

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



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



Projet de Fin de Cycle

En vue de l'obtention du diplôme de

Master (LMD)

Spécialité : ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE

Filière : ELECTROTECHNIQUE

Intitulé :

**Commande d'un filtre actif parallèle à structure de tension par la logique floue
en régime déséquilibré**

Présenté par :

LACHI BRAHIM

Devant le jury composé de :

Mr.M.RACHEDI
Mme. F.MEKRI
Mme. Dj. CHERIFI

Président
Encadreur
Examinateur

Promotion 2020-2021

Sommaire

Introduction générale.....	8
Chapitre I.....	11
I.1 Introduction	12
I.2. Perturbations affectant le réseau électrique de distribution.....	12
I.2.1. Creux tension et coupures de tension.....	13
I.2.2. Fluctuation de tension.....	13
I.2.3. Déséquilibre du système triphasé.....	14
I.2.4. Perturbations harmoniques.....	15
I.2.4.1. Définition et origine des harmoniques et inter-harmoniques	15
I.2.4.2. Harmoniques de courant et de tension.....	15
I.2.4.3. Les puissances mises en jeu.....	17
I.2.4.4. Distorsion harmonique.....	18
I.2.4.5. Effets des harmoniques	19
I.3. Normes et recommandations	20
I.4. Solutions envisagées pour la dépollution harmonique.....	21
I.4.1. les solutions traditionnelles	21
I.4.1.1. Ajout d'une inductance de lissage du courant	21
I.4.1.2. Surdimensionnement du neutre	21
I.4.1.3 Transformateurs spéciaux	21
- Transformateur déphaseur	22
- Pont dodécaphasé	22
I.4.1.4 Filtres passifs	23
I.4.2. Les solutions modernes	24
I.4.2.1 .Correction du facteur de puissance(PFC)	24
I.4.2.2. Les redresseurs MLI	25
I.4.2.3. Filtrage actif.....	25
-Principe du filtre actif de puissance.....	26
-Filtre actif série	26
-Filtre actif parallèle	27
- Coût du filtre actif	27
- Avantages du filtrage actif	27
I.5. Conclusion	28
Chapitre II : Etude d'un filtre actif parallèle basé sur un régulateur PI.....	29
II.1. II.1 Introduction	30
II.2. Filtre actif parallèle à structure tension.....	30
I.3. Structure de l'onduleur de tension	31
II.4 Calcul des courants de références	32
-Extraction des puissances	34
- Identification des courants de référence	35
II.5. Le contrôle du courant à la sortie du filtre.....	36
II.6. Résultats de simulation.....	38
II.7. CONCLUSION.....	41

Chapitre III : commande non-linéaire d'un filtre actif parallèle flou.....	42
III.1.introduction	43
42III.2.Principes de la logique floue.....	43
III.2.1.Notions de base de la logique floue.....	44
III.2.2.Variables linguistiques.....	45
.III.2.3.Fonctions d'appartenance... ..	45
III.2.4. Operateurs de la logique floue.....	46
III.2.5. Règles floues	47
III.3. Commande par logique floue	47
III.3.1.Constitution d'un système floue.....	47
III.3.2. Interface de fuzzification	48
III.3.3. Base de règles	48
III.3.4 .Mécanisme d'inférence floue	48
III.3.5. Interface de Défuzzification.....	49
III.4. Contrôle du filtre actif par régulateur PI flou... ..	49
III.5. Résultats de simulation	52
III.6. Conclusion.....	55
Chapitre IV : Etude du filtre actif en régime déséquilibré.....	56
IV.1.Introduction.....	57
IV. 2. Etude du déséquilibre de tension	57
IV.2.1. Conséquences du déséquilibre du réseau de distribution	58
IV.2.2.solutions appropriées.....	58
IV.3.Détermination des courants de référence.....	58
IV.3.1.les puissances instantanées (p) et (q).....	59
IV.3.2. Calcul des courants de référence.....	60
IV.4.Simulation numérique	60
IV.4.A - Raccordement charge passive triphasée déséquilibrée.....	61
IV.4.B- Raccordement d'une charge non-linéaire monophasée.....	64
IV.5.conclusion	66
Conclusion générale.....	67
Référence.....	70

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Limite des composantes harmoniques en courant (norme CEI 61000).....	20
Tableau II.1 : Tensions générées par l'onduleur.....	31
Tableau III.1 Tabled'inférence.....	53

Table des figures

Fig I.1 : Forme du courant absorbé par une charge non linéaire.....	12
Fig I.2 : Creux de tension et coupure de tension.....	13
Fig I.3 : Fluctuation de tension	14
Fig I.4 : Déséquilibre du système triphasé.....	14
Fig I.5 : Transformateur déphaseur.....	22
Fig I.6 : Montage d'un Pont dodécaphase.....	23
Fig 1.7 : Forme de courant et rang d'harmonique du pont dodécaphasé.....	23
Fig 1.8 : Connexion filtre passif au réseau.....	24
Fig 1.9 : Montage d'un correcteur du facteur de puissance (PFC)	25
Fig 1.10 : Redresseur MLI.....	25
Fig 1.11 : Filtre actif série.....	26
Fig 1.12 : Filtre actif parallèle	27
Fig II.1 : Connexion du filtre actif parallèle.....	30
Fig II.2 : Structure d'onduleur de tension triphasée.....	32
FigII.3 : Schéma simplifié de l'onduleur avec son filtre de sortie.....	32
Fig II.4: Extraction des composantes harmoniques.....	34
Fig II.5 : Méthode d'extraction des courants de référence.....	34
Fig II.6 : Schéma simplifié du filtre actif.....	36
Fig II.7: Principe de commande des courants par MLI.....	37
Fig II.8 : Comparaison de la modulante avec un signal triangulaire.....	37
Fig II.9 : Schéma global de la régulation du courant par MLI.....	37
Fig II.10 : Schéma simplifié de la régulation du courant par MLI.....	38
Fig II.11 : Schéma global du système à simuler.....	39
Fig II.12 : Tension triphasée du réseau.....	39
Fig II.13 : Compensation des courants harmoniques.....	39
Fig II.14 : Spectre du courant absorbé par la charge I_{ch} (avant compensation) ...	40
Fig II.15 : Spectre du courant de source après filtrage.....	40
Fig II.16 : Compensation des courants harmoniques et des courants réactives.....	41

Fig III.1: Variable linguistique.....	45
Fig III. 2: Quelques différentes formes de fonctions d'appartenance.....	46
Fig III. 3 : Structure interne d'un système flou.....	48
fig III.4 : Boucle de contrôle du courant I_f par régulateur PI flou	49
Fig III. 5: Structure générale de base d'un régulateur flou.....	50
Fig III.6 : Fonction d'appartenance de la variable d'entrer E (erreur).....	51
Fig III.7 : Fonction d'appartenance de la variable d'entrer \dot{E} (dérive de l'erreur) ...	51
Fig III.8 : Fonction d'appartenance de la variable de sortie U	51
Fig III.9 : Filtre actif parallèle avec régulation du courant.....	52
Fig III.10 : Compensation des courants harmoniques.....	53
Fig III.11 : Courant harmonique injecté au réseau I_f avec sa référence.....	53
Fig III.12 : Spectre du courant absorbé par la charge I_{ch} (avant compensation).....	54
Fig III.13 : Spectre du courant de source après filtrage I_s	54
Fig III.14 : Compensation des courants harmoniques et des courants réactifs... ..	55
Fig III.15 : Courant harmonique injecté au réseau I_f avec sa référence.....	55
Fig IV.1 : Schéma global d'obtention tous les harmoniques de charge.....	60
Fig IV.2 : système à simuler - charge passive triphasée déséquilibrée.....	61
Fig IV.3 : illustration des différentes puissances instantanées	62
Fig IV.4 (a) : Courants absorbés par la charge RL triphasée déséquilibrée	62
Fig IV.4 (b) : Courants I_{S1}, I_{S2}, I_{S3} après compensation : Régulateur PI.....	63
Fig IV.4(c) : Compensation du déséquilibre cas d'une charge passive triphasée :	
Régulateur PI flou.....	63
Fig : IV.5 : système à simuler : charge non linéaire monophasée déséquilibrée	64
Fig IV.6(a) : Courants absorbés par la charge non linaire monophasée	
déséquilibrée.....	64
Fig IV.6 (b) : Courants I_{S1}, I_{S2}, I_{S3} après compensation : régulateur PI.....	65
Fig IV.6(c) : Courants I_{S1}, I_{S2}, I_{S3} après compensation : régulateur PI flou.....	65

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

FAP : Filtre Actif Parallèle

GO :Gain d'onduleur

AC : Courant Alternatif (Alternating Current)

MW: Méga Watt

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

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

MOSFET : Transistor à Effet de Champ à Grille Métal Oxyde (Metal Oxide Semiconductor
Field Effect)

PI : Proportionnel Intégrateur

FFT : Transformation de Fourier Rapide (Fast Fourier Transform)

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

Depuis de nombreuses années, les fournisseurs d'énergie électrique s'efforcent d'en garantir la qualité. Les premiers efforts se sont portés sur la continuité de service afin de rendre toujours disponible l'accès à l'énergie chez l'utilisateur. Aujourd'hui, la situation au niveau des réseaux d'énergie électrique est devenue très préoccupante, la qualité du courant dans les installations électriques se dégrade incontestablement. Cette dégradation découle directement de la prolifération des charges qui consomment un courant non sinusoïdal, appelées « charges non linéaires », telles que des redresseurs à diodes ou thyristors, des alimentations à découpage, etc. En effet, ces charges non linéaires génèrent des harmoniques de courant et consomment de la puissance réactive, ce qui conduit à des conséquences directes sur la forme des ondes de tension et de courants qui deviennent non sinusoïdaux et donc un dysfonctionnement de plusieurs appareils sensibles à ce genre de problèmes tels que les appareils médicaux, ordinateurs, automates programmables, machines tournantes...etc.

Il est nécessaire de réduire les harmoniques dominants en dessous de 5% comme spécifié dans la norme harmonique IEEE 519 (1992) [1].

Pour faire face aux problèmes de la pollution harmonique dans les réseaux électriques de distribution et afin d'améliorer la qualité de l'énergie électrique en assurant la disponibilité et la qualité de l'onde de tension et de courant ; plusieurs solutions de dépollution des réseaux ont été proposées dans la littérature. Parmi elles, la solution classique (les filtres passifs) qui sont utilisés pour éliminer les harmoniques de courants et améliorer le facteur de puissance. Cette solution est la plus répandue et pratiquement la plus simple et la moins chère, mais elle présente deux inconvénients majeurs. Le premier est lié au phénomène de résonance avec le réseau qui est à l'origine de l'amplification de tout harmonique à fréquence voisine de celle du réseau. Le deuxième inconvénient est la dépendance des performances du filtre passif des caractéristiques du réseau sur lequel il est connecté. Cependant, les progrès remarquables réalisés au cours des dernières années, dans le domaine des semi-conducteurs de puissance entièrement commandables, les thyristors et les transistors en particulier, ont permis de concevoir des dispositifs d'élimination des harmoniques auto-adaptables appelés compensateurs actifs d'harmoniques.

Le filtre actif est un onduleur de tension ou de courant qui injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase afin

Introduction générale

d'avoir des courants sinusoïdaux côté réseau. Son objectif consiste à empêcher les courants harmoniques produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier un régulateur permettant un filtrage de grande efficacité lorsque le réseau est fortement perturbé et déséquilibré. Pour ce faire, le travail présenté est réparti en quatre chapitres.

Le premier chapitre du mémoire recense les perturbations qui peuvent apparaître dans un réseau électrique basse tension et expose leurs origines, leurs analyses et leurs conséquences ainsi que les normes visant à diminuer leurs proliférations.

Le deuxième chapitre, sera consacré l'étude du filtre actif parallèle de puissance. Nous avons présenté la méthode d'identifications des courants harmoniques des références, ainsi que la commande d'onduleur moyennant un régulateur proportionnel intégrateur (PI) ainsi des résultats de simulation obtenus à partir de l'environnement Matlab/Simulink.

Dans le troisième chapitre, on s'est intéressé au principe de la logique floue, en particulier au régulateur PI flou pour la commande du filtre actif parallèle afin d'atteindre une haute efficacité de filtrage. Des résultats de simulation sont obtenus à partir l'environnement Matlab/Simulink.

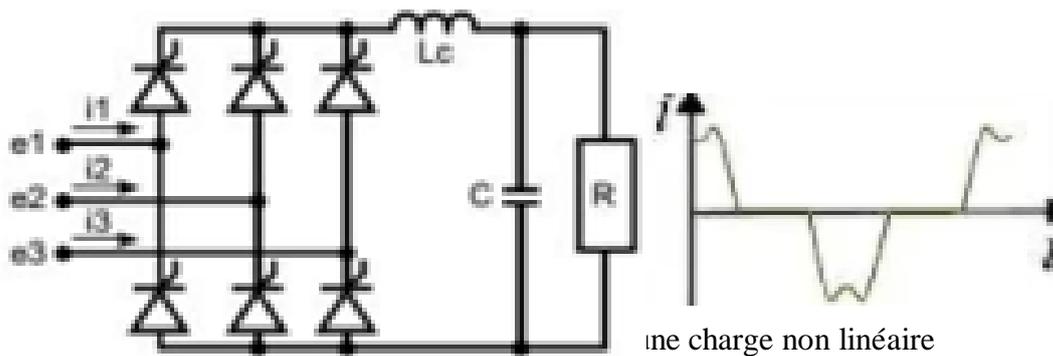
Dans le quatrième chapitre nous présentons la modélisation de l'ensemble, réseau déséquilibré-charge polluante-filtre actif.

Chapitre I

Généralités sur la pollution harmonique et les solutions de dépollution

I.1 Introduction

Le distributeur de l'énergie électrique a pour objectif de fournir à l'ensemble de ses clients une énergie de bonne qualité [1]. La modernisation des processus industriels ainsi que la sophistication des machines et appareillages électriques ont entraîné, ces dernières années, un développement important de l'électronique de puissance comportant les différents convertisseurs statiques d'énergie à base de semi-conducteurs (redresseurs, onduleurs, cyclo-convertisseurs, alimentations à découpage, etc...). Ces systèmes représentent pour le réseau électrique des charges dites « non linéaires » dont le courant absorbé n'est pas à l'image de la tension d'alimentation (bien que la tension de la source imposée à la charge soit sinusoïdale, le courant absorbé ne l'est pas). Comme le montre la figure (I.1) [2], qui illustre, un exemple de charge polluante.



I.2. Perturbations affectant le réseau électrique de distribution

La qualité de l'énergie électrique dépend de la tension aux points de raccordement et du courant absorbé par la charge. La tension est fournie sous la forme de trois tensions sinusoïdales, d'amplitude et de fréquence constantes [3], constituant un réseau triphasé équilibré [1]. Les perturbations peuvent se manifester par un creux ou une coupure brève de tension, une fluctuation de tension, un déséquilibre du système triphasé de tension, une variation de la fréquence et par les harmoniques.

1.2.1. Creux tension et coupures de tension

Un creux de tension est une brusque réduction de tension en un point du réseau, à une valeur entre 10% et 90% de la tension nominale, suivi de son rétablissement après une courte durée allant d'une demi-période jusqu'à quelques secondes. 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 comprise entre 10 ms, et une minute pour les brèves et supérieure à une minute pour les longues durées, figure (I.2). Ils peuvent être produits par des manœuvres d'enclenchement mettant en jeu des courants de fortes intensités ou par le fonctionnement consécutif des protections suite à l'apparition de défauts dans le réseau [3].

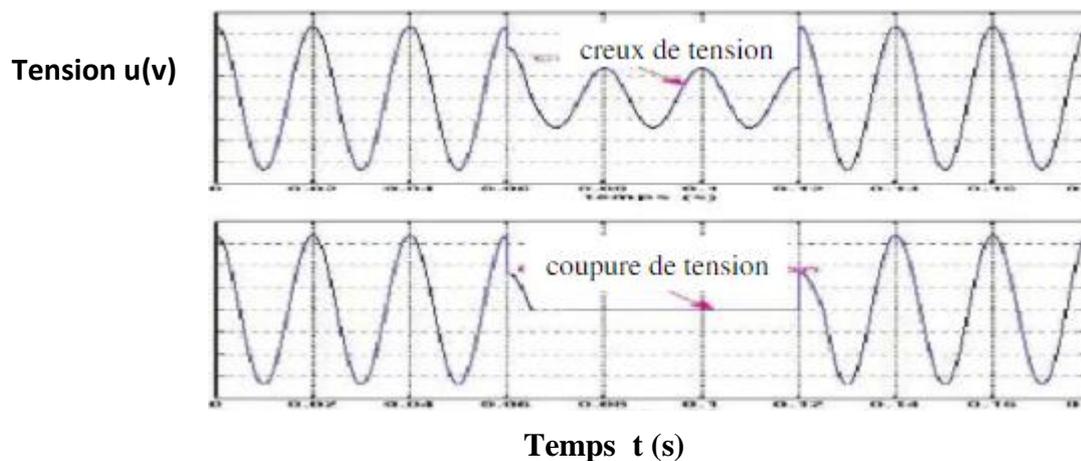
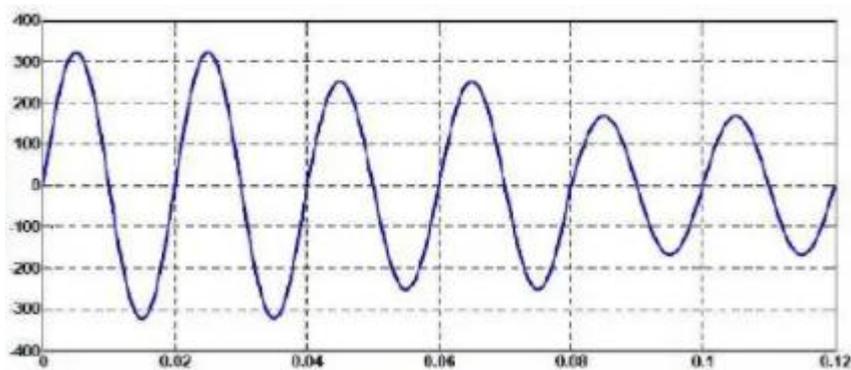


Fig I.2 : Creux de tension et coupure de tension

1.2.2. Fluctuation de tension

Les fluctuations de tension peuvent être décrites comme une variation de l'enveloppe de tension ou comme une suite de variation de tension aléatoire, figure(I.3), ce sont des variations brutales d'amplitude située dans une bande de $\pm 10\%$ et se produisent sur un intervalle de quelques centièmes de secondes. Elles sont dues en particulier à la propagation, sur les lignes du réseau, de courants d'appel importants dont l'origine principale est le fonctionnement d'appareils dont la puissance absorbée varie de manière rapide, comme les fours à arc ou encore les machines à souder.

