

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



Université Dr. Tahar Moulay de Saïda  
Faculté de la Technologie  
Département d'Electrotechnique



## Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de

**Master (LMD)**

**Spécialité : ÉLECTROTECHNIQUES INDUSTRIELLE**

**Filière : ELECTROTECHNIQUE**

Intitulé :

**Commande d'un Filtre Actif Parallèle à structure  
tension par la logique floue**

Présenté par :

**KERROUCHE MUSTAPHA BOUALEM  
ZAOUI HAKKOU**

Devant le jury composé de :

**AMARA MOHAMED  
MEKRI FATIHA  
RACHDI MOHAMED**

Président  
Encadreur  
Examineur

Soutenu le .../.../2020  
Promotion 2019-2020

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



Université Dr. Tahar Moulay de Saïda  
Faculté de la Technologie  
Département d'Electrotechnique



## **Mémoire de Fin d'Etudes**

En vue de l'obtention du diplôme de

**Master (LMD)**

**Spécialité : ÉLECTROTECHNIQUES INDUSTRIELLE**

**Filière : ELECTROTECHNIQUE**

Intitulé :

---

**Commande d'un Filtre Actif Parallèle à structure  
tension par la logique floue**

---

Présenté par :

**KERROUCHE MUSTAPHA BOUALEM  
ZAOUI HAKKOU**

Devant le jury composé de :

**AMARA MOHAMED  
MEKRI FATIHA  
RACHDI MOHAMED**

Président  
Encadreur  
Examineur

Soutenu le .../.../2020  
Promotion 2019-2020

# Remerciements

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à MEKRIN FATIHA qu'elle a assuré la direction scientifique de ce travail .Au cours de cette année, j'ai pu apprécier, d'un encadrement scientifique de qualité.je la remercie pour ses conseil pertinents et éclairés, son aide était pour moi d'une importance capitale dans la réalisation de ce travail. Qu'elle trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Mes remerciements vont également à tous mes enseignants qui m'ont fait l'honneur de participer au jury pour pouvoir évaluer ce mémoire.

Je voudrais remercier tout particulièrement ma mère et mon père pour tout ce qu'ils ont fait pour moi .ils ont fait beaucoup de sacrifices pour moi afin de m'offrir toutes les conditions nécessaires pour que je puisse devenir ce que je suis .je voudrais remercier mon grand frère KERROUCHE KAMEL DJAMEL EDDINE pour son encouragement.

Au dessus de tout, je remercie Dieu Tout Puissant, car ces travaux ne peuvent pas être réalisés sans son aide .Il m'a donné la chance d'avoir des enseignants qui me soutiennent énormément, et de m'accompagner jusqu'au bout dans toutes les épreuves.

# Sommaire

<b>Introduction Général.....</b>	<b>06</b>
<b>Chapitre I : Généralités Sur Les Perturbations des Réseaux électriques.....</b>	<b>08</b>
<b>Chapitre II: Commande du Filtre Actif Parallèle par régulateur PI classique.....</b>	<b>19</b>
<b>Chapitre III: Commande non-linéaire D'un Filtre Actif Parallèle par PI flou.....</b>	<b>34</b>
<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>47</b>
<b>Référence Bibliographiques.....</b>	<b>50</b>

# Lite des tableaux

Tableau I .1 .Niveau de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux basse tension.....	14
Tableau II.1.Tensions générées par l'onduleur.....	24
Tableau III.1.Table d'inférence.....	42

# Table des figures

Figure I.1.Redresseur monophasé alimente une charge RC.....	11
Figure I.2.Pont redresseur triphasé.....	11
Figure I.3.Diagramme de fresnal de la puissance déformance.....	13
Figure I.4.Raccordement d'une inductance anti-harmonique.....	15
Figure I.5.Deux montages d'un Pont dodécaphasé.....	15
Figure I.6.Forme de courant et rang d'harmonique du pont dodécaphasé.....	16
Figure I.7.Filtre résonant.....	16
Figure I.8.Filtre amorti.....	16
Figure I.9.Redresseur MLI.....	17
Figure I.10.Filtre actif série.....	17
Figure I.11.Filtre actif parallèle.....	17
Figure I.12.Filtre hybride (Filtre mixte).....	17
Figure I.13.Correcteur de facteur de puissance PFC.....	18
Figure II.1.Schéma explicative d'un filtre actif parallèle.....	22
Figure II.2.Structure d'onduleur de tension triphasée.....	23
Figure II.3.Interrupteur utilisé dans l'onduleur.....	23
Figure II.4.Filtre passe bas utilisé pour extraction des composantes harmoniques.....	26
Figure II.5.Puissances réactives.....	26
Figure II.6.Puissances actives.....	27
Figure II.7.Méthode d'extraction des courants de référence.....	27
Figure II.8.Schéma simplifié de la boucle de contrôle du filtre actif.....	28
Figure II.9.Comparaisons de la modulante avec un signal triangulaire.....	28
Figure II.10.Principe de commande des courants par MLI.....	29
Figure II.11.Schéma global de la régulation du courant par MLI.....	29
Figure II.12.Schéma simplifié de la régulation du courant par MLI.....	29
Figure II.13.Schéma global du système à simuler.....	30
Figure II.14.Tensions du réseau triphasé.....	31
Figure II.15.Compensation des courants harmoniques.....	31
Figure II.16.Courant et tension de source.....	31
Figure II.17.Spectre du courant absorbé par la charge $I_{ch}$ (avant compensation).....	32
Figure II.18.Spectre du courant de source après filtrage $I_s$ .....	32
Figure II.19.Compensation des courants harmoniques et du courant réactif.....	33
Figure II.20.Courant et tension de source.....	33
Figure III.1.Filtre actif parallèle avec régulation du courant.....	36
Figure III.2.Schéma général d'un système flou.....	37
Figure III.3.Fonctions d'appartenance.....	38
Figure III.4.Agrégation des règles de sortie.....	39
Figure III.5.Défuzzification par centre de gravité.....	39
Figure III.6.Structure de base s'un régulateur flou.....	40
Figure III.7.Fonction d'appartenance de la variable d'entrer E (erreur).....	40
Figure III.8.Fonction d'appartenance de la variable d'entrer Ê (dérive de l'erreur).....	41
Figure III.9.Fonction d'appartenance de la variable de sortie U.....	41
Figure III.10.Compensation des courants harmoniques.....	42
Figure III.11.Courant et tension de source.....	43
Figure III.12.Courant harmonique injecté au réseau $I_f$ avec sa référence.....	43
Figure III.13.Spectre du courant absorbé par la charge $I_{ch}$ .....	44
Figure III.14.Spectre du courant de source après filtrage $I_s$ .....	44
Figure III.15.Compensation des courants harmoniques et des courants réactifs.....	45

Figure III.16.courant et tension de source.....	45
Figure III.17.Courant harmonique injecté au réseau $I_f$ avec sa référence.....	45

# Liste des Acronymes

PFC : Correcteur de facteur de puissance (Power Factor Corrector)

THD : Taux de Distorsion Harmonique

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion

PD2 : Parallèle double (Pont Redresseur)

C.E.M : Compatibilité Electro Magnétique

CEI : Communauté des Etats Indépendants

AC : Courant Alternatif (Alternating Current)

MW: Mega Watt

IGBT: Transistor Bipolaire à Grille Isolée (Insulated Gate Bipolar Transistor)

GTO: Thyristor à Extinction par La Gâchette (Gate Turn-Off Thyristor)

MOSFAT : Transistor à Effet de Champ à Grille Isolée (Metal Oxide Semiconductor)

PI : Proportionnel Intégrateur

FFT : Transformation de Fourier Rapide (Fast Fourier Transform)

# Introduction Générale

# Introduction Générale

---

L'énergie électrique est généralement distribuée sous la forme de trois tensions constituant un système sinusoïdal triphasé. De nos jours, la situation au niveau des réseaux d'énergies électriques est devenue très préoccupante, la qualité du courant dans les installations électriques se dégrade incontestablement due à un nombre croissant des charges non linéaires (les redresseurs commandés tels que les convertisseurs à thyristors et les redresseurs non commandés comme les redresseurs à diodes, les variateurs de vitesse réglables....etc.) en absorbant des courants harmoniques et en consommant la puissance réactive dans le réseau. Le problème principal parmi les imperfections rencontrées est un faible facteur de puissance, une augmentation des pertes, et un échauffement excessif de l'équipement [1].

Pour la compensation de la pollution harmonique, des différentes des solutions ont été proposées dans la littérature [2,3]. Des solutions traditionnelles tels que l'utilisation d'inductances anti-harmoniques, agir sur la structure de l'installation, et pont dodécaphasé. Des solutions modernes comme les redresseurs à MLI ou Correction du Facteur de Puissance (PFC) et les filtres actifs. De plus, les technologies de filtrage modernes peuvent devenir une solution efficace pour résoudre et éliminer la plupart des problèmes liés à la de qualité de l'énergie électrique. Ils sont considérés comme solution pour l'amélioration du facteur de puissance et compensations des harmoniques de courant et/ou tension. Les filtres actifs sont contrôlables avec une réponse rapide mais de coût élevé. Ils peuvent être mis en série ou en parallèle avec les charges. Le filtre actif connecté en parallèle à la charge non linéaire est une solution aux problèmes de courant harmonique.

Ainsi, nous organiserons notre mémoire selon le plan suivant :

Dans le premier chapitre, nous étudierons la pollution harmonique en courant et en tension dans réseau électrique et leurs effets indésirables sur les installations et les équipements électriques, ainsi que les solutions traditionnelles et modernes pour la dépolluer les réseaux électriques.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons la structure générale d'un filtre actif parallèle permettant de compenser les courants harmoniques présents sur les réseaux électriques. Dans ce chapitre, nous nous intéresserons à l'étude de la partie puissance qui aborde la structure et la modélisation de l'onduleur à base de semi-conducteurs de puissance commandables à l'amorçage et au blocage (GTO, IGBT, MOSFET) avec des diodes en antiparallèle, un circuit de stockage d'énergie et un filtre de sortie RL. La partie commande du filtre actif parallèle est constituée d'un bloc d'identification des courants harmoniques par la méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées et de la régulation du courant injecté sur le réseau à partir d'un l'onduleur de tension à commande MLI à base d'un contrôleur PI. Ensuite nous aborderons les résultats de la simulation obtenus sous MATLAB.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons les outils de base de la logique floue et la structure générale du régulateur flou, utilisé dans la boucle de régulation du courant. Des résultats de simulation du système étudié seront présentés. Ce mémoire sera clôturé par une conclusion générale.

# **Chapitre I Généralités Sur Les Perturbations des Réseaux électriques**

# Sommaire

- I.1 Introduction .....10
- I.2 Caractéristiques des perturbations électriques en courant et en tension.....10
- I.3 Perturbation harmonique en courant et en tension.....10
- I.4 Les effets des harmoniques.....11
- I.5 Réglementation.....14
- I.6 Solutions aux problèmes engendrés par les perturbations.....14
  - I.6.1 Solutions traditionnelles.....14
  - I.6.2 Solutions modernes.....16
- I.7 Conclusion.....18

## I.1 Introduction

Il existe dans les réseaux électriques des composantes causant l'apparition de courants et/ou tensions non-sinusoïdaux tels que les convertisseurs statique (redresseur, onduleur, etc.), les fours à arcs, ou tout autre charge non-linéaire. Ces charges non-linéaires créent des courants harmoniques dans le réseau. Les courants harmoniques de rang 3 s'additionnent dans le neutre. Pour des charges non-linéaires élevées, ceci peut produire des courants élevés qui risquent de surchauffer le neutre [4]. La présence de courants et de tensions harmoniques dans le réseau provoque beaucoup de perturbations qui ont des répercussions sur le facteur de puissance, pertes Joules supplémentaires, interférences, et dysfonctionnement d'appareils, etc. Dans ce chapitre, nous présenterons les problèmes dues perturbations harmoniques des courants et/ou tension et les solutions aux problèmes engendrés par ces perturbations.

## I.2 caractéristique de la qualité de l'énergie électrique

Ces perturbations résultent de la superposition, sur l'onde fondamentale à 50Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples de celle de la fondamentale.

L'énergie électrique est délivrée sous forme d'un système de tensions, alternatif, triphasé, qui est caractérisé par :

- la fréquence,
- l'amplitude des trois tensions,
- la forme d'onde doit être la plus proche possible d'une sinusoïde,
- la symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leur déphasage relatif.

## I.3 Perturbation harmonique en courant et en tension

Les convertisseurs électroniques et l'électronique de puissance ont donné naissance à de nombreuses applications nouvelles, offrant aux clients un confort, une flexibilité et une efficacité inégalables. Mais leur prolifération au cours de la dernière décennie est devenue préoccupante et se trouve à l'origine de problèmes dont le nombre ne cesse de croître. Ces charges électroniques polluent non seulement le réseau de distribution de courant alternatif, mais elles sont aussi très sensibles à la distorsion de la tension [5]. Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences quelconques [6].

Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique. Les perturbations évoquées dans ce chapitre découlent directement de la prolifération des charges qui consomment un courant non sinusoïdal, appelées « charges non linéaires ». Ce type de charge est utilisé pour assurer la conversion, la variation et la régulation du courant électrique dans les installations commerciales (informatique ou éclairage dans les bureaux,...), industrielles (utilisation des gradateurs, des redresseurs, des variateurs de vitesse...) et résidentielles (téléviseurs, appareils électroménagers en grand nombre) [5], [6]... De récentes études ont démontré que la consommation de courant non linéaire va augmenter de façon très abrupte dans les prochaines années. Il existe aussi une autre perturbation harmonique qui s'appelle les inters harmoniques qui sont des signaux non multiples de la fréquence industrielle. Les variateurs de vitesses pour machines asynchrones, les fours à arc sont les principaux générateurs d'inter harmoniques [7], [8].

Les dispositifs générateurs d'harmoniques sont présents dans tous les secteurs industriels, tertiaires et domestiques. Les harmoniques sont le fait d'une charge non-linéaire, le courant qu'elle absorbe n'a pas la même forme que la tension qu'il alimente.

- Redresseur monophasé :

Le schéma de la figure I.1 représente un redresseur à diodes appelé aussi Pont de Graëtz ou PD2, comme la montre la figure. I.1 (a). Un pont redresseur à quatre diodes qui alimente une charge RC, ce redresseur absorbe un courant non sinusoïdal, figure. I.1 (b) [11].

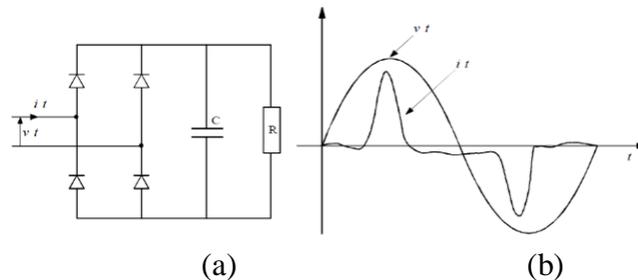


Figure I.1.Redresseur monophasé alimente une charge RC

- Pont redresseur triphasé :

Les courants de phase  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$ , ont théoriquement des forme rectangulaire le développement en série de Fourier de ce signal rectangulaire nous donne les courants harmoniques de rang (5, 7,11,...), figure I.2(b).

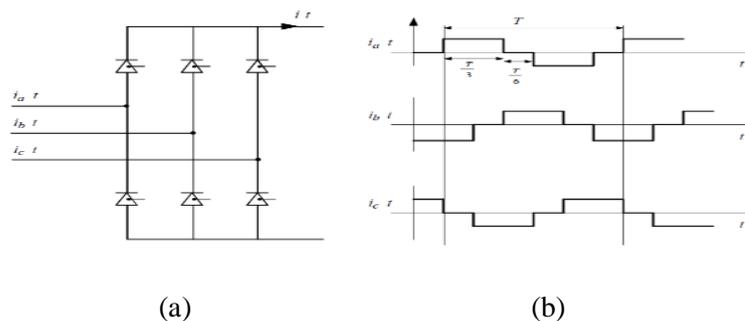


Figure I.2.Pont redresseur triphasé

- Charges d'éclairage : Les lampes à décharge avec ballast électronique fournissent des courants harmoniques de valeur comparable à celle d'un redresseur monophasé [11], [12].
- Les appareils à arc électrique : Les appareils à arc électrique regroupent les fours à arc à courant alternatif, dont la puissance peut atteindre plusieurs dizaines de MW, et les machines de soudure à l'arc, à courant alternatif ou continu [11], [13].
- Saturation du circuit magnétique des machines : Les machines (transformateurs, moteurs,...) sont dimensionnées pour fonctionner proches de la limite de la saturation magnétique pour la tension nominale d'alimentation. Lorsque celle-ci est anormalement élevée (supérieure à 1,1 fois la tension nominale), les circuits magnétiques saturent et les courants sont déformés. La machine génère alors des courants harmoniques de rang impair [11].

