,  $K_{a3}$  sont passant, tandis que  $K_{a1}$  et  $K_{a4}$  sont bloqué, La charge est bouclée à l'aide d'un interrupteur  $K_{a2}$  ou  $K_{a3}$  et d'une diode de bouclage (roue libre). En conséquence, le point "a" est directement liée à le point "O." La sortie de  $V_{ao}$  est alors nul  $V_{ao} = 0$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqué est alors égale à  $V_{ka1} = V_{ka4} = +E/2$  comme le montre la figure (III-6).

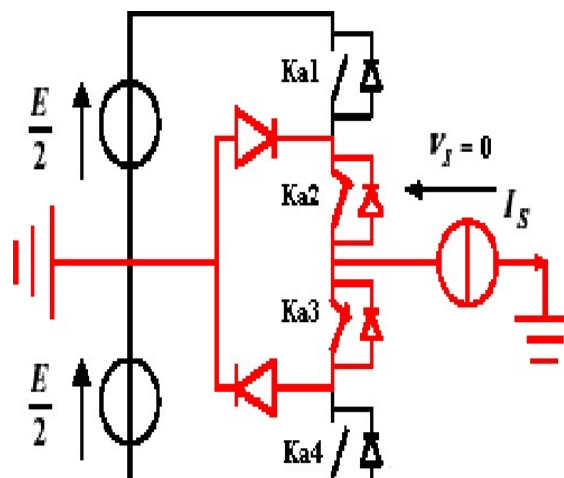


Figure III-6 : 2ieme configuration du 1er bras.

### 3ème Configuration {0011}

$K_{a3}$  et  $K_{a4}$  sont passant et  $K_{a1}$  et  $K_{a2}$  sont bloqué (Figure III-7) la valeur de tension de sortie est alors égale à  $V_{ao} = -E/2$  et la tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqué est égale à :

$$V_{ka1} = V_{ka2} = +E/2$$

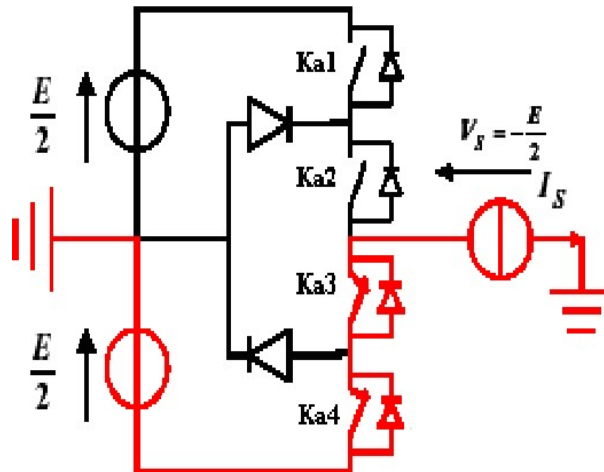


Figure III-7 : 3eme configuration du 1er bras.

#### III.3.1.2 Onduleur cinq niveau NPC

La configuration d'un onduleur de tension à cinq niveaux de type NPC est vue sur la Figure III-8.

L'onduleur triphasé à l'étude est composé de trois bras et de quatre sources de tension continues. Chaque bras à huit interrupteurs et deux diodes (IGBT). Chaque interrupteur est composé d'un transistor et d'une diode montés dans en tête bêche [36].

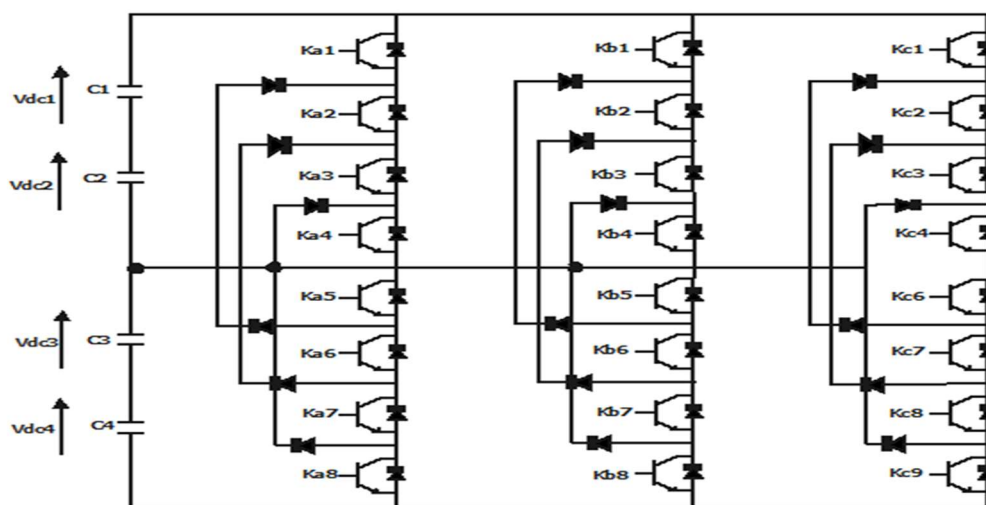


Figure III-8 : Schéma d'un onduleur NPC à cinq niveaux.

Pour définir la séquence de fonctionnement de l'onduleur, il faut définir d'abord les différents états qui peuvent se produire alors que la tension est simple. Il y a  $2^5 = 32$  états potentiels pour un seul bras de commutation, qui peut être représentée par un quadruplet de 0 et 1. Seuls les cinq états énumérés ci-dessous sont concevables [36] qui sont comme suit :

**1ere Configuration : {11110000}**

$K_{a1}$ ,  $K_{a2}$ ,  $K_{a3}$  et  $K_{a4}$  sont passants et  $K_{a5}$ ,  $K_{a6}$ ,  $K_{a7}$  et  $K_{a8}$  sont bloqués (Figure III-9). La tension simple de sortie est :  $V_{ao} = +E/2$  et la tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{ka5} = V_{ka6} = V_{ka7} = V_{ka8} = +E/4$$

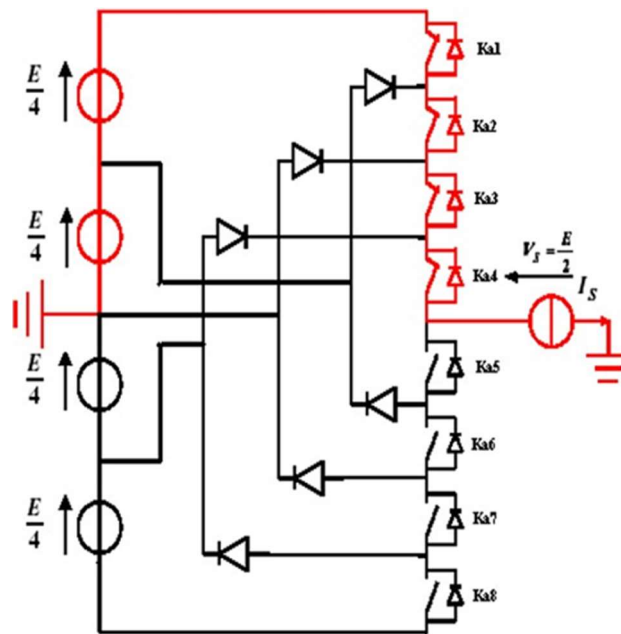


Figure III-9 : 1ere configuration du 1er bras.

**2ème configuration {01111000}**

$K_{a2}$ ,  $K_{a3}$ ,  $K_{a4}$  et  $K_{a5}$  sont passants et  $K_{a6}$ ,  $K_{a7}$ ,  $K_{a8}$  et  $K_{a1}$  sont bloqués (Figure III-10)

La tension de sortie est alors égale à ;  $V_{ao} = +E/4$  et la tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est  $V_{ka1} = V_{ka6} = V_{ka7} = V_{ka8} = +E/4$

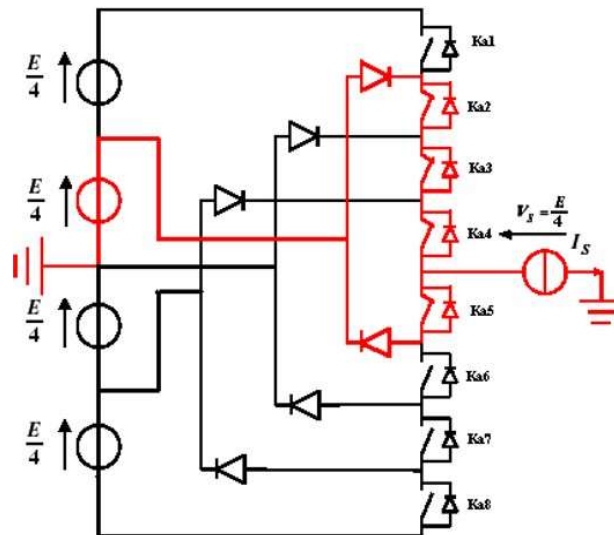


Figure III-10 : 2ème configuration du 1er bras.

**3ème configuration {00111100}**

$K_{a3}$ ,  $K_{a4}$ ,  $K_{a5}$  et  $K_{a6}$  sont passants et  $K_{a7}$ ,  $K_{a8}$ ,  $K_{a1}$  et  $K_{a2}$  sont bloqués comme c'est illustré dans la Figure III-11

La tension de sortie est alors égale à  $V_{ao} = 0$  et la tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :  $V_{ka1} = V_{ka2} = V_{ka7} = V_{ka8} = +E/4$

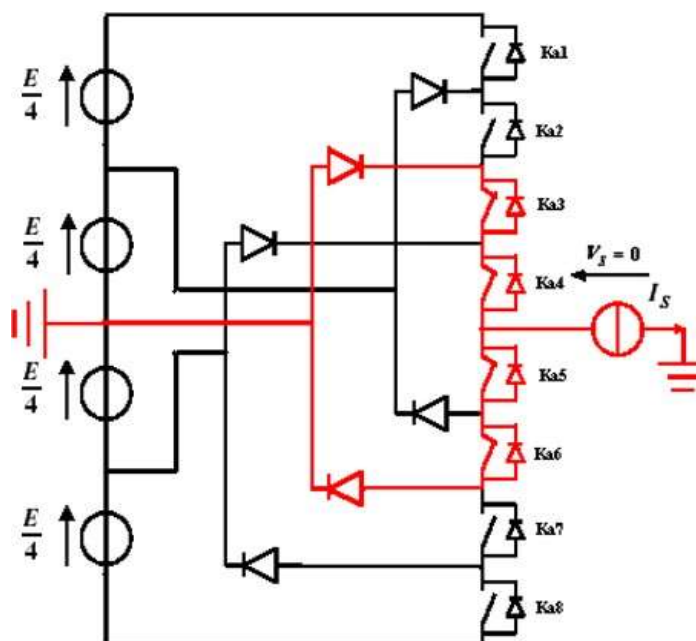


Figure III-11 : 3eme configuration du 1er bras.

4ème configuration {00011110}

$K_{a4}$ ,  $K_{a5}$ ,  $K_{a6}$  et  $K_{a7}$  sont passants et  $K_{a8}$ ,  $K_{a1}$ ,  $K_{a2}$  et  $K_{a3}$  sont bloqués comme c'est illustré dans la Figure III-12. La tension de sortie est égale à  $V_{ao} = -E/4$  et la tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :  $V_{ka1} = V_{ka2} = V_{ka3} = V_{ka8} = +E/4$

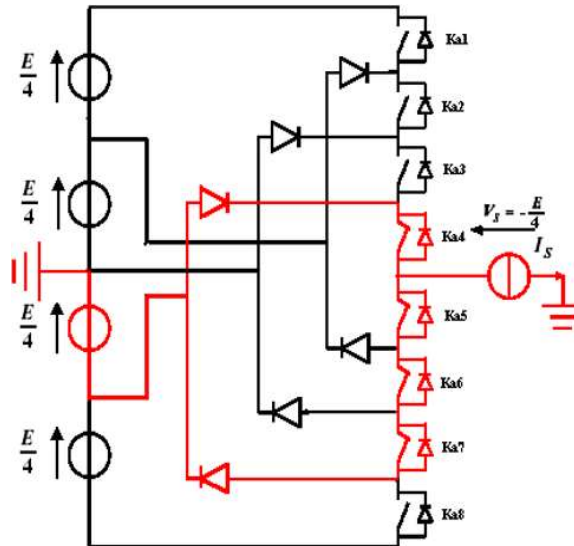


Figure III-12 : 4eme configuration du 1er bras.

5ème configuration {00001111}

$K_{a5}$ ,  $K_{a6}$ ,  $K_{a7}$  et  $K_{a8}$  sont passants et  $K_{a1}$ ,  $K_{a2}$ ,  $K_{a3}$  et  $K_{a4}$  sont bloqués comme c'est illustré dans la Figure III-13.

La valeur de tension de sortie est alors égale à  $V_{ao} = -E/2$  et la tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :  $V_{ka1} = V_{ka2} = V_{ka3} = V_{ka4} = +E/4$

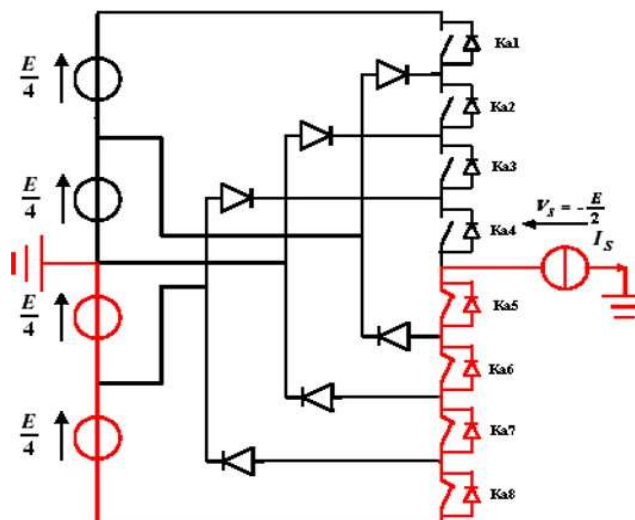


Figure III-13 : représente 5eme configuration du 1er bras.

Tableau III-2 : Table de commutation de l'onduleur NPC à 5 niveaux.

Etat des interrupteurs								Tension de sortie $V_{ao}$
$K_{a1}$	$K_{a2}$	$K_{a3}$	$K_{a4}$	$K_{a5}$	$K_{a6}$	$K_{a7}$	$K_{a8}$	
1	1	1	1	0	0	0	0	$E/2$
0	1	1	1	1	0	0	0	$E/4$
0	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	0	$-E/4$
0	0	0	0	1	1	1	1	$-E/2$

### III.3.2. Topologie en cascade (pont H)

La première application d'un onduleur en H pour la stabilisation du plasma a été publiée en 1988. Une autre structure couramment utilisée par les onduleurs en cascade en cascade en pont H est la topologie parallèle de phase. Dans cette topologie, chaque phase est connectée à un onduleur en forme de H et connectée à un transformateur par bobines d'interphase constituées d'enroulements de transformateurs avec différents rapports de transformation. Le principal avantage de cette structure est qu'elle utilise une seule source continue de tension et peut être utilisée pour des courants élevés grâce aux bobines d'interphase, malgré le fait que la tension des transistors et les axes de courant sont réduits. [37]

Une autre topologie développée à partir d'un onduleur en cascade en pont H est un pont de Vienna à commutateur bidirectionnel reliant le point central des condensateurs à une charge.