Tension u(v)



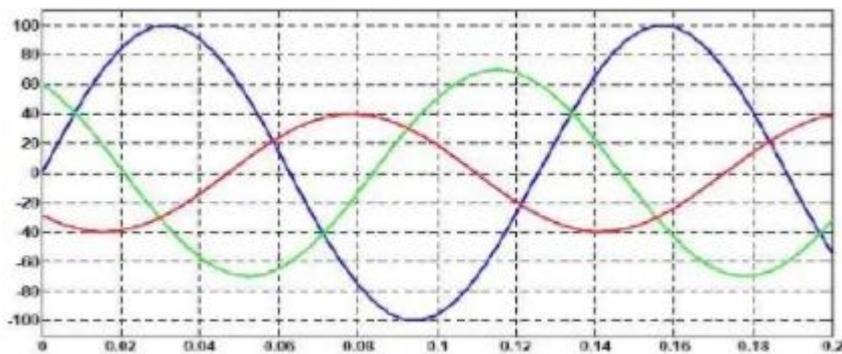
Temps t(s)

Fig I.3 : Fluctuation de tension

1.2.3. Déséquilibre du système triphasé

Le phénomène de déséquilibre de tension est la situation où les trois tensions du système triphasé ne sont pas égales en amplitude et/ou ne sont pas décalées normalement les unes par rapport aux autres de 120° , figure (I.4). La cause majeure du déséquilibre est liée à la présence de charges monophasées réparties de façon non équilibrée sur les trois phases du réseau, ce qui est particulièrement le cas dans les réseaux basse tension [4] .

Tension u (v)



Temps t(s)

Fig I.4 : Déséquilibre du système triphasé

I.2.4. Perturbations harmoniques

I.2.4.1. Définition et origine des harmoniques et inter-harmoniques

Les harmoniques sont des signaux dont la fréquence est un multiple entier de celle du fondamental, ils sont principalement générés par des charges non linéaires. Soumise à une tension sinusoïdale, une charge non linéaire absorbe un courant déformé dont les composantes harmoniques ne dépendent que de ses caractéristiques propres et non de celles du réseau. Cette charge se comporte comme une source de courants harmoniques [5,12], on peut observer d'autres fréquences qui sont des multiples non entiers de celle du fondamental.

Les principales sources d'harmoniques sont dues aux convertisseurs statique (redresseurs, variateurs de vitesse, ordinateurs, téléviseurs, etc..). Pour les inter-harmoniques, les sources principales sont les cyclo-convertisseurs, les moteurs asynchrones et les machines à souder (pour les réseaux à basse tension), et les fours à arc (pour les réseaux à moyenne et haute tension) [4].

I.2.4.2 Harmoniques de courant et de tension

Dans la plupart des cas, les harmoniques présents sur les réseaux électriques proviennent de l'utilisation de charges non linéaires. Ces charges se comportent approximativement comme des sources de courant harmonique, car le courant harmonique est fixé par la charge et non par l'impédance ou la tension du réseau auquel elles sont raccordées. L'impédance présentée par un réseau dépend de la fréquence à laquelle on la considère. On peut définir en tout point d'un réseau une impédance harmonique Z_h , qui dépendra du rang harmonique h considéré, elle représente la mise en parallèle de toutes les lignes qui convergent vers ce point. Les courants harmoniques émis par les charges perturbatrices se propagent entre les différentes lignes [12]. La circulation des harmoniques de courant provenant des charges non linéaires à travers des impédances harmoniques du réseau en un point du réseau crée des harmoniques de

$$\text{tension selon la loi d'Ohm : } V_h = Z_h \cdot I_h \quad \text{I.1}$$

V_h : la tension harmonique de rang h

Z_h : l'impédance harmonique de rang h

I_h : le courant harmonique de rang h

Le contenu harmonique d'une grandeur, tension ou courant par exemple, peut être calculé en utilisant la décomposition en série de Fourier. Cette décomposition met en évidence [1] :

- Un terme sinusoïdal à la fréquence 50Hz du réseau, le fondamental.
- Des termes sinusoïdaux dont les fréquences sont des multiples entiers de celle du fondamental, les harmoniques.

Ainsi, la somme de ces deux termes donne l'expression de la grandeur, selon les relations suivantes :

$$v(t) = \sum_{h=1} V_h \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(h\omega t - \theta_h) \quad \text{I.2}$$

$$i(t) = \sum_{h=1} I_h \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(h\omega t - \phi_h) \quad \text{I.3}$$

Avec :

h : rang harmonique.

V_h, I_h : tension et courant harmoniques de rang h.

ω : pulsation fondamentale ($2\pi \cdot f_1 = 2\pi/T$).

ϕ_h : déphasage du courant I_h par rapport à l'origine des phases à l'instant initial (t=0s).

θ_h : déphasage de la tension V_h par rapport à l'origine des phases à l'instant initial (t=0s).

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} V_h \cdot I_h \cdot \cos(\phi_h - \theta_h)$$

$$Y_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T y^2(t) dt} \quad \text{I.4}$$

Le théorème de Parseval montre que [4] :

$$\frac{1}{T} \int_0^T y^2(t) dt = Y_0^2 + \sum_{h=1}^{\infty} Y_h^2 \quad \text{I.5}$$

Y_0 : la fondamentale et Y_h : l'harmonique

On a donc les relations suivantes par les grandeurs suivantes [2] :

$$V_{eff} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \quad \text{I.6}$$

De même :

$$I_{eff} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad \text{I.7}$$

1.2.4.3. Les puissances mises en jeu [4]

Les notions de puissance définies pour les signaux sinusoïdaux ne sont pas valables pour les signaux non sinusoïdaux. Considérons un courant et une tension non sinusoïdaux la puissance active est exprimée par:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \cdot i(t) dt \quad \text{I.8}$$

Après calcul on obtient :

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} V_h \cdot I_h \cdot \cos(\varphi_h - \theta_h) \quad \text{I.9}$$

De même, la puissance réactive est donnée comme suit:

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} V_h \cdot I_h \cdot \sin(\theta_h - \varphi_h) \quad \text{I-10}$$

La puissance apparente monophasée est :

$$S = V_{eff} \cdot I_{eff} \quad \text{I-11}$$

La contribution des produits des rangs harmoniques engendre une puissance déformante, exprimée en volt ampère déformant (VAD) et peut s'écrire sous la forme [6] :

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad \text{I-12}$$

Le facteur de puissance F est égal au rapport de la puissance active sur la puissance apparente. Il caractérise le dimensionnement d'un système électrique puisqu'il représente la puissance utile consommée par rapport à la puissance apparente disponible au niveau de la source. Son expression est la suivante [6] :

$$FP = \frac{P_1}{S} = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + D^2}} \quad \text{I.13}$$

De cette équation, le facteur de puissance sera toujours inférieur à 1, Sachant que :

$$P_1 = VI_1 \cos\varphi_1 \quad \text{I.14}$$

On obtient:

$$FP = \frac{I_1}{I_{eff}} \cos\varphi_1 \quad \text{I.15}$$

I_{eff} : la valeur efficace du courant de la charge

I_1 : la valeur efficace du courant fondamental de la charge

1.2.4.4. Distorsion harmonique

Plusieurs expressions peuvent être utilisées pour quantifier la déformation du signal. On caractérise la déformation sur un rang particulier par le taux harmonique de rang h, exprimé par rapport à la composante fondamentale [4], soit :

$$Y_h (\%) = \frac{Y_h}{Y_1} \cdot 100 \quad \text{I.16}$$

On définit le taux de distorsion harmonique (THD) ou facteur de distorsion, qui peut s'appliquer soit au courant, soit à la tension, par :

$$THD (\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} Y_h^2}}{Y_1} \cdot 100 \quad \text{I.17}$$

1.2.4.5. Effets des harmoniques

La présence des harmoniques dans les réseaux perturbent les autres charges, même les charges non linéaires, connectées aux bornes de la même source de tension. En effet, ces charges risquent de ne plus être alimentées dans des conditions satisfaisantes aux références de tensions exigées. Les effets les plus importants sont :

- Les courants harmoniques génèrent des pertes et par conséquent des échauffements. Ces pertes joule dans les équipements dépendent de la valeur efficace du courant de charge absorbé et réduisent également le rendement de ces équipements et accélère le vieillissement des isolations et diminuent leur durée de vie du matériel [5].
- Les courants harmoniques provoquent des flux supplémentaires qui se superposent au flux fondamental. Ces flux augmentent la valeur crête du flux, et provoquent ainsi la perturbation du circuit magnétique du transformateur. De plus, le transformateur peut devenir générateur d'harmoniques [5].
- Pour les moteurs et les alternateurs, les harmoniques de tension de fréquence élevée provoquent des pertes fer supplémentaires. Les courants harmoniques générés par des tensions harmoniques de la source augmentent les pertes joule, créent des champs tournants à des vitesses différentes de 50 Hz qui provoquent des couples moteur ou résistant à des fréquences différentes aussi de 50 Hz. Il s'ensuit des vibrations pouvant entraîner des problèmes mécaniques, des bruits anormaux et le rendement du moteur baisse [5].
- Echauffement du câble de neutre résultant de la circulation de la somme des courants de fréquences harmoniques de rang 3 et multiples de 3 [12].
- Echauffement des condensateurs, causé par les pertes dues au phénomène d'hystérésis dans le diélectrique. Ces échauffements peuvent conduire au claquage [3].
- Ils concernent les appareils produisant une image électronique (écran ordinateur, téléviseur) les appareils produisant un son censé être de bonne qualité (téléphone, chaîne HI-FI) ou sur la précision des appareils de mesure [7].
- Les harmoniques peuvent entraîner le mauvais fonctionnement des systèmes électroniques utilisant la tension comme référence. Les compteurs d'énergie présentent des erreurs supplémentaires.

I.3. Normes et recommandations

De nombreux organismes internationaux imposent des limites sur l’injection des courants harmonique afin d’assurer une qualité du réseau de distribution. Les équipements électriques doivent fonctionner sans dégradation face à des phénomènes perturbateurs, en particulier ceux de basses fréquences. Pour garantir un niveau de qualité de l’énergie satisfaisant et une bonne cohabitation entre les sources polluantes et les charges polluées, l’ensemble des distributeurs et utilisateurs est amené à respecter plusieurs normes et recommandations qui définissent les règles relatives à la compatibilité électromagnétique (CEM). Les principales normes en matière de pollution harmonique basse tension sont au niveau international [6]. Un extrait de la norme la CEI 61000 est donné au tableau(I.1).

Rangs impairs		Rangs impairs		Rangs pairs	
Rang	Taux(%)	Rang	Taux(%)	Rang	Taux(%)
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	$0,2+1,3*25/h$				

Tableau I.1 : Limite des composantes harmoniques en courant (norme CEI 61000)

I.4. Solutions envisagées pour la dépollution harmonique

Les harmoniques de courant ne peuvent être supprimés, c'est la charge qui les génère. Il va donc falloir les confiner au plus près des charges polluantes pour éviter qu'ils ne remontent sur la totalité du réseau [11]. Ainsi les différentes méthodes utilisées pour ce fait peuvent être regroupée dans deux catégories.

I.4.1. les solutions traditionnelles

En présence d'harmoniques, une solution courante est le surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique. Cependant d'autres solutions peuvent être considérées, à savoir :

1.4.1.1. Ajout d'une inductance de lissage du courant

L'ajout d'inductance de lissage en amont des dispositifs polluants est une solution communément utilisée afin d'atténuer les harmoniques de rangs élevés puisque leurs impédances augmentent avec la fréquence. Ces inductances réduisent donc la distorsion de la tension au point du raccordement mais induisent un coût supplémentaire. De plus, elles doivent être dimensionnées pour le courant nominal circulant en ligne. Cette disposition consiste à protéger les condensateurs, destinés à améliorer le $\cos\phi$ [6].

1.4.1.2. Surdimensionnement du neutre

Comme il a été mentionné, les courants homopolaires s'additionnent dans le conducteur du neutre. Afin d'éviter l'usure prématuré de ce dernier, il peut s'avérer avantageux de le surdimensionner [9]. Cette solution consiste à doubler, voire même tripler les conducteurs du neutre.

I.4.1.3 Transformateurs spéciaux

- Afin d'éviter le passage des courants harmoniques par le conducteur de neutre, l'ajout d'un transformateur de mise à la terre criant un neutre artificiel est une solution très efficace. Ce type de transformateur fournit un chemin de faible impédance pour les courants harmoniques qui sont déviés dans son propre neutre [9]. C'est donc dire, que seul le neutre du transformateur doit être en mesure de supporter ces courants.

- Transformateur déphaseur

Une autre solution pour la réduction des courants harmoniques est l'utilisation de transformateur déphaseur, figure (I.5). L'utilisation du transformateur triangle-triangle et du transformateur triangle-étoile pour alimenter deux charges non linéaires identiques a pour effets d'éliminer les courants du 5ème et 7ème harmonique produits par ces charges au point de raccordement. D'autres connexions de transformateur déphaseur peuvent être employées pour éliminer des harmoniques de rangs plus élevés, notamment le couplage zig-zag.

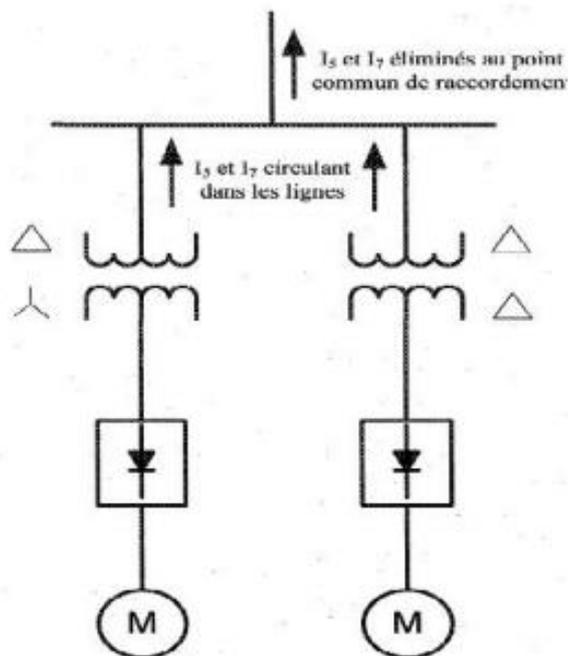


Fig I.5 : Transformateur déphaseur

Pont dodécaphasé

Le principe consiste à utiliser un transformateur à deux secondaires délivrant des tensions décalées de 30° entre elles, chacun de ces secondaires alimentant un redresseur en pont de Graëtz qui réalise un redressement hexaphasé, figure (I.6). 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 donnés 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.7), [12].

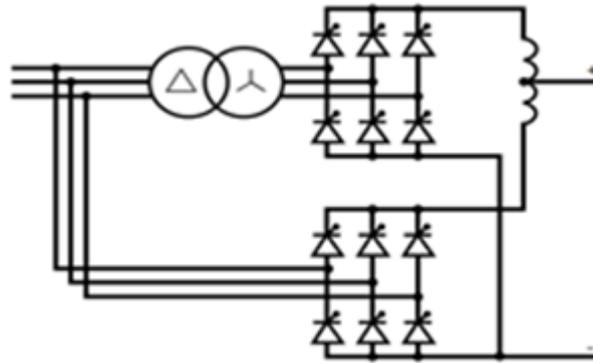


Fig I.6 : Montage d'un Pont dodécaphase

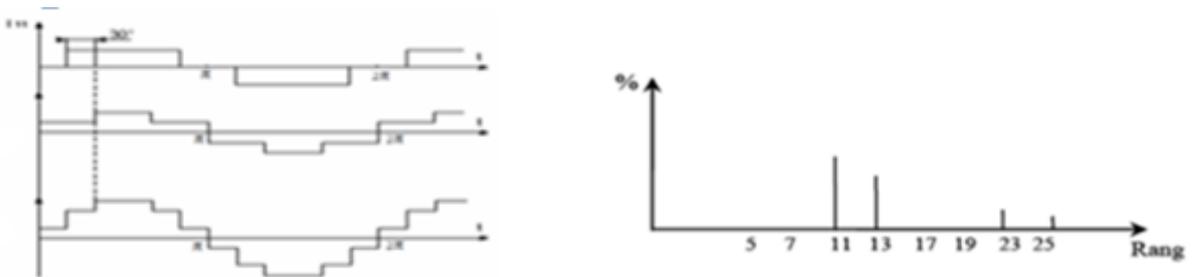


Fig I.7 : Forme de courant et rang d'harmonique du pont dodécaphasé

1.4.1.4 Filtres passifs

Son principe est de modifier localement l'impédance du réseau, de façon à dériver les courants harmoniques et à éliminer les tensions harmoniques là où c'est nécessaire. Un filtre passif, figure (I.8) est constitué d'éléments passifs tels que des inductances, des condensateurs et des résistances, forment une impédance qui varie en fonction de la fréquence. On connecte alors le filtre passif en parallèle avec le réseau de manière à absorber un harmonique de courant donné [6].

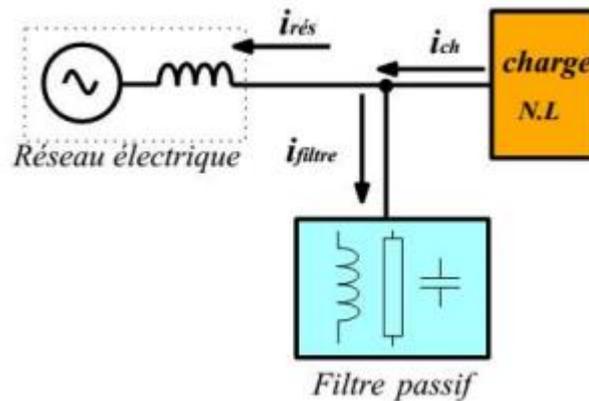


Fig 1.8 : Connexion filtre passif au réseau

La conception du filtre passif nécessite une étude approfondie du réseau électrique. Le dimensionnement dépend du spectre harmonique de la charge et de l'impédance de la source d'énergie. Il convient également de coordonner ses caractéristiques avec les besoins en puissance réactive des charges. Aussi, l'impédance du réseau a un impact majeur sur la conception et le dimensionnement du filtre passif. Il est important d'avoir une bonne connaissance des paramètres composant le réseau lors de cette étape afin d'obtenir un filtre efficace et ne risque pas d'entrer en résonance avec l'impédance du réseau. Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, on distingue le filtre passif résonnant ou passe-bande et le filtre passif amorti ou passe-haut.