## I.4. Les effets des harmoniques

De nombreux effets des harmoniques sur les installations et les équipements électriques peuvent être cités, les plus importants sont l'échauffement et l'interférence avec les réseaux électriques.

# Chapitre I Généralités sur Les Perturbations des Réseaux électrique

---

- L'échauffement : Les pertes totales par effet Joule (équation I.1) sont la somme de celles du fondamental et des harmoniques :

$$P_{pertes} = \sum_{k=1}^{\infty} I_h^2 \times R \quad \text{I.1}$$

$I_h$ : Le courant harmonique de rang h

R : la résistance traversée par le courant  $I_h$ .

Les harmoniques augmentent aussi les pertes fer (pertes par courants de Foucault), qui se traduisent par une fatigue prématurée amenant à un déclassement des équipements. Ces pertes supplémentaires occasionnées par la présence des courants harmoniques réduisent remarquablement le rendement des équipements tels que les moteurs, les transformateurs,...

- Le vieillissement des isolants est souvent dû à une contrainte en tension consécutive à la présence de la tension harmonique, et donc à une augmentation locale du courant de fuite, ou encore à l'échauffement exagéré dans les conducteurs. Le plus spectaculaire de ce type d'effet est la destruction d'équipement (condensateur, disjoncteur...).
- L'interférence dans les systèmes de télécommunication : Le couplage électromagnétique entre les réseaux électriques et de télécommunication peut provoquer des interférences. L'importance de ces interférences est en fonction de l'amplitude et de la fréquence des courants électriques ainsi que de l'importance du couplage électromagnétique entre les réseaux. Dans le cas de résonance, une partie des réseaux de télécommunication peut être rendue inutilisable. On parle ici de Compatibilité Electromagnétique (C.E.M) afin de caractériser l'aptitude d'un appareil, ou d'un dispositif, à fonctionner normalement dans un environnement électromagnétique sans qu'il produise des perturbations nuisibles aux autres appareils ou dispositifs.
- Dysfonctionnement de certains équipements électriques : En présence des harmoniques, la tension ou/et le courant peut changer plusieurs fois de signe dans une demi période, par conséquent, les équipements sensibles au passage par zéro de ces grandeurs électriques sont perturbés.
- Le risque d'excitation du phénomène de résonance : c'est un effet instantané, les équipements constitués de capacités ou d'inductances peuvent avoir des fréquences de résonance normalement élevées. Ce n'est pas le cas lorsque des batteries de capacité sont raccordées au réseau pour relever le facteur de puissance, les fréquences de résonance peuvent devenir assez faibles, et coïncider ainsi avec celles des harmoniques engendrés par les convertisseurs statiques. Dans ce cas, il y aura des phénomènes d'amplification d'harmoniques, il peut apparaître des surtensions ou des surintensités qui puissent détériorer les câbles, les transformateurs, les systèmes de protection, les batteries de capacité....
- Taux de distorsion harmonique :

Le taux de distorsion est un paramètre qui définit globalement la déformation de la grandeur alternative. La perturbation harmonique est généralement caractérisée par le taux de distorsion harmonique en tension ou en courant, THD. Le taux de distorsion harmonique en courant s'exprime comme suit :

$$\text{THD} = 100 \times \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{I_h^2}{I_1^2}} \quad \text{I.2}$$

# Chapitre I Généralités sur Les Perturbations des Réseaux électrique

- Facteur de puissance : c'est le rapport entre la puissance active P (équation I.3) et la puissance apparent S (équation. I.5). Pour tenir compte de la participation des courants harmoniques dans la puissance apparente, nous utilisons la notion de puissance déformante 'D'( équation I.6), [9], [10], donc on a :

- Puissance active:

$$P_1 = U_1 \times I_1 \times \cos \alpha_1 \quad \text{I.3}$$

- Puissance réactive :

$$Q_1 = U_1 \times I_1 \times \sin \alpha_1 \quad \text{I.4}$$

- La puissance apparent :

$$S^2 = U^2 \times I^2 \text{ ou } S^2 = P_1^2 + Q_1^2 + D^2 \quad \text{I.5}$$

$P_1$  ,  $Q_1$  : la composante fondamentale

- La puissance déformante est définie par :

$$D = \sqrt{S^2 - P_1^2 - Q_1^2} \quad \text{I.6}$$

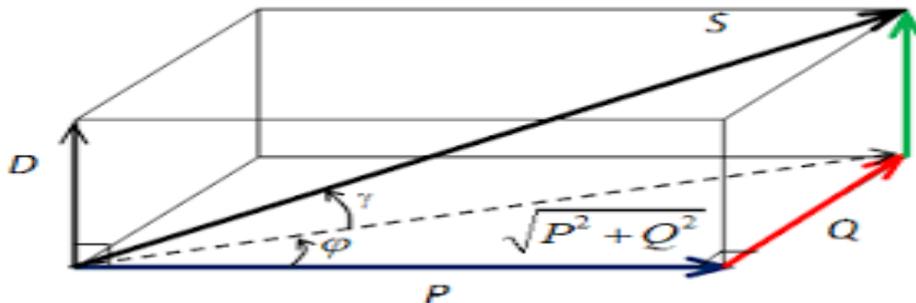


Figure I.3. Diagramme de fresnel de la puissance déformance

La puissance déformant est principalement le produit de la tension et du courant harmoniques. Cette puissance sera réduite à zéro si les harmoniques sont réduits à zéro, d'où la tension et le courant sont sinusoïdaux (I.7) :

$$D^2 = U_1^2 \times \sum_n^\infty I_h^2 \quad \text{I.7}$$

Avec n = nombre entier positif 1, 2, 3, .....

$$D = U_1 \times \sqrt{\sum_n^\infty I_h^2} \quad \text{I.8}$$

- Le facteur de puissance **FP** devient :

$$FP = \frac{P}{S} \quad \text{I.9}$$

## I.5 Réglementation

La qualité du courant électrique devient donc une préoccupation importante pour les distributeurs d'énergie et pour leurs clients ; ils adoptent, les uns comme les autres, la philosophie et les limites proposées par la norme. Afin de concilier distributeur et les consommateurs, des normes ont été étudiées. Elles régissent l'immunité des équipements aux harmoniques. Par exemple la norme CEI 1000-2-2 pour les équipements raccordés à un réseau basse tension permet de garantir à l'utilisateur un fonctionnement de l'équipement sur un réseau perturbé dans certaines limites. Un extrait de la norme CEI 1000-2-2 est donné au tableau I.1, [14].

Harmoniques impairs non multiples de 3		Harmoniques impairs multiples de 3		Harmoniques pairs	
Rang Harmonique h	Tension harmoniques %	Rang Harmonique h	Tension harmoniques %	Rang Harmonique h	Tension harmoniques %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	>21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			>12	0,2
25	1,5				
>25	$0,2 + 0,5 \cdot 25 \cdot h$				

Tableau I.1 : Niveau de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux basse tension

## I.6 Solutions aux problèmes engendrés par les perturbations :

Deux types de solutions sont envisageables. Les solutions traditionnelles sont des techniques qui doivent être connues par tous les électriciens. Elles apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées et utilisent composants passifs (inductances, condensateurs, résistance) et/ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation [17] pour fournir aux consommateurs une meilleure qualité de l'énergie électrique. Les filtres actifs de puissance sont proposés comme des solutions modernes de dépollution des réseaux électriques, sans toucher à l'installation du fournisseur d'énergies et du consommateur.

### I.6.1. Solutions traditionnelles :

Dans le but de limiter la prolifération des effets nocifs dans le réseau électrique, il est possible d'utiliser des solutions traditionnelles tels que :

- Utilisation d'inductances anti-harmoniques: Cette disposition consiste à protéger les condensateurs, destinés à améliorer le facteur de puissance, en plaçant une inductance en série avec condensateur (Figure I.4), [13], [15].

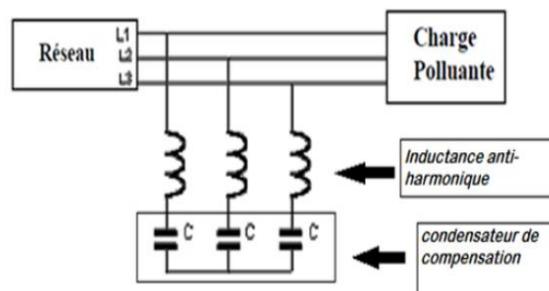


Figure I.4. Raccordement d'une inductance anti-harmonique

# Chapitre I Généralités sur Les Perturbations des Réseaux électrique

- Agir sur la structure de l'installation : Il faut éviter de connecter un récepteur sensible en parallèle avec un pollueur, une alimentation par câble distinct est convenable [11].
- Surdimensionnement des installations électrique : Cette stratégie consiste à surdimensionner les équipements du réseau de telle sorte à supporter les surtensions produites par les harmoniques [11].
- Pont dodécaphasé : Le principe consiste à utiliser un transformateur à deux secondaires délivrant des tensions décalées de  $30^\circ$  entre elles, chacun de ces secondaires alimente un redresseur en pont de Graëtz qui réalise un redressement hexaphasé (Figure I.5). Les redresseurs doivent fournir des courants continus identiques afin que les courants alternatifs qu'ils prélèvent sur les secondaires des transformateurs aient les mêmes valeurs. L'avantage de ce dernier est d'éliminer les harmoniques de rang 5, 7, 17 et 19 donné par  $6k \pm 1$  avec k impair par contre les harmoniques de rang 11 et 13 sont conservés. Les harmoniques restants sont donc de rang  $12k \pm 1$  avec k entier. Figure I.6, [16].

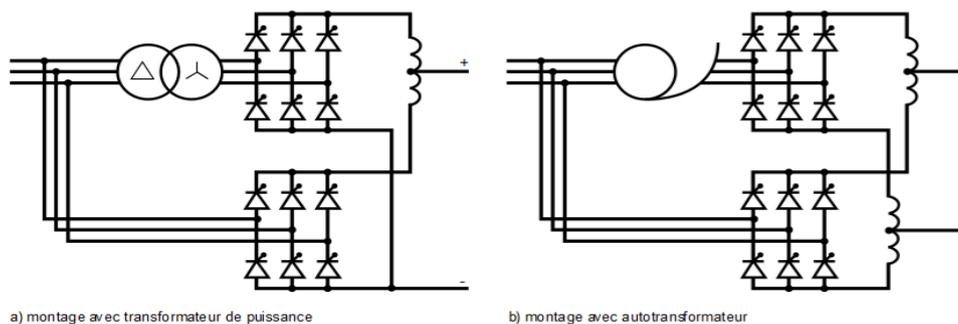
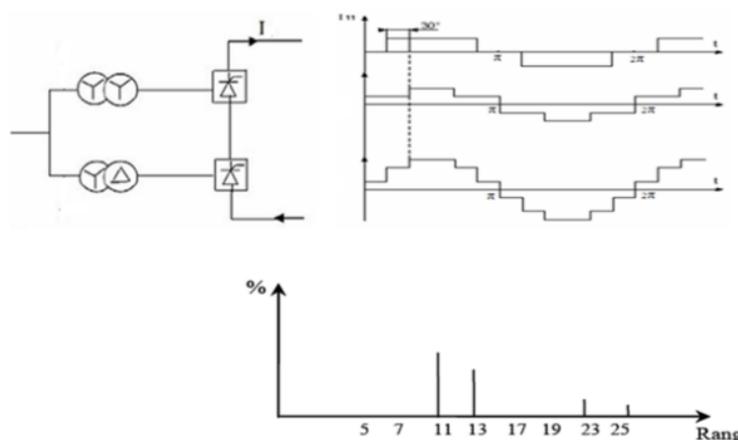


Figure I.5. Deux montages d'un Pont dodécaphasé



- Filtres passifs :

Filtre résonant : Il est constitué par la mise en série d'une inductance, d'une résistance, et d'un condensateur, figure I.7. Ce type de filtre est caractérisé par l'emplacement de trois filtres, deux pour les harmoniques d'ordre inférieurs et un filtre pour les harmoniques d'ordre supérieurs, c'est-à-dire pour un pont triphasé nous avons besoin d'un filtre passe bas pour le cinquième et l'autre filtre passe bas pour le septième harmonique et d'un filtre passe haut pour tous les harmoniques au-delà de 11<sup>ème</sup>

# Chapitre I Généralités sur Les Perturbations des Réseaux électrique

[13], [18]. Dans ce cas, il faut que la fréquence de résonance de filtre soit accordée sur celle des rangs harmoniques générés c'est-à-dire le filtre résonant ne compense qu'un rang harmonique à la fois.

Impédance équivalente du filtre en fonction de la fréquence s'exprime comme suit :

$$Z(f) = \frac{1-LC\omega^2+jRC\omega}{jC\omega} \quad \text{I.10}$$

Avec :  $\omega=2\pi f$

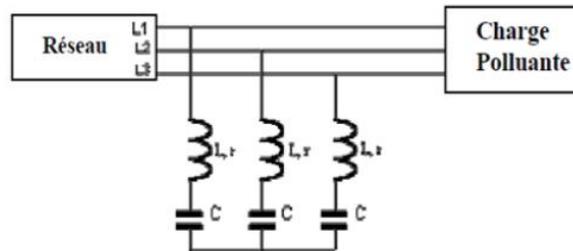


Figure I.7.Filtre résonant

- Filtre amorti : Ce type de filtre n'est efficace que si le rang d'harmonique à éliminer est suffisamment élevé. Ce filtre n'est pas utiliser pour filtrer une fréquence particulière mais plutôt un ensemble de fréquence. Sa fréquence d'accord est généralement située vers des fréquences élevées (Figure I.8), [13], [19].

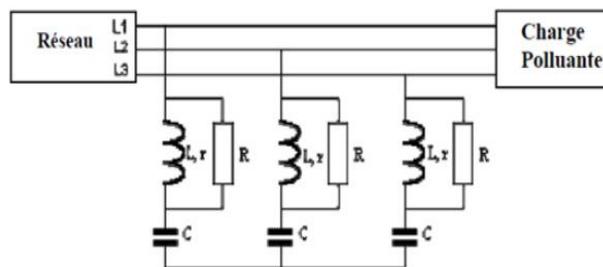


Figure I.8.Filtre amorti

## I.6.2 Solutions modernes

Ces solutions sont basées sur le développement récent des semi-conducteurs de puissance entièrement commandables.

- Les redresseurs à MLI : Ce sont des convertisseurs à modulation de largeurs d'impulsions (Figure I.9), utilisant des composants à commutation forcée tels que les IGBT ou les thyristors GTO. L'emploi de cette technique permet non seulement une réduction de la perturbation harmonique en prélevant des courants d'allure sinusoïdale mais aussi un contrôle des puissances actives et réactives [20].

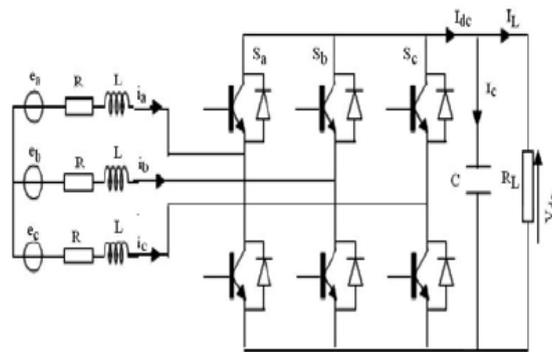


Figure I.9.Redresseur MLI

- Les filtres actifs : Le filtrage actif comprend des convertisseurs de puissance figure I.10 et figure I.11. Ils sont des sources de courant ou de tension qui éliminent les harmoniques en injectant en série ou en parallèle sur le réseau électrique des tensions et/ou des courants de compensations [21].