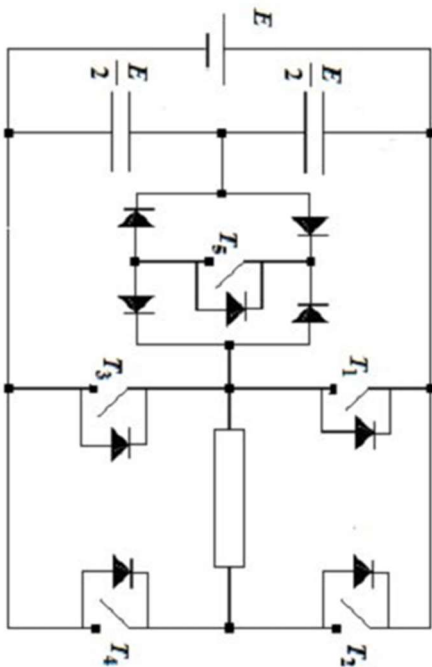


Figure III-15 : Structure d'un onduleur en pont de Vienna.

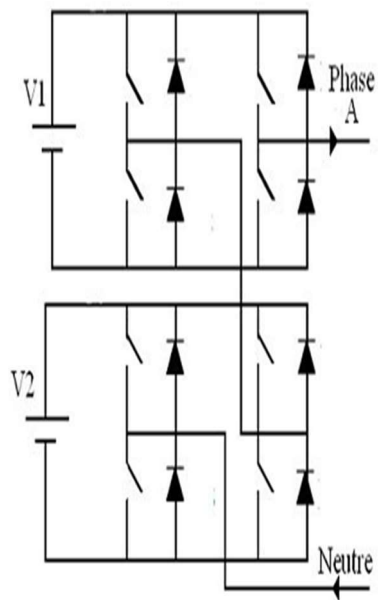


Figure III-14 : Structure d'un onduleur H-Bridge classique

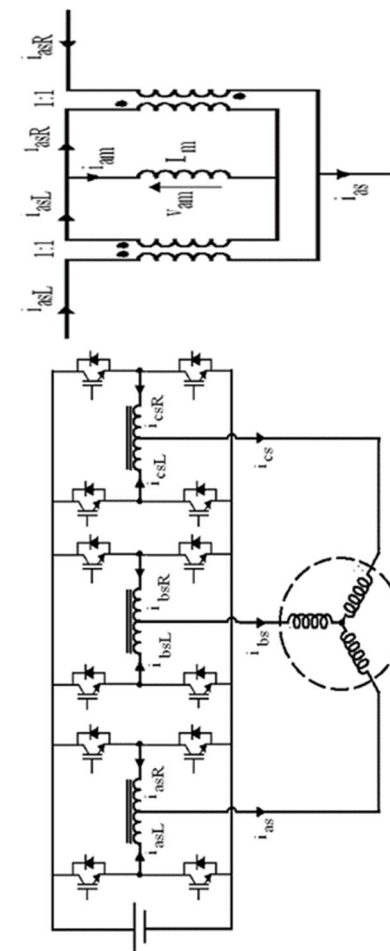


Figure III-16 : Structure d'un onduleur en pont H.

Les avantages de la topologie cascade en pont H sont :

- Ce type de convertisseur nécessite moins de composants pour atteindre le même nombre de niveaux de tension.
- Ce type d'onduleur est non seulement simple à maintenir, mais il fournit également une méthode pratique pour augmenter le nombre de niveaux dans le système.
- Le nombre de niveaux de tension de sortie possibles est le double du nombre des alimentations à courant continu ( $N = 2s + 1$ ).
- La construction modulaire a la même structure qu'un pont monophasé.

Cependant il comporte également des inconvénients qui sont :

- Des connecteurs/câbles sont nécessaires pour connecter l'alimentation CC.
- Chaque pont a besoin d'une source de tension.

### III.3.2.1. Onduleur à TROIS niveaux de type Cascade en pont H

La construction d'un convertisseur à multiniveaux basé sur une série d'onduleurs monophasés (ou pont en H) est vue sur la figure III-17. Les cellules y sont connectées en étoile, cependant il est également possible de les connecter en triangle. Chaque cellule de l'onduleur est alimentée par une source continue E et est composée de quatre interrupteurs qui sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant : il s'agit d'associations classiques d'un transistor et d'une diode en antiparallèle. Les sources doivent être galvaniquement isolées les unes des autres, afin d'éviter un court-circuit lors de leur mise en série [38]

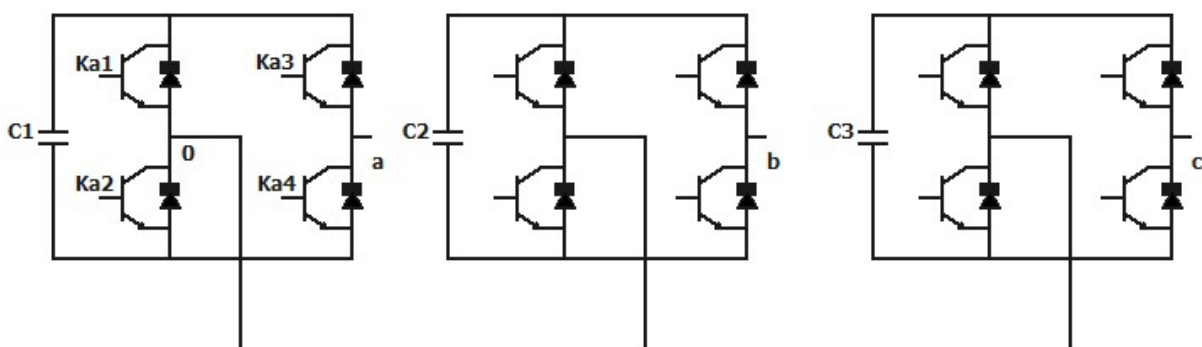


Figure III-17 : Schéma triphasé d'un onduleur cascade en pont H à 3 niveaux.

Pour mieux comprendre le fonctionnement de la structure en cascade ou point H avec trois niveaux de tension, nous allons nous concentrer sur sa structure monophasée. La construction d'un bras d'onduleur trois niveaux de type cascade en pont H est identique à celle d'un

monophasé en pont complet d'un onduleur classique.

Cependant, l'approche de contrôle est unique, ce qui permet d'atteindre les trois niveaux dans le but est de déterminer les valeurs de la tension  $V_{oa}$  qui peut prendre différents états d'interruption, ainsi que d'afficher les configurations de conducteurs d'interruption. Comme pour l'onduleur NPC à trois niveaux, nous avons trois configurations de fonctionnement différentes à choisir :

### 1ere Configuration {1001}

$K_{a1}$ ,  $K_{a4}$ , sont maintenant passant, mais  $K_{a2}$  et  $K_{a3}$  sont bloqué : la tension de sortie est :

$$V_{ao} = +E.$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqué est  $V_{K_{a3}} = V_{K_{a2}} = +E$

La Figure III.18 présente la 1ere configuration d'un bras :

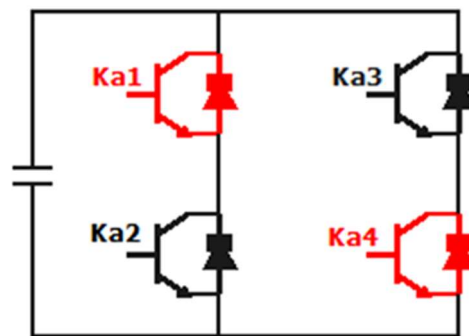


Figure III-18 : 1ere configuration du 1er bras.

### 2ème Configuration {0011}

$K_{a3}$ ,  $K_{a4}$  sont passant, tandis que  $K_{a1}$  et  $K_{a2}$  sont bloqués. La sortie de  $V_{ao} = 0$ . La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqué est :  $V_{ka1} = V_{ka2} = +E$  comme le montre la figure III-19.

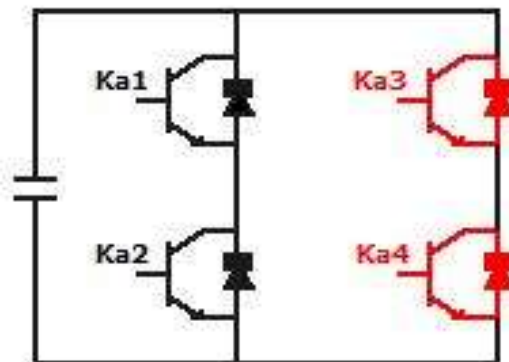


Figure III-19 : 2eme configuration du 1er bras.

**3ème Configuration {0110}**

$K_{a2}$ ,  $K_{a3}$  sont passant et  $K_{a1}$  et  $K_{a4}$  sont bloqué (Figure III-20) la valeur de tension de sortie est:  $V_{ao} = -E$ . La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqué est :

$$V_{ka1} = V_{ka4} = +E.$$

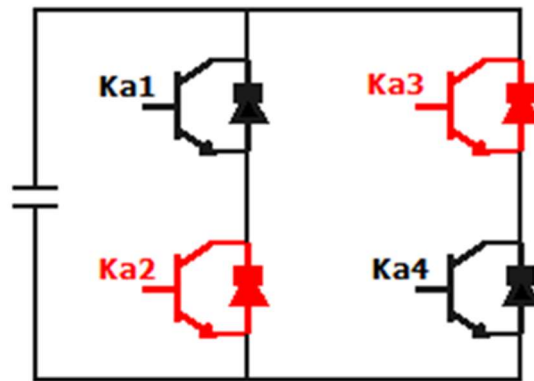


Figure III-20 : 3eme configuration du 1er bras.

Le tableau suivant montre les commutations du convertisseur en cascade en pont H à trois niveaux.

**Tableau III-3 : Commutation du convertisseur cascade en en pont H à 3 niveaux**

Etat des interrupteurs				Tension de sortie $V_{ao}$
$K_{a1}$	$K_{a2}$	$K_{a3}$	$K_{a4}$	
1	0	0	1	E
0	0	1	1	0
0	1	1	0	-E

On remarque que les interrupteurs de l'onduleur en cascade en pont H sont moins sollicités que ceux d'un onduleur deux niveaux. Un autre point important est qu'à chaque changement de niveau de tension, nous avons un seul interrupteur (IGBT) qui change d'état. Ce qui réduit considérablement les pertes par commutations.

### III.3.2.2 Onduleur à cinq niveaux de type Cascade en pont H

La structure d'un convertisseur multiniveaux basée sur la mise en série d'onduleurs monophasés (ou pont en H, ou cellule partielle) est montrée sur la figure III-21.

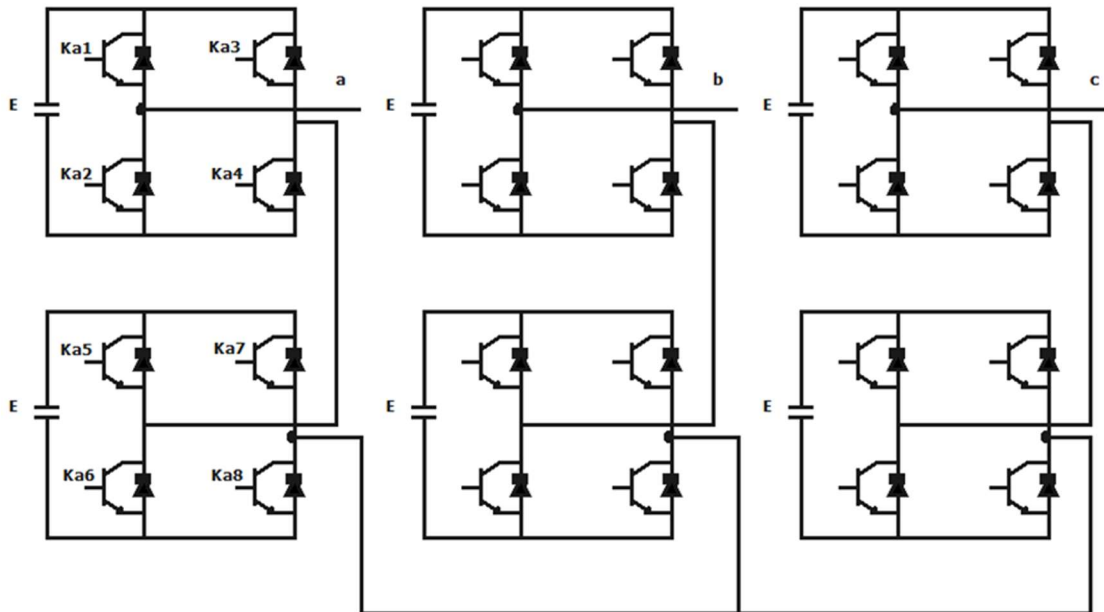


Figure III-21: Schéma d'un onduleur cascade en H à 5 niveaux

La construction d'un onduleur à cinq niveaux dans un pont en H est l'association en cascade de deux onduleurs monophasés. En conséquence, la tension obtenue à la sortie de l'onduleur est la somme des tensions à la sortie des deux onduleurs.

Comme pour le NPC, nous avons les cinq configurations de fonctionnement suivantes pour le convertisseur en cascade en pont H à cinq niveaux, qui sont :

#### 1ere Configuration : {10011001}

$K_{a1}$ ,  $K_{a4}$ ,  $K_{a5}$  et  $K_{a8}$  sont passants et  $K_{a2}$ ,  $K_{a3}$ ,  $K_{a6}$  et  $K_{a7}$  sont bloqués (Figure III-22). Dans ce cas, le premier pont monophasé (celui en haut) fournit une tension  $E$ , et le second pont monophasé (celui en bas) fournit également une tension  $E$ . ce qui implique que la tension de sortie du convertisseur en cascade H à cinq niveaux de tension :  $V_{oa} = E + E = 2E$

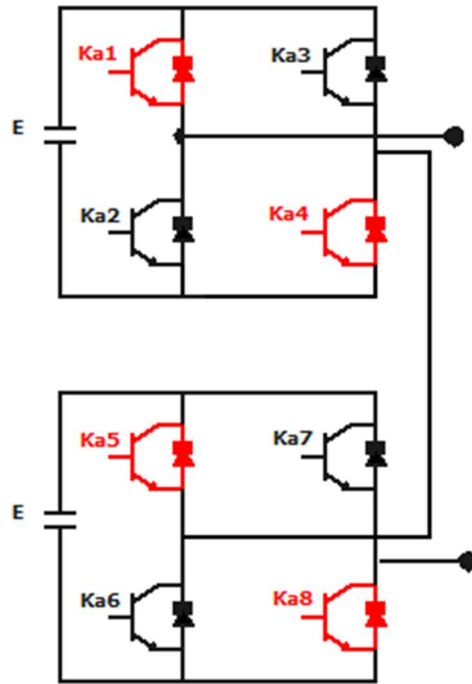


Figure III-22 : 1ere configuration du 1er bras.