1.4.2. Les solutions modernes

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

1.4.2. .Correction du facteur de puissance(PFC)

Un convertisseur AC/DC avec un correcteur de facteur de puissance, figure (I.9) 'PFC' agit comme si l'alimentation était une résistance pure vue de l'extérieur, c'est à dire que le courant est sinusoïdal et en phase avec la tension. Le PFC permet 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.

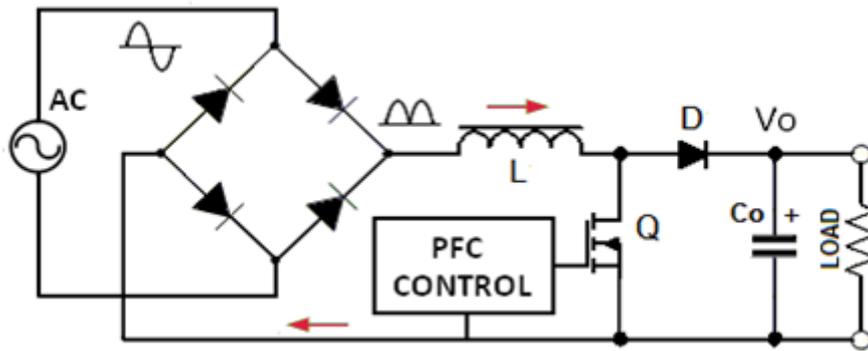


Fig 1.9 : Montage d'un correcteur du facteur de puissance (PFC)

I.4.2.2. Les redresseurs MLI

Ce sont des convertisseurs à modulation de largeurs d'impulsions MLI, figure (I.10) 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.

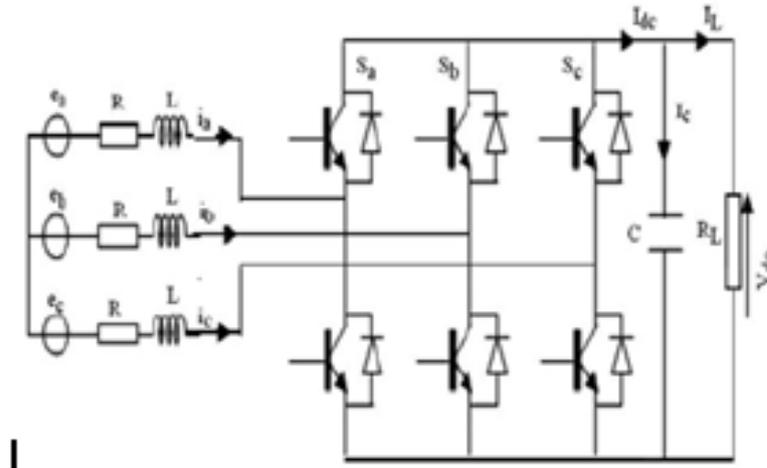


Fig 1.10 : Redresseur MLI

I.4.2.3. Filtrage actif

Vu tous les inconvénients présentés par le filtrage passif, la dépollution utilisant la commande ou l'électronique de puissance se présente comme une solution pour améliorer efficacement la qualité de l'énergie. L'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les

thyristors GTO et les transistors IGBT, ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtres appelée filtre actif de puissance, FAP, ou Active Power Filter (A.P.F) en anglais.

- *Principe du filtre actif de puissance*

Les filtres actifs sont des sources de courant ou de tension qui éliminent les perturbations harmoniques en injectant en série ou en parallèle des courants, des tensions ou les deux à la fois, en opposition de phase par rapport aux perturbations existantes de manière à ce que le courant ou la tension du réseau soient rendus sinusoïdaux et parfois avec un facteur de puissance unitaire. Le filtre actif est connecté soit en série, ou en parallèle, ou en combinant ces deux dernières structures ensemble ou associé avec des filtres passifs en fonction des grandeurs électriques harmoniques (courant ou tension) à compenser.

- *Filtre actif série*

Le filtre actif série (FAS) est placé en série entre la source et la charge à protéger, figure (I.11). Le but du filtrage actif série est de garantir une qualité d'onde de tension. Son principe consiste à superposer une certaine tension à l'onde perturbée, afin que la tension résultante soit dans les limites tolérées. Cette topologie est essentiellement destinée à protéger les installations sensibles aux perturbations venant du réseau, elle permet :

a/ Immuniser le réseau aval des creux de tension, on parle alors d'un restaurateur dynamique de tension ou autres perturbations affectant la valeur efficace de la tension, et ce, en injectant une tension en phase ou en opposition de phase avec la tension amont.

b/ Compenser les déséquilibres des tensions triphasées.

c/ Filtrer les harmoniques de tension venant du réseau,

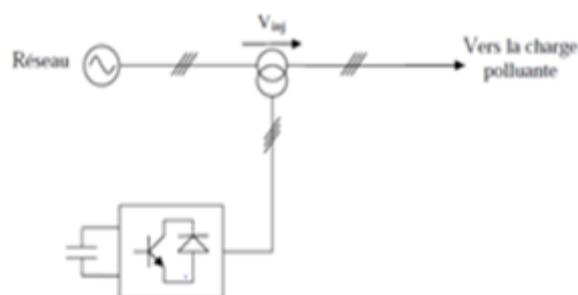


Fig 1.11 : Filtre actif série

- **Filtre actif parallèle**

Contrairement au filtre actif série, le filtre actif parallèle, figure (1.12) est surtout utilisé pour éliminer les courants harmoniques engendrés par les charges génératrices de courants harmoniques. Cette topologie fera l'objet d'étude dans le prochain chapitre.

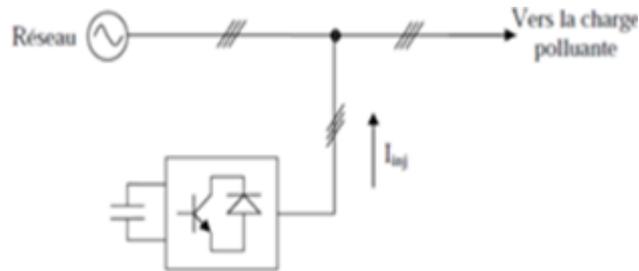


Fig 1.12 : Filtre actif parallèle

- **Coût du filtre actif**

Le coût du filtre actif varie principalement en fonction de la taille de son élément de stockage d'énergie, du nombre de semi-conducteurs qu'il contient ainsi que de sa topologie. Pour les applications de faibles et moyennes puissances, le stockage de l'énergie capacitif s'avère plus efficace et moins coûteux que celui de stockage d'énergie inductif. De façon complémentaire, l'élément de stockage d'énergie inductif, composée d'une bobine supra conductrice, est plus fiable dans les applications de haute puissance. Pour ce qui est du dernier point, il est à noter que des améliorations doivent encore être faites, car les bobines supraconductrices sont encore au stade de recherche. La topologie du filtre actif joue un grand rôle dans le coût. La topologie hybride, de son côté, permet de réduire le coût du filtre actif (réduction de la taille de l'élément de stockage d'énergie) puisque la majorité de la compensation harmonique est effectuée par le filtre passif [9].

- **Avantages du filtrage actif**

Le filtre actif offre de nombreux avantages :

a / Il s'adapte automatiquement à l'évolution des charges et du réseau.

b/ Il peut compenser plusieurs rangs harmoniques

c/ Il ne passe pas en surcharge lorsque le courant harmonique à compenser dépasse le dimensionnement du filtre actif. Il limite son émission de compensation harmonique au maximum de ses capacités, mais il n'y a aucun risque de destruction

d/ L'effet de l'impédance du réseau est moindre que dans le cas du filtre passif. Le risque de résonance entre le filtre actif et l'impédance du réseau est inexistant.

e/ Il peut protéger les condensateurs de compensation par élimination des courants harmoniques générés par une charge.

I.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons essayé de faire la lumière sur les principales perturbations qui peuvent prendre naissance dans les réseaux électriques, leurs origines et leurs conséquences sur les équipements essentiels existant dans le réseau et les installations industrielles. Ces perturbations découlent directement de la prolifération des charges qui consomment un courant non sinusoïdal, appelée « charges non-linéaires ». Nous avons vu que la dégradation de la qualité de l'énergie qui peut conduire à une modification du comportement, des performances ou même de la destruction des équipements. Différentes solutions traditionnelles et récentes sont étudiées dans la littérature afin de résoudre les différents types de perturbations. La suite de ce travail sera consacrée à l'étude du filtre actif parallèle basé sur un régulateur proportionnel intégrateur PI.

Chapitre II

Etude d'un filtre actif basé sur un régulateur PI

II.1 Introduction

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau figure (II.1), est le plus souvent commandé comme un générateur de courant [13]. Il empêche les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs et déséquilibrés), produits par des charges polluantes de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif afin de rendre le courant du réseau électrique sinusoïdal et / ou en phase avec la tension côté réseau.

L'objectif de ce chapitre est la détermination des courants de références et le contrôle du filtre actif parallèle pour améliorer la qualité de l'énergie électrique dans le réseau. Pour ce faire, après description du système étudié et les caractéristiques du filtre actif, la méthode de calcul des courants de références est détaillée ainsi que le régulateur PI.

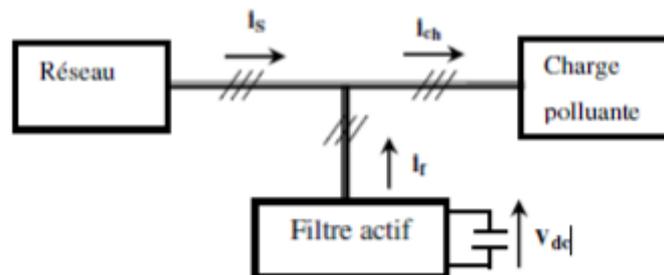


Fig II.1 : Connexion du filtre actif parallèle.

II.2. Filtre actif parallèle à structure tension

L'onduleur de tension est le composant principal du filtre actif parallèle. Son objectif est de compenser l'ensemble des harmoniques de courant générés par la charge non linéaire. La figure (II.1) présente le système global à étudier, qui est constitué du réseau d'alimentation, de la charge polluante et du filtre actif parallèle.

La partie commande du filtre actif est constituée de trois modules distincts réalisant les fonctions suivantes:

- détermination des courants harmoniques de la charge polluante
- commande de l'onduleur du filtre actif
- la poursuite des références de courant

I.3. Structure de l'onduleur de tension

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

Les interrupteurs S_1 et S_4 , S_2 et S_5 , S_3 et S_6 , doivent être complémentaires deux à deux, quel que 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 [14]. Cela implique que :

$$\begin{cases} S_1 = \overline{S_4} \\ S_2 = \overline{S_5} \\ S_3 = \overline{S_6} \end{cases}$$

Il en résulte huit états possibles pour les tensions sorties résumés dans le tableau (II.1). Le filtre de sortie de l'onduleur est du premier ordre, il permet d'assurer la connexion de l'onduleur de tension au réseau électrique, qui est considéré comme un générateur de courant harmonique. Il comporte une inductance et une résistance, figure (II.3). L'entrée de l'onduleur de tension est composée d'un condensateur qui joue le rôle d'une source de tension continue. La tension DC est maintenue constante

Tableau II.1 : Tensions générées par l'onduleur

1 ^{er} bras	2 ^{ème} bras	3 ^{ème} bras	V_{an}	V_{bn}	V_{cn}
0	0	0	0	0	0
1	0	0	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
0	1	0	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
1	1	0	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$
0	0	1	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$
1	0	1	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
0	1	1	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
1	1	1	0	0	0

Les tensions composées et simples de l'onduleur :

$$\begin{cases} V_{AB} = V_{An} - V_{Bn} \\ V_{BC} = V_{Bn} - V_{Cn} \\ V_{CA} = V_{Cn} - V_{An} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} v_{An} &= \frac{V_{AB} - V_{CA}}{3} \\ v_{Bn} &= \frac{V_{BC} - V_{AB}}{3} \\ v_{Cn} &= \frac{V_{CA} - V_{BC}}{3} \end{aligned}$$

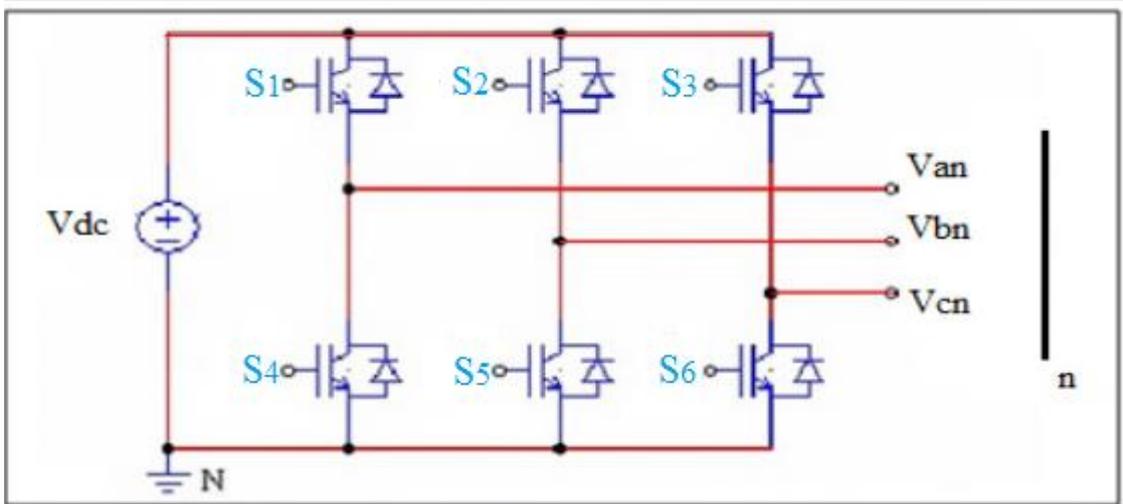
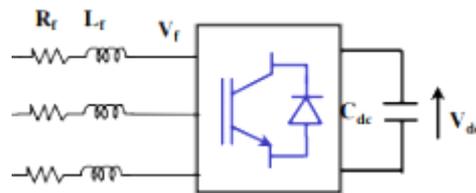


Fig II.2 : Structure d'onduleur de tension triphasée



FigII.3 : Schéma simplifié de l'onduleur avec son filtre de sortie

II.4 Calcul des courants de références

Pour commander le filtre actif, il faut identifier les courants harmoniques absorbés par la charge polluante. Dans notre travail, on a opté pour la méthode d'AKAGI, basée sur le calcul des puissances instantanées dans le domaine temporel [15]. Cette méthode d'identification des courants perturbateurs est très simple, elle se résume à l'élimination de composantes continues. Elle exploite la transformation de Concordia des tensions simples et des courants de ligne pour le calcul des puissances instantanées. La composante fondamentale est transformée en une composante continue et les composantes harmoniques en composantes oscillatoires.

Les tensions simples d'alimentations sont données par 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} :

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

: En supposant le courant continu de la charge polluante I_d parfaitement lissé (courant redressé), la décomposition en série de Fourier du courant de la charge du côté alternatif est [16]:

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

La valeur efficace du courant

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

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

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

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

Les puissances réelle et imaginaire instantanées, notées respectivement par p_{ch} et q_{ch} , sont définies par la relation matricielle 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) chacune des puissances, 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) :

$$P_{ch} = \overline{P_{ch}} + \tilde{q}_{ch} \quad \text{II.8}$$

$$q_{ch} = \overline{q_{ch}} + \tilde{P}_{ch} \quad \text{II.9}$$

Avec :

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

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

- **Extraction des puissances**

Afin de séparer les composantes continues des composantes alternatives, on utilise un filtre passe bas du deuxième ordre donné par la figure (II.4). L'expression de ce filtre est donnée par l'expression suivante:

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

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 [15].

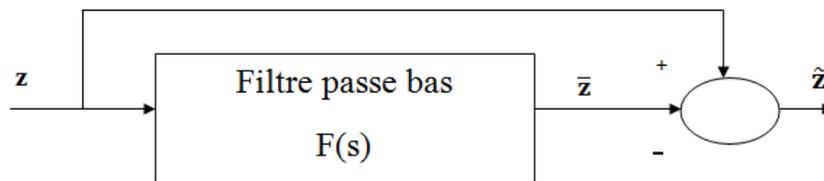


Fig II.4: Extraction des composantes harmoniques

Avec :

z : représente soit la puissance active(p) ou la puissance réactive(q)

\bar{z} : représente soit la puissance continue (\bar{p}) liée à la composante fondamentale active du courant ou la puissance continue, soit (\bar{q}) liée à la composante fondamentale réactive du courant

\tilde{z} : représente soit (\tilde{p}) ou (\tilde{q}), (sont des puissances alternatives liées à la somme des composantes harmoniques du courant).

• **Identification des courants de référence**

En se basant sur l'équation (II.7), on calcule les courants de référence $I_{réf\alpha}$ et $I_{réf\beta}$ donnés 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 $I_{réf1}$, $I_{réf2}$, $I_{réf3}$, donnés par le système d'équation (II.12).

$$\begin{bmatrix} I_{réf\alpha} \\ I_{réf\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha^2+v_{\beta^2}}} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{ref} \\ q_{ref} \end{bmatrix} \tag{II.11}$$

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

Le schéma de la figure (II.5) illustre les différentes étapes permettant l'extraction des courants de référence à partir des courants mesurés au point de raccordement.