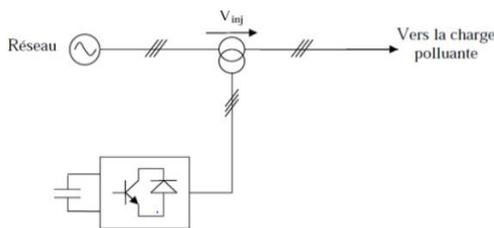


Figure I.10.Filtre actif série

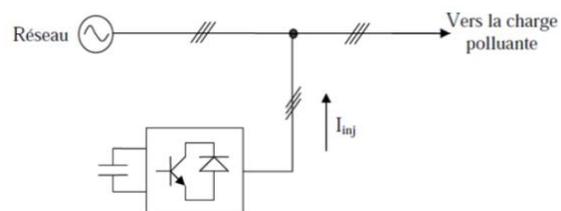


Figure I.11.Filtre actif parallèle

- Filtre hybride : On dit filtre hybride ou filtre mixte, c'est l'association d'un filtre passif et un filtre actif, figure I.12. L'intérêt des filtres mixtes est que le filtre passif prend en charge la compensation d'une grande partie des harmoniques. Le filtre actif maintient les performances de filtrage en fonction de l'évolution de la charge et du réseau [20].

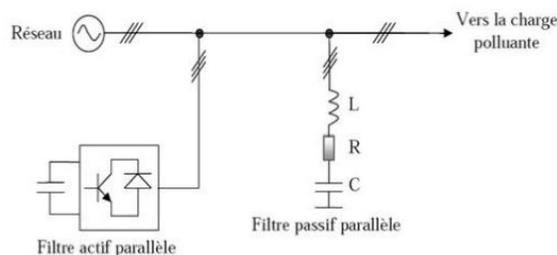


Figure I.12.Filtre hybride (filtre mixte)

- Correction du facteur de puissance (PFC)

Un convertisseur AC/DC avec un correcteur de facteur de puissance donné par la figure I.13 'PFC' agit comme si l'alimentation était une résistance pure vue de l'extérieur, c'est à dire que le courant est en phase avec la tension et sinusoïdal afin de limiter le taux de perturbation harmonique provoqué par les systèmes d'électronique de puissance connectés au réseau électrique, et le rend sans harmoniques, et compense la puissance réactive.

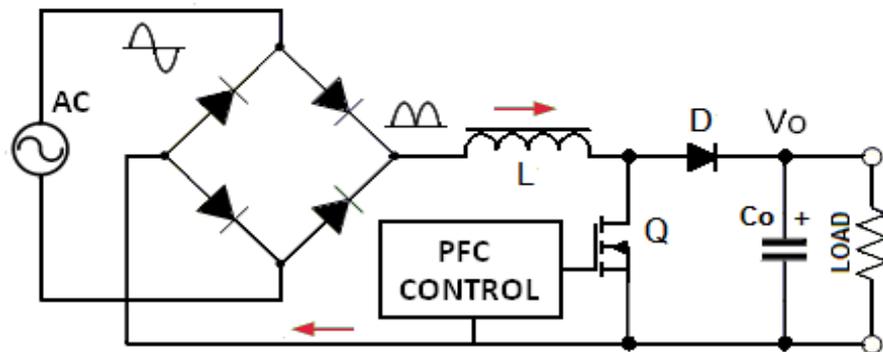


Figure I.13. Correcteur de facteur de puissance PFC

## I.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur les perturbations électriques et plus précisément les perturbations harmoniques de basse fréquence et leurs effets indésirables sur les installations et les équipements électriques. L'utilisation des charges non-linéaires responsable de la propagation des courants harmoniques dans l'ensemble des systèmes électriques est irremplaçable, donc il faut chercher des solutions qui permettent d'empêcher la circulation de ces perturbations. On a présenté dans ce chapitre des solutions de dépollution. Parmi ces solutions, on distingue le filtre actif parallèle qui fera l'objet du prochain chapitre.

# **Chapitre II**

## **Commande du Filtre Actif Parallèle par régulateur PI Classique**

# Sommaire

- II.1 Introduction .....21
- II.2 Structure générale du filtre actif parallèle.....21
- II.3 Structure de l'onduleur de tension.....23
- II.4 Calcul des références harmoniques : Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées.....24
- II.5 Contrôle du courant à la sortie du filtre.....28
- II.6 Résultats de simulation .....30
- II.7 Conclusion.....33

## II.1 Introduction

Le filtre actif peut être connecté au réseau soit en parallèle soit en série, suivant qu'il est conçu pour compenser les perturbations de courant ou de tension [22]. Donc le filtre actif parallèle est une solution moderne efficace pour réduire les harmoniques dans les réseaux électriques. L'objectif de ce chapitre se base sur le filtre actif parallèle. Pour ce faire, nous aborderons tout d'abord la structure générale du filtre actif parallèle associé à un filtre passif du premier ordre en sortie de l'onduleur. Ensuite, la partie commande d'un filtre actif à structure tension sera détaillée. La dernière partie sera consacrée à la simulation de l'ensemble filtre actif parallèle, réseau et charge non linéaire.

## II.2 Structure générale du filtre actif parallèle

La structure générale du filtre actif parallèle est présentée dans la figure II.1 sous forme de deux blocs : bloc puissance et bloc commande :

La partie puissance est constituée de :

- ✓ Un onduleur à base de semi-conducteurs de puissance, commandés à l'amorçage et au blocage (GTO, IGBT, MOSFET) avec des diodes en antiparallèle,
- ✓ Un circuit de stockage d'énergie,
- ✓ Un filtre de sortie.

La partie contrôle ou commande est constituée de :

- ✓ La méthode d'identification des courants harmonique,
- ✓ La régulation de la tension continue,
- ✓ La régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension,
- ✓ La commande de l'onduleur de tension.

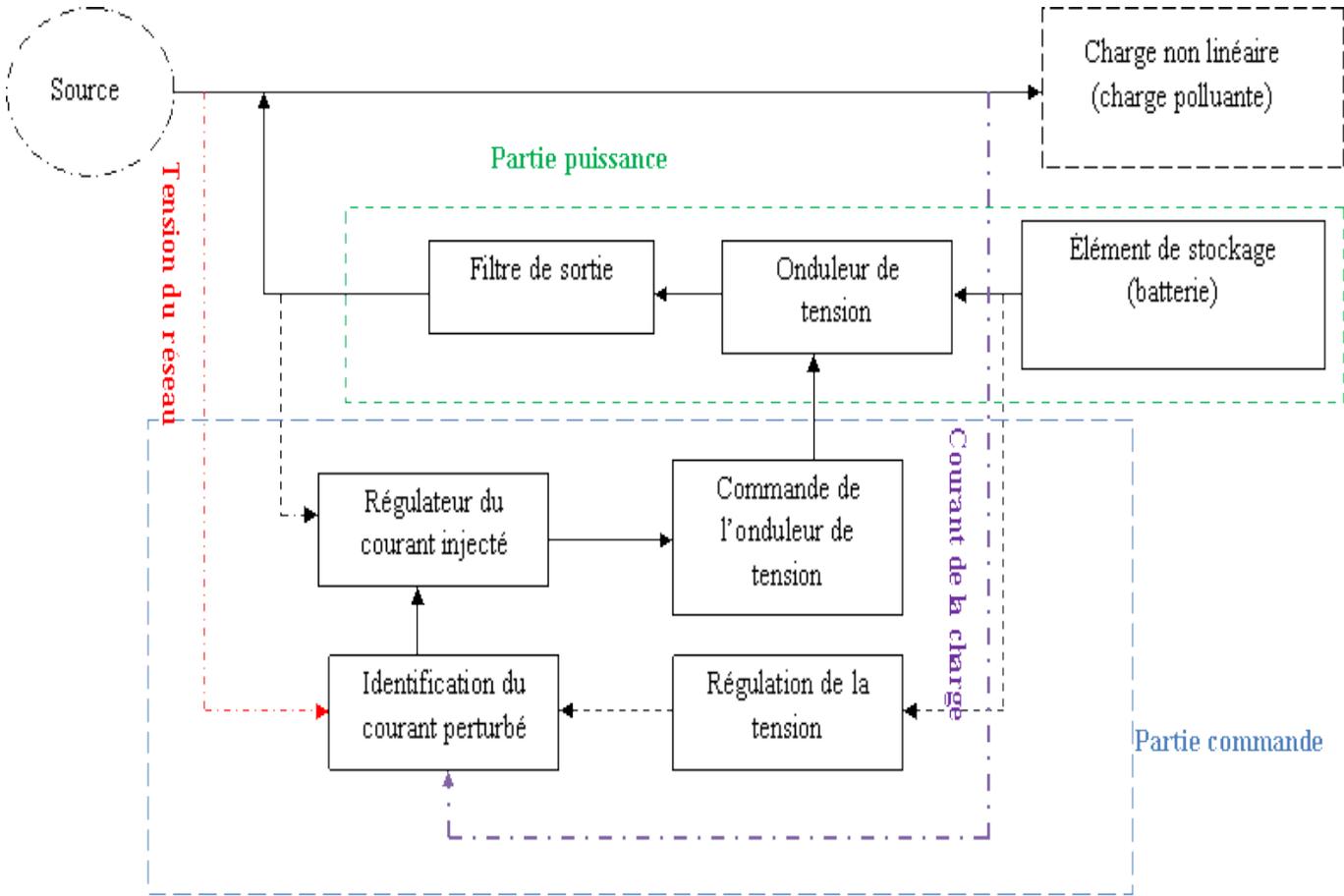


Figure II.1.Schéma explicative d'un filtre actif parallèle

Avec **.....** Courant de la charge  
**.....** Tension du réseau

## II.3 Structure de l'onduleur de tension

L'onduleur est un convertisseur statique qui fait la conversion continue - alternative de tension et de courant. Il est composé de trois bras dont deux interrupteurs par bras, chacun comporte un transistor avec une diode antiparallèle (figure II.2) et (figure II.3) alimentés par une source de tension continue. Lorsque l'un des deux est ouvert l'autre est fermé et inversement.

Le système de stockage d'énergie à l'entrée de l'onduleur se compose d'un condensateur qui joue le rôle d'une source de tension continue. La tension  $V_{dc}$  est maintenue constante.

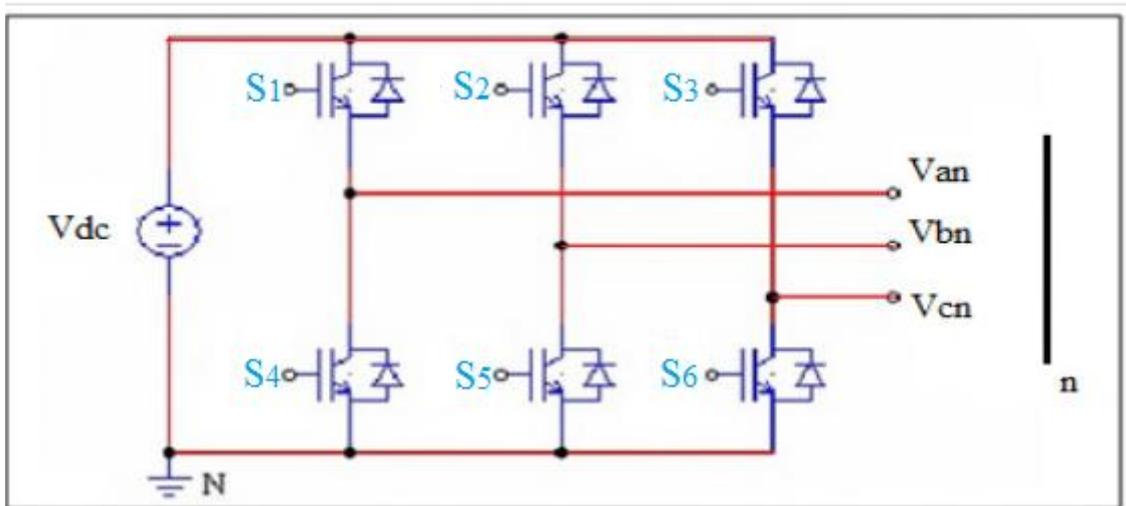


Figure II.2. Structure d'onduleur de tension triphasée

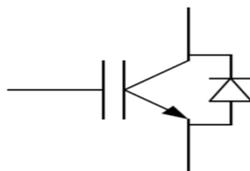


Figure II.3. Interrupteur utilisé dans l'onduleur

Les interrupteurs S1 et S4, S2 et S5, S3 et S6, doivent être complémentaires deux à deux, quelque soit la loi de commande à adopter, il est possible d'établir des relations générales que nous utiliserons pour la commande MLI, quels que soient les courants, les interrupteurs imposent les tensions entre les bornes de sortie [23]. Cela implique que :

$$F1 \begin{cases} S1 \rightarrow \text{fermé et } S4 \rightarrow \text{ouvert} = 1 \\ S1 \rightarrow \text{ouvert et } S4 \rightarrow \text{fermé} = 0 \end{cases}$$

$$F2 \begin{cases} S2 \rightarrow \text{fermé et } S5 \rightarrow \text{ouvert} = 1 \\ S2 \rightarrow \text{ouvert et } S5 \rightarrow \text{fermé} = 0 \end{cases}$$

$$F3 \begin{cases} S3 \rightarrow \text{fermé et } S6 \rightarrow \text{ouvert} = 1 \\ S3 \rightarrow \text{ouvert et } S6 \rightarrow \text{fermé} = 0 \end{cases}$$

# Chapitre II Commande du Filtre Actif Parallèle par régulateur PI Classique

F est une fonction logique pour la commutation des interrupteurs

Il en résulte huit états possibles pour les tensions de sorties résumés dans le tableau II.1

F1	F2	F3	V <sub>an</sub>	V <sub>bn</sub>	V <sub>cn</sub>
0	0	0	0	0	0
1	0	0	2V <sub>dc</sub> /3	-V <sub>dc</sub> /3	-V <sub>dc</sub> /3
0	1	0	-V <sub>dc</sub> /3	2V <sub>dc</sub> /3	-V <sub>dc</sub> /3
1	1	0	V <sub>dc</sub> /3	V <sub>dc</sub> /3	-2V <sub>dc</sub> /3
0	0	1	-V <sub>dc</sub> /3	-V <sub>dc</sub> /3	2V <sub>dc</sub> /3
1	0	1	V <sub>dc</sub> /3	-2V <sub>dc</sub> /3	V <sub>dc</sub> /3
0	1	1	-2V <sub>dc</sub> /3	V <sub>dc</sub> /3	V <sub>dc</sub> /3
1	1	1	0	0	0

Tableau II.1. Tensions générées par l'onduleur

## II.4 Calcul des références harmoniques : Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées

Pour calculer les courants de compensation, il faut tout d'abord identifier les courants harmoniques absorbés par la charge polluante, pour ce faire, on a opté pour la méthode d'AKAGI, basée sur le calcul des puissances réelle et imaginaire instantanées.

La méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées est une méthode très simple. Elle exploite la transformation de Concordia des tensions simples et des courants de ligne pour calculer ces puissances instantanées. La composante fondamentale est transformée en une composante continue et les composantes harmoniques en composantes oscillatoires, équations II.8 et II.9.