**2ème configuration {10010101}**

$K_{a1}$ ,  $K_{a4}$ ,  $K_{a6}$  et  $K_{a8}$  sont passants et  $K_{a2}$ ,  $K_{a3}$ ,  $K_{a5}$  et  $K_{a7}$  sont bloqués (Figure III-23). On a toujours  $E$  à la sortie du premier pont, mais cette fois ci  $0$  à la sortie du second pont. D'où la tension  $V_{oa} = E$

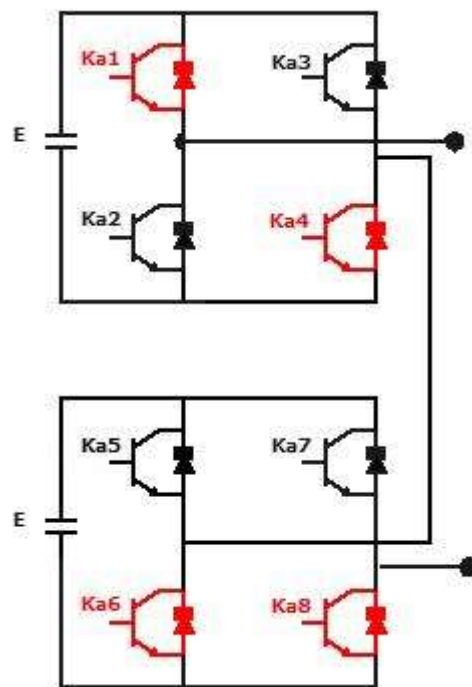


Figure III-23 : 2ème configuration du 1er bras.

**3ème configuration {01010101}**

$K_{a2}$ ,  $K_{a4}$ ,  $K_{a6}$  et  $K_{a8}$  sont passants et  $K_{a1}$ ,  $K_{a3}$ ,  $K_{a5}$  et  $K_{a7}$  sont bloqués comme c'est illustré sur la (Figure III-24). On a alors 0 comme tension de sortie dans les deux ponts monophasés montés en cascade. La tension de sortie du pont en H est alors égale à :  $V_{oa} = 0$

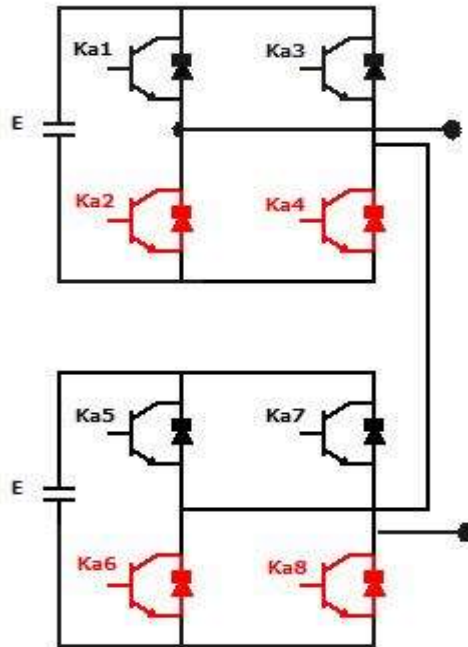


Figure III-24 : 3eme configuration du 1er bras.

**4ème configuration {01100101}**

$K_{a2}$ ,  $K_{a3}$ ,  $K_{a6}$  et  $K_{a8}$  sont passants et  $K_{a1}$ ,  $K_{a4}$ ,  $K_{a5}$  et  $K_{a7}$  sont bloqués comme c'est illustré dans la (Figure III-25). Dans ce cas, la tension de sortie est :  $V_{oa} = -E$

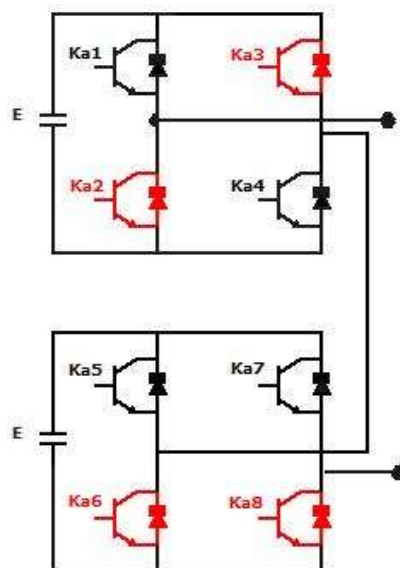


Figure III-25 : 4eme configuration du 1er bras.

5ème configuration {01100110}

$K_{a2}$ ,  $K_{a3}$ ,  $K_{a6}$  et  $K_{a7}$  sont passants et  $K_{a1}$ ,  $K_{a4}$ ,  $K_{a5}$  et  $K_{a8}$  sont bloqués comme c'est illustré dans la (Figure III-26). On a alors la tension de sortie  $V_{oa} = -E - E = -2E$

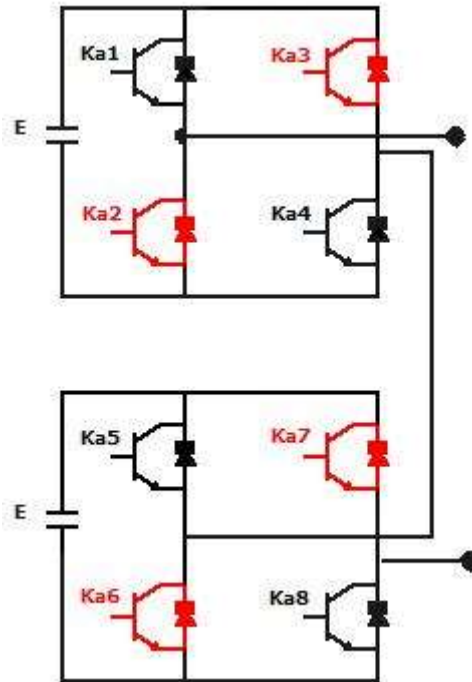


Figure III-26 : représente 5eme configuration du 1er bras.

Le tableau suivant montre les commutations du convertisseur en cascade en pont H à cinq niveaux.

Tableau III-4 : Table de commutation de l'onduleur NPC à 5 niveaux.

Etat des interrupteurs								Tension de sortie $V_{ao}$
$K_{a1}$	$K_{a2}$	$K_{a3}$	$K_{a4}$	$K_{a5}$	$K_{a6}$	$K_{a7}$	$K_{a8}$	
1	0	0	1	1	0	0	1	2E
1	0	0	1	0	1	0	1	E
0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	1	1	0	0	1	0	1	-E
0	1	1	0	0	1	1	0	-2E



Dans le cas d'un convertisseur cascade en H, il y a moins de pertes dues à la commutation que dans le cas d'un onduleur NPC. [38] En fait, dans le cas des trois commutations en cascade, il n'y a qu'une commutation pour chaque changement de niveau, mais dans le cas des trois niveaux du NPC, il y a deux commutations pour chaque changement de niveau.

### III.3.3. Topologie de L'onduleur à condensateur flottant (FC)

Meynard et Foch ont proposé cette topologie cellulaire imbriquée en 1992, voir figure (III-27) Figure (III-28). [39]. Chaque phase est constituée d'une paire de semi-conducteur de puissance raccordée parallèlement aux bornes du condensateur. Ils sont généralement contrôlés de manière complémentaire, la tension de la sortie de la branche étant reliée à la charge positive ou négative du condensateur. Cette construction est proposée pour résoudre le problème de l'équilibre de tension d'une part et des diodes excessives d'autre part [39].

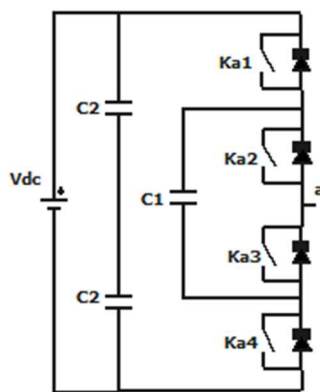


Figure III-27 : Onduleur condensateurs flottants de trois niveaux.

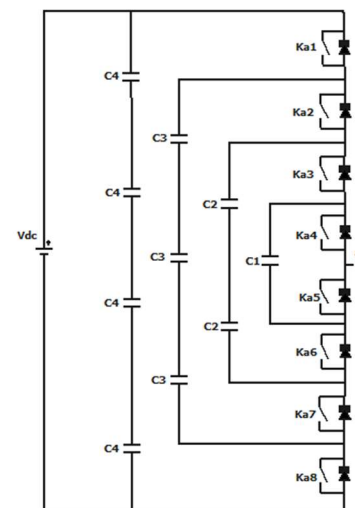


Figure III-28 : Onduleur condensateurs flottants de cinq niveaux.

## III.4. Simulation d'un filtre actif de puissance parallèle deux niveaux par la méthode indirecte par MLI basée sur la commande de puissance instantanée

Le schéma montre le système simulé (II-29). Il est composé d'un réseau alimentant un pont redresseur et d'un filtre actif de puissance à deux niveaux. Le réseau est représenté par un système triphasé de formes sinusoïdales connecté en série à une inductance et une résistance. Le pont redresseur est connecté à une charge R-L. Le filtre actif de puissance à deux niveaux

est composé d'un onduleur à six interrupteurs. Les IGBT sont utilisés pour former les interrupteurs de l'onduleur. Les paramètres de simulation utilisés sont les mêmes que la méthode directe indiqués dans le tableau (II-1)

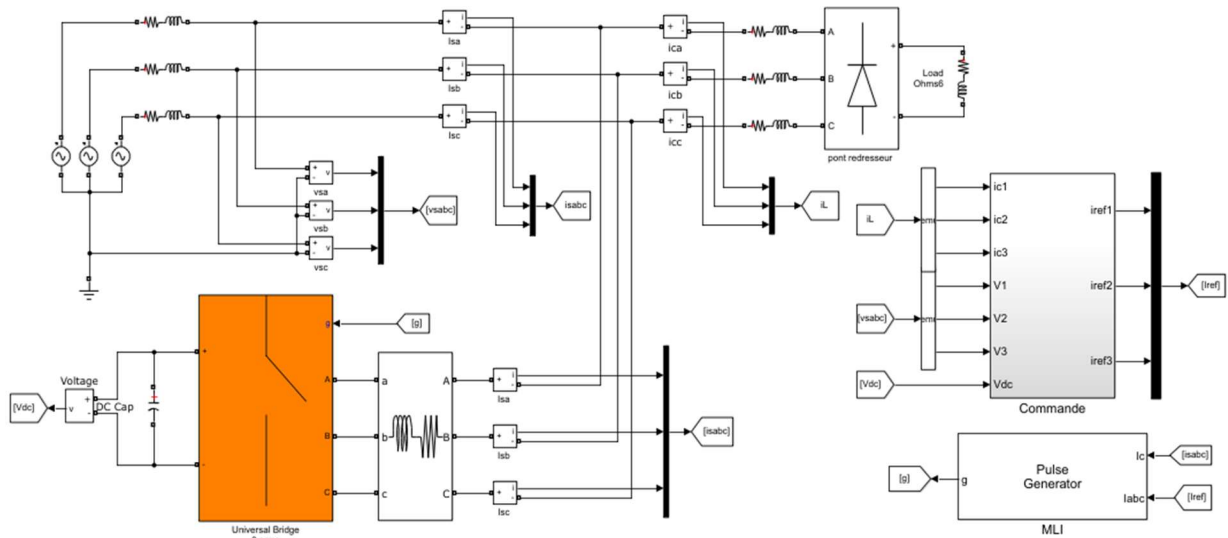


Figure III-29 : Schéma général de la méthode indirect p-q par MLI

La commande indirecte est illustrée sur la figure suivante :

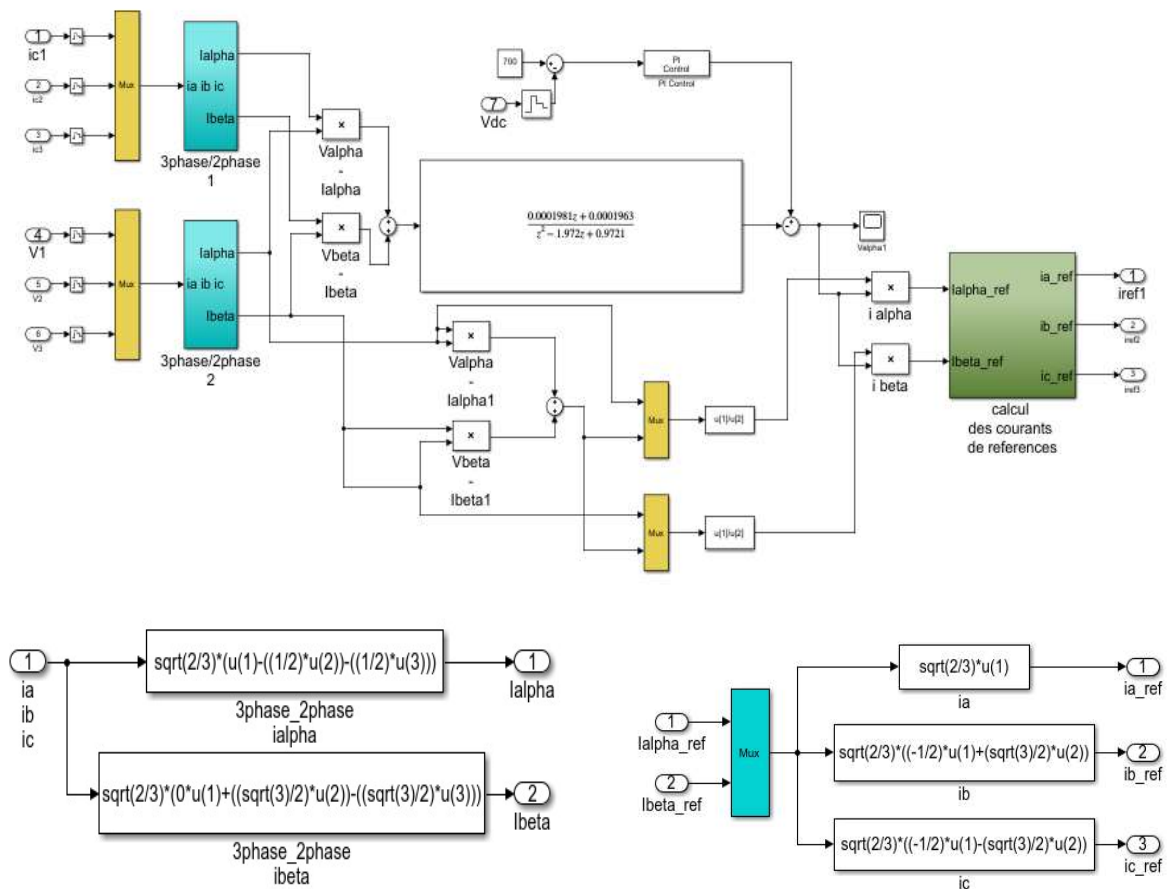


Figure III-30 : Schéma général de la commande (p-q) de la méthode indirecte

Les résultats de simulation sont illustrés sur les figures suivantes :