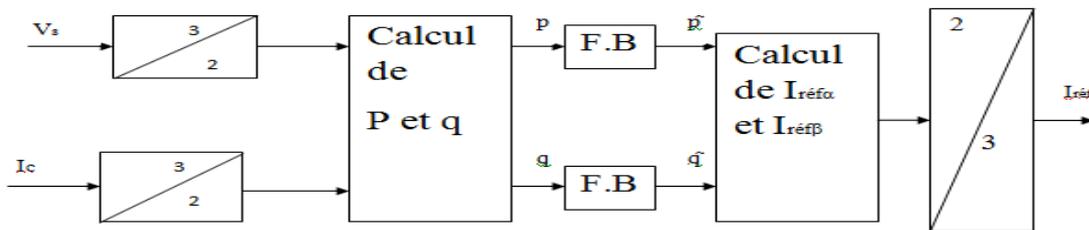


Fig II.5 : Méthode d'extraction des courants de référence

II.5. Le contrôle du courant à la sortie du filtre

Le filtre actif parallèle est considéré comme un générateur de courants harmoniques. Son filtre de sortie figure(II.6), permet la connexion de l'onduleur au réseau électrique. Le but de la commande du filtre actif est le contrôle des courants à sa sortie, afin qu'ils suivent bien leurs références. Le principe du contrôle du filtre actif est basé sur la comparaison entre le courant généré par le filtre et le courant de référence i_{ref} . Il existe deux grandes familles de contrôle, contrôle par MLI et contrôle par hystérésis. Dans ce travail, on a opté pour le contrôle par MLI (modulation de largeur d'impulsion).

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

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

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

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

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

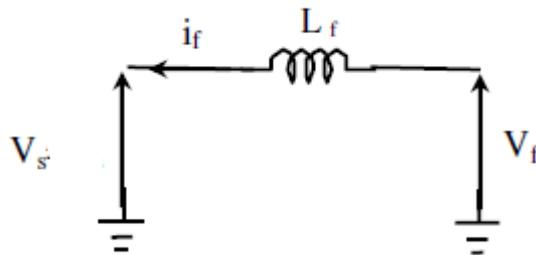


Fig II.6 : Schéma simplifié du filtre actif

De la figure (II. 7), 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), ce qui donne les ordres de commutations des interrupteurs comme le montre la figure (II.8).

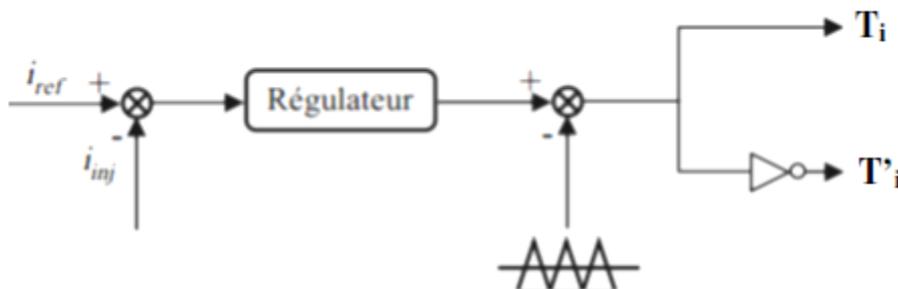


Fig II.7: Principe de commande des courants par MLI

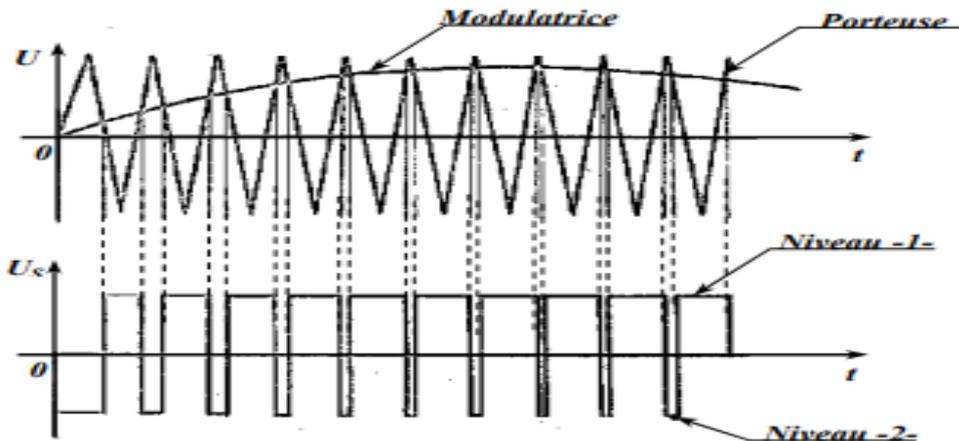


Fig II.8 : Comparaison de la modulatrice avec un signal triangulaire

Dans notre étude, on s'est basé sur correcteur proportionnel-intégrateur, car c'est un régulateur classique le plus utilisé à cause de sa simplicité. L'intérêt de la correction est l'annulation de l'erreur statique et avoir 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 de hautes fréquences venant de la MLI. Le schéma global de la régulation du courant par MLI est représenté par la figure(II.9). 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.10).

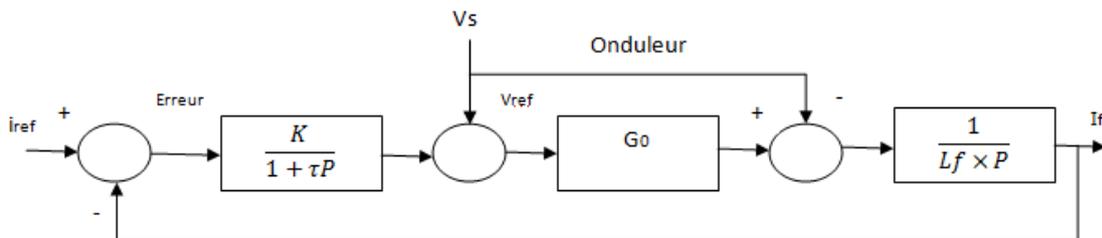


Fig II.9 : Schéma global de la régulation du courant par MLI

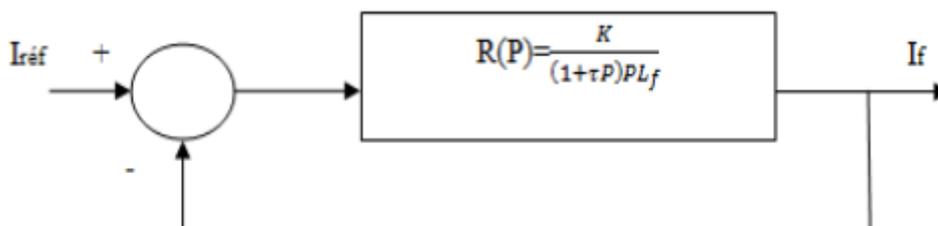


Fig II.10 : Schéma simplifié de la régulation du courant par MLI

Par identification de la fonction de transfert notre système (R(P)) à système deuxièmes (F(P)), on déduit les gains du régulateur PI utilisé. Dans ce cas, ξ 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 [15].

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

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

On déduit : $K = \omega^2 \times L_f \times \frac{1}{2\xi\omega}$ et $\tau = \frac{1}{2\xi\omega}$

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.11), 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 / Simulink¹

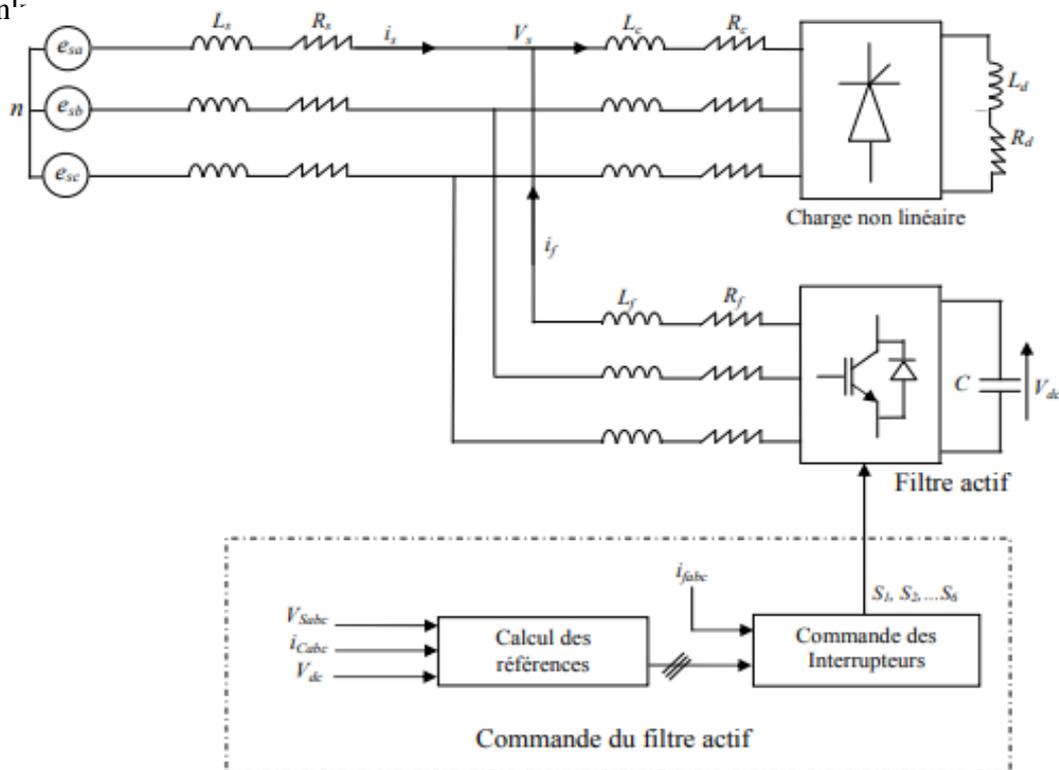


Fig II.11 : Schéma global du système à simuler

La figure (II.12) représente l'allure de la tension au niveau du réseau. La figure (II.13) représente respectivement les formes d'onde I_{ch} du courant absorbé par la charge, I_f le courant harmonique injecté au réseau et I_s le courant de source après filtrage. On remarque que le courant de source après compensation est sinusoïdal. Les figures (II.14), (II.15) représentent leur FFT. Ces résultats montrent que le 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 égale à 8.01%.

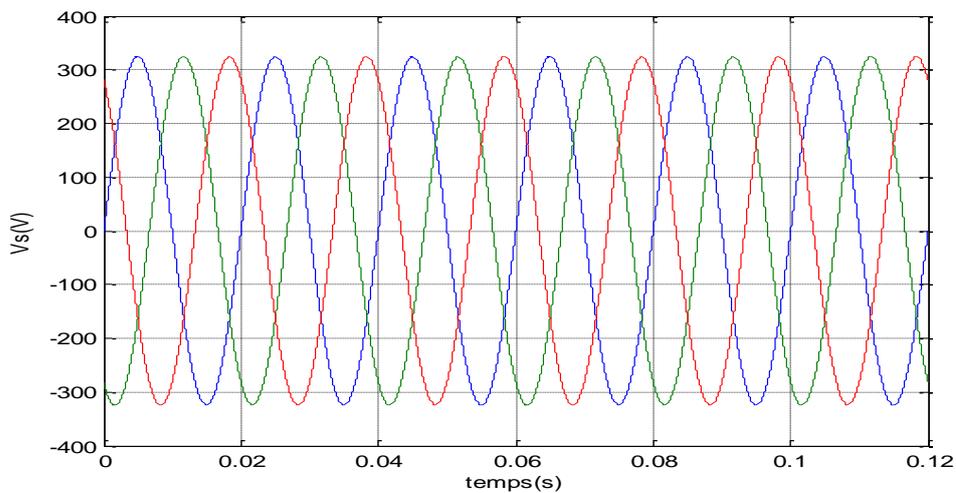


Fig II.12 : Tension triphasée du réseau

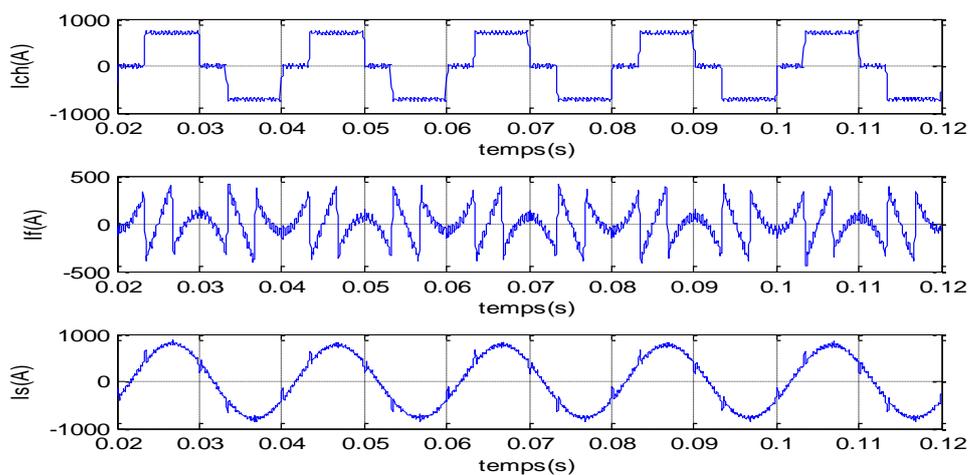


Fig II.13 : Compensation des courants harmoniques

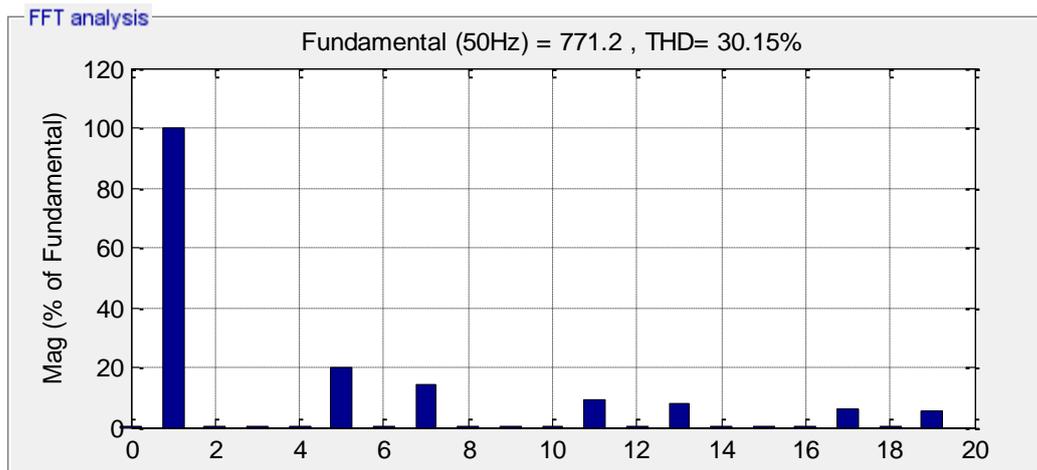


Fig II.14 : Spectre du courant absorbé par la charge I_{ch} (avant compensation)

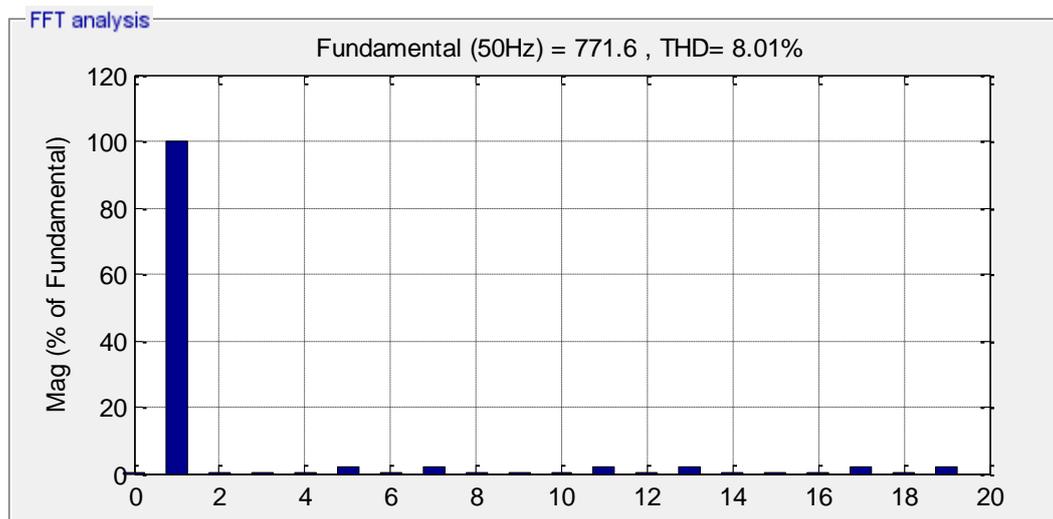


Fig II.15 : Spectre du courant de source après filtrage

La figure (II.16) illustre les résultats de simulation de compensation des courants harmoniques et des courants réactives. Dans ce cas, Le courant de source I_s est sinusoïdal et en phase avec la tension de la source.

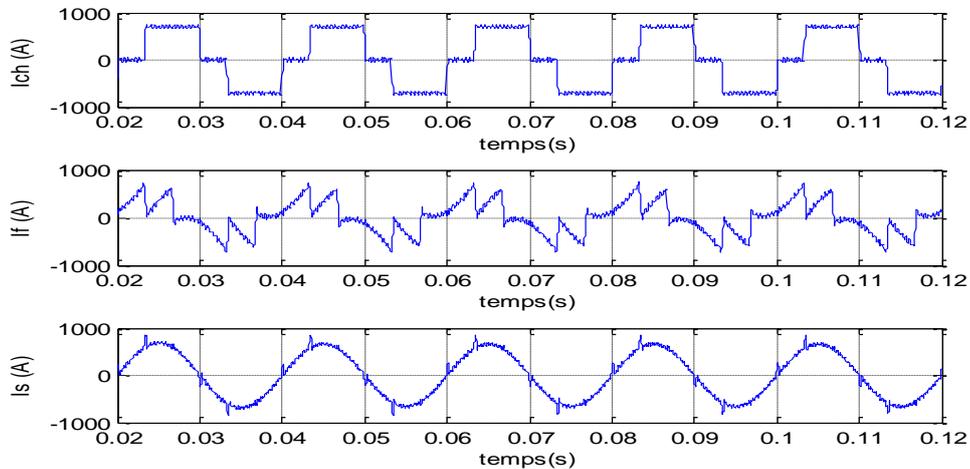


Fig II.16 : Compensation des courants harmoniques et des courants réactives

II.7. CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a fait la lumière sur le fonctionnement du filtre actif parallèle. En moyennant la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées pour l'identification des courants de référence, et le régulateur PI classique pour le contrôle du courant à la sortie de l'onduleur.