- les tensions simples d'alimentations  $V_{s1}$ ,  $V_{s2}$ ,  $V_{s3}$ :

$$\begin{cases} V_{s1} = \sqrt{2}V \sin(\omega t) \\ V_{s2} = \sqrt{2}V \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ V_{s3} = \sqrt{2}V \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad \text{II.1}$$

- les courants de charge  $I_{ch1}$ ,  $I_{ch2}$ ,  $I_{ch3}$ :

$$\begin{cases} I_{ch1} = \sqrt{2}I \sin(\omega t) \\ I_{ch2} = \sqrt{2}I \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ I_{ch3} = \sqrt{2}I \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad \text{II.2}$$

La décomposition en série de Fourier du courant de charge donne :

$$I_{ch} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \times I_d \{ \sin[(\omega - \alpha_1)] - \frac{1}{5} \sin[(5\omega - \alpha_1)] - \frac{1}{7} \sin[(7\omega - \alpha_1)] + \frac{1}{11} \sin[(11\omega - \alpha_1)] + \frac{1}{13} \sin[13\omega - \alpha_1] + \dots \} \quad \text{II.3}$$

## Chapitre II Commande du Filtre Actif Parallèle par régulateur PI Classique

La valeur efficace du courant est montrée dans l'équation suivante :

$$I_{eff} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d \quad \text{II.4}$$

La transformation de Concordia permet de ramener ce système triphasé équilibré à un système biphasé donné par les expressions suivantes :

$$[Vs\alpha\beta] = \begin{bmatrix} Vs\alpha \\ Vs\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Vs1 \\ Vs2 \\ Vs3 \end{bmatrix} \quad \text{II.5}$$

$$[Ich\alpha\beta] = \begin{bmatrix} Ich\alpha \\ Ich\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ich1 \\ Ich2 \\ Ich3 \end{bmatrix} \quad \text{II.6}$$

Le calcul des puissances réelles et imaginaires instantanées notées par p et q s'expriment par la relation suivante:

$$\begin{bmatrix} P_{ch} \\ q_{ch} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Vs\alpha & Vs\beta \\ -Vs\beta & Vs\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ich\alpha \\ Ich\beta \end{bmatrix} \quad \text{II.7}$$

De l'équation II.7 chaque puissance,  $P_{ch}$  ou  $q_{ch}$ , représente la somme d'une composante continue et d'une composante alternative comme le montrent les équations II .8 et II.9 :

$$P_{ch} = \overline{P_{ch}} + \widetilde{P_{ch}} \quad \text{II.8}$$

$$q_{ch} = \overline{q_{ch}} + \widetilde{q_{ch}} \quad \text{II.9}$$

Avec :

$\overline{p}, \overline{q}$  : Composantes continues de  $P_{ch}$  et  $q_{ch}$

$\widetilde{p}, \widetilde{q}$  : Composantes alternatives de  $P_{ch}$  et  $q_{ch}$

$q_{ch} = q_t$  (VAR) la puissance réactive totale.

$q_h = \widetilde{q_{ch}}$  (VAR) puissance réactive alternative liée à la somme des composantes harmoniques du courant.

$q_f = \overline{q_{ch}}$  (VAR) puissance réactive continue liée à la composante fondamentale du courant de charge.

$P_{ch} = P_t$  (w) la puissance active totale.

$P_h = \widetilde{P_{ch}}$  (w) puissance active alternative liée à la somme des composantes harmoniques du courant.

$P_f = \overline{P_{ch}}$  (w) la puissance active continue liée à la composante fondamentale du courant de charge.

### - Extraction des puissances

Afin de séparer les composantes continues des composantes alternatives, on utilise un filtre passe bas, figure II.4.

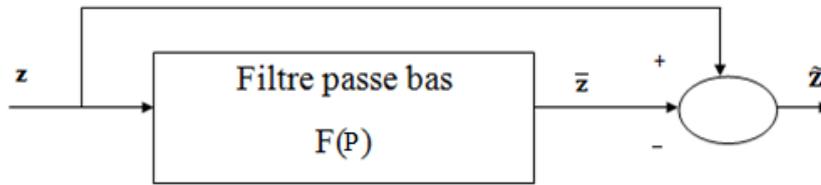


Figure II.4. Filtre passe bas utilisé pour extraction des composantes harmoniques

L'expression du filtre passe bas du deuxième ordre est donnée par :

$$F(p) = \frac{\omega_0^2}{p^2 + 2\xi\omega_0 p + \omega_0^2} \quad \text{II.10}$$

Avec  $\xi=0.7$  et la fréquence de coupure 25Hz

La fréquence d'accord de ce filtre doit être choisie en fonction de la performance dynamique attendue du filtre actif. Une bonne dynamique du filtre actif demande une fréquence d'accord élevée, alors que les bonnes performances aux rangs faibles nécessitent une fréquence de coupure faible [24].

La figure II.5 et la figure II.6 représentent les résultats de simulation des puissances réactives et actives pour  $\alpha=-\pi/6$  et  $I_{ch}=700A$ , avec un filtre passe bas de fréquence d'accord égale à 25Hz.

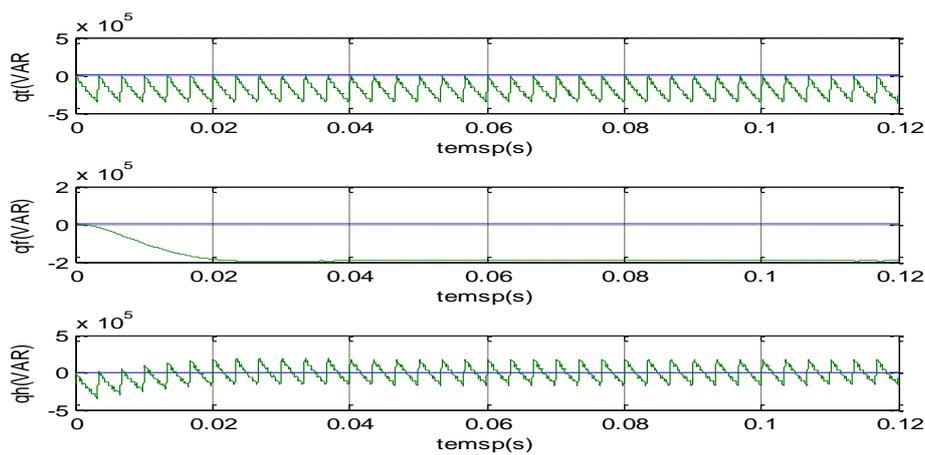


Figure II.5. Puissances réactives

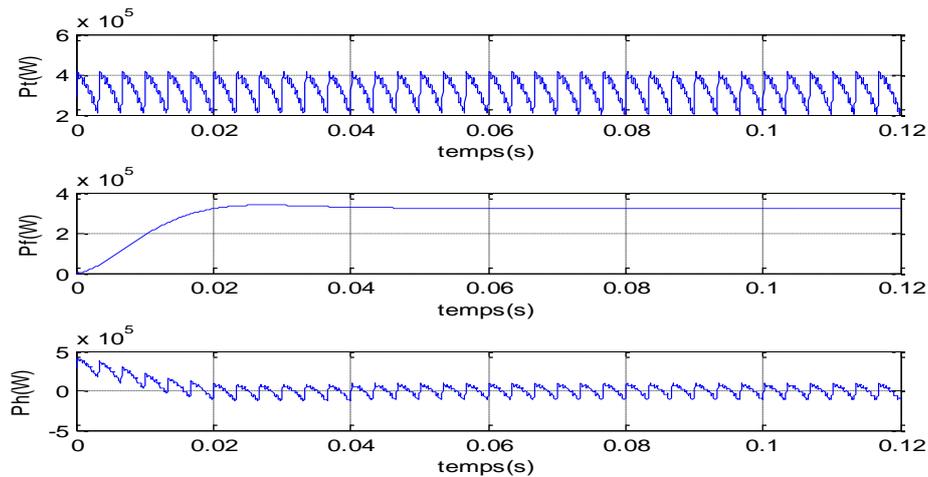


Figure II.6. Puissances actives

- Identification des courants de référence

En se basant sur l'équation II.7, on calcule les courants de référence  $I_{ré\alpha}$  et  $I_{ré\beta}$  donné par l'équation (II.11). La transformation inverse de Concordia appliquée à l'équation (II.11) permet de calculer des courants de référence dans le système triphasé  $I_{réf1}$ ,  $I_{réf2}$ ,  $I_{réf3}$  (II.12).

$$\begin{bmatrix} I_{ré\alpha} \\ I_{ré\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v\alpha^2 + v\beta^2} \begin{bmatrix} Vs\alpha & -Vs\beta \\ Vs\beta & Vs\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{ref} \\ q_{ref} \end{bmatrix} \quad \text{II.11}$$

$$\begin{bmatrix} I_{réf1} \\ I_{réf2} \\ I_{réf3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ré\alpha} \\ I_{ré\beta} \end{bmatrix} \quad \text{II.12}$$

Le schéma de la figure II.7 illustre les différentes étapes permettant l'extraction des courants de référence à partir des courants mesurés au point de raccordement.

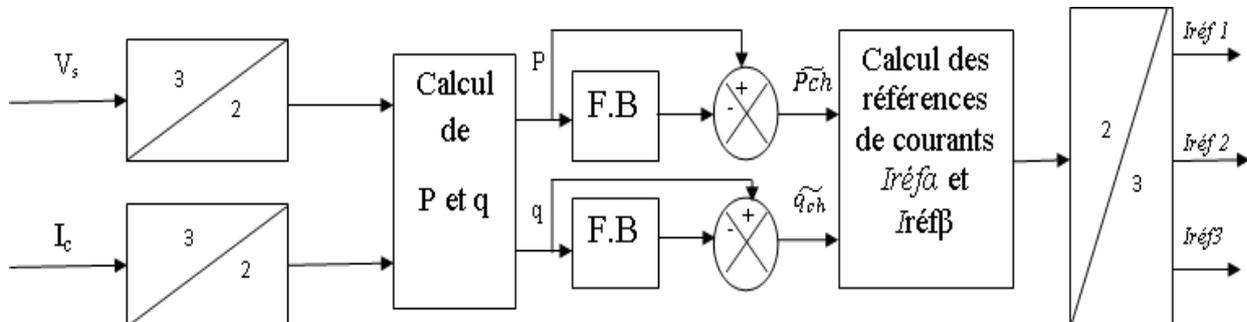


Figure II.7. Méthode d'extraction des courants de référence

## II.5 Contrôle du courant à la sortie du filtre

Le filtre de sortie de l'onduleur est du premier ordre, il permet d'assurer la connexion de l'onduleur à la tension du réseau électrique. Dans ce cas, le filtre actif parallèle est considéré comme un générateur de courants harmoniques. Il se compose d'une inductance  $L_f$  et d'une résistance  $R_f$ .

En négligeant la résistance  $R_f$  du filtre de sortie, nous pouvons écrire la relation II.13 caractérisant le courant du filtre actif.

$$L_f \frac{d}{dt} i_f = V_f - V_s \quad \text{II.13}$$

La transformation de la place appliquée à l'équation II.13 donne :

$$P \times L_f I_f(P) = V_f(P) - V_s(P) \quad \text{II.14}$$

D'où :

$$I_f(P) = \frac{V_f(P) - V_s(P)}{P \times L_f} \quad \text{II.15}$$

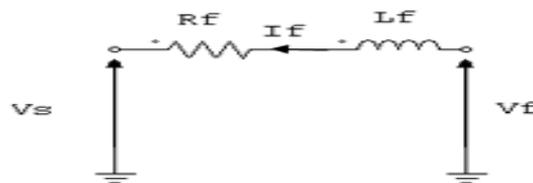


Figure II.8. Schéma simplifié de la boucle de contrôle du filtre actif

Le signal d'erreur est la différence entre le courant de référence  $I_{ref}$  et le courant du filtre actif  $I_{inj}$ . Ce signal est l'entrée du régulateur (PI). Le signal de sortie du régulateur, appelé modulatrice, est comparé à un signal triangulaire de fréquence fixe et suffisamment élevée (porteuse) (Figure II.9), ce qui donne les ordres de commutations des interrupteurs (Figure II.10)



Figure II.9. Comparaisons de la modulatrice avec un signal triangulaire

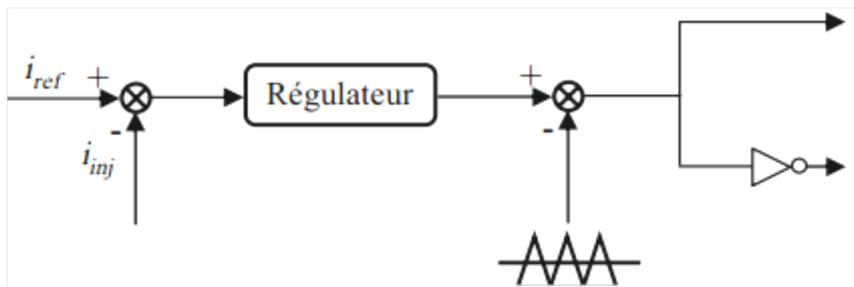


Figure II.10.Principe de commande des courants par MLI

Le correcteur proportionnel-intégrateur est un correcteur classique le plus utilisé à cause de sa simplicité. L'intérêt de la correction est de permettre une erreur statique nulle et un bon suivi de la consigne.

Nous utilisons pour chacune des phases un régulateur PI. Le rôle du filtre passif à la sortie de l'onduleur est d'atténuer les signaux hautes fréquences venant de la MLI. Le schéma global de la régulation du courant par MLI est représenté par la figure II.11. Pour que la tension de sortie de l'onduleur  $V_f$  soit égale à  $V_{ref}$ , on choisit  $G_0$  égal à 1. D'où on peut déduire le schéma simplifié de la régulation du courant qui est donné par la figure II.12.

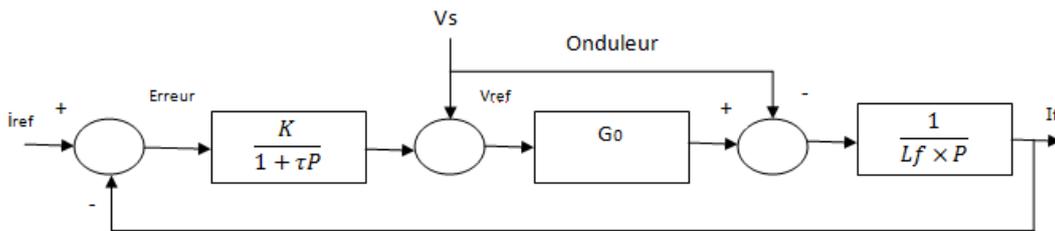


Figure II.11.Schéma global de la régulation du courant par MLI

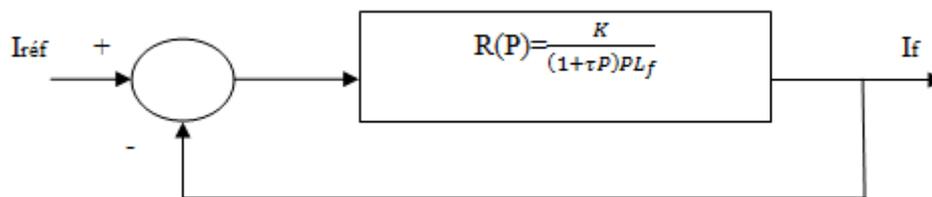


Figure II.12.Schéma simplifié de la régulation du courant par MLI

Par identification de la fonction de transfert de notre système ( $R(P)$ ) à un système de deuxième ordre  $F(P)$ , on déduit les gains du régulateur PI. Dans ce cas,  $\xi$  est égal à 0.7, ce qui réalise un bon compromis entre les performances dynamiques et statiques. La fréquence de coupure,  $\omega_c/2\pi$ , doit être choisie en respectant le critère lié à la rapidité du système en boucle fermée et le critère de filtrage. Donc, la rapidité du système dépend directement de la valeur de la fréquence de coupure du régulateur [24].

$$R(P) = \frac{K}{(1+\tau P)PL_f} \quad \text{II.16}$$

$$F(P) = \frac{\omega_0^2}{P^2 + 2\xi\omega_0 P + \omega_0^2} \quad \text{II.17}$$

On déduit :

$$K = \omega^2 \times L_f \times \frac{1}{2\xi\omega}$$

$$\tau = \frac{1}{2\xi\omega}$$

## II.6 Résultats de simulation

Dans ce travail, on s'est intéressé au filtre actif parallèle. Le système étudié est représenté par la figure II.13 qui se compose d'une source d'alimentation triphasée, de la charge non linéaire ( $I_{ch1}$ ,  $I_{ch2}$ ,  $I_{ch3}$ ) et du filtre actif parallèle. Ce système a été simulé sous Matlab / Simulink.