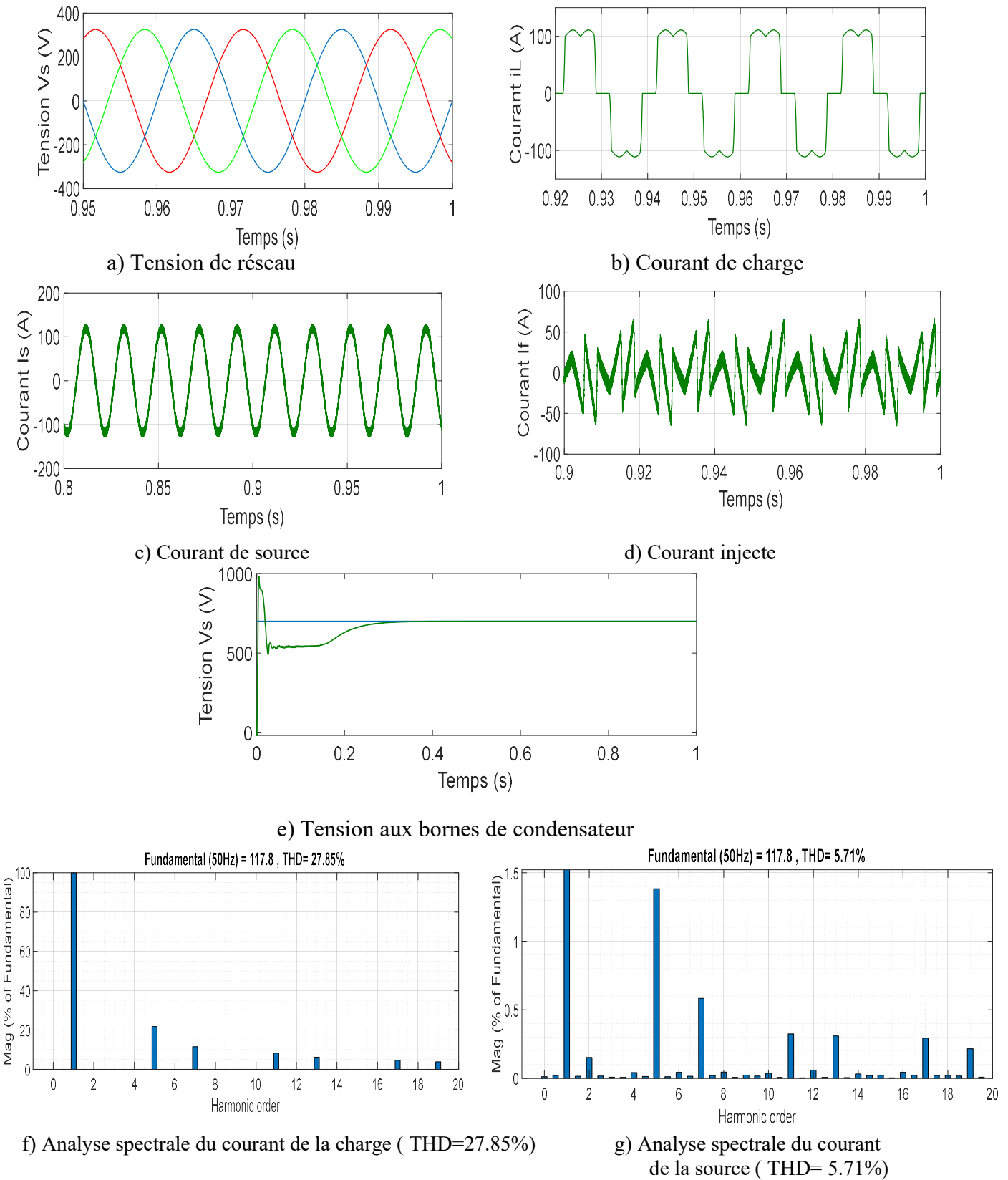


Figure III-31 : Résultats de simulation du FAP indirect à MLI par la méthode p-q

La figure (III-31.a) représente la tension source comme un signal parfaitement sinusoïdal avec

une amplitude de 400V. Les figures (III-31 b, c et d) montrent respectivement les courants de charge, de source et le courant injecté par le filtre actif de puissance. Nous remarquons que le courant de source après filtrage devient sinusoïdal. La figure (III-31.e) représente la tension aux bornes du condensateur, nous remarquons qu'il est constant.

Les figures (III-31.f.g) représentent le spectre harmonique. Nous remarquons que la valeur du spectre harmonique est réduite après le filtrage de 27.85% pour le THD à une valeur de 5,71 %. Ce qui respecte la norme CEI.

### III.5. Simulation d'onduleur multiniveau

Les mêmes conditions sont utilisées pour faciliter la comparaison des différentes structures à étudiées. Dans ce qui suit, nous allons fournir les résultats des simulations des filtres actifs de puissance multi-niveaux connecté en parallèle à un réseau triphasé à trois fils. Le réseau électrique est également connecté à une charge non linéaire triphasée qui alimente une charge de type RL. La méthode des puissances instantanées p-q à commande indirecte a été utilisée comme stratégie de commande pour ce filtre de puissance actif, qui a été simulé en utilisant un contrôleur MLI. Dans un premier temps, nous avons simulé un onduleur trois-niveaux de type NPC puis en pont H. Une comparaison entre eux est ensuite faite. Par la suite nous faisons la même pour la structure cinq niveaux dont le Tableau III-5 montre Les paramètres de simulation utilisés.

**Tableau III-5 : Les paramètres de simulation utilisés des quatre simulations.**

Elément de l'installation	Valeur de paramètre
Réseau	Source triphasée sinusoïdale et équilibrée $f=50$ Hz $V_s=5500$ v $R_s=0.0001$ ohm, $L_s=0,0005$ H
Redresseur	Charge RL $R_c=0,0001$ ohm $L_c=0,0005$ H Charge RL $R_L=50$ ohm $L_L=0.0005$ H
Filtre actif parallèle	Convertisseur à six interrupteurs Charge RL $R_f=0,0001$ ohm $L_f=0,02$ H Cascade : $L_f=0,01$ H

#### III.5.1.Simulation du FAP trois niveaux de type NPC

La figure suivante montre le filtre actif de puissance trois niveaux de type NPC

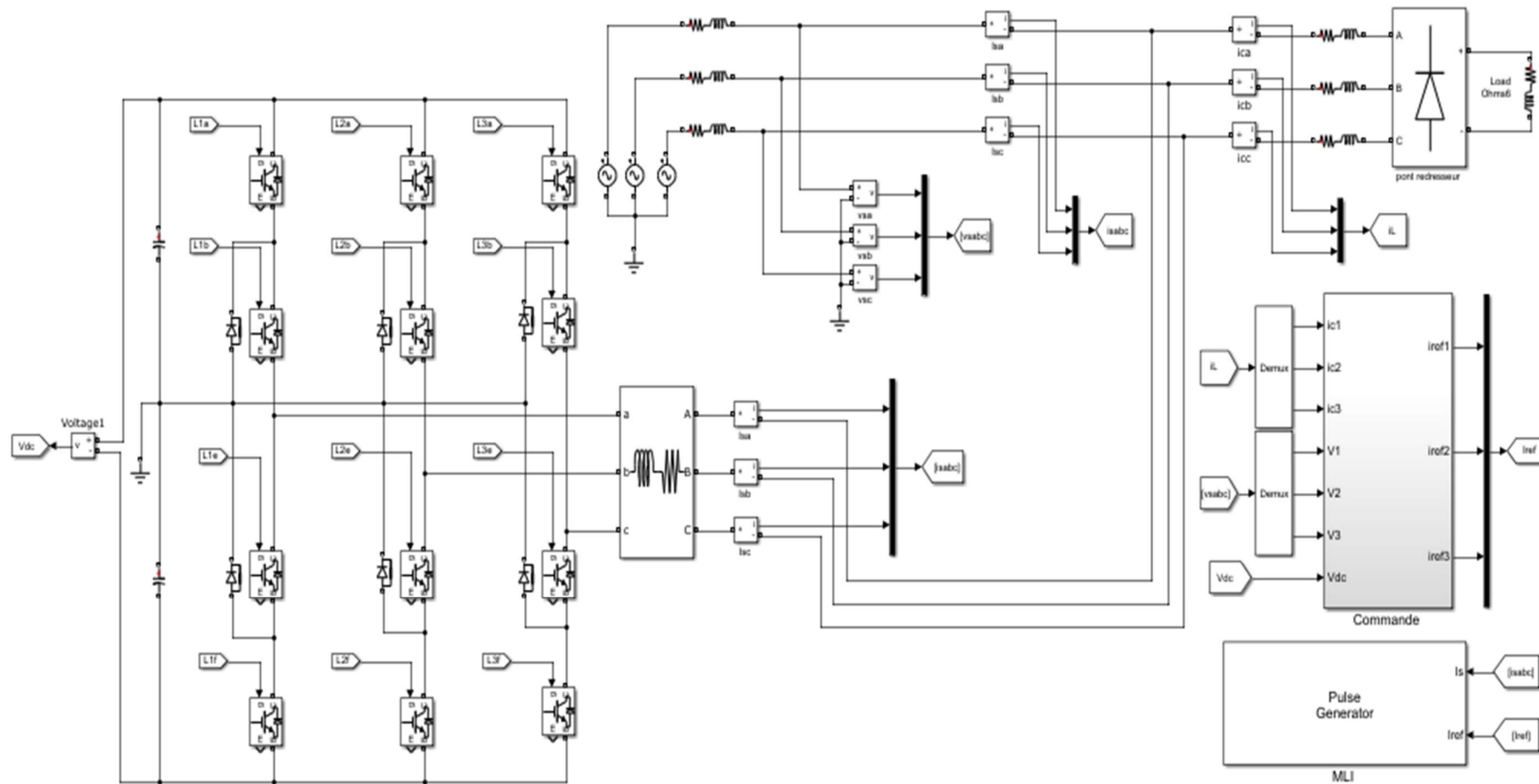
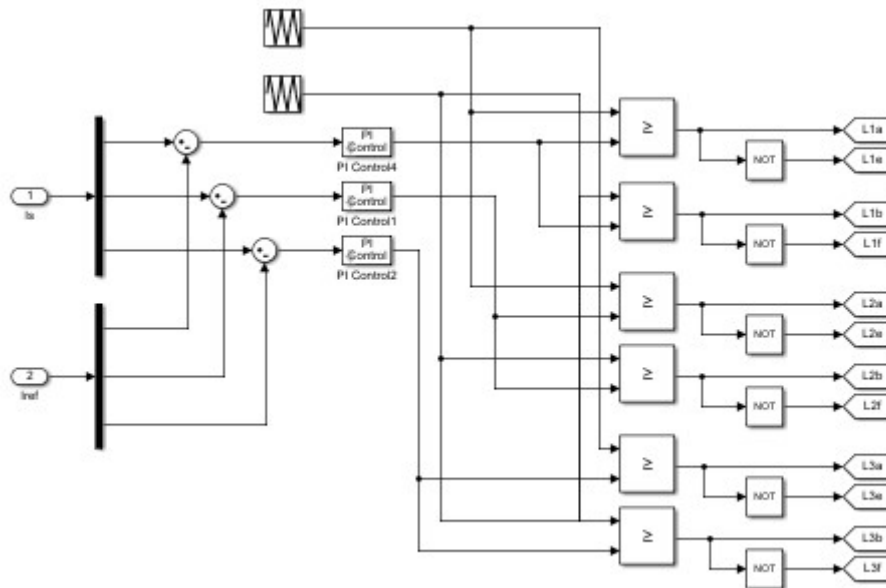


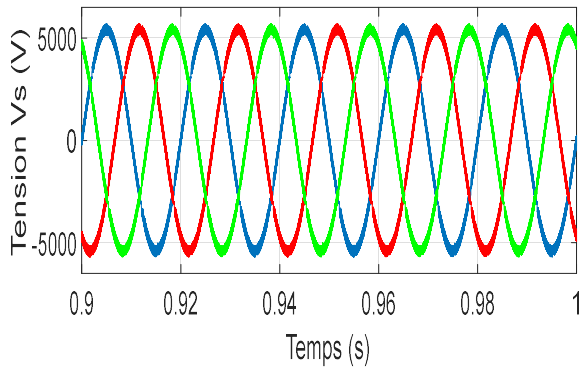
Figure III-32 : Schéma général de la simulation de l'onduleur trois niveaux NPC.

La MLI pour commander les interrupteurs de notre filtre actif de puissance est illustré sur la figure suivante :

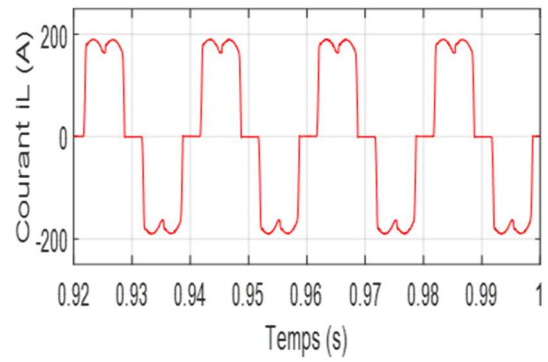


**Figure III-33 : Schéma de la commande MLI d'un onduleur trois niveau NPC.**

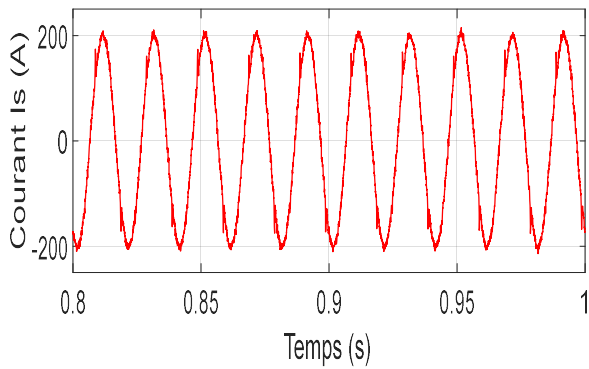
Les résultats de simulation de notre système complet qui comporte un réseau électrique alimentant une charge non linéaire et d'un filtre actif de puissance de type NPC a trois niveaux sont illustré sur les figures suivantes :