Les résultats de simulations montrent que le filtre actif est l'un des solutions modernes et efficace qui permet la compensation des harmoniques et du courant réactif. En utilisant le régulateur PI, le taux distorsion harmonique dans le réseau a été réduit à une valeur de 8% au lieu de 30.15% avant compensation.

Chapitre III

Commande non-linéaire d'un filtre actif parallèle flou

III.1. Introduction

L'incertitude et l'imprécision sont inhérentes à certains types d'informations traitées ou échangées par l'homme avec son environnement. Comme le précisait Zadeh, le raisonnement humain utilise couramment des étiquettes floues, "la température est élevée", "le ciel est gris",... ce qui différencie l'intelligence humaine de l'intelligence artificielle. D'une manière plus précise, la théorie des ensembles flous est l'outil indispensable de formalisation mathématique de l'analyse humaine face à un système complexe. Donc, l'application de la logique floue revient à tenter d'appliquer un raisonnement proche de la pensée humaine. La logique floue confère une flexibilité très appréciable aux raisonnements qui l'utilisent, ce qui rend possible la prise en compte des imprécisions et des incertitudes. Un des intérêts de la logique floue pour formaliser le raisonnement humain est que les règles sont énoncées en langage naturel. La logique floue apparaît utile pour tous systèmes complexes et non linéaires dans lesquels la modélisation est difficile ou impossible. Dans ce contexte, les systèmes flous ont été utilisés dans une large variété d'applications industrielles, tels que les systèmes audiovisuels, systèmes autonomes mobiles, et systèmes de transport (train, métro, ascenseur, ...).

Dans ce chapitre, on s'intéresse à remplacer le régulateur PI par un régulateur PI flou dans la boucle de contrôle des courants.

III.2. Principe de la logique floue

Le principe du réglage par logique floue s'approche de la démarche humaine dans le sens que les variables traitées ne sont pas des variables logique (au sens de la logique binaire par exemple) mais des variables linguistiques. La théorie de la logique floue, fondée sur des aspects de la théorie des possibilités, fait intervenir des ensembles d'appartenances appelés "ensembles flous" caractérisant les différentes grandeurs du système à commander [19]. Le raisonnement flou emploie un ensemble de règles floue établies par l'expert et dont la manipulation permet la génération de la commande adéquate. Les éléments de base de la logique floue sont les suivants [20] :

- Les variables linguistiques et les ensembles flous.
- Les fonctions d'appartenance.
- Les opérateurs.
- Les inférences à plusieurs règles floues.

III.2.1. Notions de base de la logique floue

Soit un ensemble X continu ou non, fini ou infini, tel que « $x \in X$ » désigne un ensemble de X [19]. A est un sous ensemble binaire ou ordinaire de X lorsque $A \subset X$. L'ensemble ordinaire A est défini par sa fonction caractéristique (ou fonction d'appartenance) telle que :

$$\mu_A(x) : X \rightarrow [0,1] \quad \text{III.1}$$

$$\mu_A(x) : \begin{cases} 1 & ; \text{ si } x \in A \\ 0 & ; \text{ sinon} \end{cases}$$

La notion d'ensemble flou permet des graduations dans l'appartenance d'un élément à une classe, c'est-à-dire autorise un élément à appartenir plus au moins fortement à cette classe. Soit un référentiel X dénombrable ou non et x un élément de X , alors un ensemble flou A de X est un ensemble de couples tel que :

$$A = \{ (x, \mu_A(x)) / x \in X \} \quad \text{III.2}$$

$\mu_A(x)$ est le degré d'appartenance de x à A . $\mu_A(x)$ est attribué à x par la fonction d'appartenance de A qui prend ses valeurs dans un ensemble totalement ordonné M .

L'ensemble d'appartenance est pris généralement égal à l'intervalle $[0,1]$. La fonction d'appartenance d'un ensemble

$$\begin{aligned} \mu_A : X &\rightarrow [0,1] \\ x &\rightarrow \mu_A(x) \end{aligned}$$

III.2.2. Variables linguistiques

Les variables linguistiques permettent de décrire dans un cadre très général la connaissance acquise sur une variable, même lorsqu'elle est vague ou imprécise.

La variable linguistique peut être représentée par un triplet $(x, T(x), U)$, dans lequel x est le nom de la variable linguistique, $T(x)$ l'ensemble des valeurs linguistiques de x et U l'univers de discours. La figure (III.1) illustre un exemple de variable linguistique 'vitesse' avec trois termes linguistiques : petite, moyenne et grande [22].

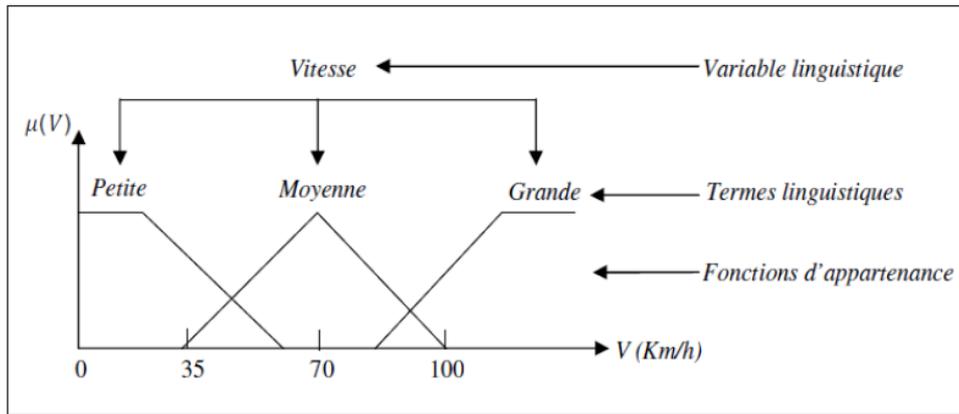


Figure III.1: Variable linguistique.

III.2.3. Fonctions d'appartenance

Pour traiter numériquement les variables linguistiques, il faut les mettre sous forme mathématique à base de fonctions d'appartenance, qui montrent le degré de vérification de ces variables aux différents sous-ensembles. Chaque ensemble flou peut être représenté par sa fonction d'appartenance. Les fonctions d'appartenance peuvent théoriquement prendre n'importe quelle forme, mais en général, les fonctions d'appartenance les plus utilisées sont définies par des formes géométriques ou des fonctions.

Les fonctions d'appartenance sont le plus souvent représentées par les fonctions triangulaire et trapézoïdale, donc par des segments de droite, les fonctions sont alors dites linéaires par morceaux. Dans la plupart des cas, et en particulier pour le réglage par la logique floue, ces deux formes sont suffisantes pour délimiter des ensembles flous. Généralement, les plus souvent utilisées sont les fonctions de forme trapézoïdale ou triangulaire ou gaussiennes figure (III.2) [17].

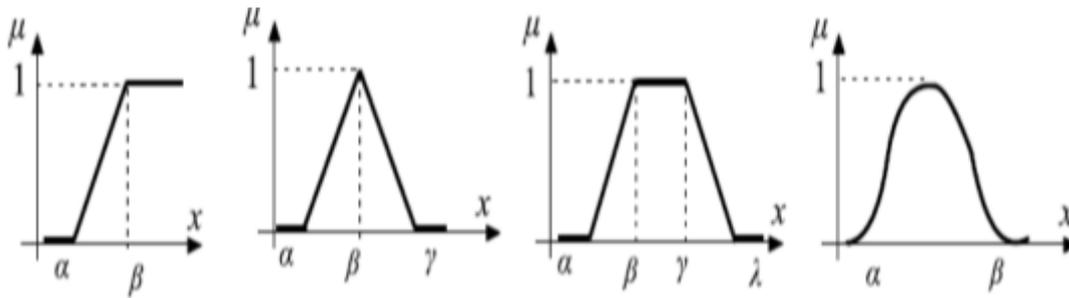


Fig III. 2: Quelques différentes formes de fonctions d'appartenance

III.2.4. Operateurs de la logique floue

Les variables linguistiques sont liées entre elles au niveau des inférences par des opérateurs logiques. Les quatre principaux opérateurs utilisés sont [23]:

- Le complément permet de vérifier, de combien un élément n'appartient pas à un ensemble. Comme exemple, si on a l'ensemble des températures élevées, le complément est l'ensemble des températures qui ne sont pas élevées. Si A est l'ensemble flou, son complément $\neg A$ est :

Négation (NON) : $\mu_{A^c} = 1 - \mu_A$ III.3

- L'intersection de deux ensembles, en logique flou, est un peu différente des méthodes classiques. On cherche à savoir de combien un élément est-il dans les deux ensembles. On utilise alors la valeur minimale d'appartenance pour calculer l'intersection :

Conjonction (ET) : $\mu_C = \mu_A \text{ ET } \mu_B$, $Z = \min [\mu_A(x), \mu_B(y)]$ III.4

- En logique floue, l'union est le contraire de l'intersection. On cherche à savoir de combien un est-il dans l'un des deux ensembles. On utilise la valeur maximale d'appartenance.

Disjonction (OU) : $\mu_C = \mu_A \text{ OU } \mu_B(z)$, $Z = \max[\mu_A(x), \mu_B(y)]$ III.5

- L'implication est une importante connexion dans les algorithmes de contrôle par logique, car la stratégie d'asservissement est souvent dictée par un ensemble de règles SI... ALORS... Il y a plusieurs méthodes d'implication, mais les plus connues sont :

Imp de Zadeh : $\mu_C(x, y) = \max \{ \min [\mu_A(x), \mu_B(y)] , 1 - \mu_A(x) \}$ III.6

Imp de Mamdani : $\mu_C(x, y) = \min [\mu_A(x), \mu_B(y)]$ III.7

III.2.5. Règles floues

La règle floue est une relation exprimée à l'aide d'une implication entre deux propositions flous, par exemple, considérons deux variables linguistiques $(V1, U, Tv1)$, $(V2, U, Tv2)$ et les deux propositions suivantes 'V1 est A', 'V2 est B', ou A et B sont deux ensembles flous de $V1$ et $V2$. On peut définir la règle floue par l'expression, si V1 est A Alors V2 est B.

Généralement, plusieurs règles floues sont nécessaires pour prendre une décision face à une situation donnée. On s'intéresse au cas de plusieurs règles floues dans le domaine de la commande et la régulation. Les règles floues peuvent être décrites de plusieurs façons [18] :

- Linguistiquement.
- Symboliquement.
- Par matrice d'inférence.

III.3. Commande par logique floue

La commande par la logique floue a le même but qu'une commande classique. En effet, cette méthode permet d'obtenir une loi de réglage souvent très efficace sans devoir faire des modélisations approfondies d'un régulateur classique. Le régulateur flou ne traite pas une relation mathématique bien définie (algorithme de réglage), mais utilise des inférences avec plusieurs règles, se basent sur des variables linguistiques [17].

III.3.1. Constitution d'un système floue

La figure (III.3) montre la configuration de base d'un réglage par logique floue, sachant qu'un système flou est composé de quatre parties essentielles [17].

- La base de connaissance constituée d'une base de données et d'une base de règles.
- Le système d'inférence.
- L'interface de fuzzification.
- L'interface de défuzzification.

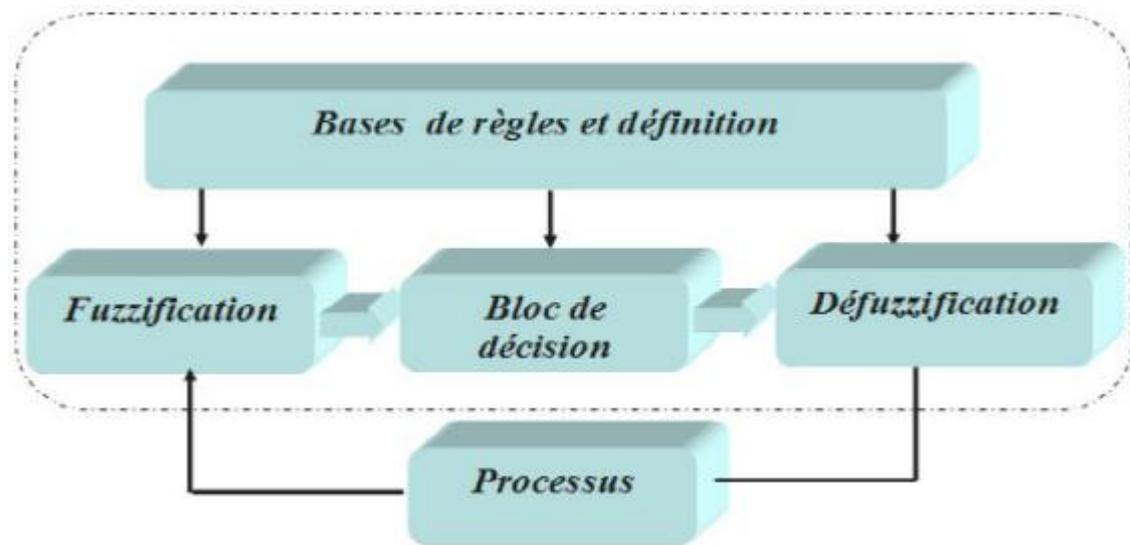


Fig III. 3 : Structure interne d'un système flou.

III.3.2. Interface de fuzzification

La fuzzification de la valeur précise d'une variable consiste à caractériser le degré avec lequel cette mesure appartient à un sous-ensemble flou donné, c'est-à-dire le passage d'une grandeur précise à une variable floue. Le choix des formes des fonctions d'appartenance est arbitraire. La forme la plus fréquemment utilisée en commande floue est la forme triangulaire, le nombre de fonctions d'appartenance est généralement impair et se répartissent autour de zéro. En général, on introduit pour une variable linguistique trois, cinq ou sept ensembles flous. Le choix du nombre dépend de la précision souhaitée. Les fonctions d'appartenance peuvent être symétriques, non symétriques et équidistantes ou non équidistantes [22].

III.3.3. Base de règles

Cette partie, comporte l'ensemble de définitions utilisées dans la commande floue (univers de discours, partitions ou classes floues, choix d'opérateurs, etc.), ainsi que la base de règle «Si...alors... », de la stratégie de commande [23].

III.3.4. Mécanisme d'inférence floue

Le principe de cette opération consiste à établir la liaison entre les grandeurs d'entrée 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 [18]. Les trois méthodes d'inférence les plus usuelles sont :

- Max-Produit.
- Somme-produit.
- Max-Min (Implication de Mamdani).

III.3.5. Interface de Défuzzification

Le résultat d'une inférence est une fonction d'appartenance. Cependant, un organe de commande nécessite un signal de commande précis. La transformation d'une information en une information déterminée est la defuzzification [24].

Dans cette partie, on va remplacer le régulateur PI dans la boucle de contrôle des courants par le régulateur PI flou qui lui-même repose sur la structure du régulateur PI classique. Souvent, le régulateur flou possède deux entrées (l'erreur et sa dérivée) et une sortie représentant la commande à appliquer au système. La figure (III.4) montre le schéma de principe du régulateur flou, et la figure (III.5) représente le contrôleur flou utilisé dans la structure de commande en boucle fermée.

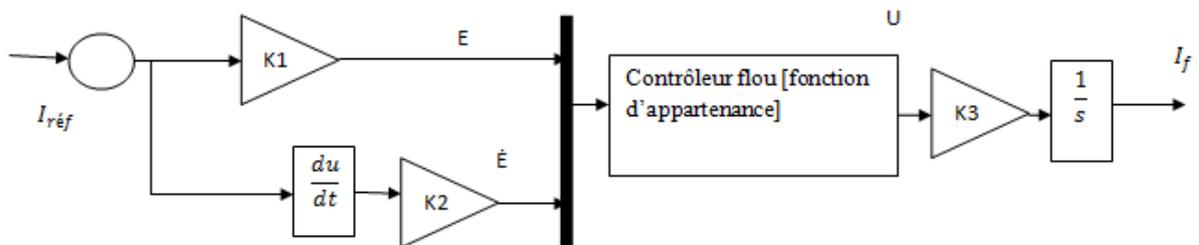


fig III.4 : Boucle de contrôle du courant I_f par régulateur PI flou

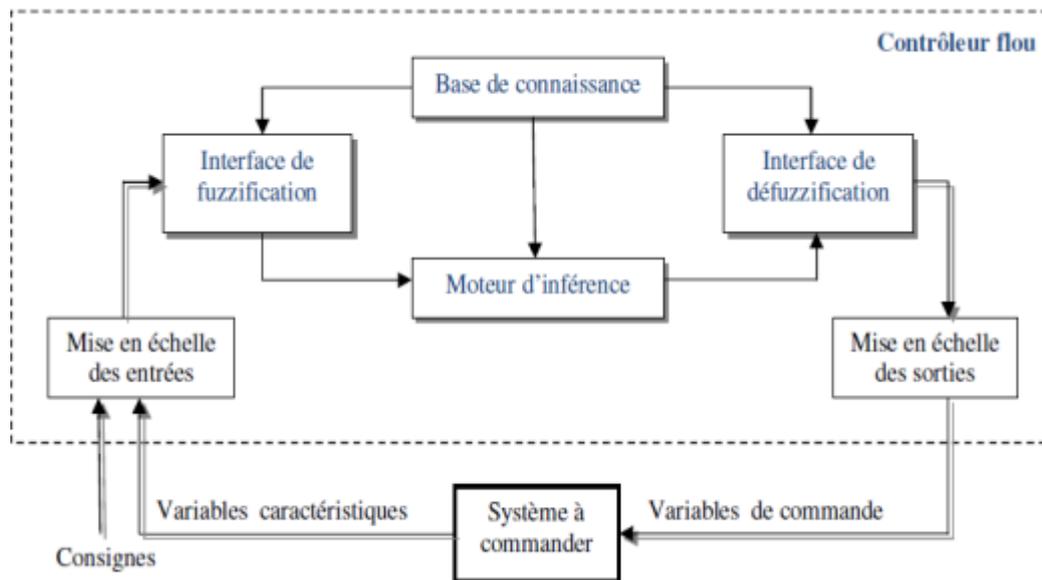


Fig III. 5: Structure générale de base d'un régulateur flou

On note :

- **Variables d'entrées** : E : l'erreur et \dot{E} : la dérivée de l'erreur
- **Variable de sortie** : U : la commande