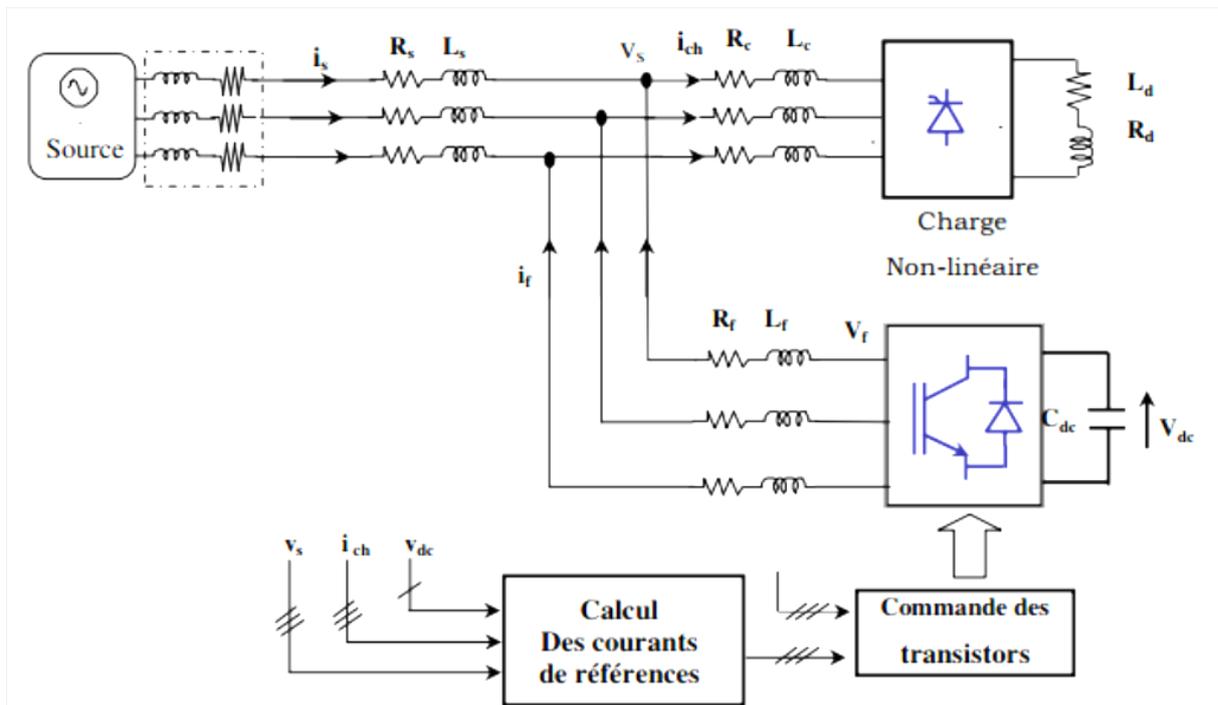


Figure II.13. Schéma global du système à simuler

La figure II.14 représente l'allure des tensions triphasées au niveau du réseau. La figure II.15 représente respectivement les formes d'ondes du courant absorbé par la charge  $I_{ch}$ , le courant harmonique injecté au réseau  $I_f$  et le courant de source après filtrage  $I_s$ . Figure II.16 montre le courant  $I_s$  et tension  $V_s$  de source. On remarque que le courant de source après compensation est sinusoïdal mais il n'est pas en phase avec la tension.

Les figures II.17, II.18 représentent FFT du courant de charge et du courant de source. Ces résultats montrent que courant de charge est fortement pollué avec un THD de 30.15%, et après compensation le taux distorsion harmonique du courant de source  $I_s$  est réduit à une valeur acceptable égale à 8.01%.

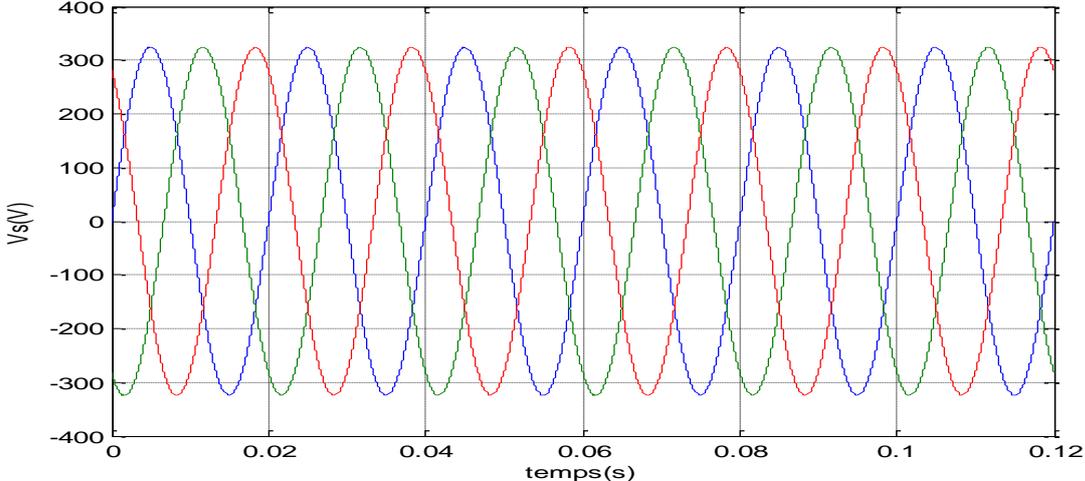


Figure II.14. Tensions du réseau triphasé

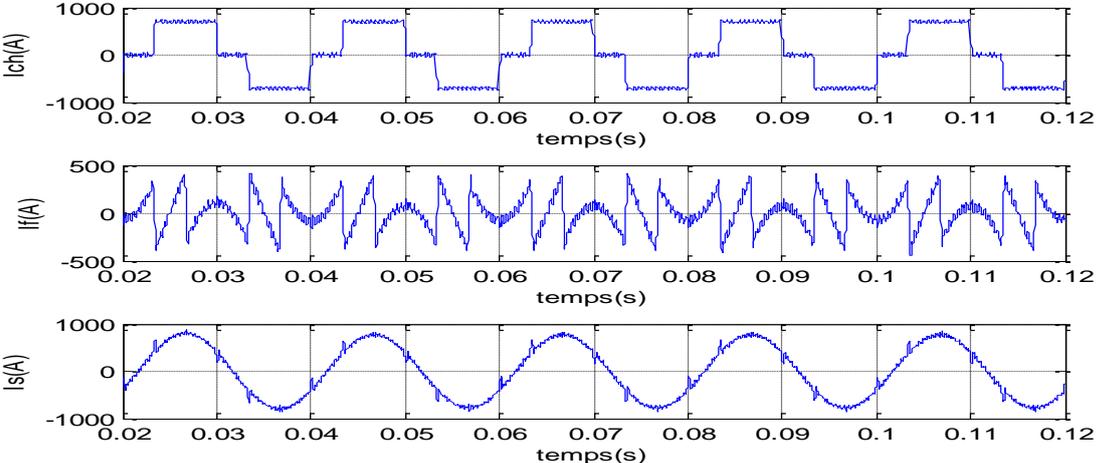


Figure II.15. Compensation des courants harmoniques

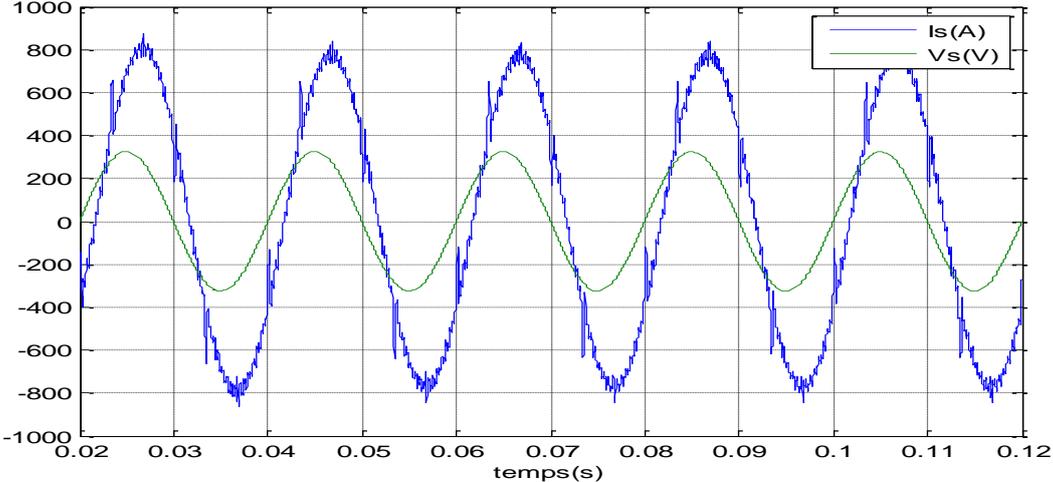


Figure II.16. Courant et tension de source

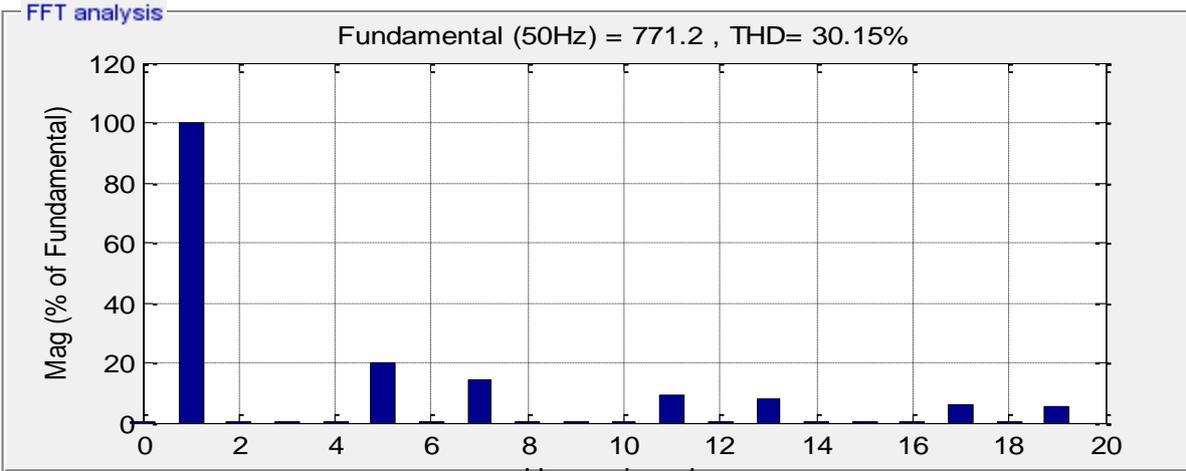


Figure II.17.Spectre du courant absorbé par la charge  $I_{ch}$  (avant compensation)

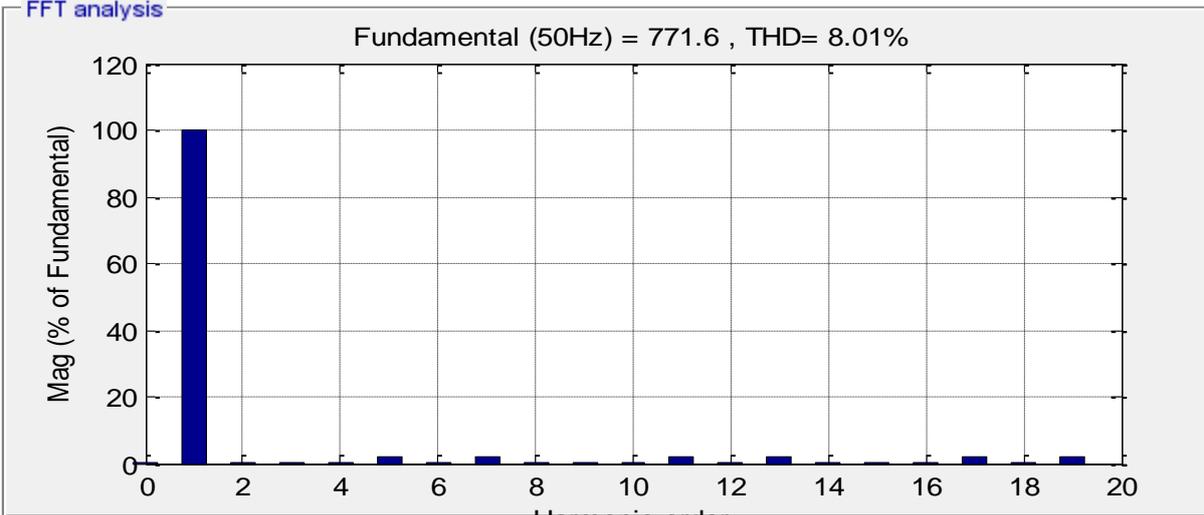


Figure II.18.Spectre du courant de source après filtrage  $I_s$

Figure II.19 illustre les résultats de simulation obtenus pour la compensation des courants harmoniques et des courants réactifs. La figure II.20 montre que le courant de source  $I_s$  après compensation est sinusoïdal et en phase avec la tension du réseau.

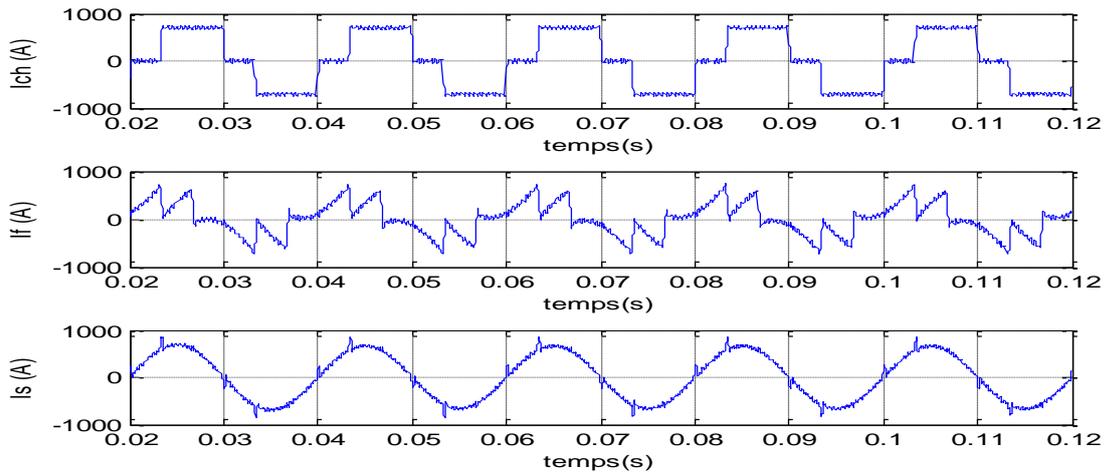


Figure II.19. Compensation des courants harmoniques et du courant réactif

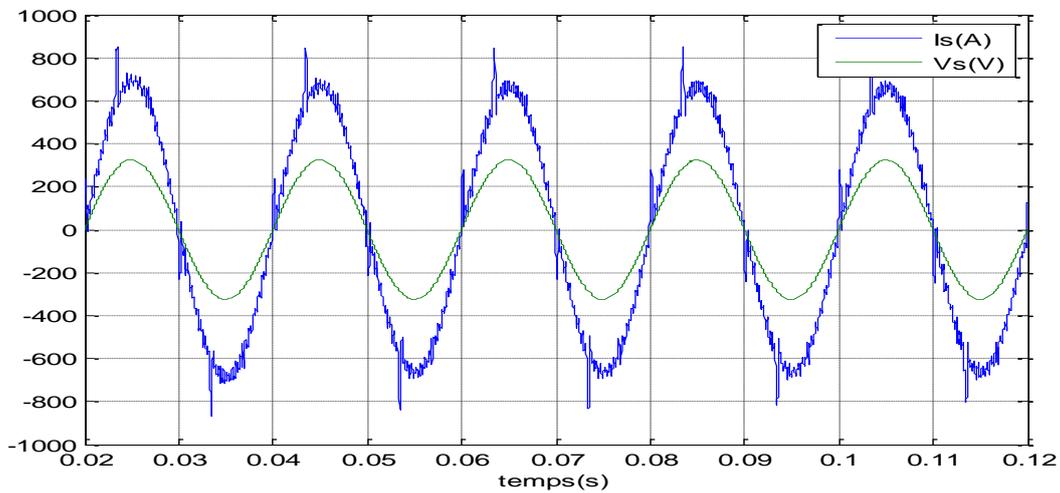


Figure II.20. Courant et tension de source

## II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié le principe de fonctionnement du filtre actif parallèle. On s'est basé sur la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées pour l'identification des courants de référence. Nous avons étudié le régulateur PI classique, pour le contrôle du courant à la sortie de l'onduleur. Des résultats de simulations montrent que le filtre actif est l'un des solutions modernes qui est efficace pour la compensation des courants harmoniques et du courant réactif. Le taux de distorsion harmoniques du courant de source après compensation est réduit à une valeur de THD=8.01% en utilisant le régulateur PI.