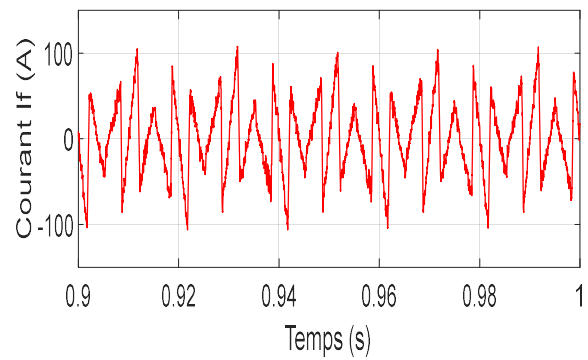
a) Tension de réseau



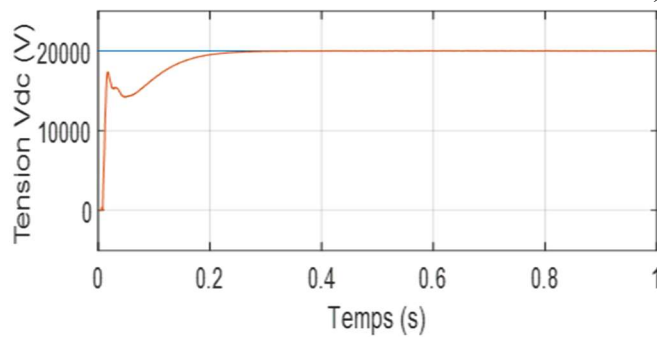
b) Courant de charge



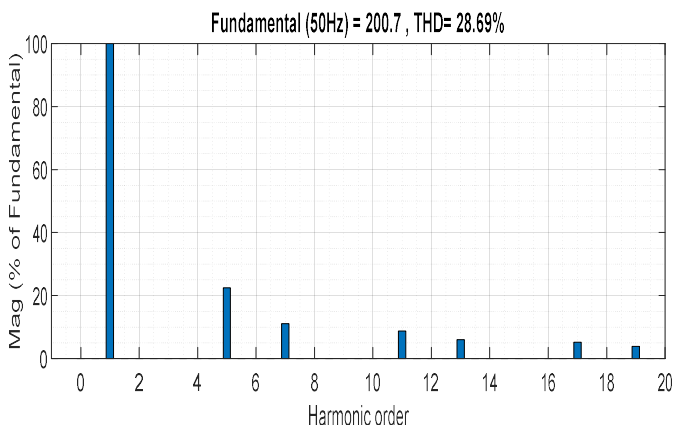
c) Courant de source



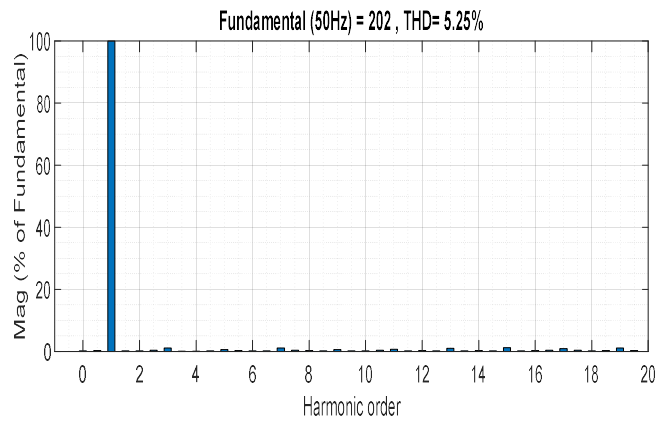
d) Courant injecté



e) Tension aux bornes de condensateur



f) Analyse spectrale du courant de la charge ( THD=28.69%)



g) Analyse spectrale du courant de la source ( THD= 5.25%)

**Figure III-34 : Résultats de simulation du FAP 3 niveaux à commande indirecte indirect par la méthode p-q**

La figure (III-34.a) illustre la tension cotée source qui est sinusoïdale. Les figures (III-34.b.c.d) illustrent respectivement les courants de la charge, de source et le courant injecté par le FAP trois niveaux de type NPC pour une seule phase. La figure (III-34.e) illustre la tension aux bornes du condensateur, nous remarquons qu'il est constant. Les figures (III-34. f.g) montrent respectivement les spectres harmoniques des courants avant et après filtrage. Le spectre harmonique obtenus montre que les harmoniques après sont éliminés. Nous remarquons de ces figures que le THD du courant de charge avant filtrage est de 28.69%, ce qui est une valeur élevée et qui ne respecte pas la norme CEI. Mais après filtrage nous remarquons que le THD égale à 5.25% ce qui respecte la norme CEI.



III.5.2. Simulation du FAP trois niveaux de type cascade en pont H

La figure suivante montre le filtre actif de puissance trois niveaux de type NPC.

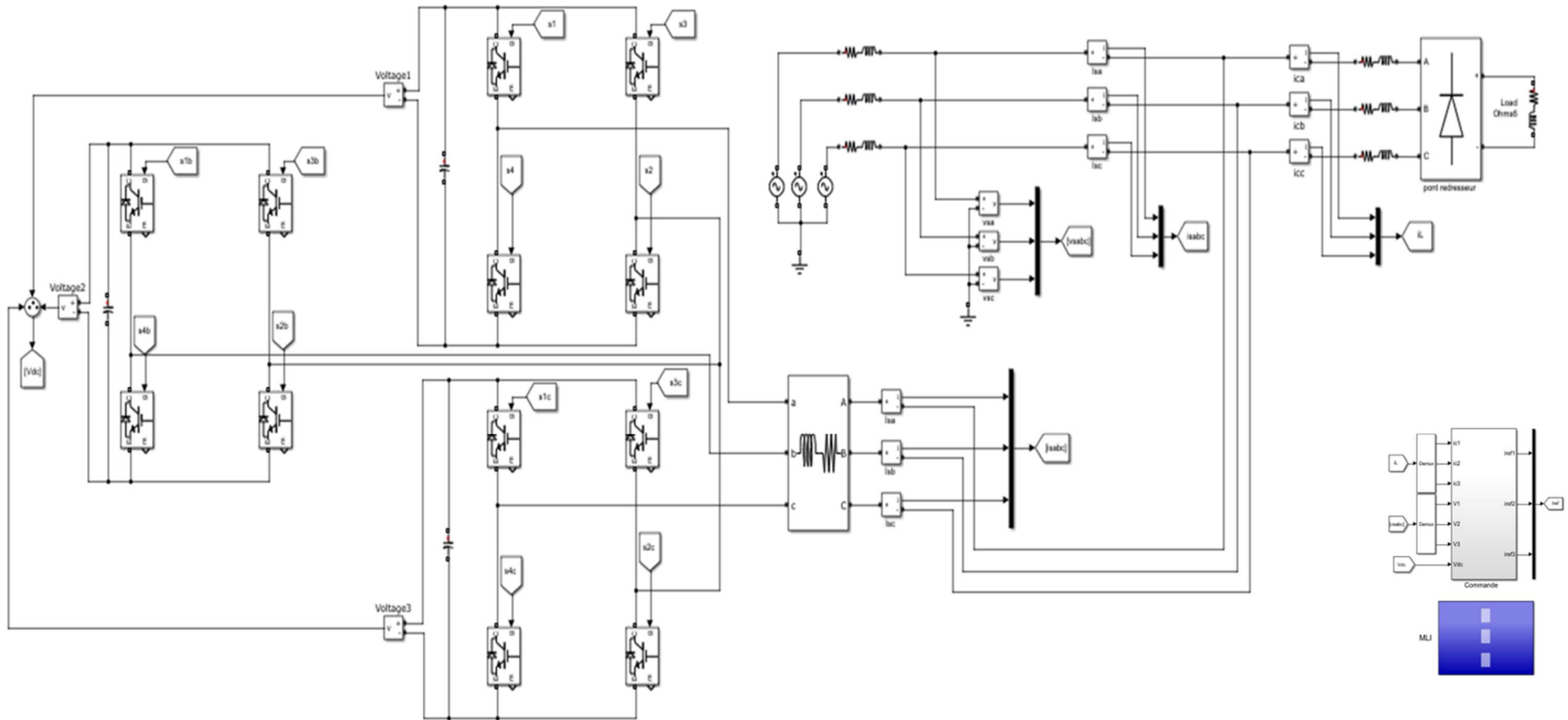
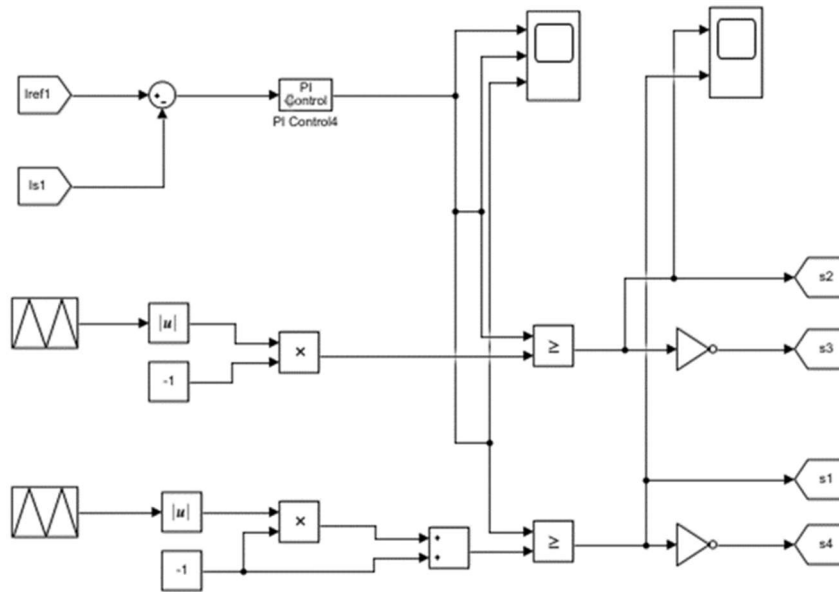


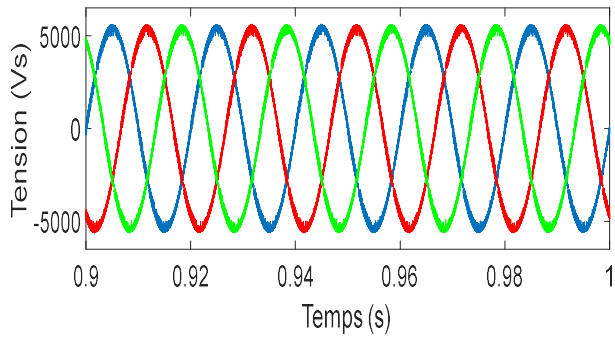
Figure III-35 : Schéma général de la simulation de l'onduleur trois niveau H-BRID

La MLI pour commander les interrupteurs de notre filtre actif de puissance est illustré sur la figure suivante :

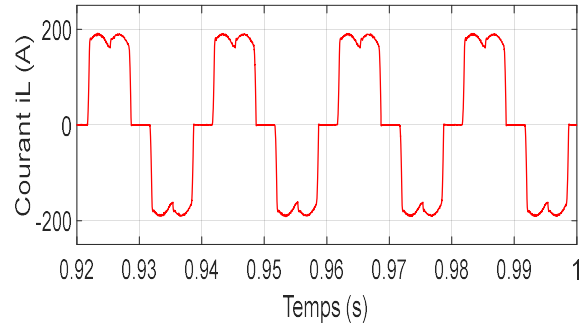


**Figure III-36 : Schéma de la MLI d'un FAP trois niveaux en cascade en pont H (un seul onduleur)**

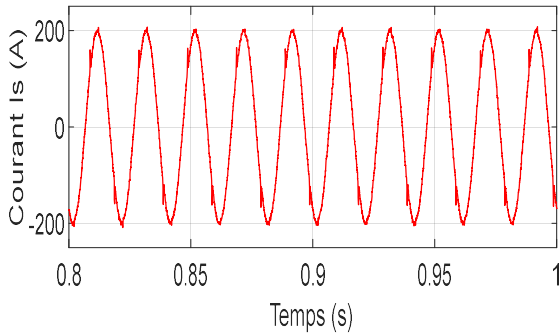
Les résultats de simulation de notre système complet qui comporte un réseau électrique alimentant une charge non linéaire et d'un filtre actif de puissance de type cascade en pont H à trois niveaux sont illustré sur les figures suivantes :



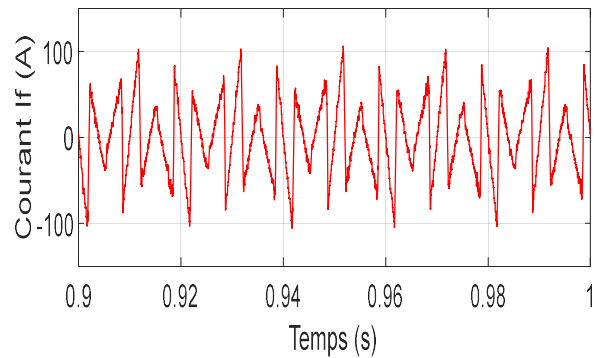
a) Tension de réseau



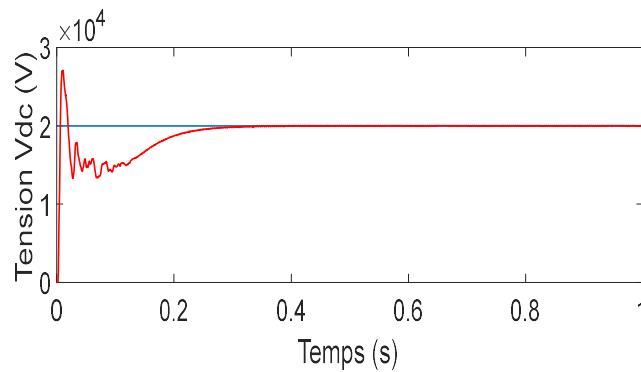
b) Courant de charge



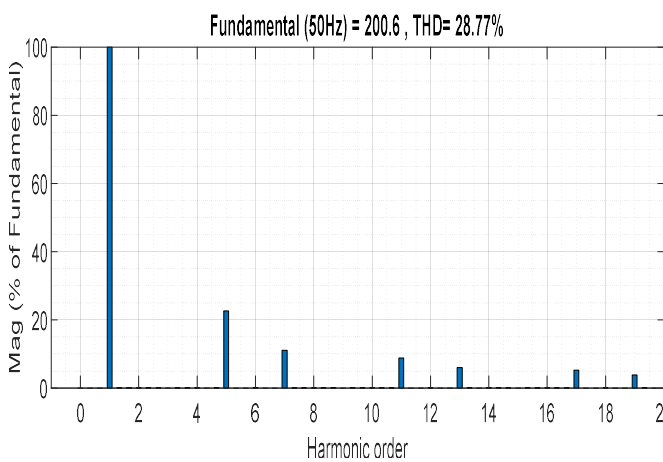
c) Courant de source



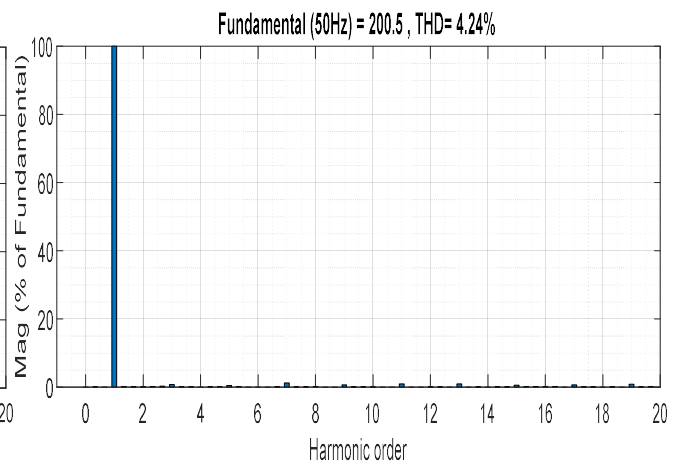
d) Courant injecte



e) Tension aux bornes de condensateur



f) Analyse spectrale du courant de la charge ( THD=28.77%)



g) Analyse spectrale du courant de la source ( THD= 4.24%)

Figure III-37 : Résultats de simulation de l'onduleur trois niveaux H-BRIDGE

La figure (III-37.a) illustre la tension cotée source qui est sinusoïdale. Les figures (III-37.b.c) et d illustrent respectivement les courants de la charge, de source et le courant injecté par le FAP trois niveaux de type cascade en pont H pour une seule phase. La figure (III-37.e) illustre la tension aux bornes du condensateur, nous remarquons qu'il est constant. Les figures (III-37.f) et g montrent respectivement les spectres harmoniques des courants avant et après filtrage. Le spectre harmonique obtenus montre que les harmoniques après sont éliminés. Nous remarquons de ces figures que le THD du courant de charge avant filtrage est de 28.77%, ce qui est une valeur élevée et qui ne respecte pas la norme CEI. Mais après filtrage nous remarquons que le THD égale à 4.24% ce qui respecte la norme CEI.