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), 'Table d'inférence'. Ces règles floues représentent le cœur du régulateur et permettent d'exprimer sous forme linguistique les variables d'entrée du régulateur aux variables de commande du système [8]. Les figures (III.6), (III.7) présentent respectivement les fonctions d'appartenances des deux variables d'entrées E , \dot{E} . La figure (III.8) 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

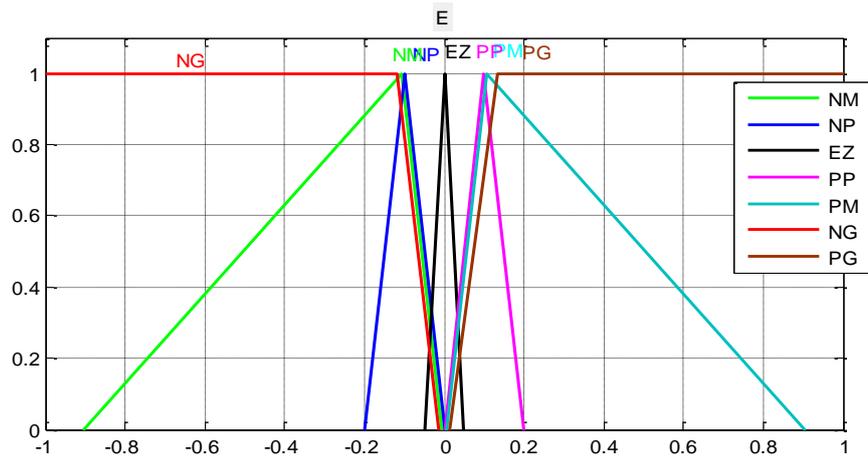


Fig III.6 : Fonction d'appartenance de la variable d'entrer E (erreur)

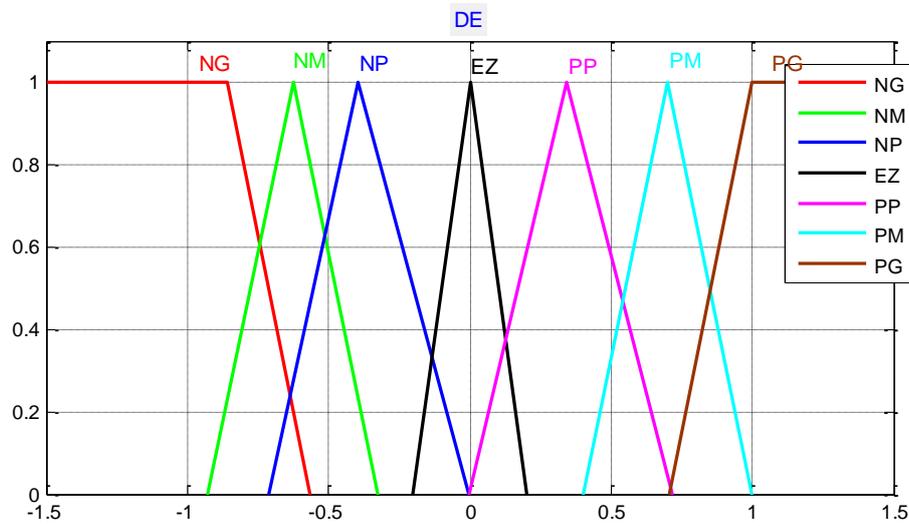


Fig III.7 : Fonction d'appartenance de la variable d'entrer È (dérive de l'erreur)

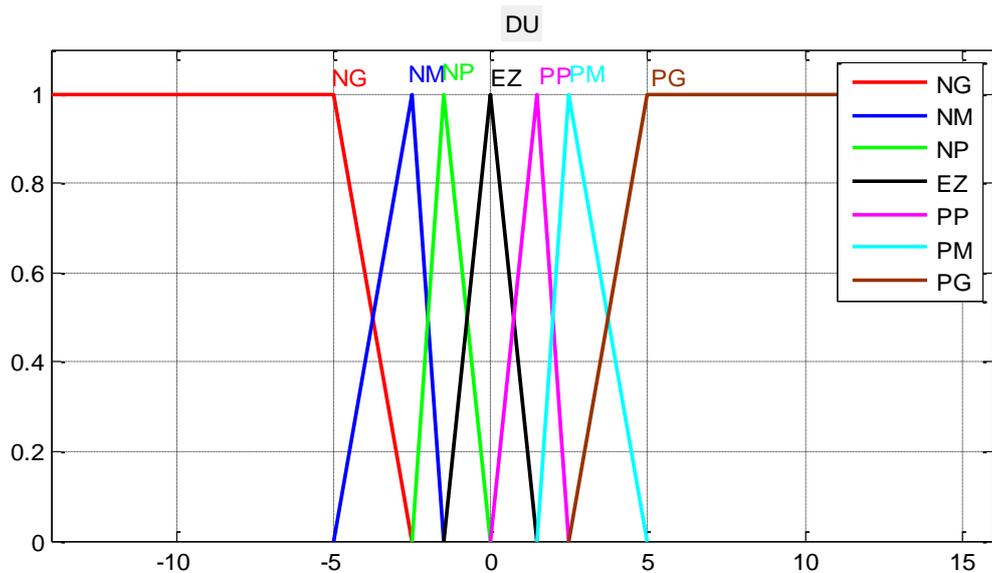


Fig III.8 : Fonction d'appartenance de la variable de sortie U

É \ 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}), de la charge non linéaire ($I_{ch1}, I_{ch2}, I_{ch3}$) et du filtre actif parallèle, donné par la figure (III.9).

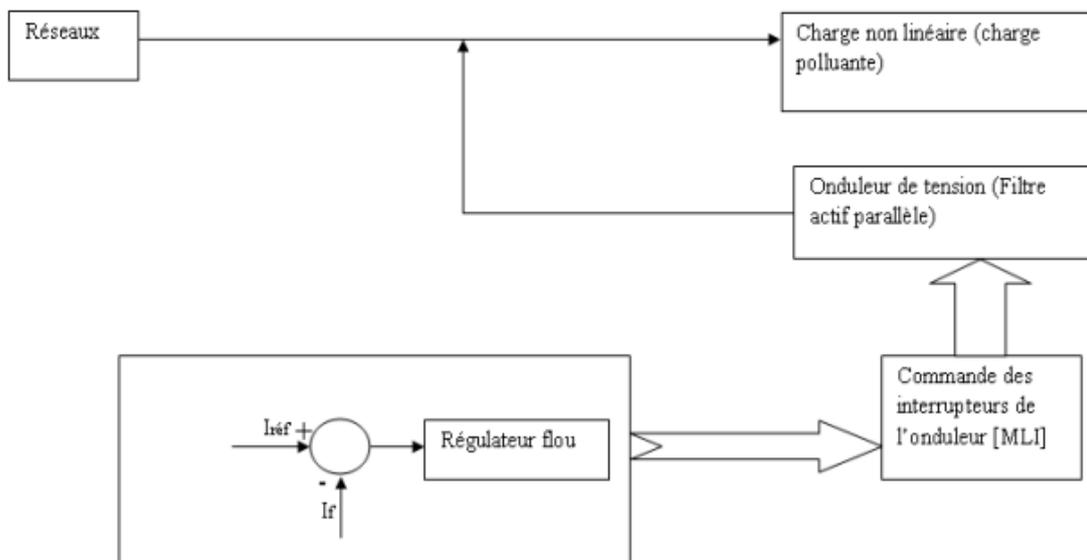


Fig III.9 : Filtre actif parallèle avec régulation du courant

La figure (III.10) présente les résultats de simulation obtenus lors de la compensation des courants harmoniques avec : I_{ch} 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. La figure (III.11) montre que le courant I_f suit très bien sa référence.

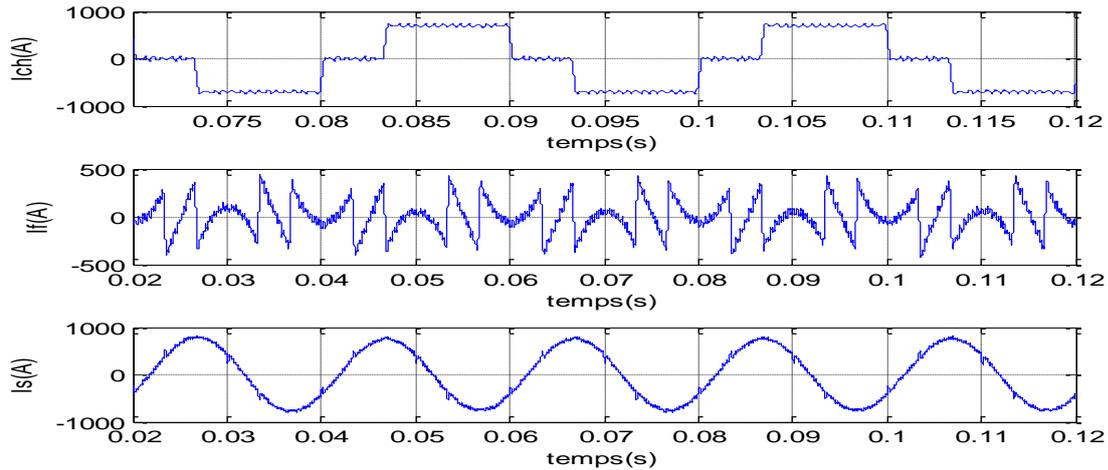


Fig III.10 : Compensation des courants harmoniques

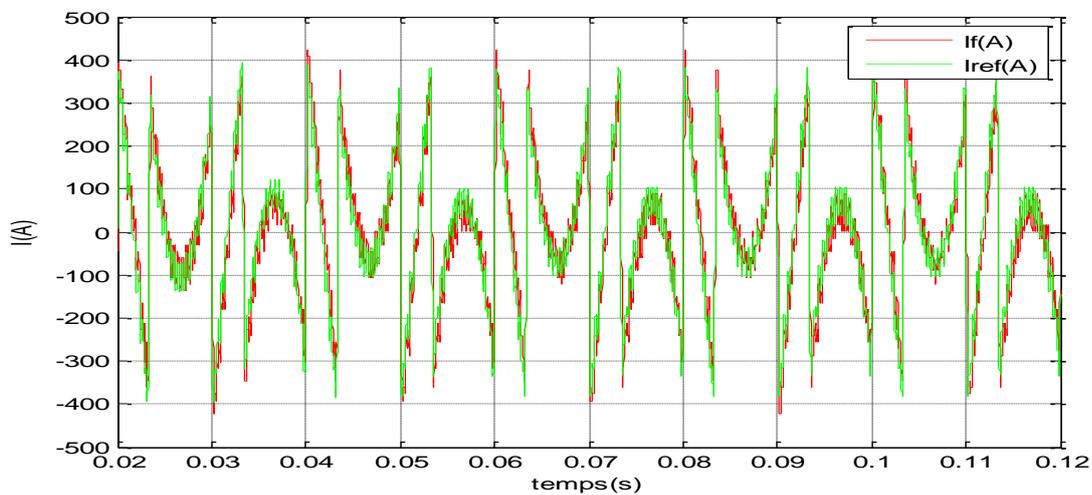


Fig III.11 : Courant harmonique injecté au réseau I_f avec sa référence

La figure (III.12) montre le spectre du courant absorbé par la charge I_{ch} (avant compensation) qui présente un taux distorsion harmonique $THD = 30.16\%$, et qui passe à 4.78% après compensation, comme le montre la figure (III.13), qui illustre le spectre du courant de source après filtrage I_s .

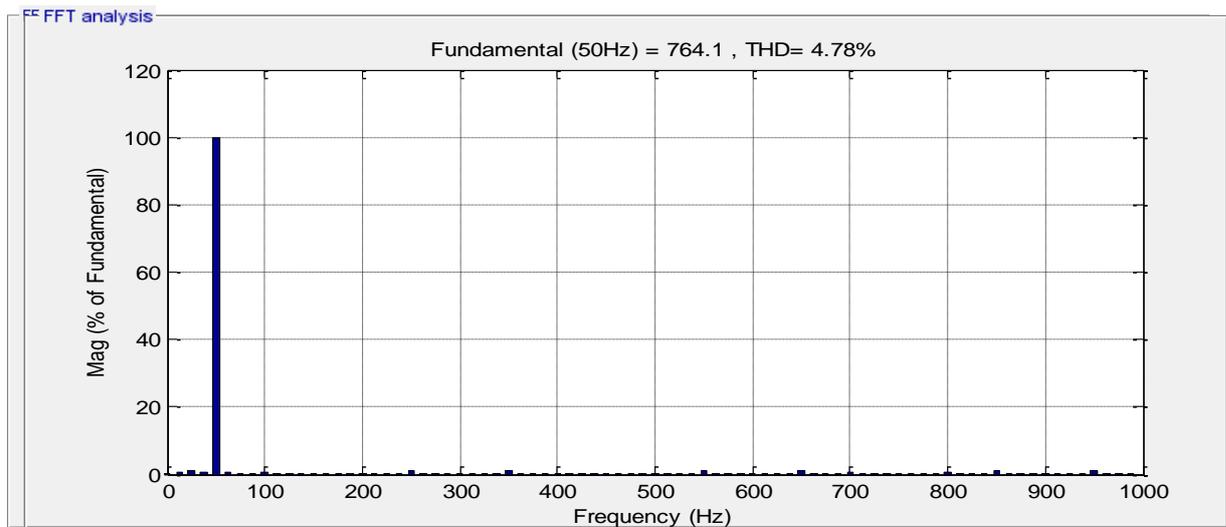


Fig III.12 : Spectre du courant absorbé par la charge I_{ch} (avant compensation)

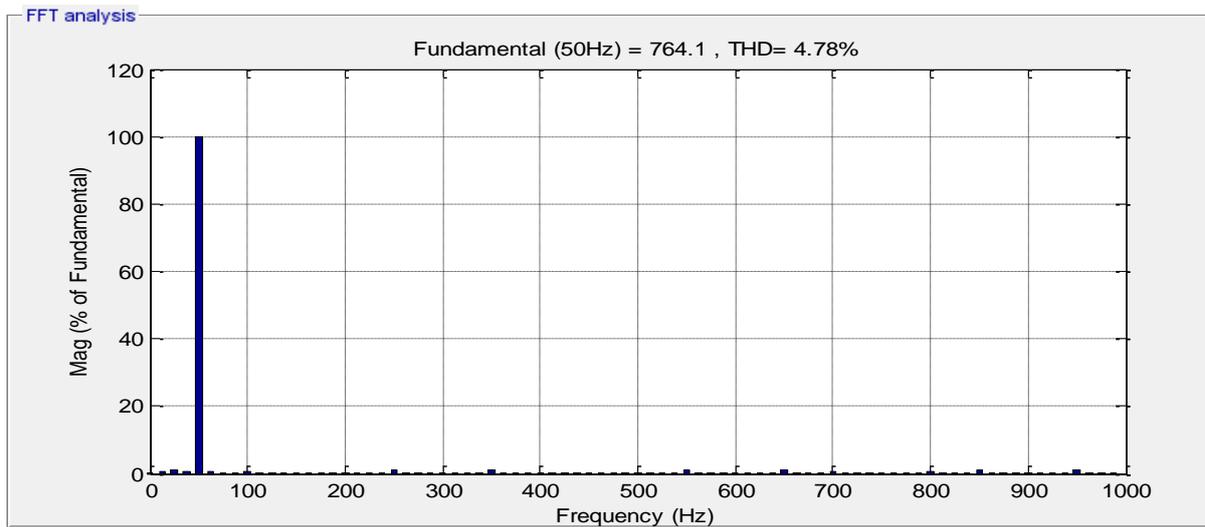


Fig III.13 : Spectre du courant de source après filtrage I_s

La figure (III.14) représente les résultats de simulation de compensation des courants harmoniques et des courants réactives. Le courant de source après compensation est sinusoïdal et en phase avec la tension du réseau. Ici aussi, on a un bon suivi du courant de référence comme le montre la figure (III.15), qu'illustre le courant harmonique injecté au réseau I_f avec sa référence.

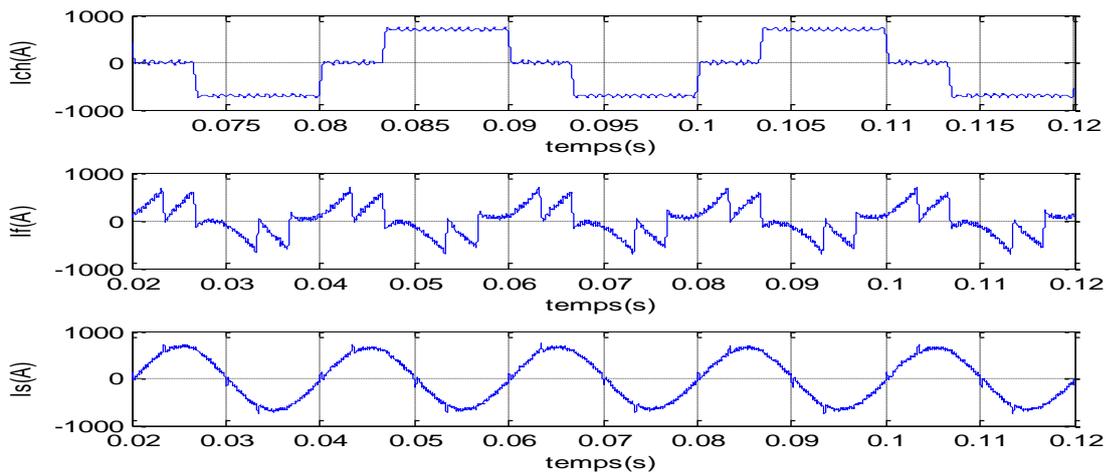


Fig III.14 : Compensation des courants harmoniques et des courants réactifs

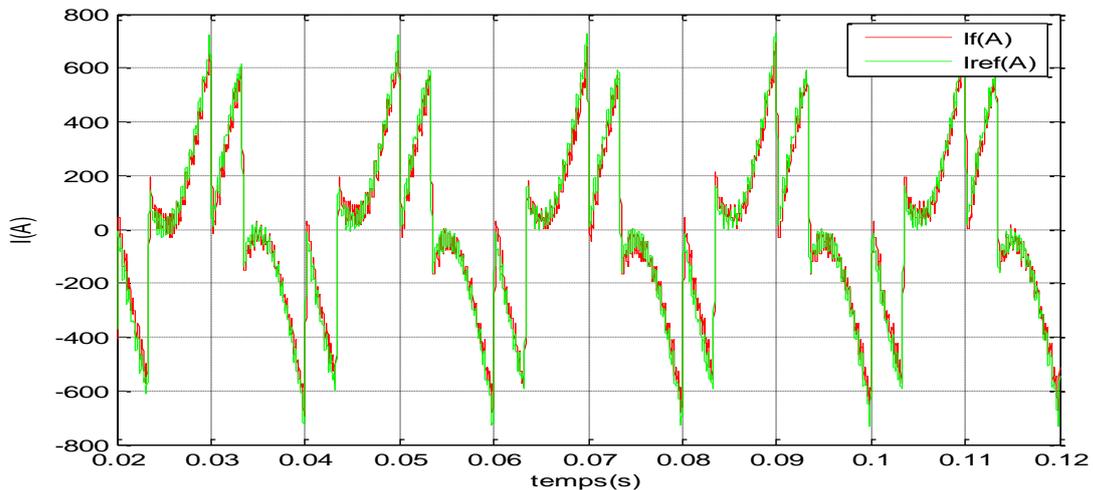


Fig III.15 : Courant harmonique injecté au réseau If avec sa référence

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le fruit d'avoir insérer le 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 que le régulateur flou permet d'obtenir des résultats plus performants par rapport au régulateur PI classique, traduit par la réduction THD du courant de source après compensation qui passe de 8.01% dans le cas d'utilisation du régulateur PI classique à 4.78 % dans le cas du régulateur flou.