# **Chapitre III**

## **Commande non-linéaire**

### **d'un Filtre Actif Parallèle PI**

#### **flou**

# Sommaire

- III.1 Introduction .....36
- III.2 Système Etudié.....36
- III.3 Logique floue.....36
- III.4.1 Différentes parties de la commande floue.....37
- III.4.2 Régulateur PI flou .....39
- III.5 Résultats de simulation.....42
- III.6 Conclusion.....46

## III.1 Introduction

La pollution harmonique est un des problèmes majeurs qui dégrade la qualité d'énergie électrique dans les systèmes de distribution. L'amélioration de la qualité de l'énergie électrique est un axe de recherche très actif, qui ne cesse de se développer en profitant de la technologie des semi-conducteurs et des calculateurs numériques [25]. Dans ce contexte, on s'est intéressé au fonctionnement optimal des filtres actifs, à base de la logique floue, en améliorant la forme du courant dans le réseau électrique ainsi que la compensation de la puissance réactive.

## III.2 Système Etudié

Dans ce chapitre, on s'est intéressé à l'étude du filtre actif parallèle à base d'un régulateur PI flou illustré par la figure III.1, qui représente le schéma synoptique de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle et la charge polluante. Le filtre actif parallèle est étudié n'est qu'un onduleur de tension commandé pour la compensation du courant harmonique et du réactif circulant dans le réseau à base d'un régulateur flou.

Le principe du filtre actif parallèle consiste à générer des courants harmoniques égaux et en opposition de phase à ceux absorbés par la charge non linéaire.

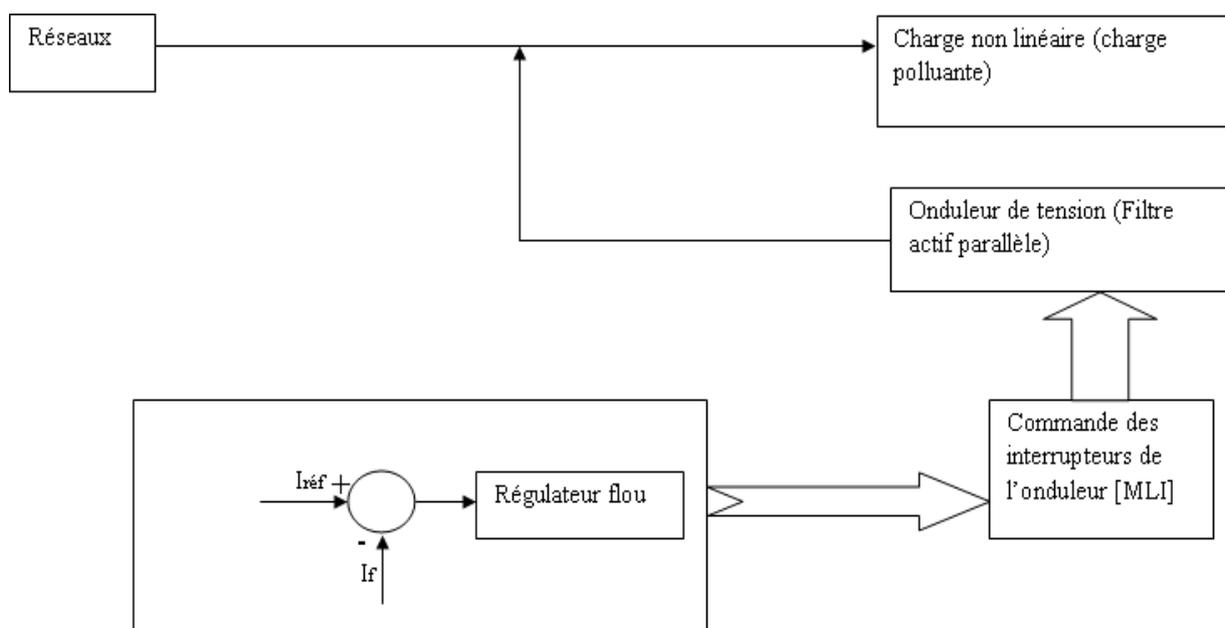


Figure III.1. Filtre actif parallèle avec régulation du courant

## III.3 Logique floue

La logique floue est une technique avancée suscite actuellement un fervent intérêt dans le domaine de la commande. La logique floue diffère de la logique classique parce qu'elle permet des définitions partielles ou "floues" de règles de contrôle. Sa puissance vient de sa capacité à décrire un phénomène ou processus particulier de façon linguistique, puis de représenter ce phénomène par un nombre de règles [26].

Cette technique est utilisée dans la commande des systèmes non linéaires ou ayant des paramètres variables, où les techniques de commande classique à base des régulateurs classiques tels que (PI, PID) peuvent être insuffisantes. Ces derniers ne sont pas robustes, d'où ils sont remplacés par des régulateurs non linéaires tels que le régulateur PI flou.

## III.4 .1 Les différentes parties de la commande floue

La logique floue est bien connue des automaticiens pour ses applications dans le contrôle-commande de procédés, appelé « contrôle flou ». Tout comme un contrôleur (ou correcteur) classique, le contrôleur flou s'insère dans la boucle de régulation et calcule la commande à appliquer au procédé suivant une ou plusieurs consignes ainsi qu'une ou plusieurs mesures effectuées sur celui-ci [26]. Chaque système basé sur la logique floue est composée de quatre blocs principaux schématisé par la figure III.2.

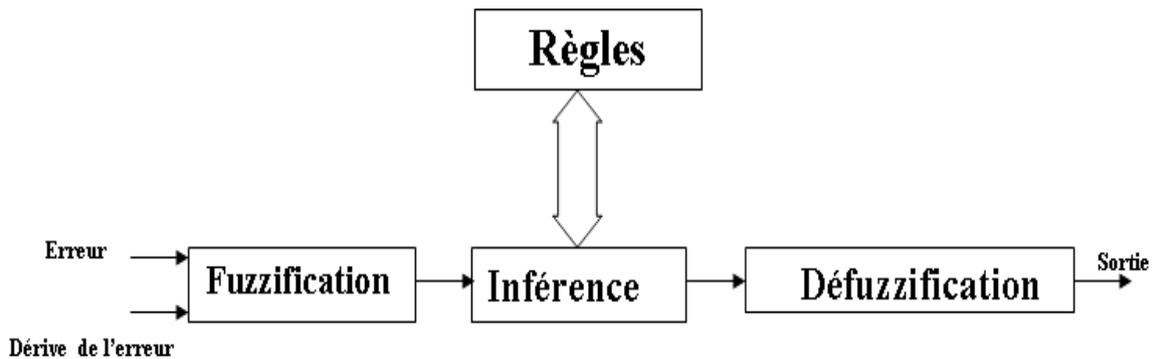


Figure III.2.Schéma général d'un système flou

### - Un système d'inférence floue

C'est un mécanisme dont le but est de déterminer la fonction d'appartenance de la commande nécessaire pour satisfaire les différentes règles floues obtenues.

Le principe de cette opération consiste à établir la liaison entre les grandeurs d'entrées du régulateur exprimées par des termes linguistiques et la variable de sortie sous sa forme linguistique à partir d'une parfaite connaissance du système à régler et d'une expertise concernant le fonctionnement du processus à régler. Les trois méthodes d'inférence les plus usuelles sont [27]:

Max-Produit.

Somme-produit.

Max-Min

Le mécanisme d'inférence le plus couramment utilisé est celui dit « de Mamdani (max-min) », ce mécanisme comprend les étapes suivantes :

1. Fuzzification des variables d'entrée
2. Evaluation des règles
3. Agrégation des sorties des règles
4. Défuzzification

Au niveau de la condition : ET => Min, OU => Max

Au niveau de la conclusion : ou => Max, Alors => Min

### - Fuzzification

L'objectif de la fuzzification est de transformer les variables déterministes d'entrée en variables floues, c'est-à-dire en variables linguistiques, en définissant des fonctions d'appartenance pour ces différentes variables d'entrée [28]. La fuzzification est un traitement flou des entrées du système en suivant les étapes suivantes : On commence par définir les variables floues des entrées, leur univers de discours, ainsi que leurs valeurs linguistiques.

## - Les règles floues

La base de règles caractérise les relations entre les classes d'événements possibles en entrée et les commandes correspondantes à la sortie. Les inférences lient les grandeurs mesurées et les variables de sortie par des règles linguistiques. Ces règles sont combinées en utilisant les opérations de connexion (et) et (ou). La stratégie du réglage dépend essentiellement des inférences adaptées qui lient les grandeurs mesurées qui sont les variables d'entrées (transformées en variables linguistiques à l'aide de fuzzification) à la variable de sortie. Les règles d'inférences peuvent être décrites de plusieurs façons [29].

Les règles floues sont définies par des fonctions d'appartenance sur les variables du système, et par des règles qui peuvent être écrites textuellement. Chaque règle fait appel à des entrées et des sorties qui peuvent être différentes, comme le montre l'exemple qui suit :

SI « température élevée » ET « pression élevée » ALORS « Ouverture vanne Grande »

SI « température moyenne » ET « pression élevée » ALORS « Ouverture vanne Grande ».

SI « température basse » ET « pression élevée » ALORS « Ouverture vanne moyenne ».

## - Défuzzification

La défuzzification consiste à prendre une décision, c'est-à-dire, obtenir une commande réelle à partir de la commande obtenue sous forme d'ensemble flou. Dans le cas d'un raisonnement basé sur l'inférence de règles floues, plusieurs méthodes existent, les plus couramment utilisées sont [30] :

-Méthode du centre de gravité

-Méthode de moyenne de maximum

-Méthode de moyenne pondérée

- **L'exemple :** La figure III.3 montre les fonctions d'appartenances des variables de sortie et d'entrées d'une vanne.

D'où l'ensemble flou est : la pression, la température et ouverture vanne ainsi que l'univers de discours est de [0 1].

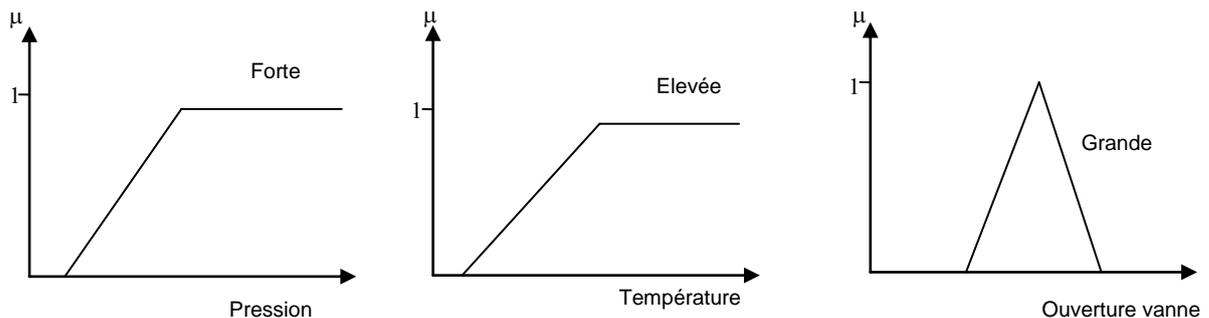


Figure III.3. Fonctions d'appartenances

Si « pression Forte » ET « température Élevée » ALORS « Ouverture vanne Grande »

Le « ET » est réalisé en effectuant le minimum entre les degrés de vérité des propositions.

L'ensemble flou global de sortie est construit par agrégation des ensembles flous obtenus par chacune des règles concernant cette sortie (Figure III.4).

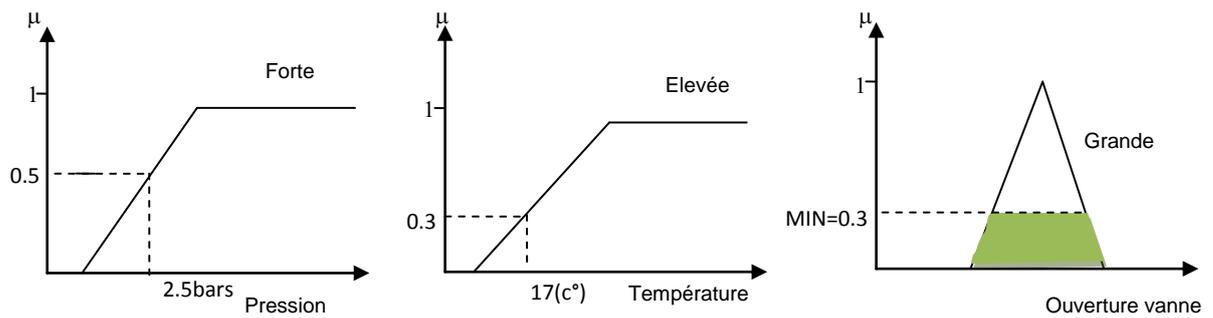


Figure III.4. Agrégation des règles de sortie

Après avoir combiné les règles, il faut maintenant produire un chiffre net comme sortie. Dans ce cas, la sortie doit être l'ouverture de la vanne. La technique la plus populaire est la méthode de défuzzification par centre de gravité (Figure III.5) : on cherche le centre de gravité du polygone obtenu par l'équation III.1 :

$$\Delta u = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \mu(x)}{\sum_{i=1}^n \mu(x)} \quad \text{III.1}$$

Xi c'est la variable l'linguistique

Elle définit la sortie comme correspondant à l'abscisse du centre de gravité de la surface de la fonction d'appartenance

D'où n est le nombre de subdivision de l'intervalle de discours de  $\mu(x)$

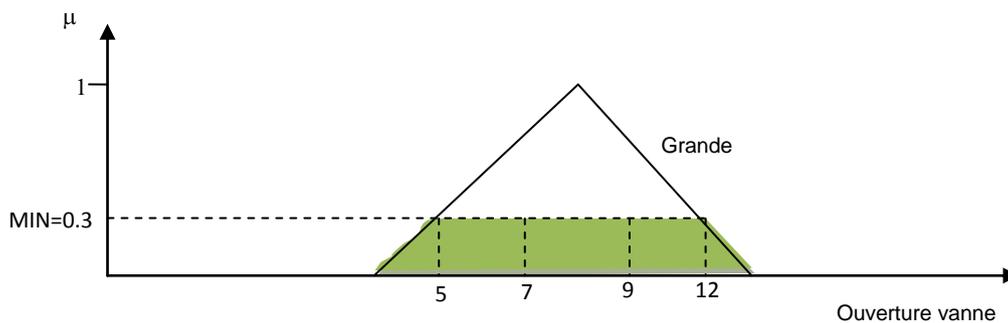


Figure III.5. Défuzzification par centre de gravité

$$\Delta u = \frac{(5+7+9+12) \times (0.3)}{0.3+0.3+0.3+0.3} = 8.25 \quad \text{III.2}$$

## III.4.2 Régulateur PI flou

La logique floue est une méthode de raisonnement qui permet de donner des définitions partielles ou floues des règles. La commande floue est une technique de commande intelligente la plus populaire. Dans cette partie, on remplace le régulateur PI de la boucle de courant par un régulateur flou. Le schéma de base du régulateur PI flou est donné par la figure III.6.

# Chapitre III Commande non-linéaire d'un Filtre Actif Parallèle PI flow

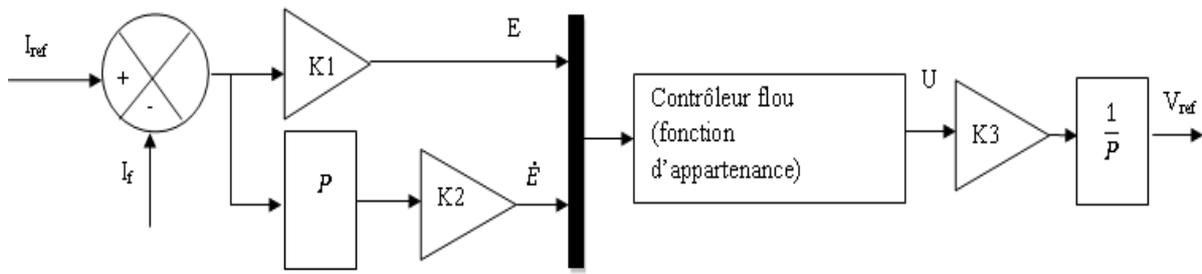


Figure III.6. Structure de base d'un régulateur flow

On note :

E : erreur

$\dot{E}$  : dérivée de l'erreur

U : variable de sortie

Les figures III.7, III.8 présentent respectivement les fonctions d'appartenances des deux variables d'entrées E (erreur),  $\dot{E}$  (la dérivée de l'erreur). La figure III.9 représente la variable de sortie U.