III.5.3.Simulation onduleur cinq niveau NPC

La figure suivante montre le filtre actif de puissance cinq niveaux de type NPC.

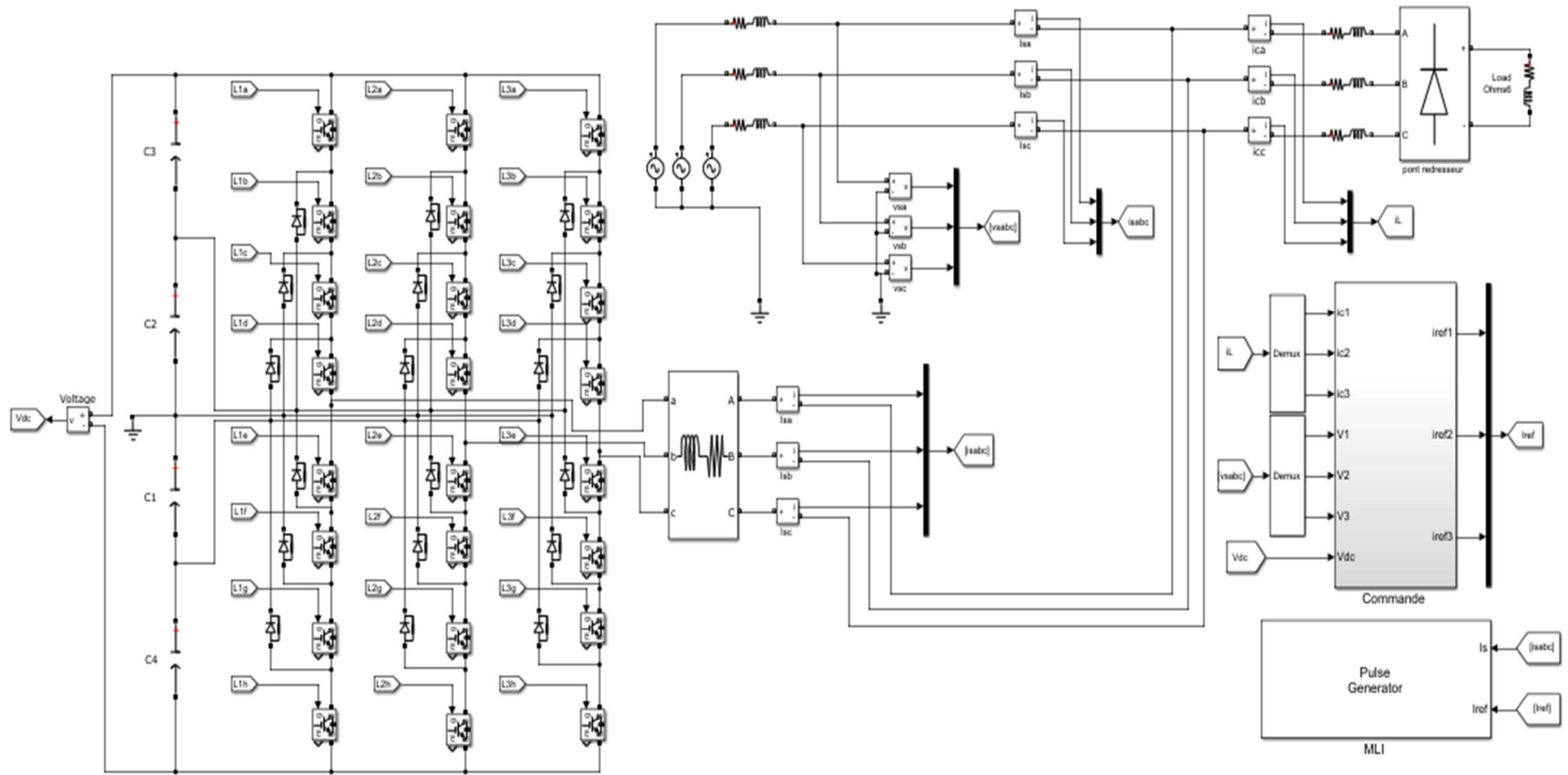


Figure III-38 : Schéma général de la simulation de l'onduleur cinq niveaux NPC.

La MLI pour commander les interrupteurs de notre filtre actif de puissance est illustré sur la figure suivante :

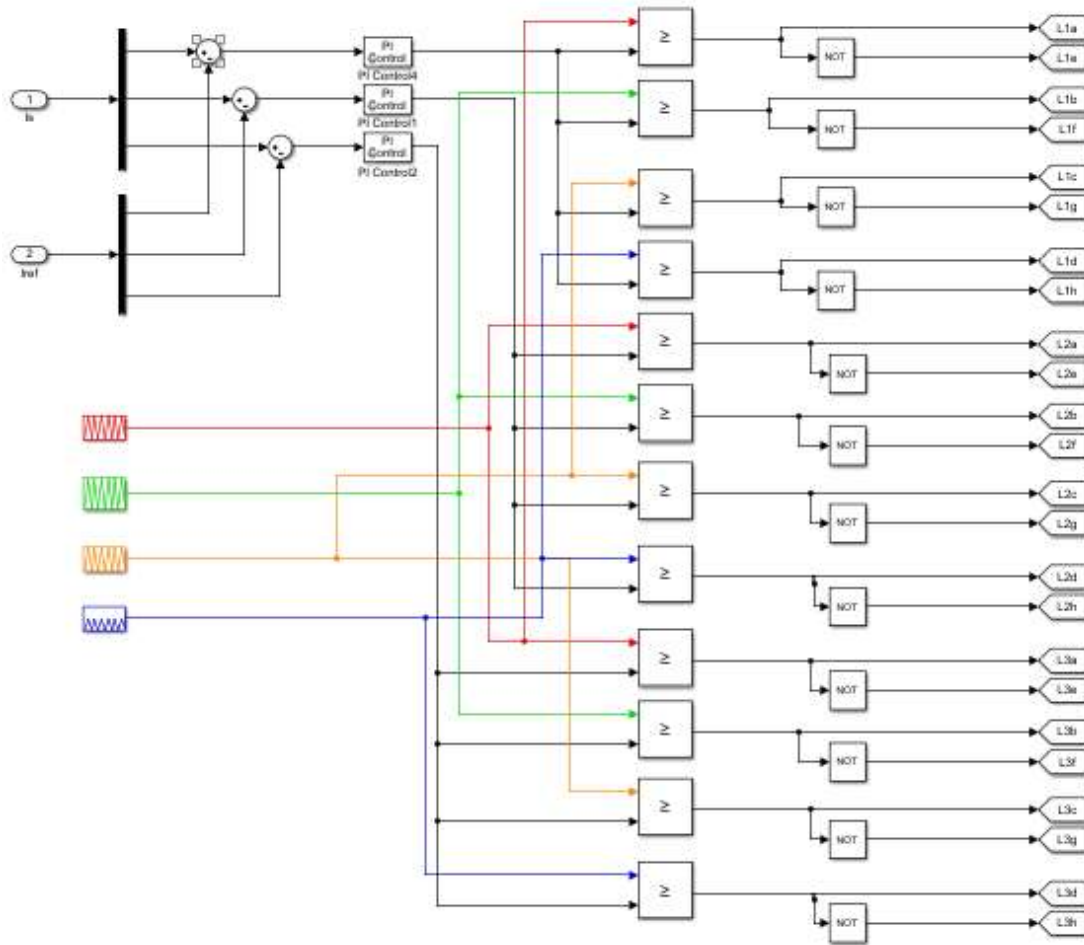
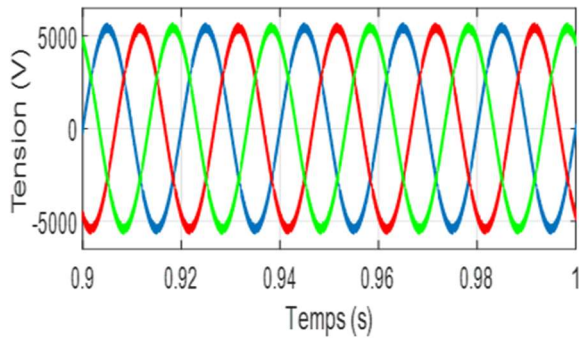
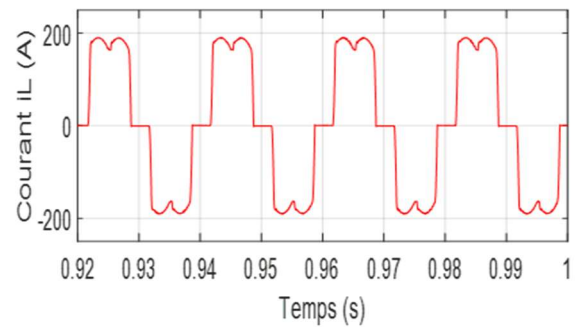


Figure III-39 : Schéma de la commande MLI de l'onduleur cinq niveaux de type NPC.

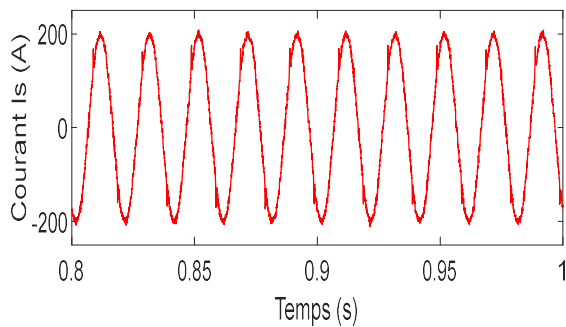
Les résultats de simulation de notre système complet qui comporte un réseau électrique alimentant une charge non linéaire et d'un filtre actif de puissance de type NPC à cinq niveaux sont illustré sur les figures suivantes :



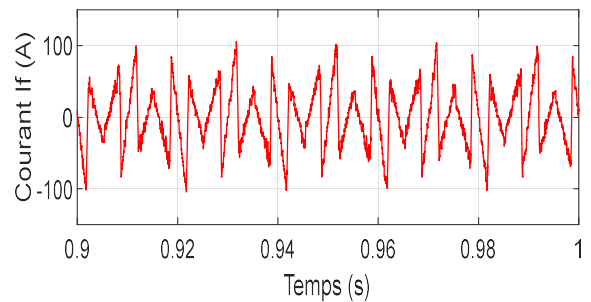
a) Tension de réseau



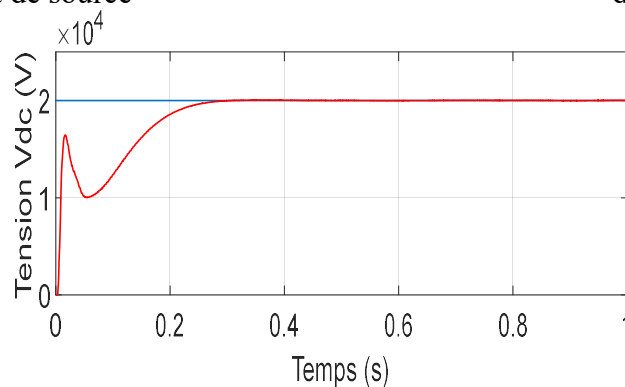
b) Courant de charge



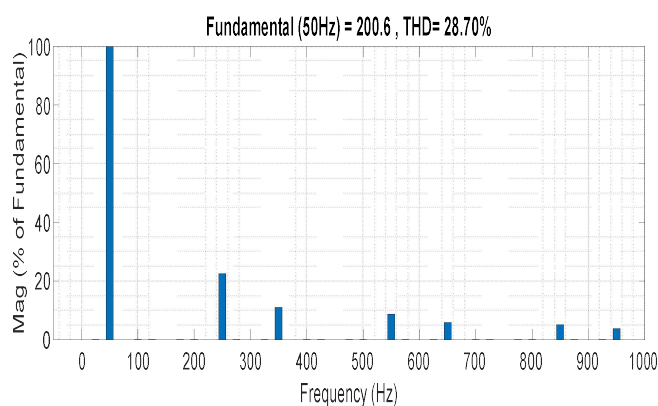
c) Courant de source



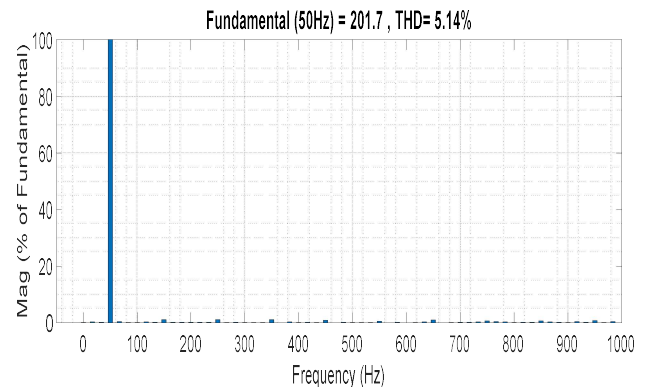
d) Courant injecté



e) Tension aux bornes de condensateur



f) Analyse spectrale du courant de la charge ( THD=28.70%)



g) Analyse spectrale du courant de la source ( THD= 5.14%)

Figure III-40 : Résultats de simulation de l'onduleur cinq niveaux NPC

La figure (III-40.a) illustre la tension cotée source qui est sinusoïdale. Les figures (III-40. b.c .d) illustrent respectivement les courants de la charge, de source et le courant injecté par le FAP cinq niveaux de type NPC pour une seule phase. La figure (III-40.e) illustre la tension aux bornes du condensateur, nous remarquons qu'il est constant. Les figures (III-40. f .g) montrent respectivement les spectres harmoniques des courants avant et après filtrage. Le spectre harmonique obtenus montre que les harmoniques après sont éliminés. Nous remarquons de ces figures que le THD du courant de charge avant filtrage est de 28.70%, ce qui est une valeur élevée et qui ne respecte pas la norme CEI. Mais après filtrage nous remarquons que le THD égale à 5.14% ce qui respecte la norme CEI.