Chapitre IV

Etude du filtre actif en régime déséquilibré

IV.1.Introduction

Un système triphasé est équilibrée lorsque les trois tensions possèdent la même valeur efficace et qu'elles sont déphasées de $2\pi/3$ l'une par rapport à l'autre. Un système triphasé déséquilibré est un système dont les tensions ou les courants ne vérifient pas les conditions de phases ou d'amplitudes lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ou déphasées de 120° les unes par rapport aux autres. La fréquence est par contre identique pour les trois grandeurs [2]. Le but de ce chapitre est l'étude du déséquilibre et d'y trouver une solution de compensation. Dans ce cadre le système étudié se compose du réseau – le filtre actif et la charge. On va étudier deux cas de figure, premier cas une charge passive triphasée déséquilibrée et une charge monophasée non linéaire.

IV. 2. Etude du déséquilibre de tension

Un déséquilibre électrique peut survenir de plusieurs manières, soit un problème de distribution d'énergie faible tension sur une branche ou claquage de la résistance d'isolement dans les enroulements moteur, etc. [15]. On peut citer deux formes du déséquilibre :

- Déséquilibre allant de l'aval vers l'amont est dû à la circulation des courants déséquilibrés absorbés par des charges monophasées raccordées au réseau (déséquilibre au niveau de la charge) avec une acuité d'autant plus importante que la puissance de court-circuit du réseau est faible au niveau considéré .

On définit le rapport de taux de déséquilibre : $\tau = \frac{V_i}{V_d}$ IV .1

V_i : Composante inverse

V_d : Composante directe

Dans le cas le plus fréquent d'une charge monophasée raccordée entre deux des trois phases, la valeur rapprochée de ce taux est donnée par la relation suivante :

$$\tau = \frac{S_n}{S_{cc}} \quad \text{IV.2}$$

s_n : Puissance apparente de la charge monophasée

s_{cc} : Puissance du circuit du réseau au point de raccordement

- Déséquilibre d'un réseau allant de l'amont vers l'aval est dû au déséquilibre produit en amont de celui-ci (niveau de tension supérieure) par un raccordement d'une charge déséquilibrée ou bien par un régime de défaut (rupture de ligne, défaut d'appareillage) dans ce cas le déséquilibre se transmet de l'amont vers l'aval (niveau de tension inférieure) au moyen de divers transformateurs [1].

IV.2.1. Conséquences du déséquilibre du réseau de distribution

- Des chutes de tensions inégales aux bornes des impédances de lignes ce qui affecte les machines raccordées directement au réseau.
- Vieillesse prématurée des bobinages traversés par des courants élevés.
- Vieillesse accélérée des isolants (déséquilibre permanent de 5% réduit de 30% la durée de vie d'une machine asynchrone [1].
- Les redresseurs triphasés sont aussi sensibles à une alimentation déséquilibrée celle-ci provoque une ondulation de la tension continue ainsi que les harmoniques de courant non caractéristiques du côté alternatif, ces harmoniques peuvent surcharger les filtres passifs et exciter leur fréquence de résonance.

IV.2.2. Solutions appropriées

Des solutions préventives sont basées sur des règles de raccordement des éléments perturbateurs tels que : le four à l'arc, dont le rapport entre la puissance du court-circuit du réseau et la puissance du court-circuit du four à l'arc est fixée à une valeur minimale (1/36), et les machines à souder dont on fixe une cadence maximale de fonctionnement en fonction du déséquilibre de tension lorsque ces mesures sont inefficaces. D'autres solutions classiques consistent à introduire soit un pont d'équilibrage, comme le pont de STEI NMETZ [4].

Dans les réseaux de distribution de basse – tension, on insère des transformateurs spéciaux pour un raccordement équilibré entre phases, cette technique est approximative insuffisante.

IV.3 Détermination des courants de référence

Dans ce travail, on s'est focalisé sur l'étude de compensation du déséquilibre aval induit par la présence d'une charge déséquilibrée en un point du réseau de distribution.

La commande du compensateur consiste à déterminer les courants de compensation (I_{f1} , I_{f2} , I_{f3}) et éventuellement les tensions de ligne (V_{s1} , V_{s2} , V_{s3}). La détermination des courants de compensation fournis par le filtre revient donc à extraire des courants de charge les composantes harmoniques, et inverses. La méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées est utilisée.

IV.3.1.les puissances instantanées (p) et (q)

Le raccordement d'une charge déséquilibrée et non linéaire sur le réseau de distribution génère un système de tension déséquilibré et harmonique $[V_s]$ au point de raccordement.

Le vecteur $[V_s]$ a pour expressions :

$$[V_s] = \begin{pmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{pmatrix} = \sum_{h=1}^{\infty} [V_{sh}] = \sum_{h=1}^{\infty} ([V_{sh}]_+ + [V_{sh}]_-) \quad \text{IV.3}$$

La même formulation est adoptée pour les courants absorbés par la charge :

$$[i_L] = \begin{pmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ i_{L3} \end{pmatrix} = \sum_{h=1}^{\infty} [i_{Lh}] = \sum_{h=1}^{\infty} ([i_{Lh}]_+ + [i_{Lh}]_-) \quad \text{IV.4}$$

Les puissances instantanées (p), (q) ont pour expressions :

$$p = V_{s\alpha} \cdot i_{L\alpha} + V_{s\beta} \cdot i_{L\beta} \quad \text{IV.5}$$

$$q = V_{s\alpha} \cdot i_{L\beta} - V_{s\beta} \cdot i_{L\alpha} \quad \text{IV.6}$$

En utilisant (IV.3), (IV.4) les puissances réelles et imaginaires peuvent être séparées de leurs composantes continues (\bar{p}), (\bar{q}), et leurs composantes alternatives (\tilde{p}), (\tilde{q}) de la façon suivante :

$$p = \bar{p} + \tilde{p} = \bar{p} + p_{2\omega} + p_h \quad \text{IV.7}$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} = \bar{q} + q_{2\omega} + q_h \quad \text{IV.8}$$

Les puissances fluctuantes (\tilde{p}), (\tilde{q}) se décomposent en composantes de fréquence double de celle du fondamental ($p_{2\omega}$), ($q_{2\omega}$) et en composantes harmoniques (p_h), (q_h), les puissances ($p_{2\omega}$), ($q_{2\omega}$) sont relatives au déséquilibre, elles sont dues à l'interaction des composantes fondamentales des courants et des tensions appartenant à des systèmes de nature différente (inverse, directe) et définies comme suit :

$$p_{2\omega} = -3 V_{s1+} I_{L1-} \cos(2\omega t - \varphi_{1-} - \theta_{1+}) - 3 V_{s1-} I_{L1+} \cos(2\omega t - \varphi_{1+} - \theta_{1-}) \quad \text{IV.9}$$

$$q_{2\omega} = 3 V_{s1+} I_{L1-} \sin(2\omega t - \varphi_{1-} - \theta_{1+}) - 3 V_{s1-} I_{L1+} \sin(2\omega t - \varphi_{1+} - \theta_{1-}) \quad \text{IV.10}$$

Les composantes continues sont données par :

$$\bar{p} = \sum_{h=1}^{\infty} 3 V_{sh+} I_{Lh+} \cos(\varphi_{h+} - \theta_{h+}) + \sum_{h=1}^{\infty} 3 V_{sh-} I_{Lh-} \cos(\varphi_{h+} - \theta_{h+}) \quad \text{IV.11}$$

$$\bar{q} = \sum_{h=1}^{\infty} -3 V_{sh+} I_{Lh+} \sin(\varphi_{h+} - \theta_{h+}) + \sum_{h=1}^{\infty} -3 V_{sh-} I_{Lh-} \sin(\varphi_{h+} - \theta_{h+}) \quad \text{IV.12}$$

IV.3.2. Calcul des courants de référence

On s'intéresse à un déséquilibre aval. On suppose que le système de tension émanant du distributeur du réseau est parfaitement sinusoïdal et équilibré, nous négligeons le déséquilibre de tension au point considéré causé par la circulation des courants déséquilibrés via l'impédance de court-circuit [15].

Prenons la tension V_s comme référence de phase, la source fournira les puissances (\bar{p}) , (\bar{q}) définies comme suit :

$$\bar{p} = 3 \cdot V_{s1+} I_{L1+} \cos(\varphi_{1+}) \quad \text{IV.13}$$

$$\bar{q} = -3 \cdot V_{s1+} I_{L1+} \sin(\varphi_{1+}) \quad \text{IV.14}$$

Le calcul des courants de référence par l'algorithme (p), (q) est donné par la figure (IV.1).

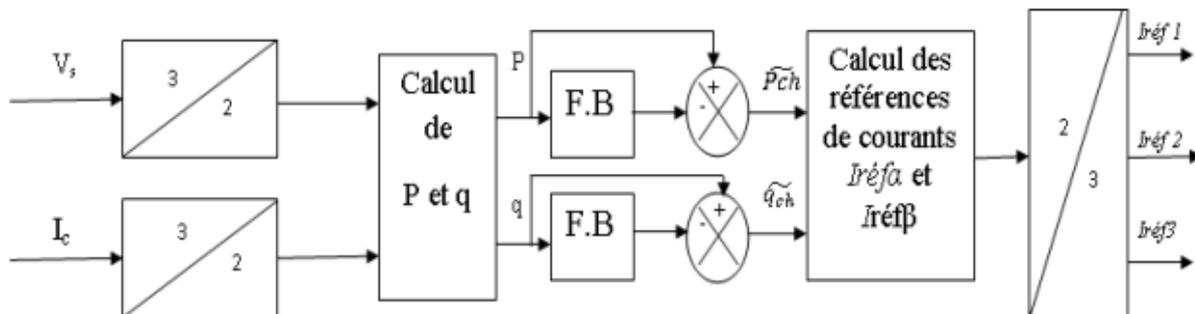


Fig IV.1 : Schéma global d'obtention tous les harmoniques de charge

IV.4. Simulation numérique

Les simulations sont effectuées sous l'environnement Matlab Simulink. Nous allons simuler deux cas de configurations de déséquilibre:

- charge passive triphasée déséquilibrée raccordée au réseau
- charge non-linéaire monophasée connectée entre deux des trois phases du réseau

IV.4.A - Raccordement charge passive triphasée déséquilibrée

Dans ce cas, le système simulé est donné par la figure (IV.2), qui comporte le réseau, la charge triphasée déséquilibrée en étoile et le filtre actif. Dont la valeur des courants de ligne est donnée par:

$I_{L1max} = 900A$, $I_{L2max} = 700A$, $I_{L3max} = 500A$ étant I_{L2} le courant de ligne équivalent à la charge équilibrée donnant la même puissance nominale.

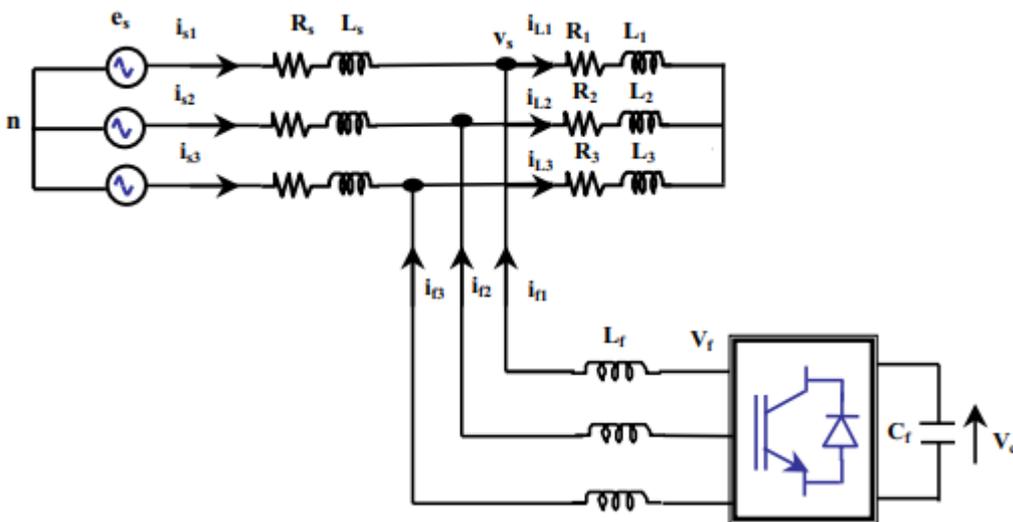


Fig IV.2 : système à simuler - charge passive triphasée déséquilibrée

La figure (IV.3) illustre les différentes composantes de puissances de la charge par l’algorithme (p, q). La compensation des puissances $p_{2\omega}$ et $q_{2\omega}$ assurent la suppression du déséquilibre des courants de charge donc assure le rééquilibrage des tensions au point de raccordement.

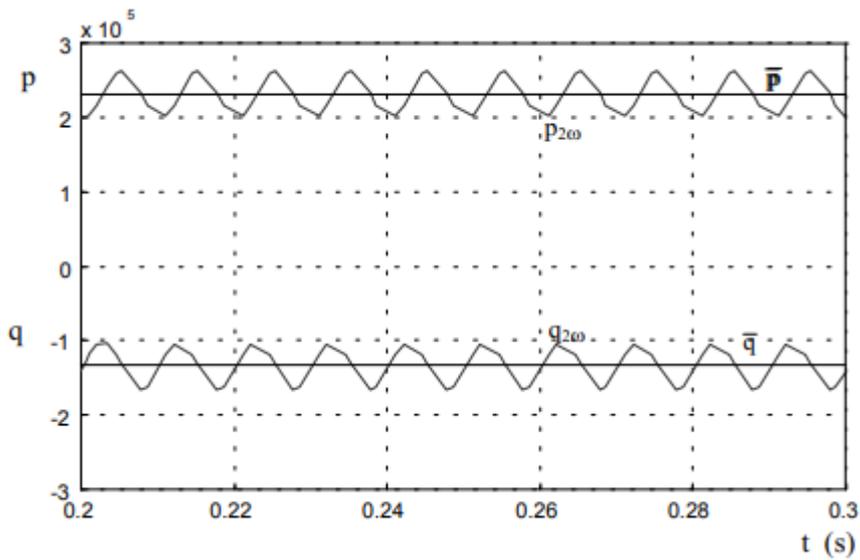


Fig IV.3 : illustration des différentes puissances instantanées

Dans un premier lieu, on va compenser uniquement le déséquilibre crée par la charge, les courants de référence du filtre sont calculés d’après les relations (II.11), (II.12).