Chaque variable linguistique est caractérisé par sept sous-ensembles flous donnés :

NG : négatif grand

NM : négatif moyen

NP : négatif petit

EZ : environ zéro

PP : positif petit

PM : positif moyen

PG : positif grand

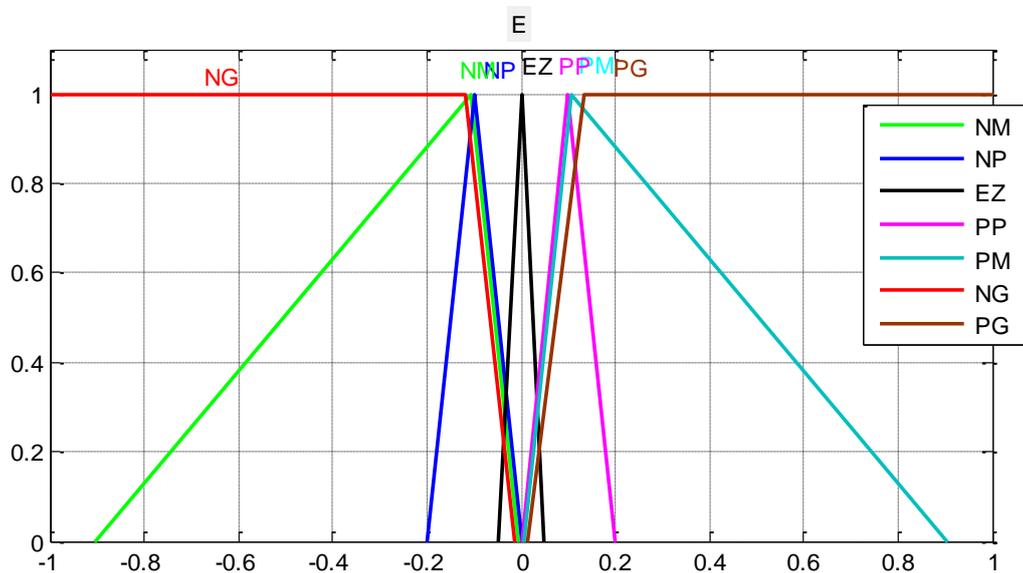


Figure III.7. Fonction d'appartenance de la variable d'entrée E (erreur)

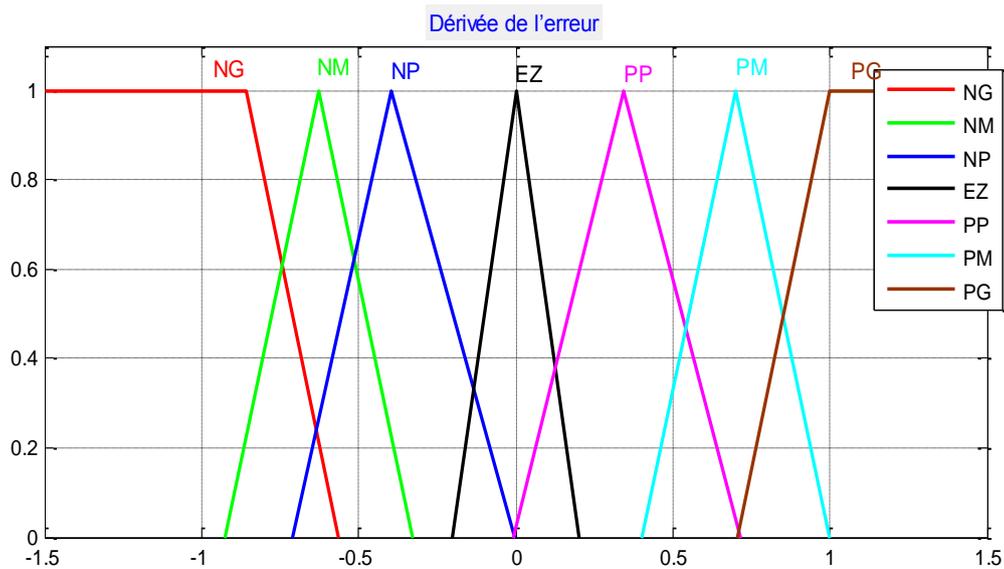


Figure III.8. Fonction d'appartenance de la variable d'entrée  $\dot{E}$  (la dérivée de l'erreur)

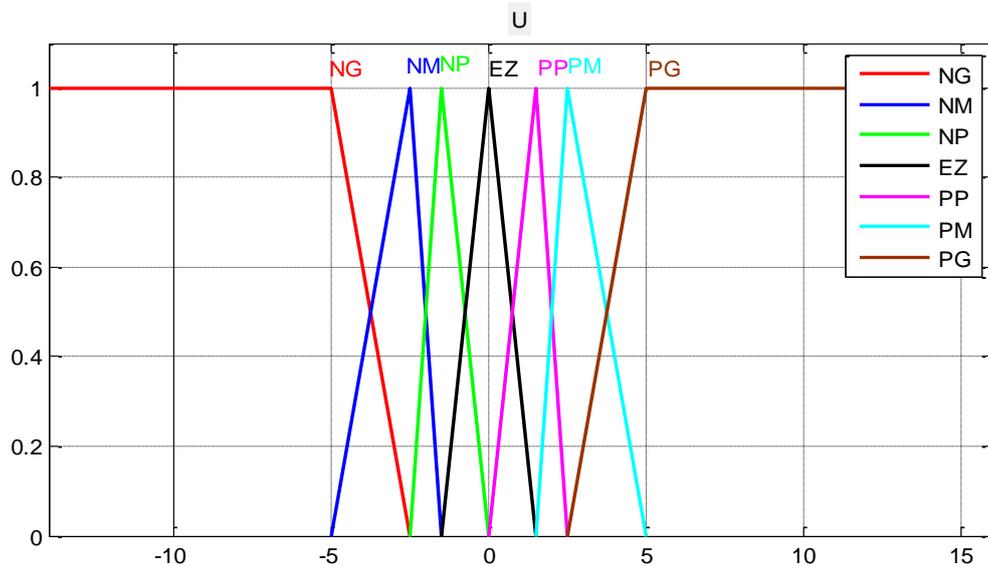


Figure III.9. Fonction d'appartenance de la variable de sortie U

Pour la fuzzification, on a utilisé des fonctions d'appartenance triangulaires pour l'erreur et sa dérivée, ainsi que pour la variable de sortie.

Les règles floues sont résumées dans le tableau III.1. Ces règles floues représentent le cœur du régulateur et qui permettent d'exprimer sous forme linguistique les variables d'entrées du régulateur aux variables de commande du système [1].

La stratégie de commande dépend essentiellement des inférences adoptées, la condition pour chaque règle est :

SI (E est NG) ET ( $\dot{E}$  est NG) ALORS U est NG

OU

SI (E est NG) ET ( $\dot{E}$  est NM) ALORS U est NG

OU

SI (E est NG) ET (Ê est NP) ALORS U est NM

OU

.....etc.

Ê \ E	NG	NM	NP	EZ	PP	PM	PG
NG	NG	NG	NM	NM	NP	NP	EZ
NM	NG	NM	NM	NP	NP	EZ	PP
NP	NM	NM	NP	NP	EZ	PP	PP
EZ	NM	NP	NP	EZ	PP	PP	PM
PP	NP	NP	EZ	PP	PP	PM	PM
PM	NP	EZ	PP	PP	PM	PM	PG
PG	EZ	PP	PP	PM	PM	PG	PG

Tableau III.1. Table d'inférence

### III.5 Résultats de simulation

Le système simulé se compose d'une source d'alimentation triphasée ( $V_{s1}$ ,  $V_{s2}$ ,  $V_{s3}$ ), et de la charge non linéaire ( $I_{ch1}$ ,  $I_{ch2}$ ,  $I_{ch3}$ ) et du filtre actif parallèle (Figure III .1).

La figure III.10 présente les résultats de simulation obtenus lors de la compensation des courants harmoniques avec  $I_{ch}$  le courant absorbé par la charge (avant compensation),  $I_f$  le courant harmonique injecté au réseau, et  $I_s$  le courant de source. Après filtrage le courant  $I_s$  a une forme sinusoïdale mais il n'est pas en phase avec tension de source  $V_s$  comme le montre la figure III.11. On remarque que le courant  $I_f$  suit bien sa référence comme l'illustre la figure III.12.

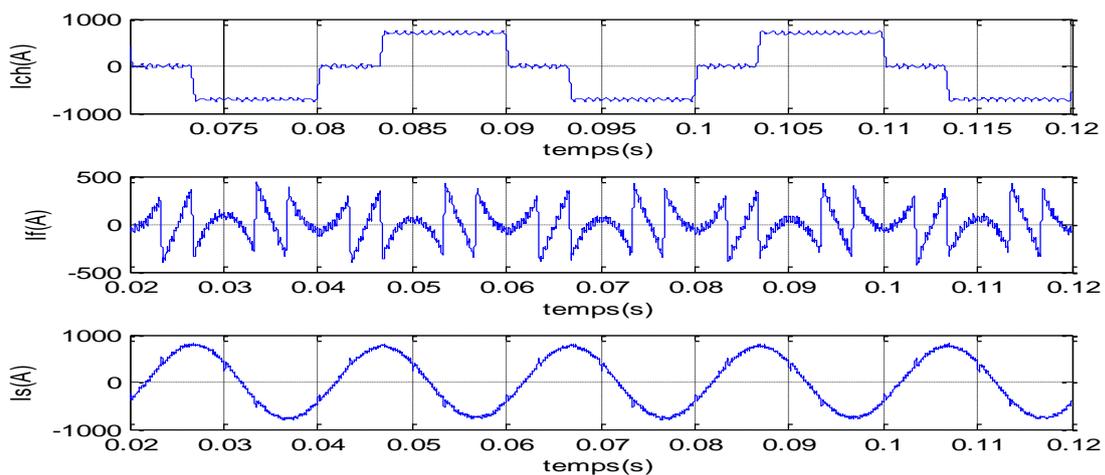


Figure III.10. Compensation des courants harmoniques

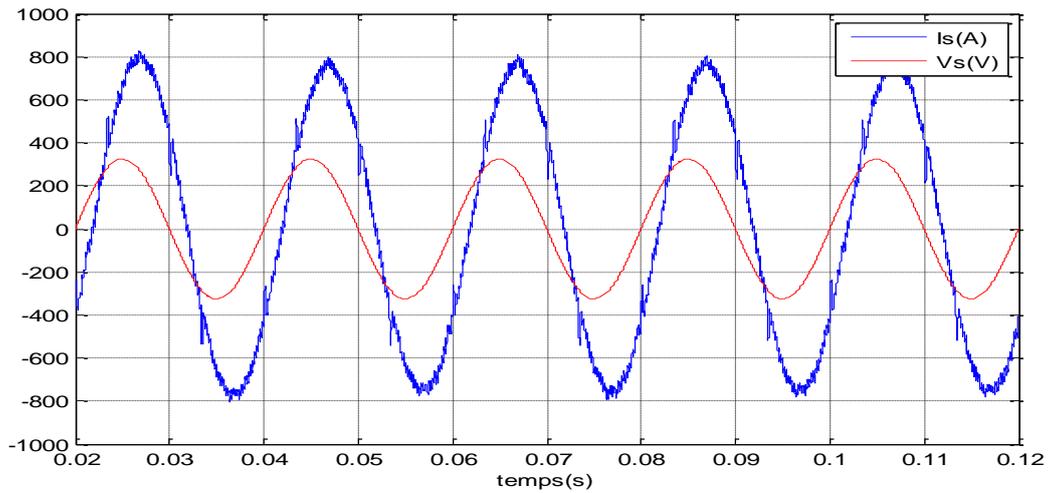


Figure III.11. Courant et tension de source

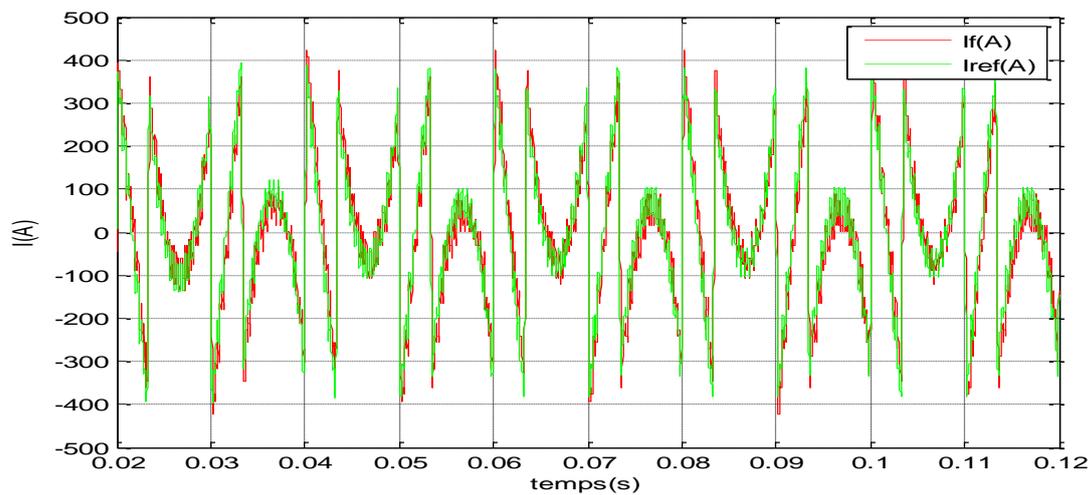


Figure III.12. Courant harmonique injecté au réseau  $I_f$  avec sa référence

La figure III.13 montre le spectre du courant absorbé par la charge  $I_{ch}$  qui présente un taux de distorsion harmonique 'THD' = 30.16%.

La figure III.14 illustre le spectre du courant de source après filtrage  $I_s$ . Ce courant a une valeur de THD égale à 4.78%.