III.5.4. Simulation onduleur cinq niveaux de type cascade en pont H

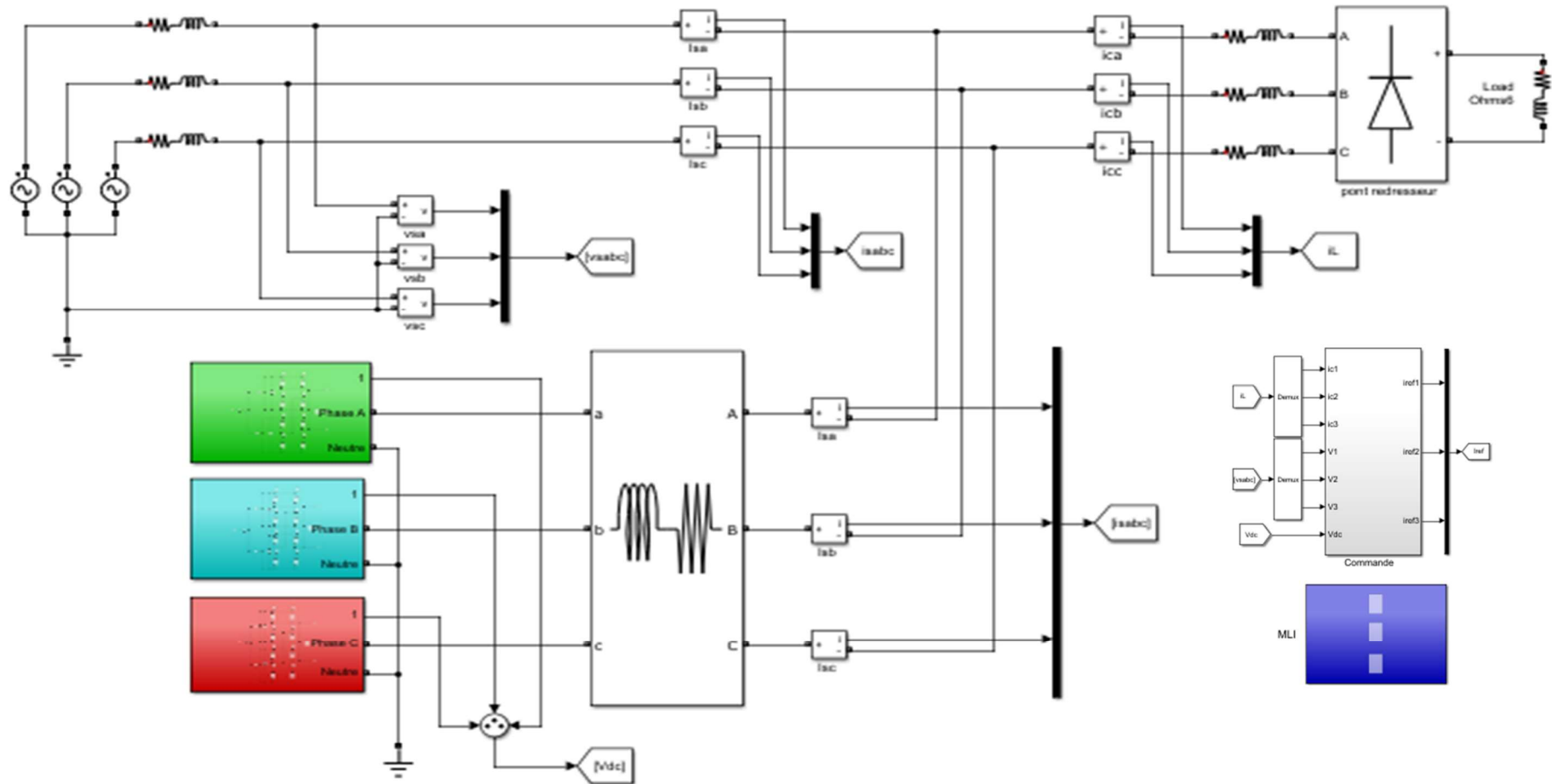


Figure III-41 : Schéma général de la simulation de l'onduleur cinq niveaux cascade en pont H.

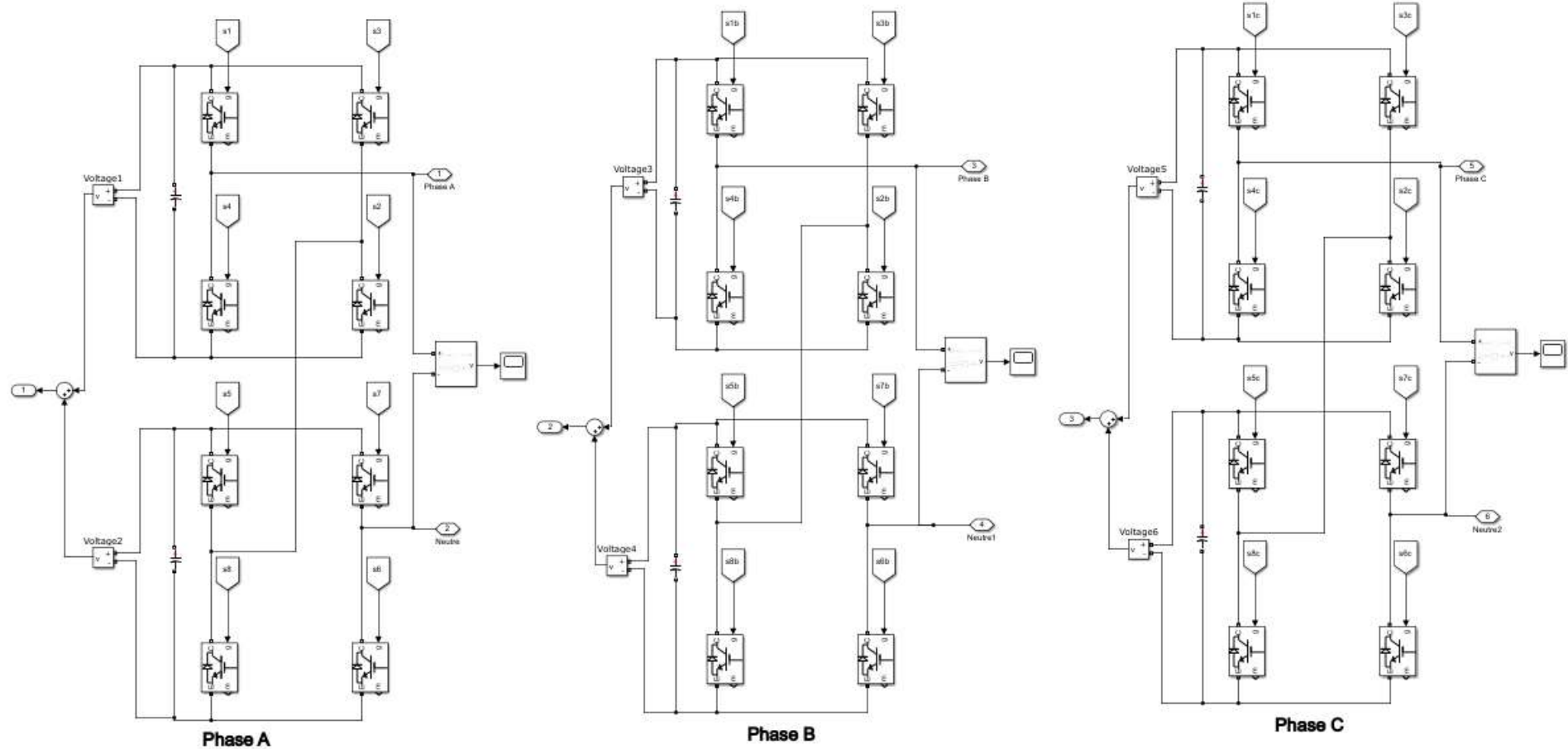
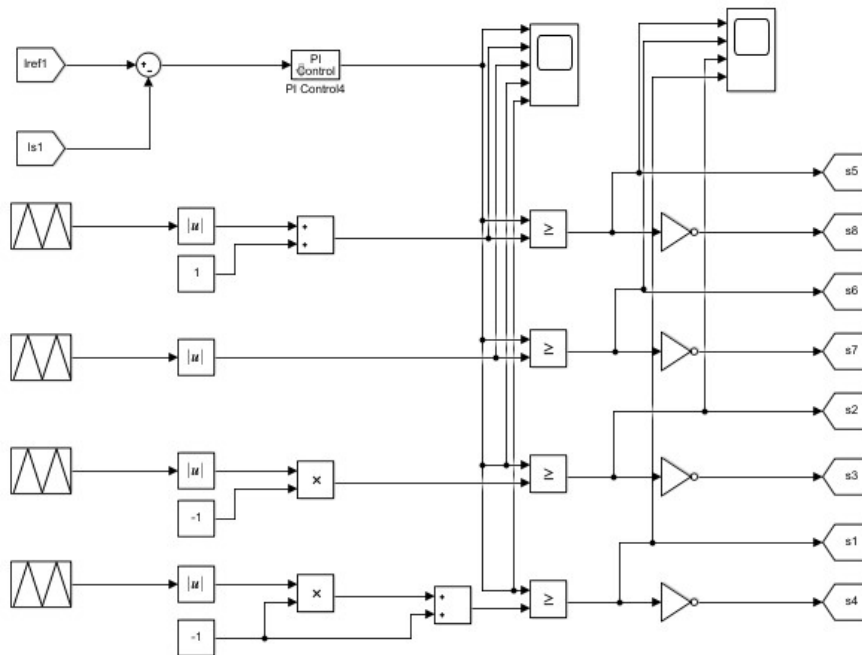


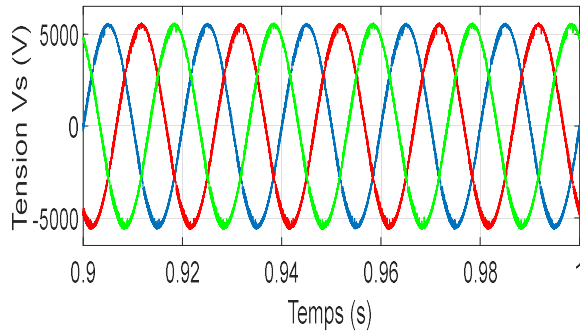
Figure III-42 : Schéma d'un pont H (H-bridge) cinq niveaux

La MLI pour commander les interrupteurs de notre filtre actif de puissance est illustré sur la figure suivante :

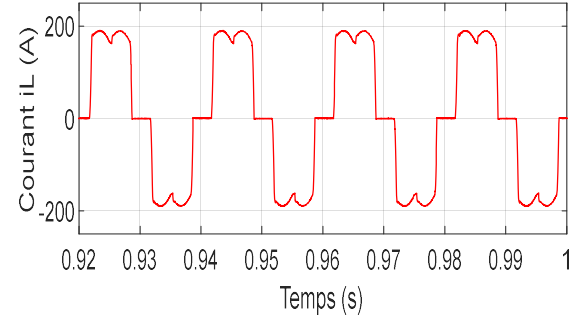


**Figure III-43 : Schéma de la commande MLI de l'onduleur cinq niveaux de type cascade en pont H**

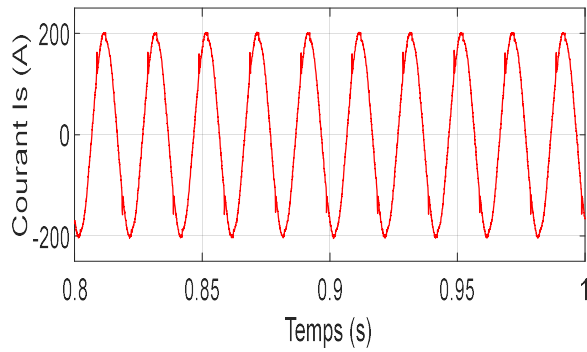
Les résultats de simulation de notre système complet qui comporte un réseau électrique alimentant une charge non linéaire et d'un filtre actif de puissance de type cascade en pont H à cinq niveaux sont illustré sur les figures suivantes :



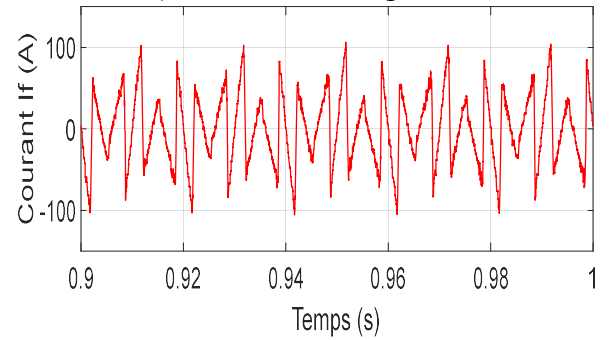
a) Tension de réseau



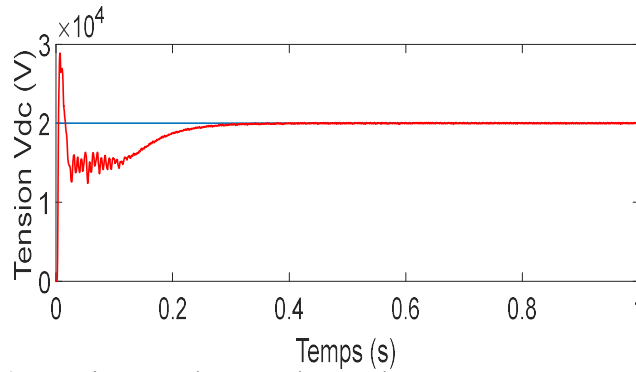
b) Courant de charge



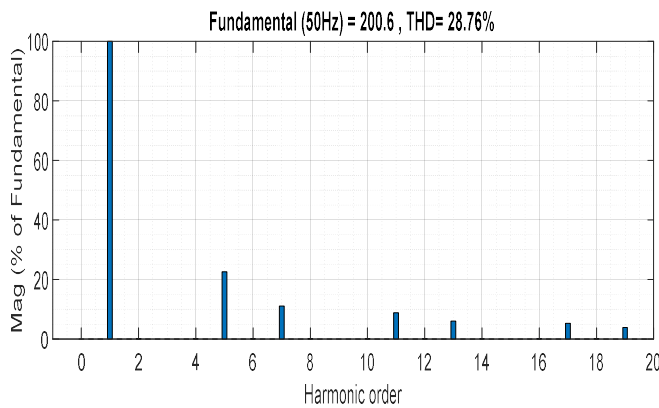
c) Courant de source



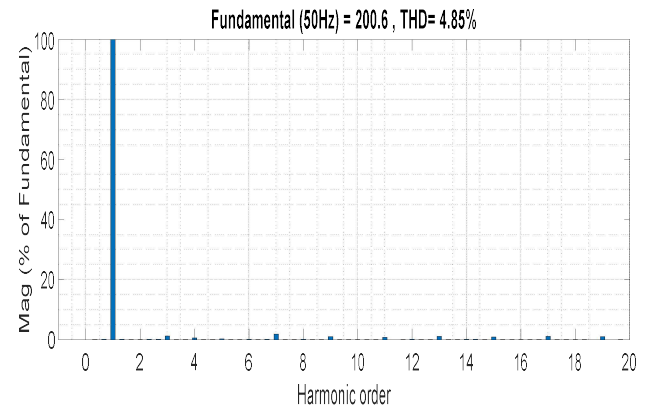
d) Courant injecté



e) Tension aux bornes de condensateur



f) Analyse spectrale du courant de la charge ( THD=28.76%)  
la



g) Analyse spectrale du courant de source ( THD= 4.85%)

Figure III-44 : Résultats de simulation du FAP cinq niveaux de type cascade en pont H

La figure (III-44.a) illustre la tension cotée source qui est sinusoïdale. Les figures (III-44.b.c.d) illustrent respectivement les courants de la charge, de source et le courant injecté par le FAP cinq niveaux de type pont H pour une seule phase. La figure (III-44.e) illustre la tension aux bornes du condensateur, nous remarquons qu'il est constant. Les figures (III-44.f.e.g) montrent respectivement les spectres harmoniques des courants avant et après filtrage. Le spectre harmonique obtenus montre que les harmoniques après sont éliminés. Nous remarquons de ces figures que le THD du courant de charge avant filtrage est de 28.76%, ce qui est une valeur élevée et qui ne respecte pas la norme CEI. Mais après filtrage nous remarquons que le THD égale à 4.85% ce qui respecte la norme CEI.