Les résultats de la simulation sont donnés par la figure (IV.4 (a, b, c)). La figure (IV.4(a)) illustre les courants de charge. La figure (IV.4 (b, c)) montrent que le filtre actif permet d’équilibrer les courants de source. La figure (IV.4 (b)) représente le résultat obtenu en utilisant un régulateur PI classique pour le contrôle du filtre actif, et la figure (IV.4 (c)) le résultat obtenu en utilisant le régulateur PI flou. Ces résultats illustrent clairement que le déséquilibre est mieux compensé en cas de contrôle avec le PI flou

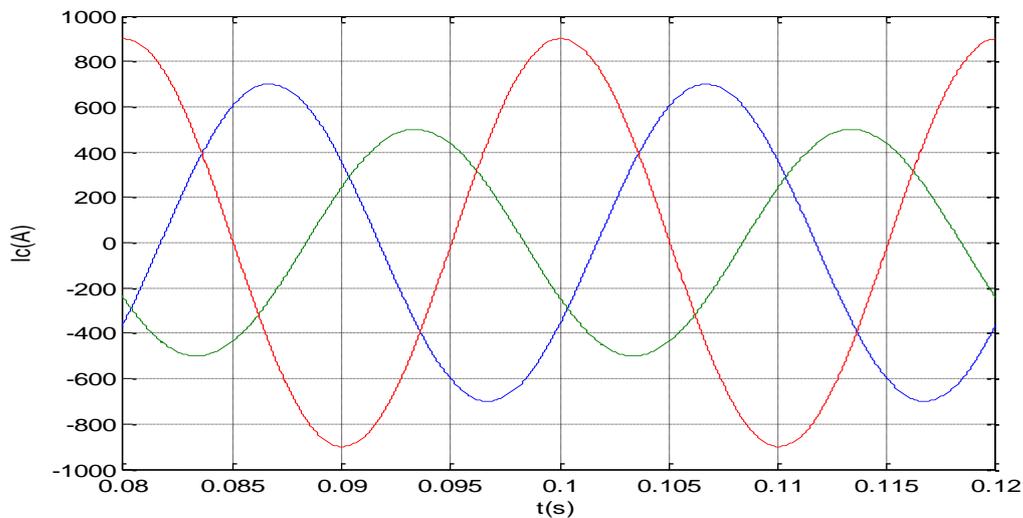


Fig IV.4 (a) : Courants absorbés par la charge RL triphasée déséquilibrée

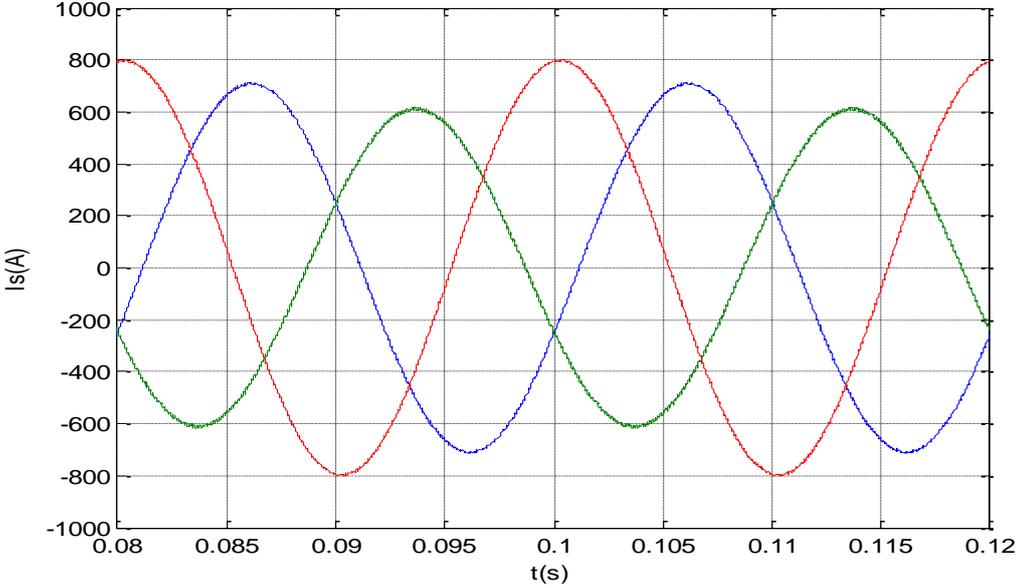


Fig IV.4 (b) : Courants I_{S1}, I_{S2}, I_{S3} après compensation : Régulateur PI

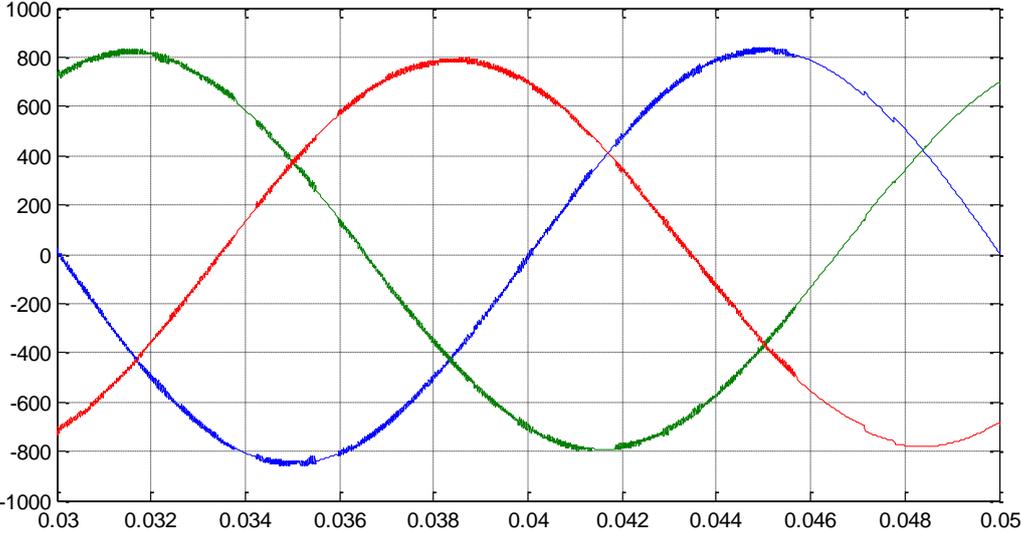


Fig IV.4(c) : Compensation du déséquilibre cas d'une charge passive triphasée : régulateur PI

Flou

IV.4.B –Raccordement d’une charge non-linéaire monophasée

Le système dans ce cas, se compose en plus du filtre actif parallèle et le réseau de distribution d’un redresseur monophasé connecté entre les phase 1 et 3 du réseau de distribution figure (IV.5), dont on a pour $I_{L1} = -I_{L3}$, $I_{L2} = 0$, avec un angle d’amorçage $\alpha = 30^\circ$

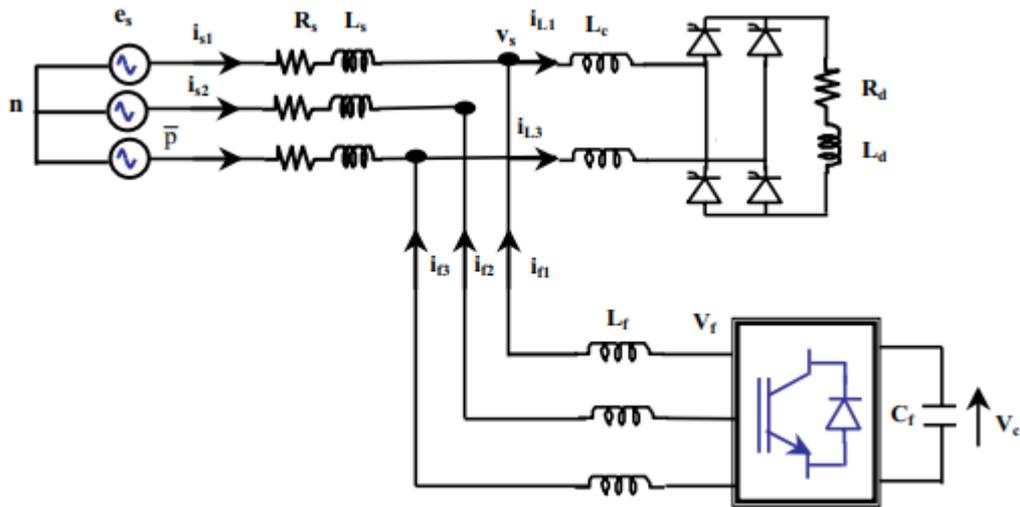


Fig :IV.5 : système à simuler :charge non linéaire monophasée déséquilibrée

La figure ((IV.6) (a)) illustre les courants absorbés par la charge non linéaire monophasée. La figure ((IV.6) (b)) représente le courant de source en utilisant un régulateur PI classique et la figure ((IV.6) (c)) représente le courant de source en utilisant PI flou. Dans ce cas aussi, le régulateur PI flou présente de meilleures performances par rapport au PI classique

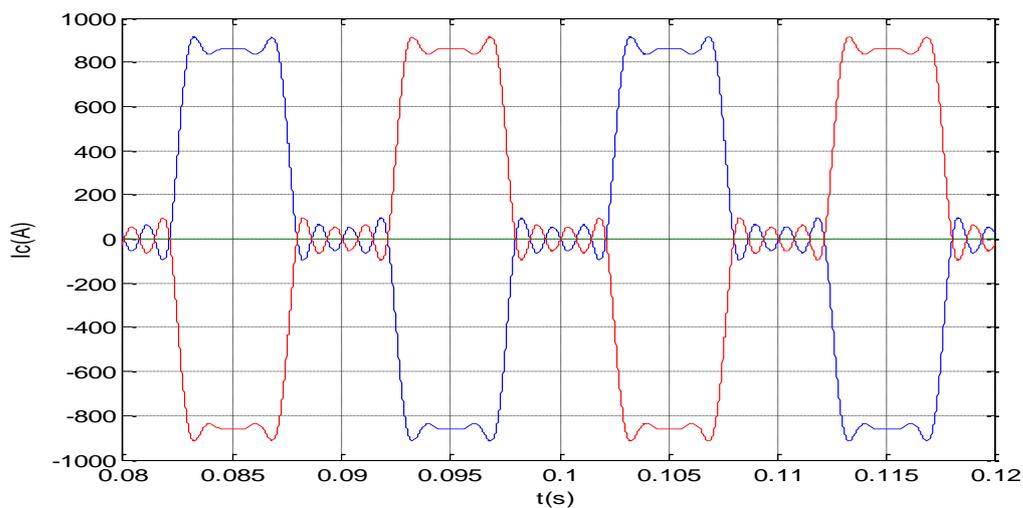


Fig IV.6(a) : Courants absorbés par la charge non linéaire monophasée déséquilibrée

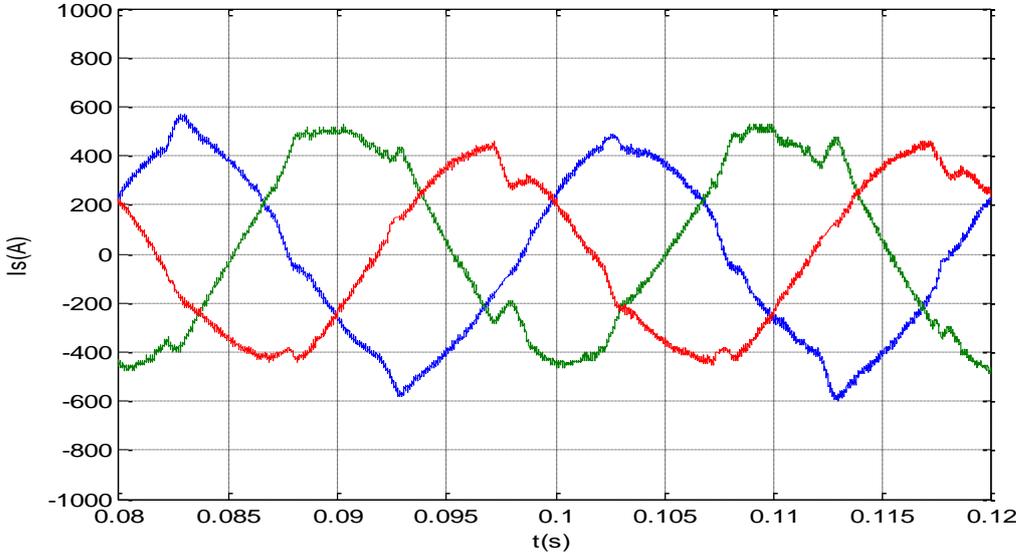


Fig IV.6 (b) : Courants I_{S1}, I_{S2}, I_{S3} après compensation : régulateur PI

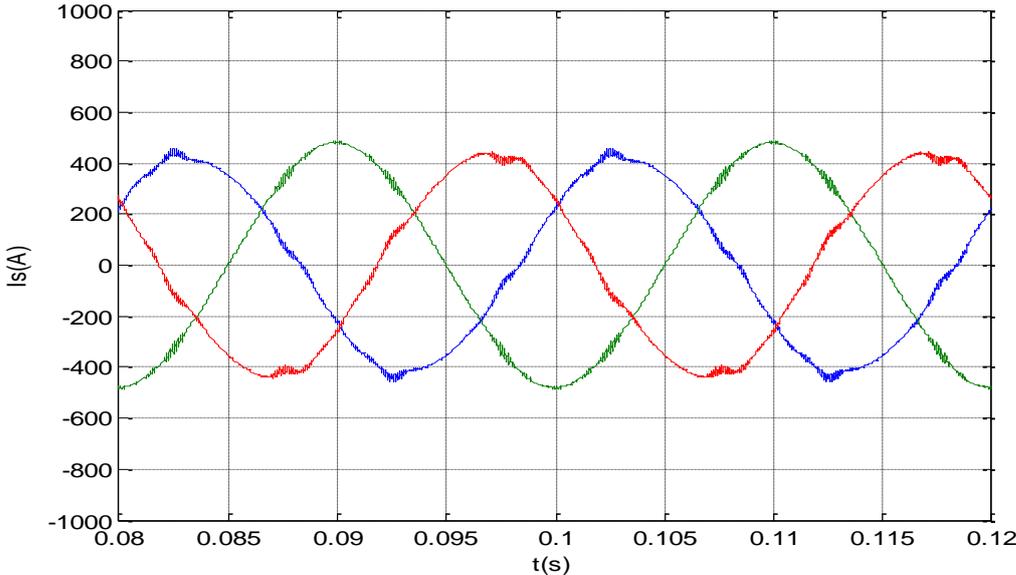


Fig IV.6(c) : Courants I_{S1}, I_{S2}, I_{S3} après compensation : régulateur PI flou

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on s'est focalisé à la comparaison des régulateurs PI classique et PI flou pour la compensation du déséquilibre. Le rééquilibrage des tensions nécessite la compensation du système inverse des courants de charge, pour le réaliser on a procédé à la méthode des puissances instantanées (p), (q) afin d'extraire les courants de référence.

Les résultats de simulation montrent l'efficacité du filtre actif à base PI flou pour la compensation du déséquilibre, et des harmoniques.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressées aux problématiques liées aux charges polluantes et déséquilibrées connectées aux réseaux. En effet, la notion de « qualité d'énergie » s'impose de plus en plus dans les rapports entre les producteurs et les consommateurs de l'énergie électrique.

Plusieurs solutions sont envisagées pour remédier aux problèmes de la pollution harmonique. Il en découle que la solution qui s'avère plus adéquate dans ce contexte est l'étude de filtre actif parallèle à structure de tension, sur lequel on a axé notre travail, dont le principe de compensation est basé sur l'injection en permanence, au point de sa connexion 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.

Dès l'entame, on a projeté la lumière sur les perturbations en l'occurrence les harmoniques leurs origines, leurs effets et ainsi que quelques techniques de compensation de ses perturbations,

Dans le deuxième chapitre, on s'est intéressé à la commande du filtre actif parallèle à structure. Après l'identification des courants de références, on a présenté la commande MLI et le régulateur PI classique. Des résultats de simulations ont été obtenus par le biais de l'environnement Matlab/Simulink. Ces résultats ont fait preuve du bon rôle joué par le FAP pour la compensation des courants harmoniques et réactifs, ou le taux de distorsion harmonique du courant est passé de 30.15% avant compensation à 8.01% après compensation.

Dans le troisième chapitre, on s'est focalisé sur l'étude du filtre actif parallèle avec régulateur PI flou. Les résultats obtenus 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%. Un fait qui prouve les bonnes performances du régulateur PI flou et l'efficacité du filtre actif parallèle pour la dépollution des réseaux électriques et la compensation de la puissance réactive, d'où la supériorité du régulateur flou par rapport à un régulateur PI classique.

Conclusion générale

Le quatrième a été consacré à la compensation du déséquilibre par le filtre actif parallèle. Les simulations effectuées témoignent l'efficacité du filtre actif, commandé par le régulateur PI flou, et sa performance face à la compensation du déséquilibre et des harmoniques.

La pollution harmonique et le déséquilibre sont des problèmes cruciaux, un avenir prometteur est réservé aux convertisseurs à absorption sinusoïdale et aux filtres actifs. Il faudrait sans doute homogénéiser les normes et pouvoir parler de standardisation. On terminera cette conclusion, pour dire que le travail que nous avons fait reste dans le domaine des connaissances d'un master et permet de toucher un petit domaine de l'électronique de puissance.

Références

- [1] : Arezki KIFOUCHE « Identification des harmoniques et génération du courant de référence » Mémoire de magister, université de Boumerdès, 2005.
- [2] : Eric BETTEGA; Jean Noël FIORINA « Harmoniques : convertisseurs propres et compensateurs actifs » Schneider Electric cahier technique N°183, 2000.
- [3] : Djafar OULDABDESLAM « Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension »
- [4] : C LABOURE ; François COSTA; Lionel PICHON « Compatibilité électromagnétique
- [5] :] Arezki KIFOUCHE « Identification des harmoniques et génération du courant de référence » Mémoire de magister, université de Boumerdès, 2005.
- [6] : Abdelmadjid CHAOUI « Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires » Thèse de Doctorat, université de Sétif, 05/10/2010.
- [7] : alim MOUTTOU « Nouvelles approches de commande d'un filtre actif parallèle à source de courant » Thèse de doctorat présenté à l'université de QUEBEC à TROIS-RIVIERES octobre 2002.
- [8] : 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.
- [9] : Steve BEAULIEU « Etude et mise au point d'un filtre actif d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique »
- [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] : Thierry DEFLANDRE, Philippe MAURAS « Les harmoniques sur les réseaux électriques » Edition EYROLLES, 1998.
- [13] : Jianhong XU « Filtrageactifparallèledes Harmoniquedesréseaux dedistribution d'électricité » Thèse de Doctorat l'Institut National Polytechnique de Lorraine20 Janvier 1994

- [14] : N.Adjimi et W.Belaidi « Modélisation et commande d'un onduleur MLI» mémoire Master en Systèmes Electriques & Automatique Université de Larbi Ben M'hidi Oum El-Bouaghi 2008/2009.
- [15] : F.Mekri « Commande robuste des conditionneurs Actifs de puissances » Thèse de Doctorat Université Des Sciences et de La Technologie D'Oran 3 novembre 2007.
- [16] : Nassar HANNA MANDALEK « Qualité de l'onde électrique et moyens de mitigation » Thèse de doctorat, université de Québec, 14/01/2003.
- [17] : BENNAIDJA Tarek, « Filtrage actif pour les réseaux déséquilibrés et distordus» , Thèse Magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF-1- , 2014.
- [18] Soumia Larabi & Juma Shabani Amani , «Étude et simulation d'une commande d'un filtre actif de puissance basé sur les ondelettes» Thèse Master , Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen , 2017 .
- [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] : Mokeddem Diab ,«Contrôle Flou des Processus Biotechnologiques à Base d'Algorithmes Génétiques», Thèse Doctorat ,Université Ferhat Abbas De Setif , 2010 .
- [21] : GHADBANE ISMAIL ,«Commande d'un Filtre Actif Triphasé Parallèle Par Différents Régulateurs» , Thèse Magister , Université Mohamed Kheider – Biskra , 2011
- [22] : Melle Hind Djeghloud ,«Filtrage actif de puissance» , Thèse Doctorat ,Université Mentouri Constantine ,2007.
- [23] : Tellli Abdelwahab ,Chouidira Ibrahim ,«Commande par logique floue d'un Filtre actif parallèle avec correction du facteur de puissance» , Thèse Master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila ,2017.
- [24] : Barkat Fathi , « Contribution à l'étude de la Commande de Filtre Actif parallèle par régulateur PI et logique floue» , Thèse Master , Université Ahmed Draia Adrar , 2017 .