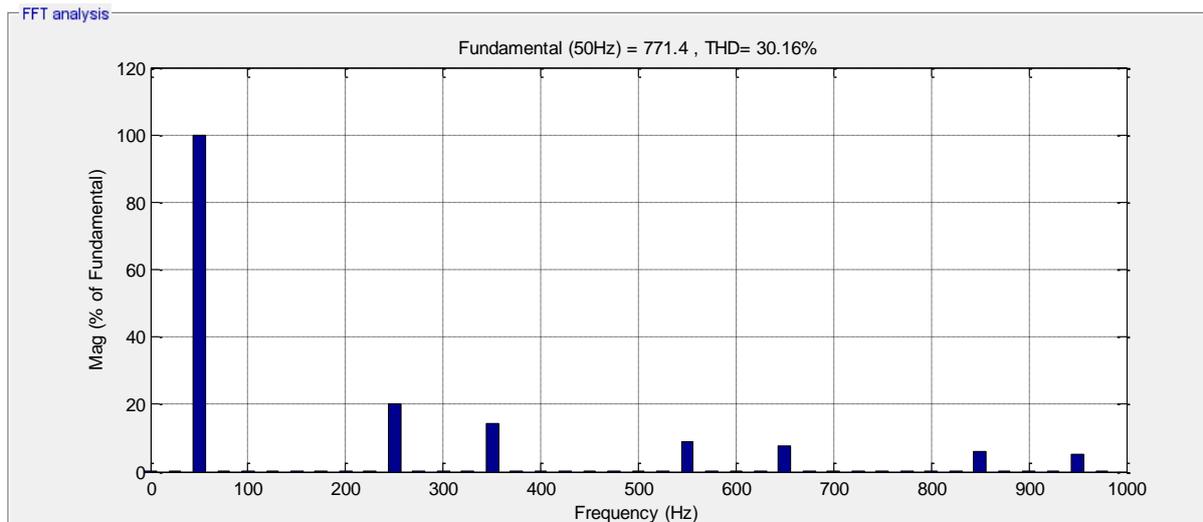


Figure III.13.Spectre du courant absorbé par la charge  $I_{ch}$

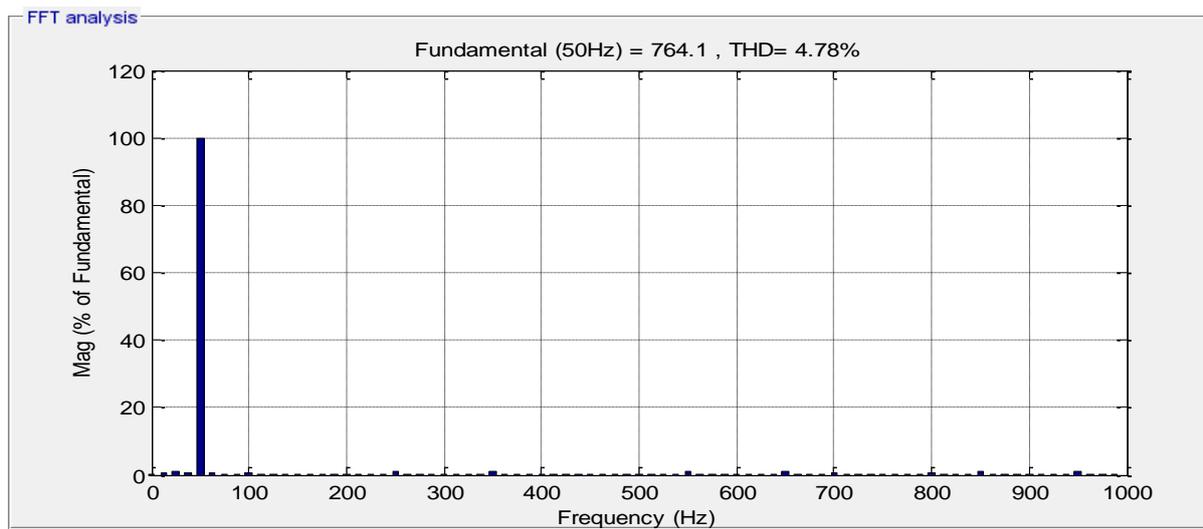


Figure III.14.Spectre du courant de source après filtrage  $I_s$

La figure III.15 représente les résultats de simulation de compensation des courants harmoniques et du courant réactif. Figure III.16 montre que le courant de source après compensation est sinusoïdal et en phase avec la tension du réseau. Figure III.17 présente le courant harmonique injecté au réseau  $I_f$  qui suit bien sa référence.

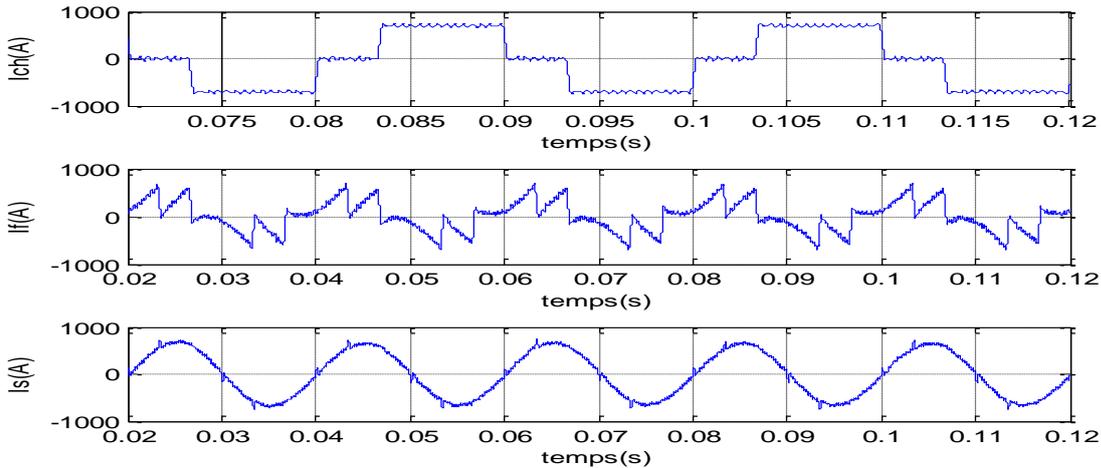


Figure III.15. Compensation des courants harmoniques et des courants réactifs

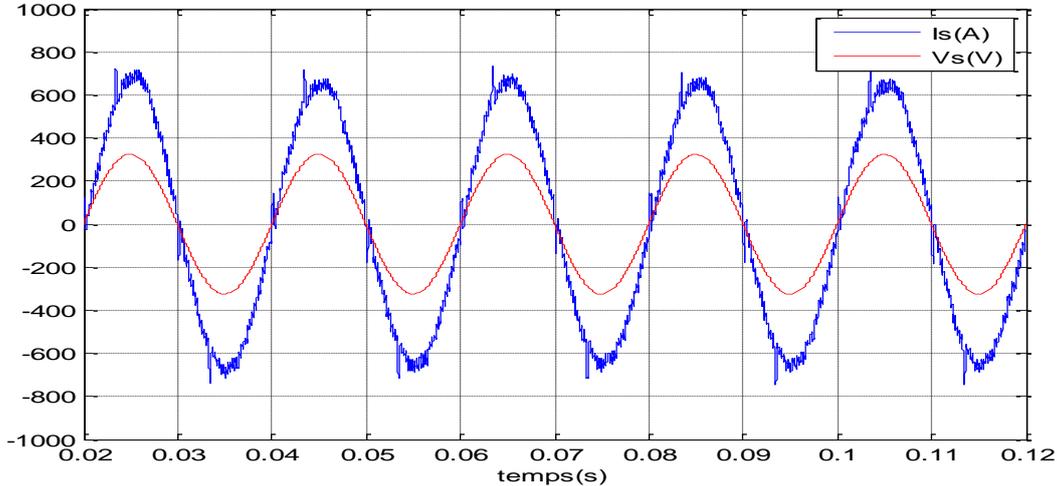


Figure III.16. courant et tension de source

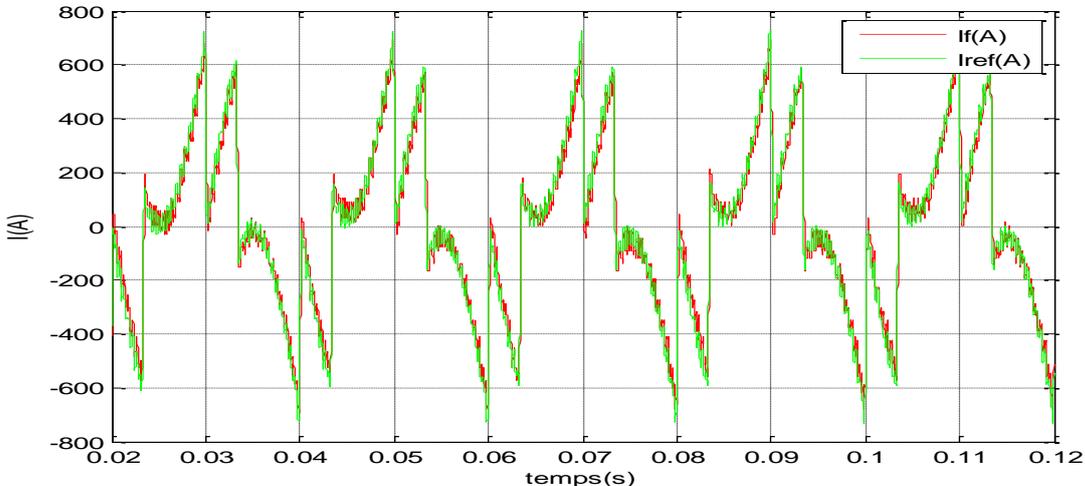


Figure III.17. Courant harmonique injecté au réseau  $I_f$  avec sa référence

### **III.6 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'intérêt d'utilisation du filtre actif parallèle avec le régulateur flou pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique dans le réseau. Les résultats de simulations obtenus montrent l'efficacité du régulateur flou, qui permet la réduction du THD du courant de source après compensation à 4.78 % au lieu de 8.66 en utilisant le régulateur PI classique.

# Conclusion Générale

# Conclusion Générale

---

Ces dernières années ont vu, chez les consommateurs d'énergie électrique, se multiplier les charges non-linéaires responsables de l'apparition des harmoniques et des effets néfastes sur le réseau électrique. Le problème de la réduction de cette pollution harmonique est devenu l'un des grands défis de la distribution électrique.

Les récents progrès en l'électronique de puissance apportent une capacité sans précédent de compensation de la distorsion harmonique générée par les charges non linéaires en utilisant un compensateur actif parallèle, permettant de dépolluer les réseaux électriques.

Le principe de la compensation est basé sur l'injection en permanence, au point de connexion du filtre actif parallèle au réseau, des courants qui correspondent à tout moment aux composantes harmoniques des courants absorbés par la charge mais en opposition de phase, afin d'avoir un courant sinusoïdal dans le réseau électrique.

Notre mémoire a été consacré à la réduction de l'injection de courants harmoniques dans le réseau électrique par la charge polluante, et plus précisément l'étude et simulation du filtre actif parallèle. Dans le premier chapitre, nous avons présenté la problématique des perturbations harmoniques et leurs effets nuisibles sur le réseau électrique, on a présenté les solutions pour les réduire, notamment le filtre actif parallèle qui est une solution pour la dépollution harmonique.

A la lumière de l'étude bibliographique approfondie faite sur les différentes solutions de dépollutions harmoniques, nous avons pu apprécier l'importance des recherches effectuées sur le filtre actif parallèles, sa structure et la méthode d'identification des courants harmoniques qui a été présentée dans le deuxième chapitre.

Le système étudié a été simulé sous MATLAB / SIMULINK. Les résultats de simulation obtenus avec régulateur PI classique montrent bien le rôle du filtre actif parallèle pour la compensation des courants harmoniques et réactifs. Dans ce cas, taux distorsion harmonique du courant avant compensation vaut 30.15% est passe à 8.01% après compensation.

Dans le troisième chapitre, on a présenté les résultats de simulation du filtre actif parallèle avec régulateur flou. Ces résultats montrent que le courant dans le réseau électrique après compensation est sinusoïdal et en phase avec la tension du réseau et le THD dans ce cas vaut 4.78%. Les résultats obtenus confirment les bonnes performances du régulateur flou et l'efficacité du filtre actif parallèle pour la dépollution des réseaux électriques et la compensation de la puissance réactive, d'ou la supériorité du régulateur flou par rapport à un régulateur PI classique.

---

# Référence Bibliographiques

- 
- [1] M. Ould Aly Sidi Mohamed « Commande floue d'un filtre actif série hybride interligne» mémoire de MASTER en Génie Électrique, Université Mohamed Boudiaf - M'SILA 2015/2016.
- [2] T.Narasa Reddy and M V Subramanyam, «Fuzzy logic controlled shunt active power filter for mitigation of harmonics with different membership functions», International Conference on Advances in Computing, Control, and Telecommunication Technologies, Trivandrum, Kerala, pp. 616 – 620, 28-29 Dec. 2009.
- [3] A. Chaoui, « Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires » Thèse de Doctorat, Université de Potitiers, France, 2010.
- [4] Gabriel Cormier Gabriel Cormier, Ph.D., ing. Professeur agrégé Département de génie électrique Faculté d'ingénierie Université de Moncton, NB CANADA E1A 3E9 2009 le line du site [http://www8.umoncton.ca/umcm-cormier\\_gabriel/](http://www8.umoncton.ca/umcm-cormier_gabriel/).
- [5] Serge Bernardo, Gérard Trochan, «Compensation des courants harmoniques générés par les ordinateurs grâce à un compensateur actif d'harmoniques révolutionnaire», MGE, UPS SYSTEMS, MGE0128FRI- 01/2000.
- [6] M.A.E. Allali, « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électrique basse tension », Thèse de Doctorat, ULP Strasbourg I. 12 sept 2002.
- [7] CEI/IEC 61000-2-1:1990, «Electromagnetic Compatibility», Part 2: Environment, Sect. 1: Description of the environment – Electromagnetic environment for low- frequency conducted disturbances and signalling in public power supply system's", First Edition, 1990-05.
- [8] R .F. Chu , J.J. Burns, «Impact of Cycloconverter Harmonics», IEEE Trans on IndAppl, vol. 25, no. 3 May/June 1989,pp.427-435.
- [9] C. Budeanu «Reactive and fictitious powers».Revue Rumanian National Institute N°. 2, 1927.
- [10] R. Atseneau et tal ,« Pratical Definitions for Powers in System with Non sinusoidal Waveforms and Unbalanced Loads : A Discussion», IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, No. 1, pp. 79-101, Jan 1996.
- [11]Christophe Prévé, Robert Jeannot « Guide de conception des réseaux électriques sur les harmoniques». cahier technique SCHNEIDER-ELECTRIC N 6883 427 /A, 1997.
- [12] A.OMERI, «Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques du courant » Thèse de Doctorat, Université Annaba, 2007.
- [13] T. Deflandre et PH. Maurs, «Les harmoniques sur les réseaux électriques» direction des études et recherche en France -édition enrôles -1998.
- [14] F.Mekri«Etude et commande d'un filtre actif parallèle à structure tension», thèse de magistère, Université des Sciences et de la Technologie D'Oran 2001.
- [15] L. Zellouma, «Filtrage actif parallèles des harmoniques de courant génère par un pont redresseur triphasé non commande», thèse de magistère, Université Annaba, 2006.
- [16] J. N. FIORINA, « Harmoniques en amont des redresseurs des ASI », Cahier Technique n° 159 et 160.1993.
- [17] A.Chaghi, A.Guettafi,A.Benoudjit, « Four legged active power filter compensation for a utility distribution system.», Journal de«ELECTRICAL ENGINEERING», VOL. 55, NO. 1-2, 2004.

- 
- [18] L.Zellouma, «Contribution à l'étude du filtrage des harmoniques des réseaux de distribution à l'aide du filtre actif », thèse de doctorat, Université d'Annaba, 2010.
- [19] A.Zidane, L. Zellouma« Compensation des harmoniques et de la puissance réactive à l'aide du filtre actif parallèle » » mémoire Master en Commande Électrique Université Echahid Hamma Lakhder d'El-Oued Juin 2015.
- [20]S. Bougerra et I. Bourenane «Filtrage actif parallèle des réseaux électriques avec compensation de l'énergie réactive» mémoire d'ingénieur en génie électrotechnique, Université de M'sila , 2006/2007.
- [21] A, Caghi, «Contribution au contrôle du courant sur un réseau de distribution électrique application d'un compensateur actif », Thèse de Doctorat, Université de Batna, 2003.
- [22] Jianhong XU « Filtrageactifparallèledes Harmoniquesdesréseaux dedistribution d'électricité » Thèse de Doctorat l'Institut National Polytechnique de Lorraine20 Janvier 1994.
- [23] N.Adjimi et W.Belaidi « Modélisation et commande d'un onduleur MLI» mémoire Master en Systèmes Electriques & Automatique Université deLarbi Ben M'hidi Oum El-Bouaghi 2008/2009.
- [24] F.Mekri « Commande robuste des conditionneurs Actifs de puissances » Thèse de Doctorat Université Des Sciences et de La Technologie D'Oran 3 novembre 2007.
- [25] S.Hebaibia&L.Dakhli « Modélisation et Simulation d'un Filtre Actif Parallèle à sept Niveaux à Commande MLI »mémoire Master en Electrotechnique Université LrbiTebessi–Tebessa2015 / 2016.
- [26] F.Chevrie&F.Guély « la logique flou » cahier technique n°191/mars 1998.
- [27] A.Telli&I.Chouidira « Commande parlogiquefloued'un filtre actif parallèle avec correction du facteur de puissance» mémoire Master enGénie ÉlectriqueUniversité Mohamed Boudiaf - M'sila2016 /2017.
- [28] I.Ghadbane« Commande d'un Filtre Actif Triphasé Parallèle Par Différents Régulateurs »mémoire Magister en Electrotechnique Université Mohamed Kheider - Biskra 24 /02/2011.
- [29] B.B. Meunie et comarsal« Logique floue : principe, aide à la décision » Edition Hermes science, lavopsier 2003.
- [30] F.Dernoncourt « Introduction à la Logique Floue » Paris, Avril 2011.