### III.6. Conclusion

Les FAP de tension sont des convertisseurs statiques alimentés par une source de tension continue pour fournir une tension constante qui injecte des courants harmoniques en opposition de phase pour compenser les courants harmoniques. Le principal inconvénient des onduleurs conventionnels (à deux niveaux) est qu'ils produisent une tension non sinusoïdale à leur sortie, ce qui conduit à une dégradation du régime de charge, ces tensions de départ sont assez élevées en harmoniques, nécessitant leur réduction. Les onduleurs conventionnels ne conviennent qu'aux applications de faible à moyenne puissance.

Contrairement, les onduleurs à plusieurs niveaux de tensions sont très employés dans les moyennes et hautes tensions. Les onduleurs multiniveaux présentent un certain nombre d'avantages par rapport aux onduleurs à deux niveaux conventionnels. Il apparaît aussi que, lorsque le nombre de niveaux devient significatif, les onduleurs avec des cellules en cascade semblent être l'option multiniveau la plus avantageuse. Cependant, l'exigence d'isoler l'alimentation de chaque cascade en pont en H est un problème par rapport à l'onduleur NPC. En fait, pour les applications triphasées avec un petit nombre de niveaux, les onduleurs NPC sont attrayants parce que les condensateurs sont partagés par les différentes branches, ce qui permet un équilibre de puissance entre les phases.

Cet équilibre permet une réduction significative de la taille des condensateurs intermédiaires. Nous avons montré dans les simulations que ce type de filtre actif de puissance donne de très bon résultat de compensation des harmoniques.

---

---

# Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire se concentre sur l'analyse et la modélisation de filtre actif de puissance parallèle multi-niveaux, que nous avons divisé en trois chapitres. Dans le premier chapitre, nous avons examiné les nombreuses causes de la pollution des réseaux, leurs effets sur le réseau et les diverses méthodes de contrôle de la pollution proposées dans la littérature. Le deuxième chapitre a été consacré à l'étude du filtre actif de puissance parallèle de deux niveaux, que nous avons divisé en deux parties : une section de puissance dans laquelle nous avons présenté les différentes parties qui composent le filtre actif de parallèle et leurs fonctions, et une section concernant les différentes stratégies de commande qui existe dans laquelle nous avons d'abord identifié les harmoniques générés par la charge non linéaire. Cela a conduit au développement des méthodes d'identification des courants harmoniques par la méthode des puissances instantanées et la méthode du référentiel lié au synchronisme.

Par la suite, nous sommes passés au régulateur de tension. Enfin, nous avons présenté et utilisé deux méthodes de contrôle, à avoir l'hystérésis et la MLI, et nous avons découvert que le contrôle MLI nécessite l'ajout du régulateur PI pour chaque phase du courant.

Toutes nos simulations ont été réalisées dans l'environnement MATLAB / sympower system, et les résultats ont montré que les deux types de commandes hystérésis et MLI répondent aux exigences, mais nous sommes plus intéressés à la commande MLI car nous voulions étendre la sphère d'application des filtres actifs de puissance parallèles d'un deux niveaux, à un multi niveau dans le troisième chapitre. Nous avons commencé par un aperçu des différents types d'onduleurs multi-niveaux qui existent et leurs topologies. Puis nous avons montré les MLI utilisés pour le type NPC et cascade en pont H que ce soit pour le trois niveaux et les cinq niveaux.

Enfin, nous avons fait des simulations du filtre actif de puissance de trois et de cinq niveaux de types NPC et cascade en pont H par matlab / sympower system. Les résultats sont concluants quant à la qualité des signaux obtenus après filtrage. Les résultats de la simulation ont révélé la valeur des filtres actifs 2 niveaux et multi-niveaux, notamment en termes de finesse des courbes de courant obtenues, de réduction des ondulations de courant et d'amélioration notable du taux de distorsion harmonique.

En passant, il serait intéressant d'étudier une autre stratégie de commande pour voir si de meilleurs résultats peuvent être obtenus, que ce soit pour les filtres actifs de puissance utilisant un onduleur à deux niveaux ou des onduleurs multi niveaux. De plus, il serait intéressant d'étudier d'autres topologies de filtres actifs de puissance multi-niveaux.

## Références bibliographiques

- [1] **ABDELATIF Med Elhadi**. « Étude comparative de différentes méthodes de compensation active d'énergie électrique », mémoire de Master. Université de M'sila, 2013.
- [2] **P. Meynaud**, Qualité de la tension dans les réseaux électriques, vol. 260, techniques de L'ingénieur, traité Génie électrique, 1990, pp. 1-25.
- [3] **BOUACIDA FARIDA ZEBIRI MANEL** « Qualité de l'énergie électrique et norme IEEE-519 » Université Larbi Ben Mhidi, Oum El-Bouaghi 2009
- [4] **Bourache Abdelkrim, GALOUL Fayçal**, « Etude Par Simulation D'un Filtre Actif Parallèle », mémoire d'ingénieur, Université de Msila, 2006.
- [5] **NADJI DJAMEL CHIKH NADIR** « Etude des Filtres pour Amélioration de la Qualité de l'Energie Electrique » Université de Msila, Juillet 2021.
- [6] **S. GUFFON** « Modélisation et commande à structure variable de filtres actifs de puissance. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2000. »
- [7] **D. OULD ABDESLAM** « Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension. Thèse de Doctorat, Université de Haute-Alsace, U.F.R. des Sciences et Techniques, 2005.
- [8] **BENABDELKADER Abdallah** « FILTRAGE ACTIF SERIE Etude et implémentation » Université de Oran 2019
- [9] **Tlili Abdenacer Bouari Ahmed** « Etude et simulation d'un filtre actif parallèle en utilisant un onduleur à trois niveaux avec la commande MLI vectorielle » KASDI MERBAH OUARGLA ,2015.
- [10] **YOUSFI ABDELKADER**, « AMELIORATION DE LA QUALITE D'ENERGIE ELECTRIQUE EN UTILISANT UN ONDULEUR DE TENSION A CINQ NIVEAUX » Université Hassiba Benbouali de Chlef 2008.
- [11] **Mohamed Muftah ABDUSALAM**, « Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales », Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, Mai 2008.
- [12] **SAHLI ABDESLEM** « FILTRAGE ACTIF ET CONTROLE DE PUISSANCES :

APPLICATION AUX SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES INTERCONNECTES AU RESEAU Thèse de Magister », Université de Sétif, 2012.

[13] **DJAFFAR OULD ABDESLAM.** « Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension », Thèse de doctorat de l'université de Haute Alsace 08 décembre 2005

[14] **S. NIA,** « Contribution à l'étude théorique et expérimentale d'un filtre actif parallèle à commandes analogique et numérique temps réel ». Thèse de doctorat de l'I.N.P.L, Nancy, (France) 1996.

[15] **N. BRYANT**«*Etude* et commande généralisée de filtres actifs parallèles : Compensation globale ou sélective des harmoniques : Régime équilibré ou déséquilibré. Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 1999.

[16] **MAE. ALALI** «Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques Basses Tension.

Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur – Strasbourg I, 2002.

[17] **P. LADOUX, G. OLLÉ** «Système didactique, Compensateur d'harmoniques et de puissance réactive. Publication RESELEC 2002.

[18] **Y. KEBBATI,** «**Développement** d'une méthodologie de conception matériel à base de modules génétiques VHDL / VHDL-AMS en vue d'une intégration de systèmes de commande électrique.

Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur – Strasbourg I, 2002.

[19] **D. OULD ABDESLAM** «Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension. Thèse de Doctorat, Université de Haute-Alsace, U.F.R. des Sciences et Techniques, 2005

[20] **D. OULD ABDESLAM, P. WIRA, J. MERKLE, Y-A. CHAPUIS, D. FLIELLER** Stratégie neuromimétique d'identification et de commande d'un filtre actif parallèle. Revue des Systèmes, Série Revue Internationale de Génie Electrique (RSRIGE), vol. 9, no. 1, pp 35-64, 2006.

[21] **D. OULD ABDESLAM, P. WIRA, D. FLIELLER, J. MERKLE**

Power harmonic identification and compensation with an artificial neural network method.



International Symposium on Industrial Electronics (ISIE'2006), Montreal, Canada, 2006.

[22] **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.

[23] **M. AOUES**, Filtrage actif des harmoniques générés par un redresseur triphasé.

Mémoire de Magister, Université Mouloud MAMMARI de Tizi-Ouzou, 2004.

[24] **M. Fatiha**, « Etude et Commande d'un Filtre Actif Parallèle à Structure de Tension », Mémoire de Magister, Univ. Oran, Octobre 2001.

[25] **A. AMARA & A.Y. BENGANA**, « Etude et simulation d'un circuit de commande pour un filtre actif de puissance parallèle à deux bras à point milieu pour un réseau électrique à trois fils », mémoire de master, université Abou BEKR BELKAID de Tlemcen, 25 juin 2015

[26] **Aeb.TIAIBA**, « Utilisation d'un onduleur multi niveau pour la compensation de l'énergie électrique », UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF- M'SILA

[27] **J. Zeng, C. Yu, Q. Qi, Z. yan, Y. Ni, B.L. Zhang, S. Chen, Felix F and Wu**, « A nouvel hysteresis current control for active power filter with constant frequency ». Electric Power System Research, Vol. 68, pp 75-82, (2004).

[28] **M. Madjid BOUDJEDAIMI**, Commande d'un onduleur par des approches basées sur des réseaux de neurones artificiels Mémoire de MAGISTER UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI TIZI OUZOU, 27septembre2009

[29] **Zergoune M A et Hideb A**, "Commande d'onduleur multiniveaux à structure en Cascade par stratégie d'élimination d'harmonique sélective," Université Kasdi Merbah d'Ouargla, 2017.

[30] **B. KHALIFA**, «Réalisation d'un banc d'essai pour la Commande et l'Observation des Convertisseur Multicellulaires Série», Approche Hybride. Grade de docteur Université de cergy- pontoise 2009.

[31] **B.LAKEHAL**, « Modélisation et commande d'un onduleur triphasé à structure multiniveau », Université A/Mira - Bejaia Faculté de Technologie Département de Génie électrique

[32] **X. Hu and L. Zhang**, A predictive direct torque control scheme for a threelevel VSI fed induction motor drive, Electrical Machines and Drives, 1999.Ninth International Conference on, pp.334-338, Conf. Publ. No. 468, 1999.

- [33] **T. Nassim, M. Khaled**, Etude des différentes stratégies de commande de l'onduleur 5 niveaux à structure NPC, Mémoire de fin d'étude, Université A. MIRA de Bejaia, 2015.
- [34] **Roberto Rojas, Tokuo Ohnishi, Takayuki Suzuki**, « An Improved Voltage Vector Control Method for Neutral Point Clamped Inverters », IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 10, N°6, pp. 666-672, November 1995.
- [35] **Ying Cheng, Chang Qian, Mariesa L. Crow, Steve Pekarek**, « A Comparison of Diode-Clamped and Cascaded Multilevel Converters for a STATCOM With Energy Storage » Industrial Electronics, IEEE Transactions on Volume 53, Issue 5, Oct. 2006 Page(s): 1512 - 1521.
- [35] **Kelaiaia Mounia Samira**, « Amélioration de la Qualité d'Énergie Délivrée Par Un Onduleur Multiniveaux Alimentant Une Machine Asynchrone A Cage » Thèse De Doctorat, Département d'Electrotechnique, 2007.
- [36] **BOUAKAZ OUAHID**, « Contribution à l'Analyse des Onduleurs Multiniveaux Fonctionnement Symétrique et asymétrique », Mémoire d'ingénieur d'état, Département d'électrotechnique, université de Batna, 2005
- [37] **N. Celanovic**, « Space Vector Modulation and Control of Multilevel Converters », Ph.D Thesis, Virginia Polytechnic Institute, 2000.
- [38] **Joseph SONG MANGUELLE**, Convertisseurs multiniveaux asymétriques alimentés par transformateurs multi-secondaires basse-fréquence : réactions au réseau d'alimentation, Thèse n° 3033 (2004), École Polytechnique Fédérale de LAUSANNE, Suisse.
- [39] **Kambiz Arab Tehrani**, Conception, Synthèse et Application d'une Nouvelle Commande Robuste par PID Fractionnaire pour Les Onduleurs Multiniveaux, Pour obtenir le grade de Docteur de l'INPL, Université de Lorraine-Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL), 2010.
- [40] **Faiçal Mnif** « Etude et Réalisation des lois de commande par mode de Glissement et par approche Géométrique : Application à un Onduleur De Tension Monophasés », Thèse présentée à l'université du Québec à Trois-Rivières Comme Exigence Pour l'obtention du Diplôme de maîtrise sciences appliquées en électronique industrielle, Université du Québec.1991

## ملخص:

تعد مشكلة التلوث التوافقي في شبكات توزيع الطاقة الكهربائية حالياً من أكبر المشكلات بسبب الأحمال غير الخطية. أثبتت الحلول الكلاسيكية أنها غير كافية. ظهرت حلول حديثة وفعالة، ويتناول العمل المقدم في هذه الأطروحة حلاً حديثاً للتحكم في التلوث التوافقي وهو مرشح الطاقة النشط متعدد المستويات. لقد درسنا وحاكينا طوبولوجيين، وهما طوبولوجيا **NPC** وطوبولوجيا سلسلة **H-bridge**، والتي استخدمنا منها طريقة القوى اللحظية الحقيقية والخيالية **p-q** عن طريق التحكم الغير المباشر في النوع، واستخدمنا وحدة التحكم الحالية **PWM** مع **PI** منظم للتحكم فيه وتنظيمه. أظهرت نتائج المحاكاة فعاليتها في التخلص من التوافقيات الحالية.

## Résumé :

Le problème de la pollution harmonique dans les réseaux de distribution d'énergie électrique est actuellement l'un des plus grands problèmes dus aux charges non linéaires. Les solutions classiques sont avérées insuffisantes. Des solutions modernes et efficaces ont émergé, et le travail présenté dans cette mémoire aborde une solution moderne de contrôle de la pollution harmonique qui est le filtre actif de puissance multi-niveaux. Nous avons étudié et simulé deux topologies à savoir la topologie **NPC** et la topologie cascade en pont **H**, dont nous avons utilisé la méthode des puissances instantanées réels et imaginaires **p-q** par une commande de type indirecte, et on a utilisé contrôleur de courant de **MLI** avec un régulateur **PI** pour le commandé et le réguler. Les résultats de simulation ont montré qu'il leurs efficacités pour éliminer les harmoniques de courant.

## Abstract:

The problem of harmonic pollution in electrical power distribution networks is currently one of the biggest problems due to nonlinear loads. Classical solutions have proven to be insufficient. Modern and effective solutions have emerged, and the work presented in this Master thesis addresses a modern solution for controlling harmonic pollution which is the active multi-level power filter. We have studied and simulated two topologies, namely the **NPC** topology and the **H-bridge** cascade topology, of which we have used the method of real and imaginary instantaneous powers **p-q** by an indirect type control, and we have used **PWM** current controller with a **PI** regulator to control and regulate it. Simulation results showed their effectiveness in eliminating current harmonics.